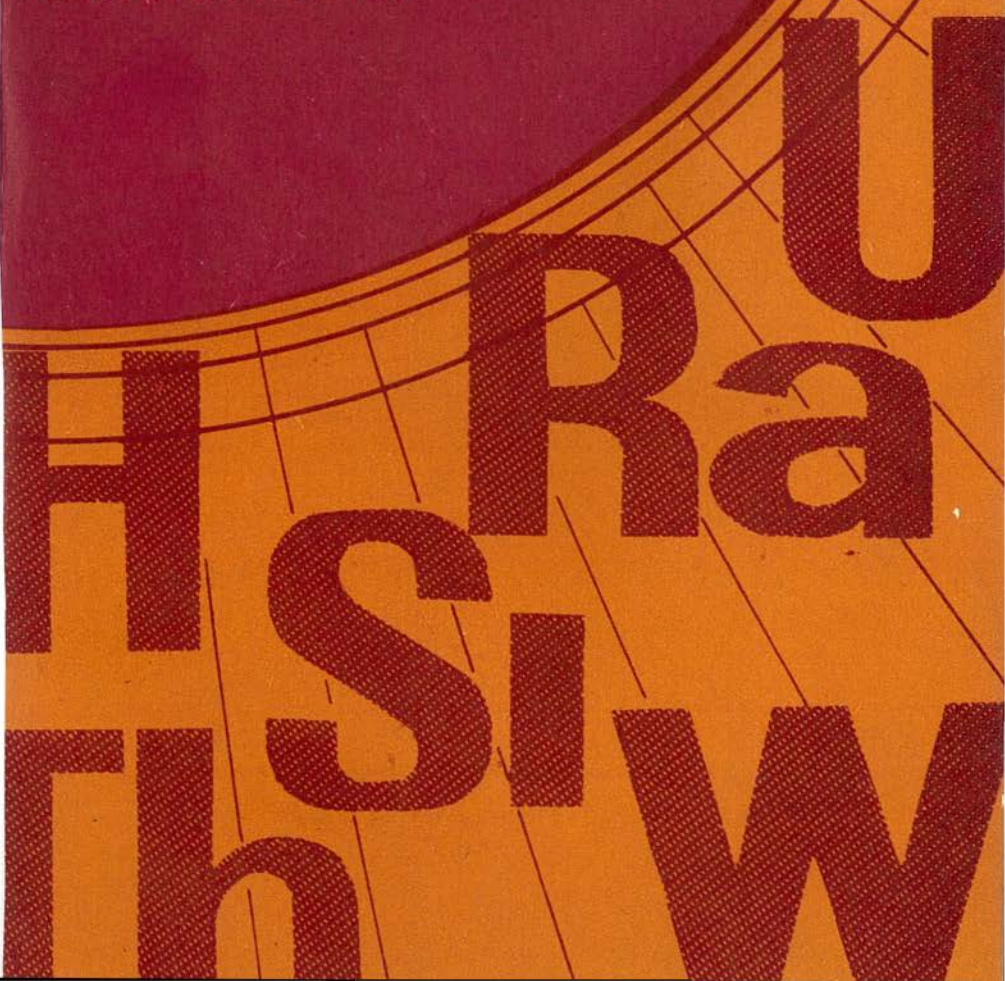
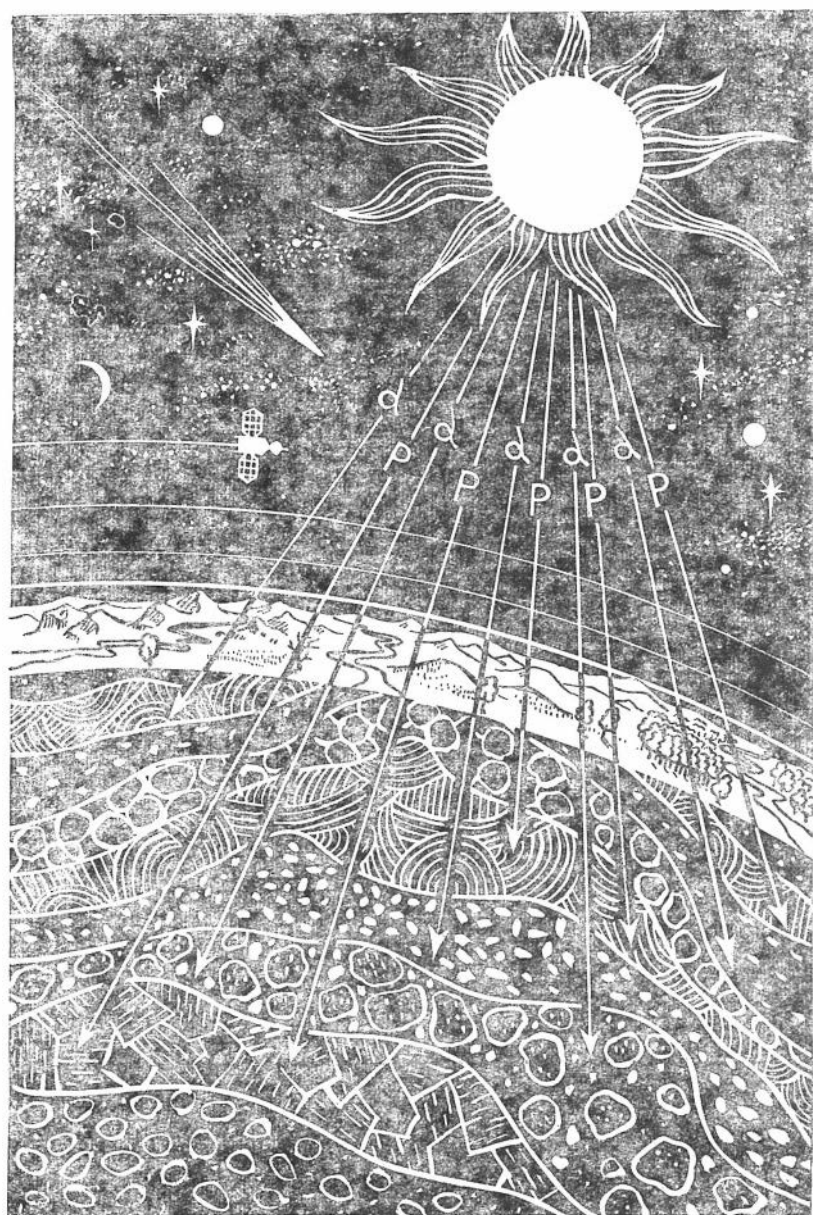


Е. М. ФИЛИПОВ

ЯДЕРНЫЕ РАЗВЕДЧИКИ
ЗЕМНЫХ
И КОСМИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ



Е. М. ФИЛИППОВ

ЯДЕРНЫЕ РАЗВЕДЧИКИ ЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ответственный редактор
докт. физ.-матем. наук проф.,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР
В. И. БАРАНОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»·СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
НОВОСИБИРСК·1974

Эта книга рассказывает о мирном использовании ядерных излучений-разведчиков вещества, слагающего различные земные объекты и космические тела. В ней в популярной форме приводятся сведения о разнообразных ядерных методах и приборах, используемых для изучения земных недр, Луны, Венеры и других планет. В заключительной части сформулированы основные задачи, которые предстоит решить науке в ближайшем будущем.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

*Пусть будет атом
рабочим, а не солдатом.*

В. С. Емельянов.
Атом и мир

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мысль о познании состава и строения Земли, ее недр, а также океанов и морей давно занимает человечество. Взоры людей давно обращены также и к другим космическим объектам — Луне, Марсу, Венере и Вселенной в целом. До последнего времени единственными посланцами Космоса на Земле были метеориты. В настоящее время космические аппараты изучают Вселенную. С космических кораблей на поверхность Луны высажены разнообразные приборы для изучения горных пород и космического пространства. На Землю доставлены образцы лунных пород для их непосредственного изучения. Проводятся регулярные исследования Венеры и Марса. Уже получены первые сведения о составе их атмосферы, давлении и температуре. На повестке дня — изучение твердых оболочек этих планет.

Однако, изучая Космос, люди не забывают и о Земле, о которой в целом не так уж много известно. Пока достоверно можно судить лишь о составе и строении самой верхней ее оболочки — земной коре толщиной не более 30 км. Между тем радиус Земли оценивается в среднем равным 6371 км. Из этого видно, что толщина земной коры составляет менее 0,5% радиуса Земли. Если сравнить земной шар с куриным яйцом, то слой земной коры будет примерно соответствовать толщине скорлупы яйца. О более глубоких слоях Земли человек судит лишь на основании разнообразных косвенных данных. Для детального изучения Земли предстоит еще многое сделать.

Данные о составе разнообразных земных объектов необходимы не только для познания Земли, но и для поисков, разведки и разработки целого ряда полезных ископаемых, используемых во многих отраслях народного хозяйства.

Классическими методами определения состава горных пород, руд и вод являются методы аналитической химии, спектральные и некоторые другие. Для ведения анализов этими методами необходимо отобрать образцы пород и руд, доставить их в лабо-

раторию, превратить в тонко измельченный порошок и только затем подвергнуть анализу. Все это весьма трудоемкие и подчас дорогостоящие процессы.

Методика определения состава геологических объектов существенно упрощается с помощью различных ядерно-физических методов. Отдельные атомы химических элементов сами себя выдают, испуская различные ядерные частицы, проникающие через значительные толщи вещества. Поэтому о содержании радиоактивных элементов в горных породах можно судить по измерению ядерных частиц, испускаемых ядрами атомов этих элементов. О содержании других химических элементов в горных породах и рудах можно судить по воздействию на них внешним ядерным излучением от различных источников и по измерению наведенной радиоактивности или по измерению различных вторичных ядерных частиц, возникающих в породе под действием первичного излучения.

Таким образом, посылая в горные породы различные ядерные частицы — эти своеобразные микроразведчики, можно судить о породах, рудах и других геологических объектах. Многие геологические задачи при этом можно решать без отбора образцов, непосредственно облучая горные породы на месте их залегания — в скважинах, горных выработках и т. д. Так на стыке физики, математики, химии, геологии, радиоэлектроники и других наук возникла новая геологическая наука — ядерная геофизика, или ядерная разведка.

В этой книге сделана первая попытка рассказать читателю о достижениях ядерной геофизики, применяющейся для изучения земных и космических объектов. В ней очень доступно излагаются основы различных ядерно-физических методов и приводятся описания приборов, применяющихся для решения разнообразных геологических и других задач.

Книга не претендует на то, чтобы удовлетворить запросы всех читателей. Одних удовлетворяют простые и элементарные рассуждения, другие предпочитают формулы длинным объяснениям, третьих интересует детальное устройство описываемых приборов, четвертых — конкретные результаты исследований, пятых — отдельные частные вопросы, рассматриваемые в разных главах, и т. д. Автор далек от мысли, что все задуманное им получилось на должном уровне. Тем не менее он надеется, что в этой книге все-таки многие из перечисленных категорий читателей найдут для себя что-нибудь полезное.

1. С ЧЕГО НАЧИНАЕТСЯ ЯДЕРНАЯ РАЗВЕДКА?

§ 1. ОТКРЫТИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ

Ядерная разведка родилась с бурным развитием атомной и ядерной физики. Основателем этих наук является великий английский физик Эрнест Резерфорд (1871—1937), высказавший еще в 1891 г. идею о сложном строении атома, возможности его деления и разрушения. Зарождение атомной физики связано с открытием в 1895 г. В. К. Рентгеном (1845—1923) X-лучей, получивших впоследствии название в честь его имени, и с открытием в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном (1856—1940) электрона. С открытием в 1896 г. А. Беккерелем (1852—1908) естественной радиоактивности урана возникает и развивается ядерная физика. Обнаруженные А. Беккерелем лучи свободно проникают через тела, непрозрачные для видимого света. Систематически исследовать свойства этих лучей стали супруги Пьер Кюри (1859—1906) и Мари Складовская-Кюри (1867—1934), открывшие в 1898 г. радиоактивность тория, полония и радия. Излучение атомов урана и других элементов М. Кюри назвала радиоактивностью.

Эти открытия дали возможность Э. Резерфорду и другим основательно заняться изучением радиоактивности и строения атома. Так, в 1899 г. Э. Резерфордом были открыты альфа- и бета-лучи, установлен совместно с Ф. Содди закон радиоактивного распада атомов. В 1900 г. Виллард обнаружил еще более проникающее радиоактивное излучение — гамма-лучи.

В 1902 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди показали, что радиоактивность является самопроизвольным (спонтанным) распадом атомов, в результате которого образуются новые химические элементы. Так, последовательный распад урана и тория приводит в конце концов к образованию различных изотопов свинца и атомов гелия. В 1911 г. Э. Резерфорд и его ученики установили существование атомного ядра. Они предложили планетарную модель строения атома, а в последующем провели другие основополагающие исследования в ядерной физике.

После открытия явления радиоактивности ученые многих стран занялись детальным изучением природных объектов: элементов, минералов, горных пород, вод, воздуха и т. п. Наряду с элементами уранового, ториевого и других рядов в природе открыты еще около 180 естественно-радиоактивных изотопов, а их общее количество достигло 230. Из них большая часть обладает слабой радиоактивностью. Высокоактивных изотопов насчитывается всего 67. Каждый изотоп характеризуется атомным номером Z и массой A . Для химических элементов величина A характеризует атомный вес.

Каждый радиоактивный изотоп имеет строго определенный период своего распада (T), т. е. время, в течение которого в среднем распадается половина атомов данного радиоактивного вещества. В природе из радиоактивных элементов наиболее распространены изотопы урана с массой 238 (уран-238) и тория с массой 232 (торий-232). Они имеют периоды полураспада, соответственно равные $4,51 \cdot 10^9$ и $1,39 \cdot 10^{10}$ лет. Ряд других естественно-радиоактивных изотопов имеет еще более значительные периоды полураспада. Так, гадолиний-152 имеет период полураспада $1,1 \cdot 10^{14}$ лет, а ванадий — $50—6 \cdot 10^{15}$ лет и т. д.

В природе установлено 110 стабильных изотопов. Многие из них также следует рассматривать нестабильными с весьма большими периодами полураспада, которые еще надлежит установить.

С измерением излучения радиоактивных элементов возникла возможность вести поиски и разведку радиоактивных и связанных с ними руд. Кроме того, различное содержание в горных породах радиоактивных элементов позволило геологам и геофизикам судить о самих горных породах, неразличимых на глаз или скрытых под маломощными наносами.

§ 2. ОТКРЫТИЕ ИСКУССТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ И ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

В 1930 г. П. Дирак предсказал существование первой античастицы — позитрона (электрона с положительным зарядом). Спустя два года эта частица была обнаружена в космических лучах К. Андерсеном. В. Паули в 1931 г. высказал гипотезу о существовании нейтрино — нейтральной частицы с весьма малой массой. Более тяжелая нейтральная частица — нейтрон — открыта в 1932 г. Д. Чедвиком. Предсказание этой частицы было сделано Э. Резерфордом еще в 1920 г. Д. Д. Иваненко и независимо от него В. Гайзенберг в 1932 г. выдвинули гипотезу о нейтронно-протонном строении атомных ядер.

Весьма важным для ядерной физики и особенно ядерной геофизики явилось открытие в 1934 г. супругами И. Кюри (1897—1956) и Ф. Жолио-Кюри (1900—1958) искусственной радиоактивности ядер. Облучая альфа-частицами вещество, они обратили внимание на появление в нем искусственно-радиоактив-

ных ядер. Это открытие позволило в дальнейшем физикам и геофизикам заняться разработкой методики анализа вещества, активирующегося под действием различных видов ядерных излучений. Так, посылаемые в породу ядерные разведчики заставляли как бы «заговорить» вещество, испуская различные ядерные частицы. Регистрируя их, можно судить и о самом веществе, подвергнутом облучению первичными ядерными частицами.

Существенным этапом в развитии ядерной физики явился 1939 г., когда Л. Мейтнер и О. Фриш, интерпретируя опыты О. Гана и Ф. Штрассмана, открыли деление урана под действием нейтронов. Независимо от них к этому пришли также И. и Ф. Жолио-Кюри. В этом же году Я. И. Френкель и независимо от него Н. Бор и Дж. Уилер создали теорию деления атомного ядра. Г. Н. Флеров и К. А. Петржак в 1940 г. открыли самопроизвольное деление ядер урана на осколки. Открытие явления деления ядер под действием нейтронов на осколки с испусканием 2—3 нейтронов позволило осуществить цепную ядерную реакцию и овладеть энергией ядра.

Что в ядре урана скрыта огромная энергия, ученым было известно еще в начале нашего века. Гениальнейшее предвидение того, что эта энергия окажет большую услугу человечеству, было сделано в 1910 г. В. И. Вернадским (1863—1945). В последующем он не раз призывал ученых выявить эту энергию и поставить на службу высоким и гуманным идеям. Однако В. И. Вернадский понимал, что для овладения атомной энергией нужно иметь в достаточном количестве необходимое сырье. В связи с этим по его инициативе в России с 1913 г. начались первые поиски месторождений радиоактивных руд.

Первая управляемая ядерная реакция была осуществлена 2 декабря 1942 г. под руководством Э. Ферми (1901—1954).

В это время в глубокой секретности в США был запущен первый атомный реактор. Американские ученые под давлением военщины и вопреки чаяниям народов стремились во что бы то ни стало заставить атомную энергию работать на войну, результатом чего явилась трагедия Хиросимы и Нагасаки.

Атомная угроза нависла и над нашей страной. В связи с этим советские ученые стали проводить большие исследования по овладению атомной энергией. Первый атомный реактор в нашей стране под руководством И. В. Курчатова (1903—1960) введен в строй 26 декабря 1946 г. Вскоре в СССР для обороны страны было создано атомное оружие.

Советский Союз после испытания первой атомной бомбы обратился ко всем странам с призывом использовать атомную энергию в мирных целях и показал тому пример, когда 27 июня 1954 г. была создана и вступила в строй первая в мире атомная электростанция.

Мощные потоки нейтронов, возникающие в атомных реакторах, можно использовать для создания разнообразных искусственно-радиоактивных изотопов. В СССР такие изотопы стали

получать в большом количестве с 1948 г. С этого времени начала бурно развиваться прикладная ядерная физика. Ядерное излучение изотопных источников нашло широкое применение в науке, технике, медицине, биологии и народном хозяйстве. В это же время радиоизотопные источники стали использовать в качестве ядерных разведчиков для облучения различных геологических объектов с целью их изучения. Эти объекты оказалось возможным изучать не только по вызываемой в них искусственной радиоактивности, но и по различным вторичным излучениям, образующимся под воздействием на атомы и их ядра первичного излучения.

§ 3. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Каждое вещество состоит из молекул и атомов. Сочетания однородных молекул, или приблизительно однородных, образуют минералы. Горные породы, слагающие земную кору и поверхностный слой Луны и других планет, представляют собой разнообразные сочетания различных минералов.

Атомы состоят из ядер, окруженных электронами. Атомы, ядра и электроны имеют весьма малые размеры. Так, радиус атома равен примерно 10^{-8} см, ядер — 10^{-13} — 10^{-12} , а электронов — $3 \cdot 10^{-13}$ см. Все ядра атомов состоят из нуклонов (протонов и нейтронов). Исключением является обычный водород, ядро которого состоит из одного протона. Число протонов в ядре и число орбитальных электронов в атоме определяет его заряд и называется порядковым номером элемента и его изотопов Z в соответствии с таблицей Д. И. Менделеева. Сумма масс протонов и нейтронов в ядре определяет его массу и соответственно атомный вес элемента A , равный 10^{-27} — 10^{-23} г. Вес электрона, как известно, примерно в 1800 раз меньше нуклона. К настоящему времени известно 105 химических элементов (табл. 1). Из них 92 встречаются в природе, остальные синтезированы в лабораториях искусственным путем.

Большая часть химических элементов, встречающихся в природе, состоит из нескольких изотопов, т. е. ядер с одинаковым количеством протонов и различным количеством нейтронов. В настоящее время в природе насчитывается 340 изотопов; из них, как уже отмечалось, 230 радиоактивны, а остальные стабильны. Помимо того, в лабораториях получено свыше 1000 искусственно-радиоактивных изотопов.

§ 4. ИЗУЧАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

Человек в своей практической деятельности во все возрастающих количествах использует богатства земных недр: нефть, уголь, железо, медь, свинец, уран, а также строительный камень,

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева																		2 He Гелий																	
1 H Водо- род																		5 B Бор	6 C Угле- род	7 N Азот	8 O Кисло- род	9 F Фтор	10 Ne Неон												
3 Li Литий	4 Be Берил- лий																	13 Al Алю- миний	14 Si Крем- ний	15 P Фос- фор	16 S Сера	17 Cl Хлор	18 Ar Аргон												
11 Na Натри- й	12 Mg Магне- ний																	19 K Калий	20 Ca Каль- ций	21 Sc Скан- дий	22 Ti Титан	23 V Вана- дий	24 Cr Хром	25 Mn Марганец	26 Fe Железо	27 Co Кобальт	28 Ni Никель	29 Cu Медь	30 Zn Цинк	31 Ga Галлий	32 Ge Гер- маний	33 As Мышь- як	34 Se Селен	35 Br Бром	36 Kr Крип- тон
37 Rb Руби- дий	38 Sr Строн- ций	39 Y Иттрий	40 Zr Цирко- ний	41 Nb Нью- бий	42 Mo Молиб- ден	43 Tc Техне- ций	44 Ru Руте- ний	45 Rh Родий	46 Pd Палла- дий	47 Ag Сере- бро	48 Cd Кадмий	49 In Индий	50 Sn Олово	51 Sb Сурь- ма	52 Te Теллур	53 I Иод	54 Xe Ксенон																		
55 Cs Цезий	56 Ba Барий	57 по 71 редкие земли. Лантаниды	72 Hf Гафний	73 Ta Тантал	74 W Воль- фрам	75 Re Рений	76 Os Ос- мий	77 Ir Иридий	78 Pt Плати- на	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Таллий	82 Pb Свинец	83 Bi Висмут	84 Po Поло- ний	85 At Аста- тин	86 Rn Радон																		
87 Fr Фран- ций	88 Ra Радий	89 по 103 редкие элементы. Актиниды	104 Ku Курча- товий	105 Nh Нильс- борий																															

Лантаниды	57 La Лантан	58 Ce Церий	59 Pr Празео- дим	60 Nd Неодим	61 Pm Проме- тей	62 Sm Самар- ий	63 Eu Европий	64 Gd Гадоли- ний	65 Tb Тербий	66 Dy Диспро- зий	67 Ho Гольмий	68 Er Эрбий	69 Tm Тулий	70 Yb Иттер- бий	71 Lu Люте- ций
Актиниды	89 Ac Акти- ний	90 Th Торий	91 Pa Протак- тиний	92 U Уран	93 Np Непту- ний	94 Pu Плутоний	95 Am Амери- ций	96 Cm Кюрий	97 Bk Берк- лий	98 Cf Кали- форний	99 Es Эйнштей- ний	100 Fm Фермий	101 Md Менделеев- ий	102 (No) Нобелий	103 Lr Лоуренс- сий

Средний состав земной коры (по А. Е. Ферсману), вес. %

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Кислород	49,13	Кальций	3,25	Водород	1,00
Кремний	26,00	Натрий	2,40	Титан	0,61
Алюминий	7,45	Калий	2,35	Углерод	0,35
Железо	4,20	Магний	2,35	Хлор	0,20

подземные воды и т. п. Для поисков, разведки и разработки полезных ископаемых привлекаются разнообразные геофизические методы. Немаловажная роль при этом отводится и методам ядерной геофизики, с помощью которых, как уже отмечалось, можно определять содержание в породах отдельных химических элементов и судить о содержании в них различных полезных компонентов, а также о плотности пород и руд и т. п. В связи с этим необходимо кратко сказать о составе земной коры, доступной человеку в его деятельности.

Земля, как указывалось, имеет средний радиус около 6371 км. Наиболее изучен лишь ее верхний слой толщиной около 30 км, называемый земной корой. В земной коре имеются все химические элементы от водорода до урана. Однако содержание химических элементов в ней меняется в весьма широких пределах — от десятков процентов до тысячных и миллионных долей процента. Об основных пороодообразующих химических элементах можно судить по данным табл. 2. Наиболее распространенными элементами в земной коре являются кислород, кремний и алюминий (82,58% веса всей земной коры). На долю первых девяти элементов приходится 98,13%, первых двенадцати — 99,29%, а на долю всех остальных элементов, содержащихся в земной коре, приходится лишь 0,71%. Так, бериллий составляет всего $3 \cdot 10^{-4}\%$, уран — $4 \cdot 10^{-4}$, золото — $4 \cdot 10^{-7}$, а протактиний даже — $7 \cdot 10^{-11}\%$.

Приведенные в табл. 2 содержания элементов являются средними для всей земной коры. Однако в горных породах содержание различных элементов может меняться в широких пределах. В некоторых типах горных пород наблюдаются повышенные (рудные) скопления того или иного минерала. Такие скопления рудных минералов геологи и геофизики специально разыскивают, чтобы из них добывать и извлекать необходимые для народного хозяйства элементы и их соединения.

Для поисков, разведки и разработки различных полезных ископаемых по классической методике производится отбор образцов, их дробление и истирание. Приготовленная таким образом проба анализируется химическими и физико-химическими или физическими методами. По результатам этих анализов в дальнейшем геологи судят о наличии в породах и рудах того или иного элемента и о пригодности этих руд на данном этапе для добычи.

Определение содержания в породах различных элементов перечисленными методами сопряжено с многими трудностями. Кроме того, в настоящее время, когда геологические исследования принимают большой размах, с каждым годом все увеличивается число проб, отбираемых для анализов. В этих условиях, естественно, необходимо переходить от трудоемких и длительных методов к более прогрессивным. К ним, в частности, и относятся методы ядерной физики, с помощью которых, как будет показано ниже, можно быстро и с высоким порогом чувствительности определять содержание в пробах разнообразных химических элементов и их изотопов.

Преимущество ядерных методов по сравнению с другими и в том, что с их помощью содержание многих элементов в горных породах можно определять не только в лабораторных условиях, но и непосредственно на месте выхода исследуемых пород и руд — в обнажениях, горных выработках (канавах, шурфах, штольнях и шахтах) и по разрезу буровых скважин.

О составе Луны и других космических тел судили в основном на основании различных гипотетических данных. При этом, например, считалось, что Луна и Земля имеют общую природу происхождения и вследствие этого не должны сильно отличаться по химическому составу. Однако это надлежало проверить, что оказалось возможным лишь при создании космических аппаратов. На лунную поверхность для этих целей был высажен целый ряд станций, оборудованных различными приборами, в том числе и ядерно-геофизическими. С помощью этих приборов получены более достоверные сведения о нашем спутнике. В дальнейшем эти сведения были проверены по образцам пород, доставленных на Землю с помощью пилотируемых космических кораблей «Аполлон-11», «Аполлон-12», автоматической станции «Луна-16» и др. Эти данные о породах Луны будут рассмотрены ниже.

2. РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДАЮТ ЗНАТЬ О СЕБЕ

§ 1. ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Горные породы и другие геологические объекты в своем составе с нерадиоактивными химическими элементами содержат и естественно-радиоактивные. Эти последние испускают ядерные частицы, отличающиеся по виду и энергии. Регистрируя их, судят о природе излучающих радиоактивных элементов. Таким образом, ядра-излучатели сами о себе дают знать. Этим свойством

радиоактивных ядер постоянно пользуются исследователи, изучающие природные объекты.

Из естественно-радиоактивных элементов наиболее распространены семейства урана (урана-радия), тория и актиния (актино-урана, или урана-235), а также изотоп одиночка — калий-40. Все эти изотопы являются долгожителями и существуют с момента образования Земли. Так, родоначальник первого семейства уран-238 имеет период полураспада $T=4,51 \cdot 10^9$ лет. Испытывая 14 последовательных актов распада (8 альфа- и 6 бета-превращений), уран-238 в итоге превращается в стабильный изотоп свинец-206. Наиболее долгоживущим радиоактивным продуктом его распада является радий-226 ($T=1622$ года). Это семейство часто называют урано-радиевым. Радий, хотя и является продуктом распада урана, но в земных условиях может создавать самостоятельные месторождения. Это связано с тем, что радий имеет достаточно большой период полураспада и может путем геохимических процессов переноситься из одного места в другое. В связи с этим при изучении радиоактивности природных образований содержание урана и радия в них определяют раздельно.

Актиноуран ($T=7,1 \cdot 10^8$ лет) является изотопом урана, поэтому в природных образованиях он встречается совместно с ураном-238.

Испытывая последовательно 7 альфа- и 4 бета-распадов, актиноуран превращается в стабильный изотоп свинец-207. В природном уране на долю актиноурана приходится $1/140$, т. е. 0,715%. Поэтому он в этих образованиях отдельно от урана-238 обычно не определяется.

Из упомянутых выше радиоактивных элементов наибольший период полураспада имеет изотоп торий-232 ($T=1,39 \cdot 10^{10}$ лет). Его последовательный распад (6 альфа- и 4 бета-превращения) приводит к образованию стабильного изотопа свинец-208. Все радиоактивные продукты распада тория имеют сравнительно небольшие периоды полураспада, поэтому он в геологических образованиях находится в равновесном состоянии с продуктами своего распада.

На долю калия-40 ($T=1,25 \cdot 10^9$ лет) в природном калии приходится 0,0119%, или $1/8400$. Однако в связи с тем, что калий в природе занимает седьмое место (см. табл. 2) его изотоп калий-40 вносит заметный вклад в естественную радиоактивность природных образований.

Подводя итог изложенному, заметим, что природная радиоактивность обуславливается в основном ураном, радием и торием с их продуктами распада и калием-40. В природных образованиях встречаются и другие радиоактивные изотопы. Однако содержание их невелико, и поэтому при изучении общей естественной радиоактивности горных пород и других объектов их обычно не учитывают.

Выше говорилось, что в природных условиях содержание актиноурана достигает 0,715%. Однако ученых давно занимает мысль — так ли всегда и всюду это было. И вот в последнее время французскими учеными было сделано сенсационное открытие. При изучении соотношения изотопов урана из месторождения Габона они установили, что концентрация актиноурана варьирует в пределах 0,621—0,730%.

В урановых рудах Габона к тому же были обнаружены заметные количества редкоземельных элементов: неодима, самария, европия и церия. Изотопный состав этих элементов полностью соответствует составу продуктов деления, накапливающихся в современных ядерных реакторах (см. § 4, гл. 3).

Эти данные, по мнению многих ученых, могут служить доказательством протекания в природе цепной ядерной реакции сотни миллионов лет назад. В то время содержание актиноурана в рудах соответствовало 3%. Именно такие концентрации актиноурана в урановом топливе необходимы для протекания реакции деления в реакторах на обычной воде.

§ 3. ИЗМЕРЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ

Излучения, проходя через вещество, взаимодействуют с ним, вызывая различные эффекты. По этим эффектам и судят о ядерном и атомном излучениях.

Анри Беккерель в 1896 г. с помощью фотографической пластинки открыл естественную радиоактивность урана. В последующем естественную радиоактивность стали измерять с помощью ионизационных камер. Явление сцинтилляций, открытое У. Круксом в 1903 г., стало применяться для измерения радиоактивности проб лишь после изобретения советским инженером Л. А. Кубецким в 1930 г. светочувствительного прибора — фотоумножителя (см. ниже).

На принципе перечисленных эффектов разработаны различные приемники излучений, называемые чаще всего счетчиками или детекторами.

Альфа- и бета-частицы регистрируются непосредственно по вызываемым ими эффектам. Регистрация гамма-лучей осуществляется обычно по выбиваемым в веществе электронам. Нейтроны, непосредственно не ионизирующие вещество, регистрируются по вторичным эффектам, приводящим к образованию заряженных частиц: протонов отдачи (ядрам водорода H^1), альфа-частиц (ядер гелия He^4), тритонов (ядер трития H^3) и других частиц, возникающих в реакциях на ядрах атомов некоторых элементов.

Ионизационный эффект, вызываемый отдельной частицей в приемнике излучения, обычно мал, поэтому его усиливают при помощи специальных радиометрических устройств и после этого фиксируют.

В настоящее время для регистрации излучений используют различные виды ионизационных, сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов.

Ионизационные детекторы действуют по принципу воздушного конденсатора, в котором центральный электрод служит одной из его обкладок, а стенка камеры — другой. Газ, заполняющий пространство в детекторе в обычных условиях, является изолятором, но под действием заряженных частиц становится проводником. В нем появляются свободные электроны, положительные и отрицательные ионы. Если к обкладкам такого прибора, в котором образуются ионы, приложить разность потенциалов, то электроны и ионы устремятся к электродам, и в результате возникает электрический ток, который может быть зафиксирован чувствительным прибором, включенным в цепь между электродами. Величина ионизационного тока детектора зависит как от интенсивности ионизирующей радиации, так и от разности потенциалов, приложенной к его электродам. В зависимости от разности прилагаемых потенциалов и некоторых других специфических особенностей ионизационные детекторы подразделяются на ионизационные камеры, пропорциональные и газоразрядные счетчики.

Ионизационные камеры могут работать в стационарном (интегрирующем) и импульсном режимах. Этот вид детекторов в основном применяется для регистрации заряженных альфа- и бета-частиц. Причем камеры, работающие в интегрирующем режиме, используются для измерения суммарных потоков излучения, а импульсные — для измерения отдельных частиц и их энергии.

В пропорциональных счетчиках амплитуда импульса, приходящего на анод, пропорциональна числу ионов, образованных при начальной ионизации, и соответственно энергии излучения. Таким образом, этот вид детекторов используется для определения энергии излучений. В ядерной геофизике применяются два типа пропорциональных счетчиков: для регистрации мягкого рентгеновского и гамма-излучения с энергией примерно в диапазоне 1—50 кэВ ($1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ эрг}$) и нейтронов. Заметим, что рентгеновское и гамма-излучение имеют одинаковую электромагнитную природу и отличаются длиной волны. В связи с этим в дальнейшем в ряде случаев под гамма-излучением будет одновременно пониматься то и другое. При этом, естественно, не следует забывать, что спектр рентгеновского излучения является сплошным с отдельными характеристическими линиями, а спектр гамма-излучения — линейчатым.

Пропорциональные счетчики для мягкого гамма-излучения заполняются инертными газами: гелием, неоном, аргоном, криптоном и ксеноном (см. табл. 1). Обычно, чем меньше атомный номер наполнителя счетчиков, тем с более высоким разрешением можно регистрировать указанное излучение. Так, счетчики с неоновым наполнителем используются для спектрометрии гамма-

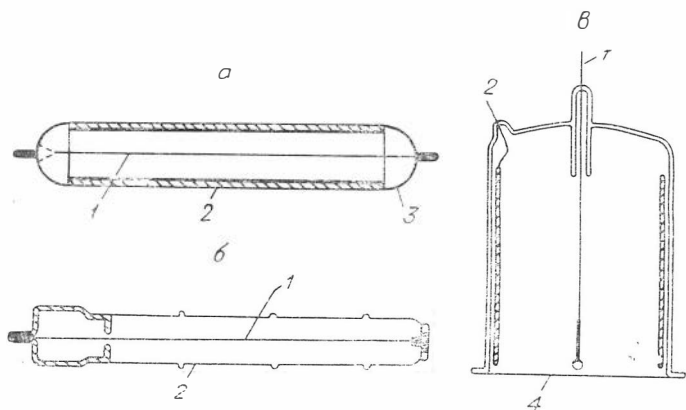


Рис. 2.1. Схематический разрез цилиндрических гамма- и бета-счетчиков (а и б) и торцового бета-счетчика (в):

1 — нить; 2 — катод; 3 — баллон; 4 — окно счетчика.

излучения с энергией в диапазоне $\sim 1,5 \div 3,5$ кэВ, с аргоновым заполнением — для спектрометрии гамма-квантов с энергией в диапазоне $\sim 3,5 \div 6,5$ кэВ, а с ксеноновым заполнением — для спектрометрии гамма-излучения в диапазоне $\sim 5 \div 18$ кэВ.

Пропорциональные детекторы для регистрации нейтронов заполняют газами со свойствами ядер атомов, интенсивно захватывающих нейтроны. К таким газам относят атомарный изотоп гелий-3 и соединение бора с фтором (трехфтористый бор).

Газоразрядные счетчики Гейгера-Мюллера используются для регистрации альфа- и бета-частиц, а также гамма-квантов. С их помощью можно измерять только суммарные потоки перечисленных излучений.

Газоразрядные счетчики по сравнению с другими ионизационными детекторами находят наибольшее применение. Поэтому на их схеме удобно ознакомиться с устройством ионизационных детекторов вообще. Схематические разрезы цилиндрических гамма- и бета-счетчиков и торцового бета-счетчика показаны на рис. 2.1. Анодом счетчиков служит вольфрамовая нить, расположенная на оси счетчика, а катодом — тонкий слой металла, нанесенный на внутреннюю поверхность счетчика. Баллоны гамма-счетчиков и торцовых бета-счетчиков обычно изготавливаются из стекла; баллон цилиндрических бета-счетчиков — из тонкого слоя алюминия, служащего одновременно катодом счетчика. Внутреннее пространство счетчика заполняется газом. При попадании заряженных частиц во внутреннее пространство счетчика газ ионизируется. Под действием приложенной разности потенциалов между обкладками счетчика с ионизованным газом начинает течь ток. По величине этого тока, усиленного прибором, судят об интенсивности воздействующего излучения.

Бета-частицы внутрь счетчика проникают либо через корпус счетчика, либо через окно в торце. Торцовые счетчики с очень

тонким окном могут использоваться не только для регистрации бета-, но и альфа-частиц.

Гамма-излучение регистрируется по электронам, вырываемым из катода счетчика путем фотоэффекта и комптон-эффекта. С этими эффектами читатель подробно ознакомится в следующих главах.

Ионизационные камеры по устройству сходны с торцовыми счетчиками. Пропорциональные счетчики обычно цилиндрические с тонким боковым окном — для входа мягких гамма-лучей.

Полупроводниковые счетчики сходны с ионизационными камерами, однако пространство в них заполнено не газом, а твердым полупроводником. Под действием радиации в таких детекторах возникают свободные носители зарядов. С помощью этого вида детекторов с весьма высоким разрешением можно регистрировать заряженные частицы и гамма-кванты.

Сцинтилляционные счетчики представляют собой сочетание сцинтиллятора (люминофора) и светочувствительного прибора — фотоэлектронного умножителя (фотоумножителя, ФЭУ). Принципиальное устройство фотоумножителя показано на рис. 2.2. В нем имеется несколько динодов — эмиттеров. Между фотокатодом и первым эмиттером приложена определенная разность потенциалов. От эмиттера к эмиттеру разность потенциалов постепенно возрастает.

Ядерные частицы, воздействуя на люминофор, вызывают возникновение в нем вспышек света. Свет воздействует на фотокатод и вырывает из него электроны — происходит так называемое явление фотоэффекта. Под действием разности потенциалов, приложенной между фотокатодом и первым эмиттером ФЭУ, электроны увеличивают энергию и вырывают, в свою очередь, из эмиттера новые электроны. В связи с тем, что между первым и вторым эмиттерами приложена более высокая разность потенциалов по сравнению с разностью потенциалов между фотокатодом и первым эмиттером, электроны в этом промежутке вновь ускоряются и достигают второго эмиттера и т. д. Количество вырываемых электронов от эмиттера к эмиттеру растет, и на коллекторе ФЭУ накапливается заряд в виде импульса тока. Усиление этих токов осуществляется с помощью специальных электронных схем. Для того, чтобы при ускорении электроны не рассеивались на атомах азота и кислорода, содержащихся в баллоне ФЭУ, в нем создают вакуум.

Каждый прибор, предназначенный для регистрации ядерных излучений, в зависимости от его назначения, помимо детекторов излучения, содержит усилительные и¹ другие радиоэлектронные схемы: блоки питания, дискриминации импульсов тока, пересчета импульсов и т. п. Наиболее простыми являются приборы, предназначенные для измерения суммарных потоков излучения, — интенсиметры. Приборы, используемые для определения энергии заряженных частиц и гамма-квантов, получили название спектрометров. Неотъемлемой частью таких приборов являются анализа-

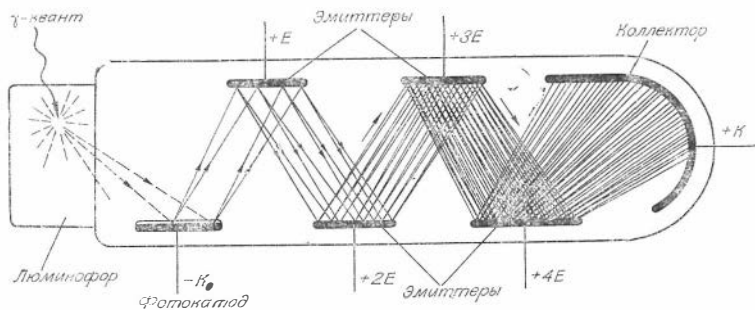


Рис. 2.2. Схематическое устройство и принцип действия фотоэлектронного умножителя.

торы, которые бывают одноканальными и многоканальными с числом каналов до 4000 и более.

В зависимости от области применения радиометрические приборы подразделяются на лабораторные, полевые (переносные и перевозные) и скважинные, предназначенные для изучения буровых скважин.

§ 4. ИЗУЧЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Изучением природной радиоактивности пород, вод и воздуха в нашей стране начали заниматься с 1904 г. физики И. И. Боргман в Петрограде и А. П. Соколов в Москве. С 1915 г. в Москве этой проблемой начал заниматься В. И. Баранов, который внес значительный вклад в развитие радиометрических и ядерно-геофизических методов в нашей стране.

Естественные радиоактивные элементы излучают альфа- и бета-частицы, а также гамма-кванты. На первом этапе изучения радиоактивности природных объектов применялись в основном альфа- и бета-методы. С их помощью определялась суммарная радиоактивность проб. В настоящее время радиоактивность проб в основном определяется гамма- и бета-методами. Раздельное определение в пробах урана, радия, тория и калия ведется при этом по измерению суммарной бета-активности и гамма-спектрометрии по отдельным реперным линиям. Если вначале гамма-спектрометрия осуществлялась с помощью сцинтилляционных счетчиков, то с 1970 г. для этих целей стали применять полупроводниковые германий-литиевые детекторы с высокой разрешающей способностью. В качестве примера измерения спектрального распределения гамма-излучения проб, содержащих уран, могут служить графики, приведенные на рис. 2.3 и 2.4. Германиево-литиевый детектор имел объем, равный $20,5 \text{ см}^3$, а сцинтилляционный детектор состоял из кристалла иодистого натрия, активированного таллием, высотой 100 м и диаметром 150 мм. Нарастание

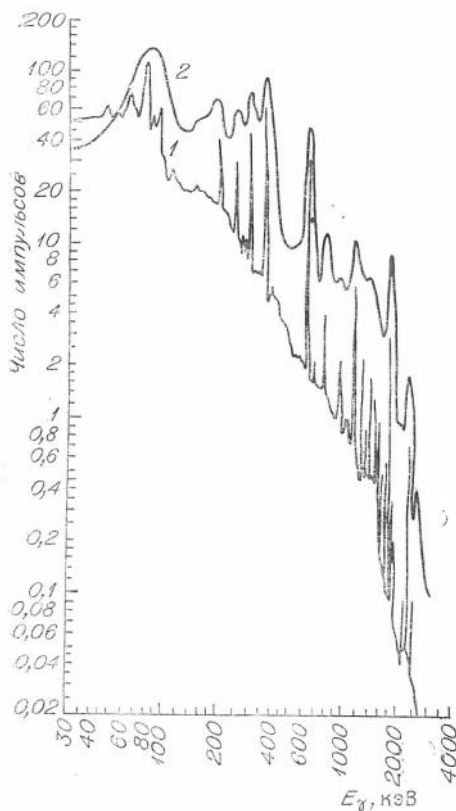


Рис. 2.3. Гамма-спектры элементов уранового ряда, измеренные с помощью германий-литиевого (1) и сцинтилляционного (2) детекторов в диапазоне от 30 кэВ до 3 МэВ.

общего фона спектральных кривых с уменьшением энергии связано с накоплением рассеянного и тормозного излучения в пробе и детекторе. Из рис. 2.3 видно, что в спектре, измеренном с помощью германиево-литиевого детектора, проявляется значительно больше линий, чем в спектре, измеренном с помощью сцинтилляционного счетчика. Так, линии урана (урана X_1 или тория-234) с энергией 63 и 93 кэВ, а также радия-В (свинец-214) с энергией 76 кэВ в сцинтилляционном спектре сливаются в один пик.

Для определения урана обычно используют реперные линии с энергией 93 (торий-234) и 185 кэВ (ионий или торий-230); для определения радия в качестве реперных пиков обычно используют линии с энергией 352 (торий-234), 609 кэВ и 1,76 МэВ (радий-С или висмут-214). Для определения тория можно пользоваться реперными линиями с энергией 238 кэВ (торий-В или свинец-212) и 2,62 МэВ (то-

рий-С¹¹ или таллий-208). Определение калия ведут по линии 1,46 МэВ (калий-40).

В производственных условиях для анализа проб горных пород на радиоактивные элементы применяется в основном пятиканальная лабораторная сцинтилляционная установка типа ЛСУ-5к («Лаура»), фотография которой показана на рис. 2.5. В своем составе она имеет два приемника (бета- и гамма-датчики). В гамма-датчике в качестве люминофора используется кристалл иодистого натрия размером 40×50 мм ФЭУ-13; в бета-датчике — слой порошка стильбена (50—60 мг/см²), нанесенный на плексигласовый диск. Порог чувствительности при измерении проб весом 150—200 г на ЛСУ-5к соответствует следующим содержаниям: $(2 \div 2,5) \cdot 10^{-4}\%$ урана, $(1 \div 5) \cdot 10^{-4}\%$ радия в эквиваленте равновесного урана, $(1 \div 1,5) \cdot 10^{-4}\%$ тория и $0,2 \div 0,3$ калия. Точность измерения 30% (более высокие концентрации

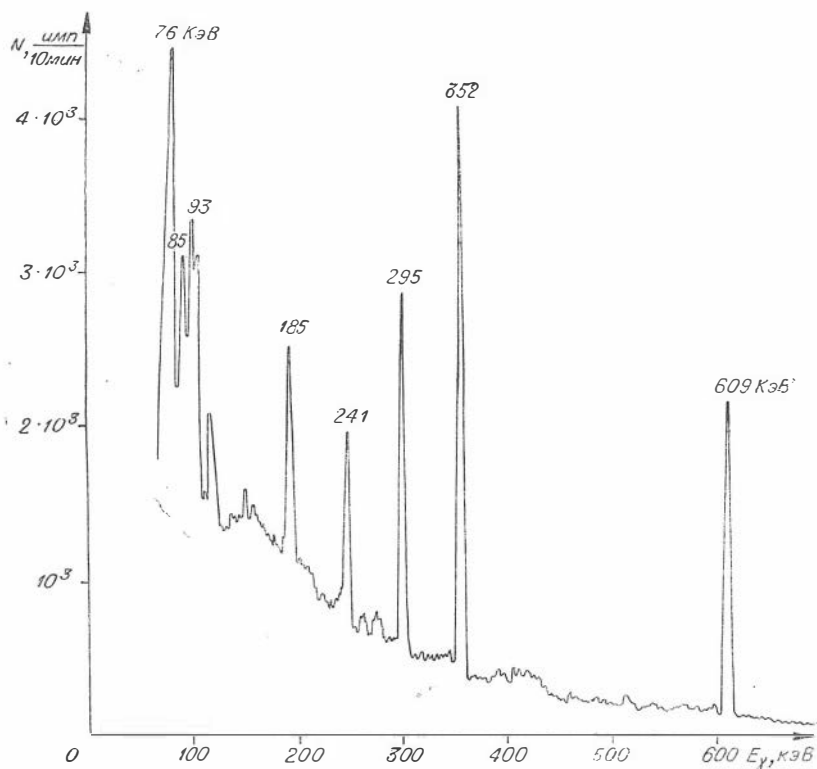


Рис. 2.4. Гамма-спектр урановой смолки, измеренный с помощью полупроводникового германий-литиевого детектора в низкоэнергетическом диапазоне энергий (50—700 кэВ).

измеряются с более высокой точностью). Время замера одной пробы составляет 30 мин.

При измерениях в свинцовом домике с толщиной стенок 12 см с кристаллом иодистого натрия 70×70 мм и бета-люминофором диаметром 150 мм (под ФЭУ-49) проб весом около 1 кг в течение 1 ч порог чувствительности для ЛСУ-5к повышается примерно в 4—10 раз.

Помимо ЛСУ-5к для измерения многокомпонентных проб могут также применяться 50-канальный амплитудный анализатор типа АИ-50 («Линия»), 100-канальный амплитудный анализатор типа АИ-100-1 («Радуга») и др. Так, В. А. Бобровым при измерениях в течение 1 ч проб весом 1,5 кг, размещенных в фигурной кассете, на анализаторе АИ-100-1 с низкофоновым детектором (ФЭУ-49 и кристалл иодистого натрия диаметром 150 мм, высотой 100 мм), расположенным в камере низкого фона, получены следующие пороги чувствительности: $7 \cdot 10^{-5}\%$ урана по радио; $1,6 \cdot 10^{-5}\%$ тория; $7 \cdot 10^{-5}\%$ мезотория-2 (в единицах равновесного тория) и $0,02\%$ калия.

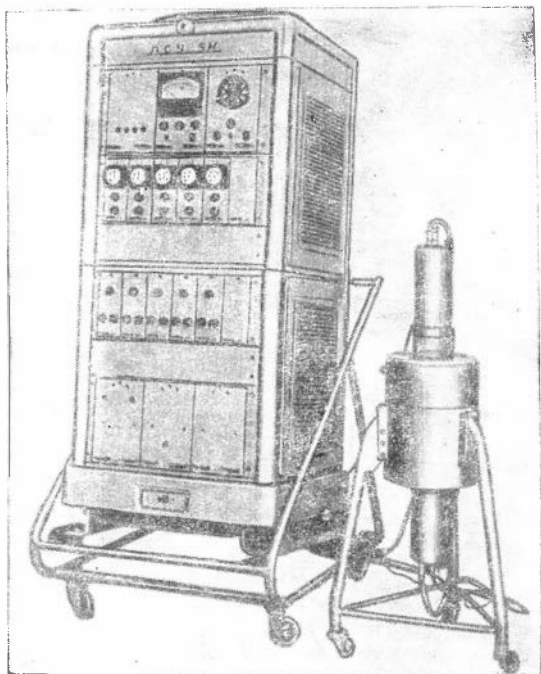


Рис. 2.5. Общий вид пятиканальной лабораторной сцинтилляционной установки ЛСУ-5К («Лаура»).

§ 5. СОДЕРЖАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

О содержании радиоактивных элементов в верхнем слое земной коры можно судить по результатам изучения горных пород, выходящих на поверхность или пробуренных скважинами. Заметим, что самая глубокая скважина в настоящее время имеет отметку 7724 м. Концентрации радиоактивных элементов на больших глубинах оценивают по изучению пород, имеющих выходы на поверхность. На основе таких данных А. П. Виноградовым показано, что в земной коре среднее содержание радиоактивных элементов может быть выражено следующими величинами: $1,2 \cdot 10^{-10}\%$ радия; $(2-4) \cdot 10^{-4}\%$ урана; $1,2 \cdot 10^{-3}\%$ тория и $2,5\%$ калия. О радиоактивности более глубоких слоев можно судить лишь на основании косвенных данных, основанных на гипотетических расчетах температурного режима внутри Земли и на изучении состава метеоритов. Метеориты по одной из гипотез рассматриваются как осколки внутренних частей планет, подобных Земле. Силикатные каменные метеориты рассматриваются как осколки мантии, располагающейся на глубине от 30 до 2900 км от

поверхности Земли. Среднее содержание радиоактивных элементов в них оценивается величинами: $1,3 \cdot 10^{-6}\%$ урана, $4,3 \cdot 10^{-6}\%$ тория и $0,09\%$ калия. Концентрации радиоактивных элементов в железистом ядре Земли радиусом 3470 км устанавливаются по их концентрациям в железистых метеоритах. Заметим, что содержание в них радиоактивных элементов в 10—100 раз ниже соответствующей величины в каменных метеоритах.

Содержание радиоактивных элементов в водах морей и океанов значительно меньше, чем в поверхностных слоях Земли. Так концентрация радия в них равна примерно $1 \cdot 10^{-16}$ г/см³, урана — $(0,3 \div 3,7) \cdot 10^{-9}$ г/см³, тория — $1 \cdot 10^{-9}$ г/см³ и калия — $3 \cdot 10^{-4}$ г/см³. Содержание радия в реках, как правило, ниже или такое же, как и в морской воде, а содержание урана может меняться в широких пределах: от $3 \cdot 10^{-12}$ до $n \cdot 10^{-8}$ г/см³. Радиоактивность вод проточных озер не отличается от радиоактивности вод рек. Воды некоторых бессточных озер имеют несколько повышенную радиоактивность по сравнению с речными водами. В пластовых водах наблюдаются более высокие концентрации радиоактивных элементов по сравнению с поверхностными. Однако в целом содержание урана в них может варьироваться от $1 \cdot 10^{-12}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Повышенные концентрации радия также встречаются в пластовых водах нефтяных месторождений.

Содержание радиоактивных элементов в воздухе атмосферы ничтожно. Так, содержание радона (газообразный продукт распада радия) в кюри/см³ может быть представлено следующими данными: атмосферный воздух над океаном вдали от берегов — $1 \cdot 10^{-18}$, атмосферный воздух у земной поверхности — $1 \cdot 10^{-16}$ и почвенный воздух — $2 \cdot 10^{-13}$, а содержание торона (газообразный продукт тория) у земной поверхности может меняться от $1 \cdot 10^{-18}$ до $1 \cdot 10^{-16}$.

Горные породы подразделяют на изверженные, осадочные (образованные из осадков на дне морей и океанов) и метаморфические (образованные из осадочных при воздействии на них избыточных давления и температуры). Из изверженных пород наибольшее количество радиоактивных элементов содержат кислые породы (богатые кремнеземом — SiO_2) — $3,5 \cdot 10^{-4}\%$ урана, $1,8 \cdot 10^{-3}\%$ тория и т. д. и наименьшее — ультраосновные (бедные кремнеземом) — $3 \cdot 10^{-7}\%$ урана, $5 \cdot 10^{-7}\%$ тория и т. д.; из осадочных пород наибольшее количество радиоактивных элементов содержат глины ($4 \cdot 10^{-4}\%$ урана, $1,1 \cdot 10^{-3}\%$ тория и т. д.), глинистые породы и калийные соли (25—40% калия), а наименьшее — известняки ($1,4 \cdot 10^{-4}\%$ урана, $1,8 \cdot 10^{-4}$ тория и т. д.) и другие осадки выпаривания. Содержание радиоактивных элементов в метаморфических породах является промежуточным между содержанием их в изверженных и осадочных породах.

Радиоактивные элементы из почвы проникают в растения. Концентрации радиоактивных элементов в них зависят от разнообразных факторов состава и происхождения почв, типа природных вод, вида растений, климата, рельефа и т. д. Содержание

урана в золе растений меняется в пределах от $5 \cdot 10^{-7}$ до $10^{-2}\%$, радия — от $8 \cdot 10^{-14}$ до $9 \cdot 10^{-7}\%$.

Из растительной пищи радиоактивные и другие химические элементы попадают в организм животных и людей. Поэтому в организме каждого человека практически содержатся все элементы периодической системы Менделеева. Правда, концентрации большинства химических элементов у людей весьма малы. Так, содержание урана в ткани человека достигает $1,3 \cdot 10^{-8}\%$, радия — $4 \cdot 10^{-10}\%$, иода — $1,6 \cdot 10^{-5}\%$, меди — $1 \cdot 10^{-4}\%$ и т. д. Для человека весом 70 кг (средний вес) содержание указанных химических элементов достигает следующих величин: $9 \cdot 10^{-6}$ г. урана, $2,8 \cdot 10^{-8}$ г радия, 0,011 г иода и 0,072 г меди и т. д.

§ 6. О ПОИСКАХ РАДИОАКТИВНЫХ РУД НА ПОВЕРХНОСТИ

Для поисков радиоактивных руд на поверхности применяются методы воздушной и наземной съемок. Для измерения природы радиоактивных элементов при этих исследованиях в качестве реперных линий можно использовать только жесткое излучение с энергией примерно от 1 МэВ и выше. Низкоэнергетичные линии на фоне рассеянного излучения при этом выделить невозможно. В связи с тем, что у урана отсутствует жесткое излучение, определение его в породах можно вести только по радю — в районах развития пород с ненарушенным равновесием между ураном и радием. Определение радиоактивных элементов обычно осуществляется по линиям: радия — 1,76 МэВ, тория — 2,62 МэВ и калия — 1,46 МэВ.

В основу воздушных методов поисков радиоактивных руд положена способность гамма-излучения естественных радиоактивных элементов проходить в воздухе значительные расстояния. Пробег гамма-излучения естественных радиоактивных элементов в воздухе, как известно, достигает нескольких сотен метров. Это обстоятельство, собственно говоря, и обеспечивает возможность регистрации гамма-излучения горных пород на значительной высоте от поверхности земли с помощью летательных аппаратов (самолетов АН-2, ЯК-12 и др., вертолетов МИ-1, КА-15 и др.).

При воздушной съемке в комплексе с радиометрическими исследованиями ведутся измерения земного магнитного поля. Это связано с тем, что результаты совместных исследований используются не только для поисков радиоактивных руд, но и для геологического картирования горных пород и для поисков других видов полезных ископаемых.

Спектр гамма-излучения, полученный при измерении с самолета на высоте 25—100 м над однородным протяженным участком с кристаллом нодистого натрия, активированного таллием, размерами 12×8 см, показан на рис. 2.6. На этом рисунке выделяются линии 1,76 и 2,2 МэВ (радий), 2,6 МэВ (торий) и 1,46 МэВ (калий). В настоящее время в аэрорадиометрах используют приборы с шестью кристаллами размерами 27×10 см. Один из кри-

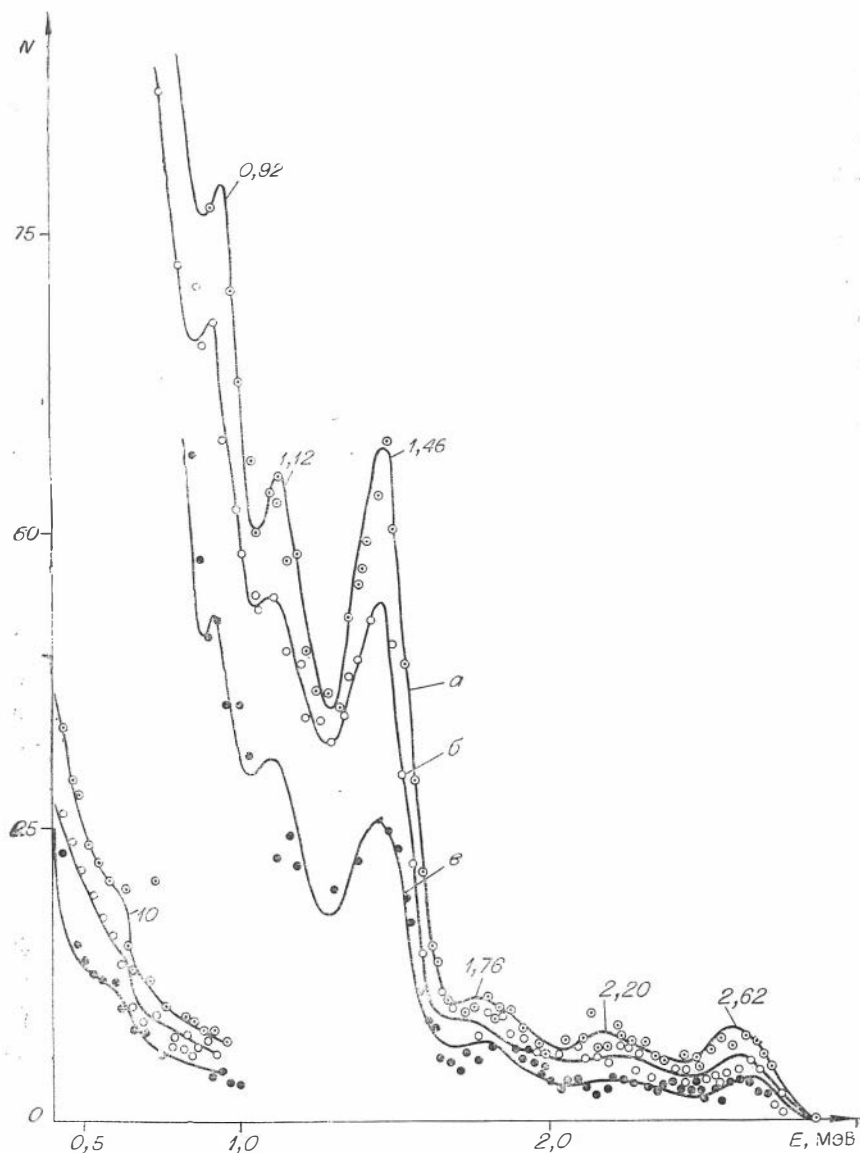


Рис. 2.6. Спектры гамма-излучения, измеренные на различных высотах над поверхностью однородных гранитов (N — скорость счета, отн. ед.).
 a — $h=25$ м; $б$ — $h=50$ м; $в$ — $h=100$ м.

таллов используется для учета космического фона, который автоматически исключается из показаний остальных детекторов. Полученные результаты обрабатываются с помощью счетно-решающих систем и в виде концентраций радия (или урана), тория и калия записываются на диаграммные ленты.

В связи с тем, что используемая аппаратура обладает значительной инерционностью, аномалии аэрогамма-съемки обычно бывают смещены на 0,5—1 км по направлению маршрута съемки. Дальнейшая привязка аномалий осуществляется с помощью наземных видов съемок. Если местность благоприятствует автомобильному транспорту, то исследования ведут с помощью авто-съемок. Если же местность непроходима для автомобиля, то привязка аномалий осуществляется с помощью пешеходной съемки. Этот вид съемки используется и для привязки аномалий автомобильной съемки. Каждый из рассматриваемых методов можно также использовать самостоятельно.

С помощью всех рассмотренных видов съемок содержания радиоактивных элементов в горных породах можно определять, начиная с их средних концентраций, указанных в начале § 4 этой главы.

При пешеходных измерениях бета- и гамма-излучений можно раздельно определять содержание в породах урана и радия.

На показания приборов обычно действует гамма-излучение с глубины не свыше 50 см. Для поисков радиоактивных руд, залегающих под слоем рыхлых отложений, в последнее время стали привлекать гамма-плужную съемку. При этом специальный плуг с детекторами гамма-излучения перемещается с помощью двух тракторов и погружает детекторы на глубину до $1\div 1,7$ м.

Для изучения донных отложений в водоемах морей и т. п. привлекается морская съемка. Детектор при этом погружается на дно и тащится за кораблем, а показания прибора записываются на диаграммную ленту.

§ 7. ГЛУБИННЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ РАДИОАКТИВНЫХ РУД

К настоящему времени поверхность почти всей территории Земли практически изучена. Для поисков радиоактивных руд на глубине существуют различные глубинные методы. Вначале рыхлые отложения изучались с помощью так называемой эманационной съемки — с измерением радиоактивных газов (радона и торона).

В грунте пробивается бурка (шпур) глубиной до 1,5 м. Затем в бурку вводится полый зонд, соединенный гибким шлангом с прибором. С помощью специального насоса, встроенного в прибор, почвенный воздух закачивается в камеру прибора, в которой и измеряется его радиоактивность. В связи с малой производительностью эманационной съемки в последнее время ее стали заменять гамма-съемкой в бурках. Этому, в частности, благоприятствовало внедрение в геофизику приборов со сцинтилляционными счетчиками и гамма-спектрометров.

В дальнейшем, применяя гидрозадавливатели, естественную радиоактивность стали измерять в наносах мощностью до 2 м. При разработке самоходных виброагрегатов типа СВА-2 исследования проводятся в отложениях глубиной от 2 до 5 м. На

больших глубинах исследования естественной гамма-активности рыхлых отложений ведут с помощью самоходных установок глубинного поиска СУГП-10 (см. § 8, гл. 4), применяющихся также для изучения плотностных свойств грунтов и для определения их влажности. С помощью наземных и подводных установок подобные исследования свойств грунтов велись до глубин не более 25 м. На больших глубинах поиски и разведка радиоактивных и других видов полезных ископаемых осуществляются путем бурения скважин и их последующего изучения с помощью гамма-каротажа и других методов. Содержания радиоактивных элементов можно определить при работе с гамма-спектрометрической аппаратурой, также начиная со средних содержаний в горных породах.

В заключение заметим, что радиометрические методы используются не только для поисков радиоактивных руд, но и для их разведки, разработки и обогащения. Последние три направления называются рудничной радиометрией. В ее задачи входят: обнаружение, оконтуривание и опробование рудных тел в массиве; контроль технологии добычи (учет потерь и разубоживания руд и борьба с ними при выемке и транспортировке); оценка качества отбитой горнорудной массы, ее сортировка, обогащение и т. д.

§ 8. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Человечество давно занимает мысль о предсказании землетрясений. В Японии для этого разводят золотых рыбок, которые незадолго до землетрясения начинают проявлять беспокойство. Перед землетрясениями беспокоятся также различные животные (собаки, лошади и т. п.). В Индонезии о деятельности вулканов судят по поведению нежного цветка — королевской примулы, произрастающей на склонах вулканов. Эта примула обладает удивительной способностью — она распускается перед началом извержения вулканов. Не замечено ни одного случая, чтобы ее распускание не было связано с вулканической деятельностью. Так рыбки, животные и примулы предупреждают людей о грозящей им опасности.

Геофизики, ведущие исследования в сейсмоактивных районах, давно изыскивают возможности создания приборов, которые заранее бы могли давать людям сигналы тревоги. Однако коварная стихия неохотно выдает свои тайны ученым. Тем не менее пытливые исследователи вырывают у нее одну тайну за другой.

Недавно ученые Узбекистана Б. З. Мавашев и В. И. Уломов и независимо от них геофизик из Киргизии И. А. Лучин обратили внимание на то, что перед началом землетрясений в породах возникают упругие деформации, приводящие к разрушению минералов. В результате в поры пород начинает интенсивно поступать радон — газообразный продукт распада уранорадия. По капиллярам, имеющимся в породах, радон устремляется к по-

верхности земли и попадает в водоносные пласты. В Ташкенте такой пласт располагается на глубине 1,3—2,4 км. Вода имеет целебные свойства и извлекается через скважину. В этой воде длительное время определяли радон. Перед началом землетрясения наблюдалось резкое увеличение эманации в порбах воды (рис. 2.7, а). В процессе землетрясения капилляры, по которым поступала вода в пласт, были нарушены и поступление эманации резко сократилось. Аналогичные явления зафиксированы в период и после землетрясения, происшедшего в Ташкенте в марте 1967 г. (рис. 2.7, б), а также в Тюпском районе Киргизской ССР около г. Пржевальска и в Дагестанской АССР.

Подземные воды перед землетрясением обогащаются не только радоном, но и гелием, аргоном, ураном и другими элементами. Детальные исследования в этом направлении проведены группой ученых ташкентских и московских институтов: геофизиками В. И. Уломовым, Б. З. Мавашевым, Л. Б. Горбушиной, В. Т. Тыминским, А. И. Спиридоновым, гидрогеологами Г. А. Мавляно-

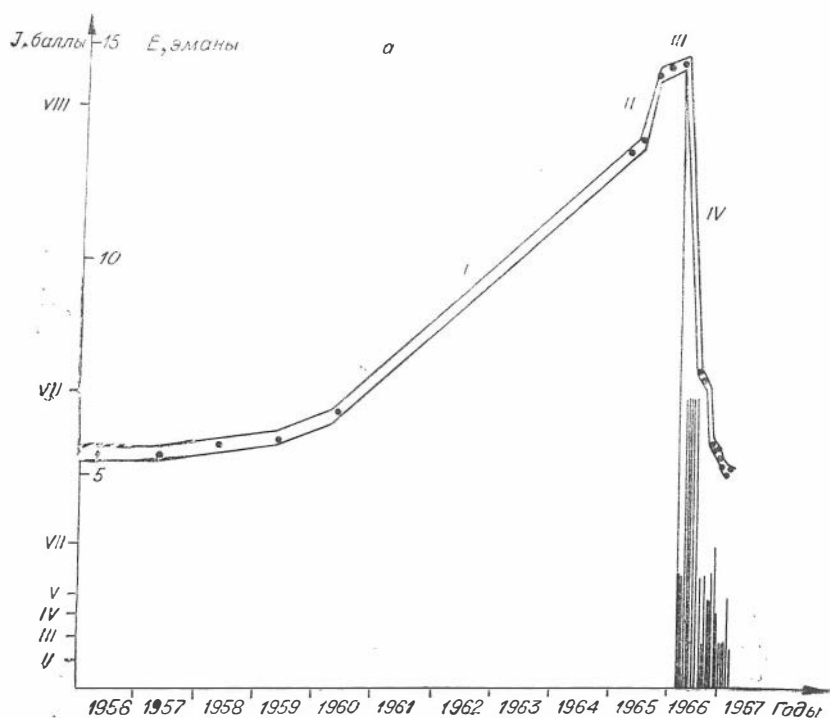
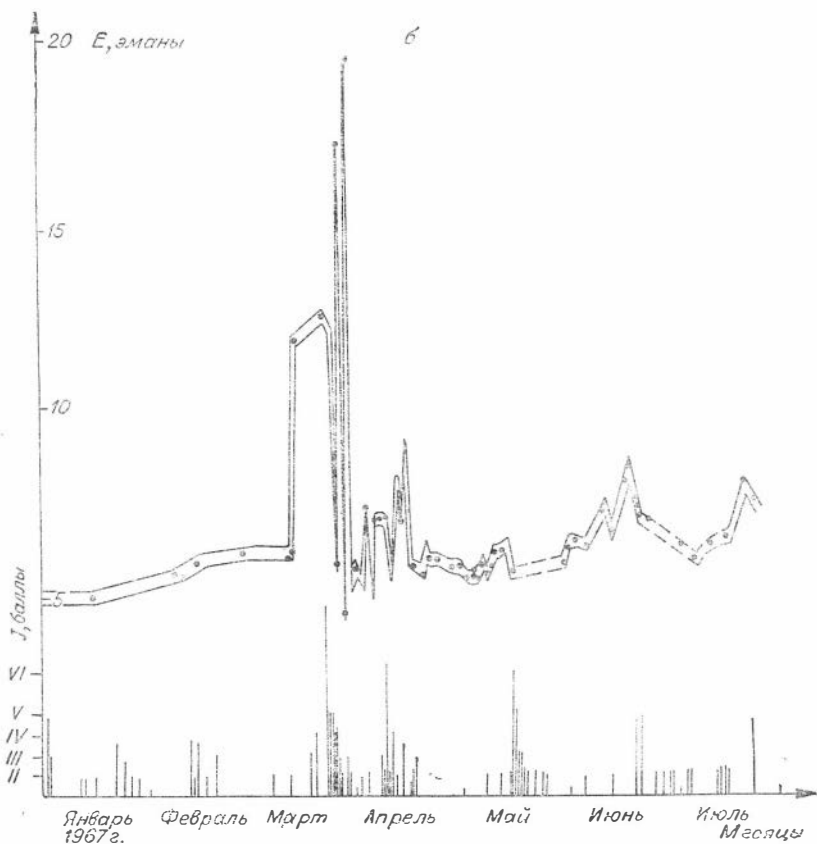


Рис. 2.7. Изменение во времени концентрации радона в термоминеральной воде Ташкентского минерального бассейна (точки в интервале между кривыми) в сравнении с интенсивностью подземных толчков (вертикальные линии), по В. И. Уломоу (а — период 1956—1967 гг., римскими цифрами на кривой обозначены различные этапы деформаций; б — период с января по июль 1967 г.).

вым, А. Н. Султанхаджаевым, Л. А. Хасановой и геохимиком Н. И. Хитаровым. Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР представленными этими учеными материалы охарактеризовал 12 июня 1973 г. в качестве открытия, вносящего крупный вклад в мировую науку.

Азербайджанские исследователи установили, кроме того, что перед подземными толчками наблюдается небольшое повышение радиоактивности пород. Это явление также связано с приносом радона в поверхностные отложения. Распад радона при этом приводит к образованию новых радиоактивных изотопов, интенсивных гамма-излучателей.

Рассмотренные методы, естественно, не являются определяющими при разработке методов прогнозирования землетрясений в самых разнообразных геологических условиях. Для решения этой задачи привлекается целый ряд других геофизических и геологических методов. Так, геолог Ф. Р. Гордон подметил, что за 1,5 ч перед началом землетрясения в изучаемом им районе уровень воды поднимается на несколько десятков сантиметров. Это также служит предвестником землетрясений.



Верхние слои земной атмосферы постоянно находятся под воздействием космического излучения. Уже на заре развития атомной и ядерной физики ученые начали изучать космическое излучение. Первые исследования проводились на уровне моря и на склонах и вершинах высоких гор. При этом физики в основном имели дело с вторичными частицами, возникающими под действием первичного космического излучения с ядрами атомов верхних слоев земной атмосферы.

Верхние слои атмосферы стали доступны исследователям лишь при запуске ракет и искусственных спутников. Путем запуска ИСЗ удалось вывести аппаратуру за пределы земной атмосферы и начать изучение космического излучения вне сферы действия магнитного поля Земли. В результате проведенных всесторонних исследований было установлено, что космическое излучение, достигающее верхних слоев атмосферы, состоит в основном из протонов ($\sim 85\%$) и альфа-частиц ($\sim 15\%$). Энергия этих частиц меняется от 10^3 до 10^4 МэВ, а потоки — примерно от 0,01 (экватор) до 0,3 (полюс) частиц/см² с. стер. Кроме протонов и альфа-частиц в космическом излучении в ничтожном количестве присутствуют ядра атомов других химических элементов с атомным номером обычно не выше 50 (олова), а также нейтронное излучение. При вспышках на Солнце величина потоков нейтронов может превосходить указанные выше потоки заряженных частиц.

Под действием потоков заряженных частиц около Земли образуются радиационные пояса: внутренний и внешний, открытые с помощью спутников и космических ракет. Потоки частиц в этих поясах превышают нормальные потоки космического излучения в 100 млн. раз. Положение поясов вокруг Земли демонстрируется на рис. 2.8. Такое расположение поясов связано с геомагнитным и электрическим полем Земли. Внутренний пояс состоит из протонов с энергией порядка $10 \div 100$ МэВ, потоком $2 \cdot 10^4$ частиц/см²·с и электронов с энергией в интервале от 30 кэВ до

4 МэВ; 99% электронов имеют энергию не меньше 600 кэВ и потоки $10^5 - 10^6$ электрон/см²·с. Внешний пояс состоит из электронов с энергией $n \cdot 10^4$ эВ; потоки этих электронов не превышают $2 \cdot 10^7$ частиц/см²·с. В последующем при более детальных исследованиях поясов была обнаружена их несимметричность. С дневной стороны наблюдается приплюснутость поясов, а с ночной — их вытянутость.

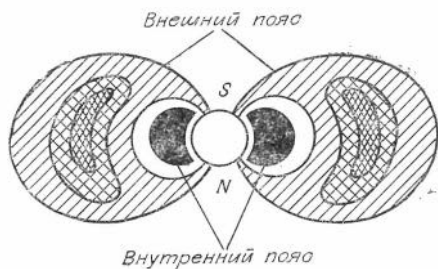


Рис. 2.8. Общая картина распределения радиационных поясов вокруг Земли (густота штриховки дает качественное представление о величине интенсивности во внешнем радиационном поясе).

Область минимума для электронов с энергией менее 100 кэВ оказалась слабо выраженной, а для протонов с энергией $\sim 1-2$ МэВ в этой области, наоборот, наблюдался максимум интенсивности. Было установлено также, что радиация во внутреннем поясе практически не меняется, в то время как во внешнем поясе радиация со временем меняется как по интенсивности, так и по положению в пространстве.

Взаимодействие высокоэнергетичного излучения с атомами земной атмосферы приводит, как уже отмечалось, к возникновению вторичного излучения сложного состава. Здесь же возникают и нейтроны, формирующие при своем распаде внутренний протонный пояс. Торможение низкоэнергетических электронов на атомах в верхних слоях атмосферы приводит к появлению мягкого рентгеновского излучения, которое поглощается в верхних частях атмосферы и не достигает поверхности Земли.

Поверхности Земли достигает главным образом только вторичное излучение (обусловленное высокоэнергетичными частицами), которое подразделяется на мягкую и жесткую компоненты. Мягкая компонента состоит из электронов, позитронов и фотонов и по своей проникающей способности близка к гамма-излучению радиоактивных элементов, жесткая компонента в основном состоит из μ -мезонов и обладает высокой проникающей способностью.

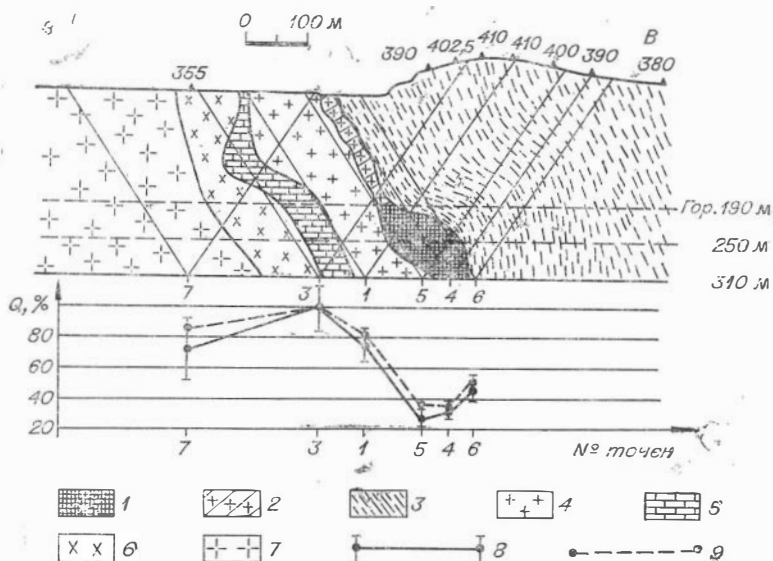


Рис. 2.9. Геологический разрез и кривые космического излучения по профилям через медноколчеданное месторождение:

1 — рудное тело ($4,58 \text{ г/см}^3$); 2 — зона обрушения; 3 — кварцево-серицитовые сланцы ($3,27 \text{ г/см}^3$); 4 — кварцево-альбитовые порфиранды ($2,74 \text{ г/см}^3$); 5 — известняки; 6 и 7 — разновидности порфирантов; 8 и 9 — соответственно наблюдаемая и расчетная кривые интенсивности космического излучения.

На уровне моря интенсивность космического излучения составляет около $1,45$ частиц/см²·мин, что соответствует ионизации около $1,9$ пар ионов/см³·с. С высотой интенсивность ионизации под действием космической радиации возрастает.

Жесткая компонента космического излучения в силу своей высокой проникаемости по сравнению с излучением естественных радиоактивных элементов, может быть обнаружена на глубине до 3 км под землей. Регистрируя это космическое излучение в подземных горных выработках и в буровых скважинах с помощью радиометров-телескопов, можно судить о вышележащей толще пород: о их мощности и плотности. При этом можно выявлять рудные тела, отличающиеся по плотности от вмещающих пород, — карстовые полости, зоны дробления и т. д. В качестве иллюстраций применения этого метода приведены данные по выявлению рудных тел и других пород (рис. 2.9): рудное тело выявляется минимальными, а известняки максимальными значениями регистрируемого излучения.

Археологи стали использовать рассматриваемый метод для изучения пирамид с целью выявления в них полостей и т. п.

§ 10. ГАММА-КВАНТЫ РАСКРЫВАЮТ ТАИНЫ ЛУННЫХ ПОРОД

Отсутствие у Луны атмосферы позволяет осуществлять регистрацию гамма-излучения верхнего слоя пород непосредственно с орбиты лунного спутника. Впервые такие исследования проведены в апреле 1966 г., после вывода 3 апреля 1966 г. на орбиту Луны спутника «Луна-10». Минимальное удаление этого спутника от Луны составляло 350 км, максимальное — 1015 км. Измерение гамма-излучения осуществлялось с помощью 32-канального анализатора. Спектр гамма-излучения измерялся в двух интервалах: а) от $0,15$ до $1,5$ МэВ и б) от $0,3$ до $3,1$ МэВ. Диапазоны переключались путем подачи по радио команд с Земли на станцию.

Аппаратура перед отправкой в космический полет была градуирована в земных условиях. На основе полученных данных рассчитан спектр гамма-излучения для разных горных пород земного происхождения, содержащих различные концентрации радиоактивных элементов, соответствующие главным типам горных пород (рис. 2.10).

Отсутствие атмосферы на Луне приводит к тому, что ее поверхность постоянно бомбардируется потоками космических частиц (см. предыдущий параграф). Под действием этого излучения на ядра атомов горных пород Луны постоянно образуются радиоактивные изотопы космогенного происхождения. Поэтому на показания детекторов помимо излучения радиоактивных элементов постоянно действует и излучение активируемых изотопов. Используемая гамма-спектрометрическая аппаратура на «Луна-10» позволила отдельно определить ту и другую радиоактивности лунных пород.

На основе проведенных исследований установлено, что изменения гамма-поля на поверхности Луны не выходили за пределы 40%. Средняя доза гамма-излучения на поверхности лунных пород меняется в пределах 20—30 мкР/ч. Это примерно в 1,5—2 раза выше дозы над гранитами земного происхождения (14 мкР/ч). Такая высокая радиоактивность лунных пород в основном обусловлена гамма-излучением космогенных изотопов лунной поверхности.

На основе полученных результатов и сопоставления их с данными рис. 2.10 было установлено, что лунная поверхность в основном сложена породами основного (базальтового) и ультраосновного (дунитового или хондритового) состава. Первые из них связаны с лунными «морями», вторые — с «материками». Содержание естественных радиоактивных элементов, определенное по изложенной выше методике, оказалось ниже, чем в тектитах (стеклообразные шарики космического происхождения).

Полученные данные полностью согласуются с данными анализа образцов пород, доставленных на Землю экипажами «Аполлон-11» и «Аполлон-12», «Луной-16» и др.

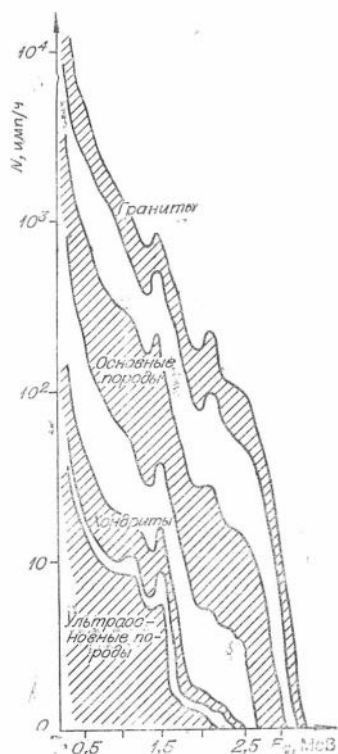


Рис. 2.10. Гипотетические гамма-спектры лунных пород, которые должны быть получены на орбите спутника Луны на высоте 350 км (фон вычтен); штриховкой показаны диапазоны концентрации естественных радиоактивных элементов для данного типа горных пород.

§ 11. ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ В РАЗВЕДКЕ ТАЙН ВЕНЕРЫ

Венера — одна из наших ближайших планет-соседок. Она гораздо ближе к Солнцу, чем Земля. Так, среднее расстояние Венеры от Солнца составляет около 100 млн. км, а Земли от Солнца — около 150 млн. Другим соседом является Марс, располагающийся на расстоянии около 230 млн. км от Солнца. Расстояние Венеры от Земли меняется от 40 до 260 млн. км, а Марса — от 55 до 400 млн. км. Эти планеты, ближайшие к Земле, и явились после Луны первоочередными объектами исследований с помощью космических станций.

Космические корабли достигают Луны, расположенной от Земли на расстояние около 380 тыс. км, за трое суток. Для дости-

жения же ими Венеры и Марса требуется соответственно около 4 и 6 месяцев. Для того, чтобы послать космонавтов в длительное путешествие на 8—12 месяцев, человечество пока еще не готово, поэтому первостепенное значение в изучении Венеры и Марса приобретают автоматические космические станции. Оборудование этих станций различной аппаратурой позволило получить целый ряд сведений о ближайших планетах. С помощью космической станции «Венера-8», преодолевшей свыше 300 млн. км, 22 июля 1972 г. на поверхность Венеры был высажен аппарат, на борту которого имелся гамма-спектрометрический датчик, позволивший измерить гамма-излучение естественно-радиоактивных элементов, содержащихся в горных породах Венеры места посадки станции.

Наличие у Венеры атмосферы (97% углекислого газа, около 2% азота, около 1% водяного пара и менее 0,1% кислорода) с давлением у поверхности пород, в 100 раз большим земного, не позволяет по замерам с орбитальной станции судить о содержании в породах радиоактивных элементов. Поэтому для измерения естественной радиоактивности горных пород Венеры ученые вынуждены были высадить соответствующую аппаратуру на ее поверхность.

В связи с тем, что температура на поверхности Венеры около 500°C, спектрометрический датчик, располагавшийся внутри станции мог регистрировать гамма-излучение с энергией от 0,3 МэВ и выше (до 3 МэВ). Излучение с энергией ниже 0,3 МэВ поглощалось в герметичной оболочке станции.

Градуировка спектрометрического датчика велась в земных условиях. В результате были получены данные, аналогичные показанным на рис. 2.9. По результатам такой градуировки в точке посадки аппарата в породах определено содержание элементов в следующих количествах (вес. %): калий — 4, уран — $2 \cdot 10^{-4}$ и торий — $6,5 \cdot 10^{-4}$. Эти величины отвечают концентрациям радиоактивных элементов в земных породах типа гранитов.

По отражению радиоволн от поверхностного слоя пород Венеры было установлено, что их плотность немногим менее 1,5 г/см³, т. е. близка к плотности земных грунтов.

Космические аппараты штурмуют и Марс. Так, сейчас к нему мчатся четыре советских станции «Марс-4», «Марс-5», «Марс-6» и «Марс-7». Они ведут изучение Космоса на трассе Земля — Марс. С их помощью предполагается комплексное изучение Марса с пролетной траектории, с орбитального спутника и с помощью посадочного аппарата.

§ 12. НА ПУТИ К ЮПИТЕРУ

Космические аппараты изучают не только ближайшие к Земле планеты, но и удаленные от нее. Так, 3 марта 1972 г. американские ученые запустили в сторону Юпитера космическую станцию

«Пионер-10». Юпитер, как известно, отстоит от Солнца на расстоянии примерно 780 млн. км. Таким образом, при великих противостояниях минимальное расстояние между Землей и Юпитером может составлять около 600 млн. км. «Пионеру» выпала еще более трудная задача: чтобы достичь Юпитера, ему нужно преодолеть около 800 млн. км, а также пояс астероидов, среди которых он должен был лететь в течение 175 суток. На траекторию полета станции могли подействовать астероиды большой массы, имеющие собственное гравитационное поле. Большую опасность представляли также мелкие частицы способные изрешетить станцию. Однако «Пионер» преодолел пояс астероидов без происшествий. 4 ноября 1973 г. он пролетел на расстоянии 130 тыс. км от Юпитера.

Станция обеспечена разнообразной научной аппаратурой, в том числе для изучения космического излучения. Приборы дали ценную информацию о Юпитере. Сигнал до Земли шел 46 мин.

В 1987 г. «Пионер» навсегда покинет Солнечную систему. Только через 11 млн. лет он сможет достичь окрестности созвездия Тельца. В случае, если эта станция попадает к разумным существам иных миров, то они обнаружат на ее корпусе пластинку с изображением мужчины и женщины — двух наиболее типичных землян, координаты Солнечной системы относительно четырнадцати известных нам пульсаров, всю Солнечную систему, путь «Пионера» и символ атомов водорода, являющегося наиболее распространенным веществом во Вселенной. Такова суть первого письма, посланного землянами в Космос. Получат ли его другие разумные представители Вселенной — неизвестно. По крайней мере, вероятность этого события весьма мала. Однако до посылки его она была еще меньше.

В настоящее время в сторону Юпитера движется «Пионер-11», запуск которого состоялся 5 апреля 1973 г.

3. ВОЗБУЖДЕННЫЕ ЯДРА АТОМОВ

§ 1. КАК МОЖНО ВОЗБУДИТЬ ЯДРА АТОМОВ?

Под действием радиоактивных излучений происходят различные ядерные реакции. В итоге этих реакций весьма часто образуются радиоактивные изотопы — возбужденные ядра атомов. Для возбуждения радиоактивных ядер в качестве снарядов чаще всего используют электронейтральные частицы — нейтроны, которые свободно проникают внутрь ядер. Радиоактивные изотопы могут образовываться под действием альфа-частиц (см. гл. 13), а также жесткого гамма-излучения, протонов, дейтронов и других частиц (см. гл. 17). Под действием всех этих частиц

пробы становятся радиоактивными. Измеряя наведенную радиоактивность этих объектов, можно судить о содержании в них различных химических элементов, вступающих в реакции, и решать разнообразные геологические задачи.

Методика, основанная на возбуждении радиоактивных ядер в облучаемом веществе под действием нейтронов, получила название нейтронного активационного анализа (НА).

Другие активационные методы также называются в соответствии с возбуждающим излучением. В настоящей главе рассматриваются лишь возможности метода НА. Однако методика проведения анализа для этого метода и других в общих чертах схожа. На примере проведения измерений по НА можно ознакомиться с методикой активационного анализа вообще.

Весь процесс изучения содержания определяемых элементов в веществе сводится, во-первых, к облучению его потоком нейтронов в течении времени t_0 , выбираемого не свыше пяти периодов полураспада ($5T$); во-вторых, к перемещению проактивированной пробы к месту измерения за время t_n (пауза или перерыв) и, в-третьих, к измерению наведенной активности за время t_m , выбираемого также не свыше $5T$.

Определение природы элементов, вступающих в ядерную реакцию, осуществляется по измерению периодов полураспада, по измерению энергии гамма-излучения или других частиц, или по комбинации того и другого. Каждый радиоактивный изотоп обычно имеет только для него характерный период полураспада и характерную энергию излучаемых частиц. Эти отличительные особенности изотопов и используются для установления их природы.

Методика нейтронного активационного анализа широко применяется в практике ядерно-физических исследований геологических проб. Для этой цели применяются радиоизотопные нейтронные источники, а также используется излучение ядерных реакторов и нейтронных разнородителей. Помимо этого радиоизотопные нейтронные источники достаточно широко применяются в нейтронном активационном методе для изучения горных пород и руд, пройденных скважинами, и начинают применяться для изучения горных пород в стенках горных выработок и пород, выходящих на дневную поверхность.

§ 2. ВОЗБУЖДЕНИЕ ПРОБ НЕЙТРОНАМИ ОТ РАДИОИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Нейтронный активационный анализ для определения в геологических пробах отдельных химических элементов с применением радиоизотопных источников нейтронов впервые использовал в 1957 г. Ирвинг (США). Однако наиболее интенсивные исследования в этом направлении с 1957 г. начала проводить Д. И. Лей-

пунская (СССР). Под ее руководством разработан ряд методик и установок.

В настоящее время для анализа геологических проб применяются одноканальные и многоканальные нейтронные активационные установки. Устройство одноканальной нейтронно-активационной установки и измерительного блока показано на рис. 3.1. Для изготовления активатора такой установки может быть использована любая емкость (бочка, бак и т. п.) высотой около 1 м и диаметром около 60 см. В центре такой емкости делается канал для размещения источника и пробы. Проба крепится к нижней части цилиндрического пробкодержателя.

При облучении надкадмиевыми нейтронами кассета с пробой размещается в специальном кадмиевом чехле.

Измерение наведенной активности проб в рассматриваемой установке осуществляется с помощью сцинтилляционного счетчика. В других аналогичных установках измерения наведенной активности проб часто осуществляются с помощью газоразрядных счетчиков.

Устройство трехканального активатора, выпускаемого серийно для анализа геологических образцов, показано на рис. 3.2. Парафиновый замедлитель выполнен в виде шаровидного блока. В центре блока располагается второй меньший блок в виде куба. Источник нейтронов располагается в центре куба, он окружен слоем рассеивателя из свинца. Внутри куба располагаются три канала для активации проб в плоских кассетах: *К* — для активации проб надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами; *Т* — для активации тепловыми нейтронами и *С* — для активации смешанным потоком нейтронов. Каналы *К* и *С* располагаются вплотную к свинцовому рассеивателю. Облучение проб надкадмиевыми

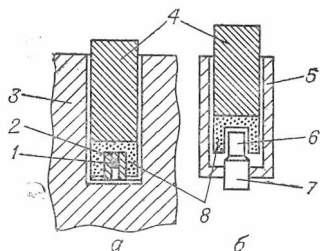


Рис. 3.1. Схема устройства одноканального активатора (а) и измерительного блока (б) (по Э. В. Анчевскому и М. А. Белякову):

1 — источник нейтронов; 2 — промежуточный замедлитель; 3 — основной замедлитель (вода или парафин); 4 — парафиновый пробкодержатель кассеты; 5 — свинцовый домик; 6 — сцинтиллятор; 7 — фотоэлектронный умножитель; 8 — кассеты с пробой.

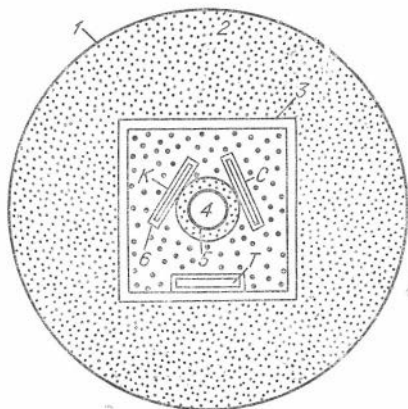


Рис. 3.2. Схема устройства трехканального активатора (по Д. И. Лейпунской и др.):

1 — корпус; 2 — парафин; 3 — внутренний корпус из оргстекла; 4 — источник нейтронов; 5 — рассеиватель из свинца; 6 — кадмий; Т — канал для активации тепловыми нейтронами; К — канал для активации преимущественно быстрыми нейтронами; С — канал для активации смешанным потоком нейтронов.

нейтронами в канале K осуществляется путем размещения кассеты с пробой в кадмиевом чехле. Канал T размещен на расстоянии около 2 см от свинцового рассеивателя.

Регистрирующий блок (на рис. 3.2 он не изображен) оборудован двумя сменными детекторами для измерения бета- и гамма-излучения. При измерениях счетчики и проба помещаются в свинцовых домиках. Для измерения бета-активности проб применяются газоразрядные счетчики, а для измерения гамма-активности — сцинтилляционные.

С помощью ампульных нейтронных источников определяются 10 химических элементов с порогом чувствительности от $\sim 0,01$ до 1%.

Наведенную активность проб при отсутствии излучений мешающих изотопов определяют, измеряя суммарное излучение. При наличии в пробах мешающих излучателей измерения проводят с помощью гамма-спектрометрической аппаратуры.

Анализ элементов с более высоким порогом чувствительности может вестись при их активации в каналах нейтронных размножителей и ядерных реакторов.

§ 3. НЕЙТРОННЫЙ РАЗМНОЖИТЕЛЬ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРОБ

В СССР для проведения активационного анализа геологических образцов, технологических проб и на основе нейтронного размножителя разработана и серийно выпускается активационная установка «Размножитель-1». Эта установка состоит из следующих основных узлов: нейтронного размножителя ПС-1 (подкритическая система); пневматической системы, предназначенной для транспортировки образцов в зону облучения и на позиции измерения и хранения; пульта управления размножителем и пневмопочтой и датчиков для измерения наведенной активности облученных образцов.

Схема устройства размножителя нейтронов с пультом управления его работой показаны на рис. 3.3. Нейтронный размножитель относится к классу малогабаритных ядерных реакторов. Реакция деления ядерного горючего в таких системах и поддержание необходимого уровня потока нейтронов возможны только с помощью внешнего нейтронного источника. В качестве такого источника в рассматриваемой установке служит плутоний-238—бериллиевый препарат. Большой период полураспада используемого изотопа ($T=86,9$ года) позволяет поддерживать в активной зоне стабильный поток нейтронов в течение длительного времени его эксплуатации. Источник располагается в центральном канале размножителя. В рабочем состоянии источник размещается в центре активной зоны. Для прекращения работы размножителя источник с помощью сервопривода переводится в нижнее положение (в боросодержащий парафин). В области активной зоны

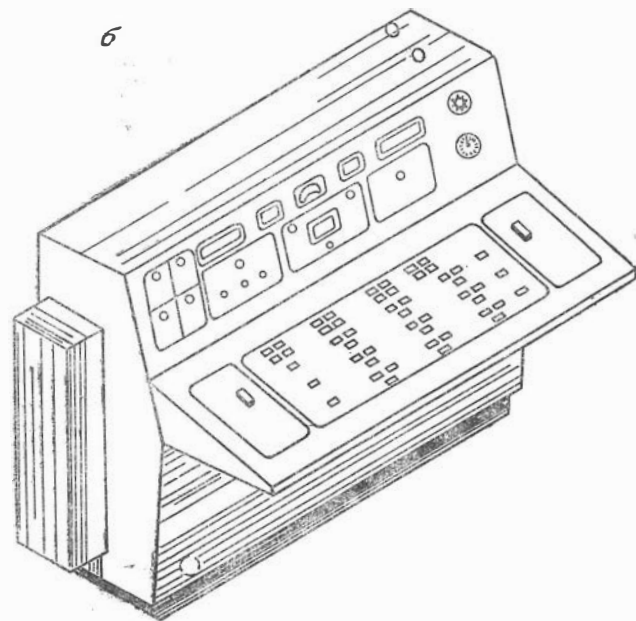
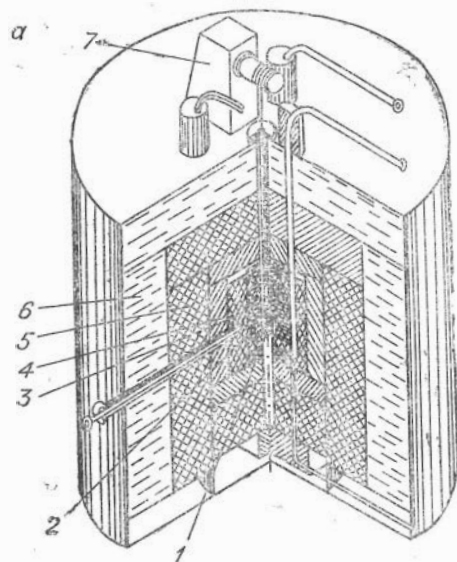


Рис. 33. Схема устройства нейтронного размножителя типа ПС-1 (а) и пульта управления его работой (б):

1 — радиоизотопный источник нейтронов с выходом $2,3 \cdot 10^3$ нейтр/с; 2 — активная зона; 3 — комбинированный отражатель нейтронов; 4 — свинцовая защита; 5 — борсодержащий парафин; 6 — водная защита; 7 — сервопривод.

при этом располагается поглощающий стержень из кадмия или бора.

Активная зона собирается из отдельных дисков, состоящих из порошкообразной двуокиси урана, равномерно распределенного в полиэтилене и обогащенного до 36% изотопом уран-235. Вокруг этой зоны располагается комбинированный отражатель нейтронов, собранный из полиэтиленграфитовых стержней и дисков. В этой зоне располагаются три вертикальных и один горизонтальный каналы, предназначенные для размещения образцов. Помимо этого в размножителе имеются еще два дополнительных вертикальных канала. Эти каналы предназначены для размещения в них ионизационных камер. С их помощью осуществляется контроль за потоками нейтронов в размножителе.

Биологическая защита размножителя состоит из отдельных разъемных цилиндрических и дисковых блоков из свинца, борсодержащего парафина и воды.

Наличие активной зоны в установке позволяет примерно в 1000 раз повышать поток нейтронов от помещенного в замедлитель радионуклидного источника нейтронов. Поток тепловых нейтронов в каналах равен $\sim 1,2 \cdot 10^7$ нейтр/см²·с. Потоки быстрых нейтронов в таких установках примерно в 3 раза выше потоков тепловых нейтронов.

Рассматриваемая установка «Размножитель-1» предназначена для размещения в стационарной лаборатории. Размножители типа СО-1 и НР-1 рассчитаны для установки в кузове автомобиля. Перед перевозкой таких размножителей вода сливалась, а по прибытии на место работ вновь заливалась.

Аналогичного рода установки созданы в США и Канаде. Однако нейтроны в них получались исключительно благодаря использованию больших количеств радионуклидных препаратов. Так, активная зона в установке, созданной в США, состоит из изотопа кюрий-242 ($T=163$ дня) активностью 4000 кюри, смешанного с бериллием. Эта установка позволяет получать потоки быстрых нейтронов величиной $9 \cdot 10^7$ нейтр/см²·с. Активная зона в установке, созданной в Канаде, состоит из изотопа сурьма-124 ($T=60$ дней) активностью 6000 кюри, смешанного с бериллием. В установке можно было получать потоки тепловых нейтронов $2 \cdot 10^8$ нейтр/см²·с. В первой из этих установок нейтроны получаются путем реакции (α, n), а во второй — путем реакции (γ, n). Обе установки обладают существенным недостатком по сравнению с РС-1, а именно: использование в них короткоживущих изотопов приводит к тому, что со временем количество радиоактивных изотопов в активной зоне уменьшается. Соответственно падает и выход нейтронов. Установку РС-1 с этих позиций можно считать практически вечной.

На установке «Размножитель-1» можно определять порядка 40 химических элементов с порогом чувствительности от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-2}\%$.

§ 4. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРОБ

Как уже отмечалось, первый ядерный (атомный) реактор был разработан в США под руководством Э. Ферми в декабре 1942 г. В СССР аналогичные исследования проводились группой ученых под руководством И. В. Курчатова, и первый ядерный реактор в нашей стране был запущен в декабре 1946 г. К настоящему времени созданы реакторы самых разнообразных типов. Ядерные реакторы — это критические системы. Во время работы в них протекает самоподдерживающаяся управляемая реакция. На рис. 3.4 дано схематическое устройство простейшего урано-графитового реактора. Реактор начинает действовать после извлечения из него регулирующих стержней, изготовленных из бора или кадмия. Экспериментальные каналы этого реактора предназначены для вывода пучков нейтронов наружу. Для облучения образцов в нем имеются специальные каналы внутри активной зоны. Канал с пневмопочтой предназначен для исследований с короткоживущими изотопами.

Потоки нейтронов в реакторах в зависимости от их типа могут иметь различные значения. В маломощных реакторах создаются потоки тепловых и быстрых нейтронов до 10^{10} — 10^{11} нейтр/см²·с, а в наиболее мощных до 10^{12} ÷ 10^{15} нейтр/см²·с.

Для активационного анализа геологических образцов в СССР разработан специальный ядерный реактор РГ-1 на двуокиси урана, обогащенного на 10% ураном-235. Реактор снабжен 11 каналами, два из которых оснащены пневмопочтой. Один из этих каналов имеет кадмиевый экран и обеспечивает возможность активации надтепловыми нейтронами. Пневмопочта позволяет со скоростью до 10 м/с транспортировать образцы весом до 50 г. В тепловых каналах обеспечиваются потоки от $2 \cdot 10^{10}$ до $9,3 \cdot 10^{10}$ нейтр/см²·с. Для размещения ядерного реактора спроектировано специальное помещение.

Весьма интенсивные потоки нейтронов можно получать в импульсных реакторах ИИН-3, ИГР и др. Реактор ИИН-3 работает как в стационарном, так и в импульсном режиме (рис. 3.5). Во внутреннюю цилиндрическую полость корпуса заливается 23 л уранил-сульфата. Уран в этой активной зоне обогащен до 90% ураном-235. Пусковой и регулирующие стер-

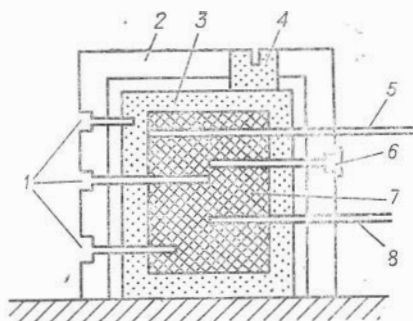


Рис. 3.4. Схематический разрез урано-графитового реактора:

1 — экспериментальные каналы; 2 — защита; 3 — графитовый отражатель; 4 — тепловая колонна; 5 — регулирующий стержень; 6 — закрытый канал для облучения образцов; 7 — урано-графитовая решетка; 8 — канал с пневмопочтой.

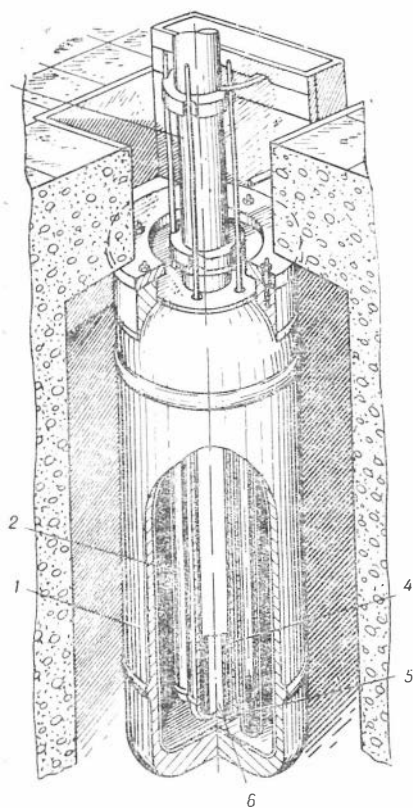


Рис. 3.5. Устройство ядерного реактора ИИН-3:

1 — корпус реактора с внутренним диаметром 39,2 см; 2 — каналы поглощающих стержней (4 шт.); 3 — цилиндр пневмопривода; 4 — цилиндрический пусковой стержень с внешним диаметром 9,6 см; 5 — регулирующие стержни (4 шт.); 6 — центральный экспериментальный канал диаметром 7,5 см.

жни выполнены из карбида бора. В рабочий режим реактор вводится путем быстрого извлечения пускового стержня из активной зоны с помощью пневматического привода. При этом жидкость как бы вскипает и уходит за пределы рабочей зоны. Если после вспышки в реактор не вводить регулирующих стержней (с помощью электромеханических приводов), то он работает в стационарном режиме. В этом случае в экспериментальном канале создается плотность потока $1 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·с, а на поверхности корпуса — $2 \cdot 10^{11}$ нейтр/см²·с. При работе реактора в импульсном режиме в центральном канале создается плотность потока $\sim 8 \cdot 10^{14}$ нейтр/см²·с, а на поверхности корпуса — $1,5 \cdot 10^{14}$.

Рассматриваемые реакторы выгодно эксплуатировать в импульсных режимах при активации короткоживущих изотопов. Так, при облучении проб на реакторе ИГР, создающем плотность потока $1 \cdot 10^{18}$ нейтр/см²·с, в случае образования изотопов с периодом полураспада ~ 1 с их активность повышается в 35 раз по сравнению с облучением в реакторе со стационарным режимом.

С помощью излучения ядерных реакторов на тепловых нейтронах можно активировать и вести анализ с большим порогом чувствительности подавляющего числа химических элементов периодической системы. Из 84 стабильных элементов и двух радиоактивных с большим периодом полураспада (уран и торий) по активации тепловыми нейтронами можно определять 74. Эта методика неблагоприятна для определения 10 самых легких элементов — водорода, гелия, лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода, фтора и неона. Восемь из этих элементов имеют весьма низкие сечения захвата тепловых нейтронов (менее 1 мбарна), кроме бора и лития. Часть из них имеет очень короткие (кислород, фтор, азот, неон, бор), а часть очень большие

пульсных реакторов типа ИИН с потоками 10^{14} нейтр/см² в импульсе. С его помощью можно определять в породе целый ряд химических элементов с порогом чувствительности от 10^{-8} до $1 \cdot 10^{-4}\%$.

Ядерные реакторы используются не только для активации ядер атомов химических элементов потоками нейтронов, но и вторичными частицами, которые образуются в ядерных реакциях,— (n, α) , (n, p) , (n, d) , (n, t) и др. Под действием возникающих при этом заряженных частиц могут возникать различные ядерные реакции, приводящие к образованию радиоактивных изотопов. Измеряя их наведенную активность, можно анализировать разнообразные химические элементы и их изотопы. В последние годы все больше внимания уделяется изучению содержания разнообразных изотопов в геологических объектах. Решение этой проблемы применительно к определенным химическим элементам и их соединениям позволит, по мнению геологов, по-новому подойти к вопросам происхождения различных месторождений полезных ископаемых и т. п.

§ 5. ВОЗБУЖДЕНИЕ ЯДЕР АТОМОВ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОРЕННЫХ ЗАЛЕГАНИЯХ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД

Преимущество определения химических элементов непосредственно на месте залегания пород бесспорно. Не удивительно, что рассматриваемый метод вначале применялся для изучения разрезов скважин (1953 г.) и только через четыре года его начали использовать для анализа образцов. В последнее время этим методом определяют некоторые химические элементы на плоской поверхности пород — при пешеходных и автомобильных исследованиях.

Методика изучения разреза скважин по наведенной активности возникающих изотопов получила название нейтронного активационного каротажа. Изотопы с малыми периодами полураспада (несколько минут) при этом могут определяться в процессе движения скважинного прибора. Изотопы с более высокими периодами полураспада определяются только при остановке прибора — точечные или дискретные замеры. Для устранения влияния на показания детектора нейтронного гамма-излучения источник нейтронов с выходом около $1 \cdot 10^7$ нейтр/с располагается на расстоянии 1,5—2 м, а иногда и 3—4 м от детектора.

К настоящему времени с помощью рассматриваемого метода ведется определение в породах и рудах фтора, алюминия, кремния, марганца и меди.

Содержание фтора в породах определяется по активации быстрыми нейтронами. При регистрации с помощью сцинтилляционных счетчиков гамма-квантов с энергией от 2,5÷3 МэВ и выше можно практически избавиться от влияния всех мешающих излучений и надежно определять содержание фтора в породах. Определение его по разрезам скважин ведется на скоро-

стях 400÷500 м/ч с порогом чувствительности 0,2% и абсолютной погрешностью 0,04÷0,07%. При автомобильной съемке в процессе движения прибора (3—4 км/ч) достигнут порог чувствительности 0,08% фтора, а при остановке прибора — 0,03%. При пешеходных измерениях фтор определяют начиная с 0,05%.

По методике активации фтора в породах выявляются флюориты (CaF_2) и апатиты [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{Cl})$]. Кроме того, по наличию корреляционной связи фтора с фосфором в породах определяются фосфориты [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$].

Специалисты подсчитали, что внедрение рассматриваемого метода для выявления флюоритов по разрезам скважин дает годовую экономию около 175 тыс. руб. на один прибор.

Под действием быстрых нейтронов на кремний и тепловых нейтронов на алюминий образуется один и тот же радиоактивный изотоп алюминий-28. Для отдельного определения этих элементов породы рекомендуется облучать с помощью двух типов нейтронных источников: полоний-борного ($E_{\text{ср}}=2,7 \text{ МэВ}$) и полоний- или плутоний-бериллиевого ($E_{\text{ср}}=5 \text{ МэВ}$). При облучении пород нейтронами от полоний-борного источника активируются только ядра атомов алюминия. Таким образом и устанавливают содержание этого элемента в породах. Кремний при этом можно определять только по разностной методике при работе с двумя источниками с различной энергией быстрых нейтронов. Определение алюминия и кремния в скважинах ведут на скоростях 30÷70 м/ч с порогом чувствительности, в среднем равным соответственно 5 и 15%.

Марганец в породах определяется только при точечных замерах. Это связано с большим периодом полураспада образующего изотопа марганца-56 ($T=2,56 \text{ ч}$). Содержание марганца в породах в зависимости от их вещественного состава можно определять с порогом чувствительности 0,01—0,1%.

Для определения меди в горных породах по разрезам скважин применяется методика точечных измерений по короткоживущему изотопу — медь-66 ($T=5,1 \text{ мин}$) и по долгоживущему изотопу медь-64 ($T=12,8 \text{ ч}$). Содержание меди в рудах невелико (0, n — $n\%$), поэтому ее определению в породах мешает целый ряд элементов. При измерениях по короткоживущему изотопу мешает излучение алюминия-28 ($T=2,3 \text{ мин}$) и марганца-56 ($T=2,56 \text{ ч}$), а при определениях по долгоживущему изотопу — марганец-56 и натрий-24 ($T=15 \text{ ч}$). В случае небольших содержаний в рудах алюминия и кремния (в эквивалентах алюминия) и марганца рекомендуется применять методику, основанную на короткоживущем изотопе. В случае высоких концентраций этих мешающих элементов рекомендуется пользоваться методикой, основанной на долгоживущем изотопе.

Определение меди по короткоживущему изотопу ведут с порогом чувствительности 0,5%, а по долгоживущему — с порогом чувствительности 0,2%. С таким же порогом чувствительности определяется содержание меди на стенках горных выработок.

Методикой нейтронного активационного каротажа пользовались также для отбивки водонефтяного контакта по активации хлора и натрия, содержащихся в минерализованных пластовых водах. Однако после разработки скважинных генераторов нейтронов (см. гл. 16) и их внедрения в производство рассматриваемая методика утратила свое значение.

4. ЯДЕРНЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

§ 1. ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Плотность, как известно, является одним из важнейших физических параметров, характеризующих горные породы и грунты, слагающие Землю и другие небесные тела.

Средняя плотность Земли равна $5,52 \text{ г/см}^3$, а верхнего слоя — земной коры толщиной 30 км — $2,8 \text{ г/см}^3$. Средняя плотность Луны оценена в $3,33 \text{ г/см}^3$. О плотности отдельных пород лунной поверхности до последнего времени ничего не было известно. Между тем плотность земных пород, выходящих на поверхность, меняется в широких пределах: от $1,5—1,8 \text{ г/см}^3$ (грунты) до $2,7—3,2 \text{ г/см}^3$ (граниты, диабазы и др.). Плотность рудных тел может достигать значительно больших величин: около 5 г/см^3 для руд железа и $7,5 \text{ г/см}^3$ для руд свинца и т. д.

Данные о плотностях различных образований горных пород необходимы для изучения строения Земли и отдельных ее оболочек, а также для поисков и разведки различных полезных ископаемых. Данные о плотности грунтов необходимы для решения инженерно-геологических задач, связанных с сооружением разнообразных строительных объектов и т. д.

Классическим способом определения плотностей горных пород и грунтов является весовой. С этой целью берут образец породы, определяют его вес P и объем V . Отношение этих величин отвечает объемному весу (объемной плотности) образца:

$$\rho = P/V \text{ г/см}^3.$$

Для определения плотностей горных пород созданы специальные весовые плотномеры — денситометры. С помощью этих приборов образцы пород взвешивают в воздухе и воде, и таким образом определяют плотность. Этот метод в геофизике получил название гидростатического взвешивания. Пористые породы при определении плотности на денситометре необходимо парафинить, что усложняет методику измерений.

Плотность грунтов при этом определяют с помощью так называемого режущего кольца. Кольцо с известным объемом вдавливается в грунт и извлекается из него совместно с застряв-

шим грунтом. С помощью режущего приспособления грунт выравнивается с краями кольца. Затем после взвешивания образца элементарно определяют его плотность. Однако операции по вдавливанию кольца в грунт и выравниванию застрявшего в кольце грунта приводят к его деформации. Это, в свою очередь, приводит к неточностям определения плотности грунта.

§ 2. ЯДЕРНЫЕ «ВЕСЫ»

Существенно упростить методику определения плотностей грунтов и горных пород удалось лишь с помощью ядерных излучений. Наиболее подходящими для этих целей оказались гамма-лучи, способные проникать через значительные толщи вещества. Гамма-лучи при воздействии на вещество и, в частности, на горные породы взаимодействуют с их электронами. Если энергию гамма-лучей выбрать в диапазоне 0,2—1,5 МэВ, то ослабление их в веществе происходит в основном благодаря процессу рассеяния. Явление рассеяния гамма-лучей открыто Комптоном и в честь его имени получило название комптон-эффекта, или комптоновского рассеяния. Ослабление гамма-лучей в веществе путем этого эффекта пропорционально количеству электронов в единицу объема вещества, которое, в свою очередь, пропорционально плотности вещества. Таким образом, облучая породы потоком гамма-лучей и регистрируя рассеянное или прошедшее через породу излучение, можно судить о ее плотности.

На этом явлении основан целый ряд ядерных «весов», позволяющих определять плотность горных пород, т. е. как бы взвешивать их, причем не только по образцам в лаборатории, но и непосредственно в поле на месте залегания коренных выходов горных пород без отбора образцов. В качестве источников гамма-излучения при этом используют радиоизотопные источники кобальт-60 и цезий-137, имеющие периоды полураспада T , равные соответственно 5,3 года и 30 годам. Кобальтовый источник испускает два гамма-кванта с энергией 1,17 и 1,33 МэВ, а цезиевый источник — гамма-кванты с энергией 0,661 МэВ. При взаимодействии с электронами вещества гамма-кванты испытывают рассеяние. С каждым актом рассеяния энергия гамма-квантов уменьшается.

Для регистрации рассеянного или прошедшего через пробу излучения применяются газоразрядные счетчики Гейгера — Мюллера или сцинтилляционные.

Плотномеры, основанные на регистрации проходящего через породу преимущественно первичного излучения, получили название просвечивающих, или абсорбционных, гамма-плотномеров (ГП), а плотномеры, основанные на облучении пород потоком первичного излучения и регистрации рассеянного излучения, — гамма-гамма-плотномеров (ГГП).

Плотность отбираемых образцов пород и грунтов в основном определяют с помощью просвечивающих ГП. Схематическое устройство одной из таких установок показано на рис. 4.1.

Для облучения исследуемой пробы узким пучком гамма-лучей источник и приемник излучения помещают в свинцовые блоки с узкими цилиндрическими отверстиями (коллиматорами). Блок источника не только формирует узконаправленный пучок гамма-лучей, но и защищает оператора от действия излучения. Свинцовый блок приемника наряду с регистрацией узконаправленного потока излучения, проходящего через образец, защищает счетчик от действия на него излучения посторонних предметов, космической радиации и гамма-лучей, выходящих из образца и рассеиваемых окружающими предметами, и т. д. Узконаправленный пучок гамма-лучей в виде своеобразного «шила» пронизывает любой образец породы (толщиной не больше 10 см), не оставляя в нем следа.

Гамма-лучи, проходя через образец и частично рассеиваясь на электронах атомов, отклоняются от направления первичного пучка и не попадают в коллиматор приемника излучения. Чем больше плотность образца и его толщина в месте просвечивания, тем меньшее число гамма-лучей попадает в приемник.

Свинцовый блок с источником может перемещаться по раме с нониусной шкалой. По этой шкале с точностью до 0,1 миллиметра можно определить толщину образца, зажатого между вершинами конусообразных свинцовых блоков.

Сибирский ОКБ геофизического приборостроения Министерства геологии СССР создал

на основе этого прибора просвечивающее устройство для определения плотности образцов пород, входящее в комплект универсального плотномера УГГП-1.

Просвечивая образцы с помощью таких установок, можно определять их плотность в разных местах и в разных направлениях. Парафинирование образцов при этом отпадает. Плотность образцов с помощью описанных установок по заранее построенной градуировочной кривой можно определять с относительной погрешностью, равной 1%,

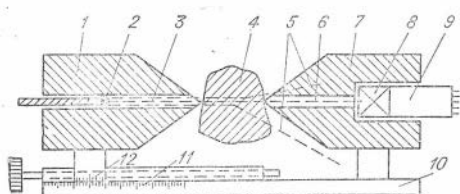


Рис. 4.1. Схематическое изображение гамма-просвечивающей установки, применяющейся для определения плотности образцов горных пород неправильной формы (разработка Института геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР):

1 — свинцовый экран источника; 2 — источник гамма-лучей; 3 — коллимационное отверстие, направляющее излучение в виде узкого пучка на образец; 4 — изучаемый образец; 5 — излучение, выходящее из пучка за счет рассеяния в образце; 6 — излучение, попадающее в приемный коллиматор; 7 — свинцовый экран приемного блока; 8 — приемный люминофор; 9 — фотозлектронный умножитель, регистрирующий световые вспышки в люминофоре; 10 — рама; 11 — шкала отсчета; 12 — нониус.

т. е. породы и руды с плотностями в диапазоне 2—4 г/см³ определяются с абсолютной погрешностью, равной $\pm 0,02 \div \pm 0,04$ г/см³. На измерение образца в одном направлении затрачивается от 2 до 3 мин.

Для определения плотностей образцов постоянной толщины, например, грунта, отобранного режущим кольцом, используют более простые установки (без конусов и нониусных шкал, с жестко закрепленными блоками источника и приемника). Такие установки при изучении грунтов с постоянной плотностью можно использовать для определения содержания в них влаги.

§ 4. ГАММА-ЛУЧЕВОЕ «ВЗВЕШИВАНИЕ» ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД БЕЗ ОТБОРА ОБРАЗЦОВ

Рассмотренная методика определения плотностей горных пород не лишена недостатков. При работе по ней необходимо отбирать образцы и доставлять их в лабораторию. С момента отбора до момента измерения образца проходит много времени.

Между тем высокопроникающая способность гамма-лучей позволяет более оперативно решать задачу определения плотностей грунтов и горных пород непосредственно на месте их залегания без отбора образцов. Для проведения таких исследований разработаны специальные гамма-просвечивающие плотномеры.

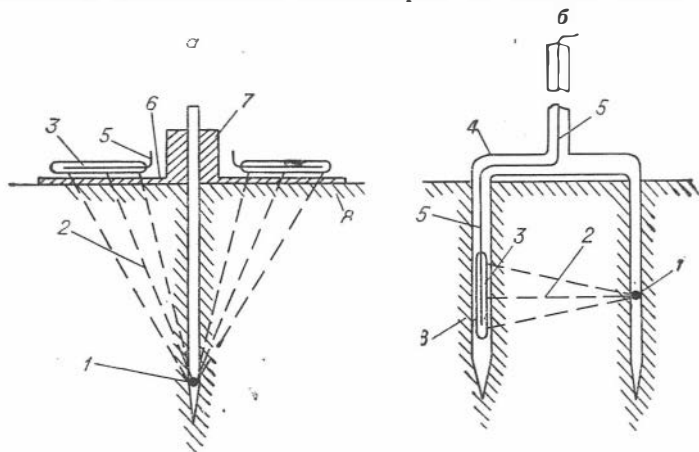


Рис. 4.2. Схематическое изображение полевых установок для определения плотности почв, грунтовых и других различных сыпучих сред; *а* — установка с одним погруженным источником излучения (по И. Вендту); *б* — установка с погруженным источником и приемником излучения («радиоактивная вилка», по К. Е. Кромптону).

1 — источник гамма-лучей; 2 — первичный пучок гамма-лучей, идущих в сторону приемников; 3 — газонаполненный приемник гамма-лучей; 4 — основание вилки; 5 — кабель, соединяющий приемники с пультом радиометра; 6 — плита, устанавливаемая на грунт; 7 — направляющая для установки в грунт зонда с радиоактивным источником; 8 — среда, плотность которой определяется.

Плотность рыхлых образований определяется путем введения в исследуемую среду штыря с одним источником или одновременного введения в среду штыря с источником и зонда с приемником (рис. 4.2). Одноштыревые плотномеры на поверхности могут иметь вместо двух приемников один. Штырь с источником при этом вдавливается в грунт не только под прямым углом к исследуемой среде, но и наклонно. Во всех случаях штырь вводится в грунт с помощью специального направляющего устройства — кондуктора.

Плотность грунтов и почв при помощи гамма-просвечивающих «весов» можно определять на глубине до 1,5 м с относительной погрешностью $1 \div 2\%$ в течение 2—3 мин. При исследовании грунтов с неменяющейся плотностью эти приборы применяются также для определения в них влаги с точностью до 2%.

К настоящему времени созданы также гамма-просвечивающие плотномеры для определения плотности жидкости в стволе буровой скважины. Нефть из глубокозалегающих горных пород извлекают через буровые скважины. В стволе этих скважин наряду с нефтью находится и вода, попадающая из водоносных пластов или специально закачиваемая в скважину в процессе ее бурения. Различие в величинах плотностей нефти и воды в $0,2 \text{ г/см}^3$ четко фиксируется с помощью таких приборов.

§ 5. «ВЗВЕШИВАНИЕ» ГОРНЫХ ПОРОД В КОРЕННОМ ЗАЛЕГАНИИ РАССЕЯННЫМ ПОТОКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

При определении плотностей горных пород в коренном залегании наибольшее применение находят ГГП, основанные на регистрации рассеянного излучения. На этом принципе созданы приставные, зондовые и скважинные плотномеры. Для того чтобы защитить приемник от первичного излучения, между ним и источником располагают достаточный слой свинца или вольфрама.

Градуировочный график для ГГП в виде кривой представлен на рис. 4.3. С увеличением плотности изучаемой среды скорость счета регистрируемого излучения вначале растет, а затем, достигнув максимума, спадает. Левая, восходящая, часть графика обычно используется при определении сред с плотностью не вы-

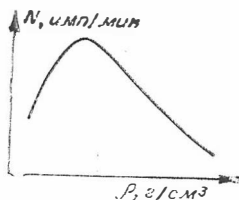


Рис. 4.3. Градуировочный график плотномеров, основанных на регистрации рассеянного гамма-излучения (ρ — плотность).

ше 2 г/см^3 , т. е. таких сред, как торф, почва и грунты. Расстояние между источником и приемником излучения (размер зонда) при этом выбирается по возможности минимальным. В связи с тем, что между источником и приемником необходимо располагать поглотитель, размер зонда не может быть выбран меньше 4—5 см при использовании вольфрамового экрана и цезиевого источника гамма-лучей. Плотность горных пород от 2 г/см^3 и выше определяют по ниспадающей ветви градуировочного графика, выбирая длину зонда свыше 10 см.

§ 6. ПРИСТАВНЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

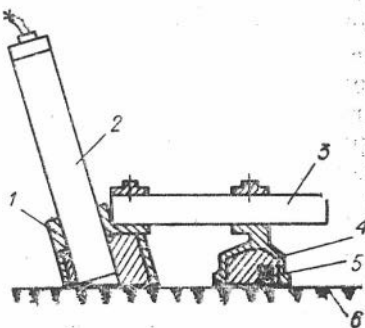
Приставные ГГП применяются для определения плотностей горных пород в месте соприкосновения прибора с исследуемой средой. Схематическое устройство датчика плотномера со сцинтилляционным счетчиком показано на рис. 4.4. На рис. 4.5 сфотографирован плотномер, входящий в комплект УГГП-1. Свинцовый блок источника направляет первичное излучение цезиевого источника в породу, защищает приемник излучения и оператора от излучения. Слой свинца у гильзы датчика необходим для дополнительной защиты приемника от прямого гамма-излучения источника. Кроме того, этот экран предохраняет приемник от излучения, распространяющегося в приповерхностном слое породы, и способствует регистрации излучения из глубоких частей породы, расположенных против приемника.

Плотность горных пород на месте залегания с помощью приставного плотномера можно определять с относительной погрешностью $1 \div 1,5\%$.

Для определения плотностей пород в движении по определенным маршрутам созданы автомобильные плотномеры. По устройству датчика они аналогичны приставным плотномерам. Блоки с источником и приемником в мобильных плотномерах располагаются на специальных салазках, транспортируемых автомобилем. Показания прибора в процессе работ записываются на спе-

Рис. 4.4. Устройство датчика приставного гамма-гамма-плотномера ПГГП-1, разработанного в Институте геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР:

1 — блок детектора (алюминиевый корпус, заполненный свинцом); 2 — гильза радиометра с детектором; 3 — рукоятка, выполняющая роль штанги, соединяющей блок источника с блоком детектора; 4 — блок источника (алюминиевый корпус, заполненный свинцом); 5 — источник гамма-квантов; 6 — поверхность исследуемой среды.



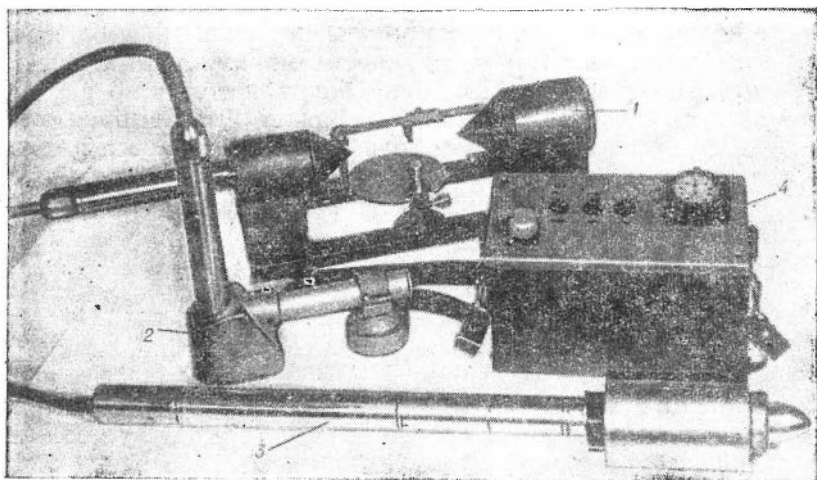


Рис. 4.5. Универсальный гамма-гамма-плотномер УГГП-1.

1 — просвечивающее устройство для определения плотностей образцов пород; 2 — приставное устройство плотномера; 3 — зондовое устройство плотномера с защитным экраном; 4 — пульт прибора.

циальную диаграммную ленту. Плотность пород с помощью таких плотномеров можно определять в процессе движения с относительной погрешностью 2—3%.

§ 7. ЛУННЫЙ ПЛОТНОМЕР

В декабре 1966 г. с помощью автоматической космической станции «Луна-13» был доставлен на поверхность Луны плотномер приставного типа с газоразрядными счетчиками. Применение в плотномере малогабаритных счетчиков излучения позволило создать весьма миниатюрный прибор (рис. 4.6) длиной 25,8 см, шириной 4,8 см и высотой 1,0 см. В нем располагался цезиевый источник активностью 1 мг·экв. радия, свинцовый разделительный экран и три группы малогабаритных газоразрядных счетчиков типа СБМ-10 М (по 5 шт. в каждой группе). Каждая группа счетчиков при этом располагалась на различных расстояниях от источника для ослабления влияния неровностей измеряемой поверхности. Радиометрическая часть прибора была выполнена на транзисторах. Прибор был проградуйрован в земных условиях на средах с плотностью от 0,16 до 2,6 г/см³.

Полученный замер по кривой соответствовал значениям плотности 0,80 и 2,15 г/см (см. рис. 4.3). Первая из этих величин принята как наиболее достоверная. Это обусловлено тем, что астрономическими, фотографическими и радиофизическими исследованиями на поверхности Луны не обнаружено плотных

пород. В последующем эти сведения подтверждены данными изучения плотности грунта, доставленного космическим аппаратом «Луна-16». Установлено, что верхний слой толщиной 5 см имеет плотность около $0,8 \text{ г/см}^3$, а средняя плотность всего доставленного образца (столбик длиной 35 см) оказалась равной $1,2 \text{ г/см}^3$. Изучение образцов пород, собранных экипажем «Аполлона-11», показало, что плотность лунной пыли равна $1,54 \div 1,66 \text{ г/см}^3$, а кристаллических и стекловидных пород — $3,1 \div 3,4 \text{ г/см}^3$.

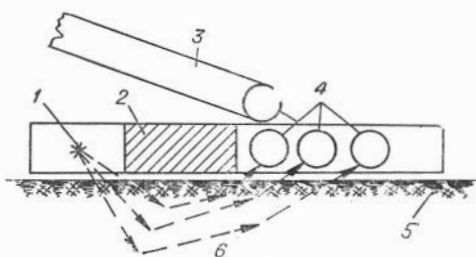


Рис. 4.6. Схематическое изображение приставного плотнометра, высаженного на лунную поверхность:

1 — источник гамма-излучения; 2 — защитный экран; 3 — механизм выноса плотнометра из приземлившегося аппарата; 4 — группы газоразрядных счетчиков; 5 — лунная поверхность пород; 6 — схематический путь гамма-лучей от источника к приемникам.

§ 8. ПЛОТНОСТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОРОД

Для определения плотностей горных пород в бурках и шпурах созданы зондовые ГПП (рис. 4.5 и 4.7). Излучение, выходящее из источника, рассеивается породой и попадает в приемник. По интенсивности этого излучения ведется определение плотностей пород в бурках или шпурах. Наиболее высокая точность измерений (1%) достигается без зазора между зондом и породой. Поэтому рассматриваемые плотнометры получили наибольшее применение при изучении рыхлых отложений: грунтов, насыпных сооружений, подводных донных отложений и т. п. В. И. Ферронский и другие для изучения этих отложений создали наземные самоходные и плавающие установки. Зондовое устройство с помощью этих установок задавливается в изучаемую среду с помощью специальной системы штанг. Схематическое устройство самоходной установки глубинного поиска СУГП-10 показано на рис. 4.8. Гидравлическая задавливающая система установлена на базовой гусеничной машине. Регистрирующая же аппаратура располагается на отдельной автомашине ГАЗ-63. С помощью такой установки зондовое устройство в породы второй и третьей категории прочности можно вдавливать со скоростью $6,25 \text{ м/мин}$.

В последнее время для этих исследований стали выпускаться новые пенетрационно-каротажные станции для наземных (типа СПК) и подводных (типа ПСПК) исследований.

В ценетрационно-каротажной станции СПК гидравлическая система смонтирована на шасси автомобиля повышенной проходимости ЗИЛ-157, а регистрирующая аппаратура — на

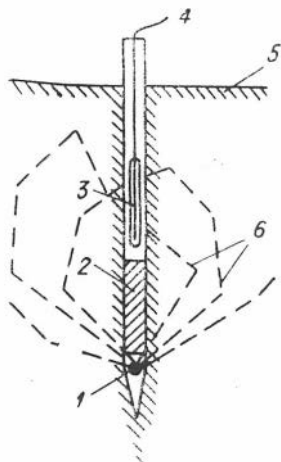


Рис. 4.7. Схематическое изображение зондового гамма-гамма-плотномера:

1 — источник гамма-лучей; 2 — свинцовый экран, защищающий приемник от первичного излучения источника; 3 — приемник гамма-лучей; 4 — кабель, соединяющий зонд с пультом радиометра; 5 — среда, плотность которой определяется; 6 — некоторые траектории гамма-квантов, идущих от источника к приемнику.

автобусе повышенной проходимости КАВЗ-663. Вдавливание зондов с помощью этой установки можно осуществлять со скоростью 3,5 или 8 м/мин.

Подводная пенетрационно-каротажная станция ПСПК смонтирована на серийно выпускаемых понтонах типа КС. Схематически эта установка показана на рис. 4.9. Основными элементами этой станции являются подводная установка, предназначенная для погружения вдавливанием зонда, навинченного на колонну пенетрационных штанг, и его извлечения; плавсредства с оснасткой для транспортировки установки, ее погружения на дно водоема и извлечения, размещения измерительной аппаратуры, пульта управления установкой и источника электроэнергии, а также размещения экипажа. Зондовые устройства с помощью такой установки можно вдавливать со скоростью 6,25 м/мин.

В 1972 г. для подобного рода исследований донных отложений спроектировано специализированное судно «Геолог-1». Оно оборудовано соответствующей аппаратурой и может быть использовано не только для инженерно-геологических исследований, но и для поисков и разведки полезных ископаемых в зоне шельфа.

Плотность исследуемых отложений пород с помощью рассмотренных плотномеров на зондах размером 40 см можно определять с относительной погрешностью $1 \div 1,5\%$.

Пенетрационные установки в своих комплектах, кроме плотностных зондов, имеют и другие ядерно-геофизические зонды для комплексных исследований, которые будут рассмотрены ниже. Помимо ядерно-геофизических зондов в комплексе этих установок имеются зонды и для изучения пород по их механическим и электрическим свойствам. Совместное использование всех этих зондов позволяет всесторонне судить о различных физических свойствах изучаемых отложений и оперативно принимать необходимые решения.

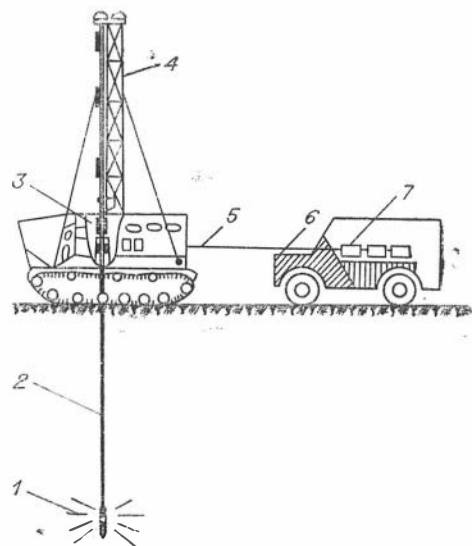


Рис. 4.8. Схема установки глубинного поиска СУГП-10:

1 — глубинный измерительный зонд; 2 — штанга с каналом связи; 3 — гидравлическое устройство для погружения штанг вдавливанием; 4 — мачта для поддержания штанг в рабочем положении; 5 — линия связи в наземной регистрирующей аппаратуре; 6 — аппаратная станция; 7 — наземный пульт с регистрирующей аппаратурой.

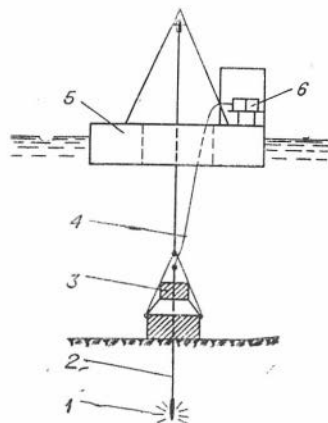


Рис. 4.9. Схема подводной пенетрационно-каротажной станции ПСПК:

1 — измерительный зонд с источником; 2 — колонна пенетрационных штанг; 3 — подводная установка; 4 — кабель; 5 — плавсредство с оснасткой; 6 — пульт управления с регистрирующей аппаратурой.

§ 9. ПЛОТНОМЕРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БУРОВЫХ СКВАЖИН

При изучении буровых скважин между скважинным прибором и породой всегда имеется зазор. Плотность пород при этом можно определять с помощью приборов, прижимаемых к стенке скважины пружинами, и окружать экранами со стороны удаленных от прибора стенок скважины. Стандартные приборы такого типа, какой показан на рис. 4.8, стали снабжать при этом специальными кожухами со свинцовыми наполнителями и окнами против источника и детектора со стороны, прижимаемой к стенке скважины. Удерживание приборов рабочей стороной у стенки скважины осуществляется также с помощью прижимных пружин, крепящихся на кожухе или корпусе прибора. В. А. Арцыбашев такой прибор создал на основе широко распространенного радиометра СРП-2к. Для повышения точности измерений в радиосхему прибора была введена компенсационная схема. Плотность пород с помощью такого прибора можно определить с относительной погрешностью $1 \div 1,5\%$.

§ 10. ПЛОТНОМЕРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КАВЕРНОЗНЫХ СКВАЖИН

Стенки скважин не являются идеально ровными. Это связано с рядом факторов. Горные породы имеют различную крепость. Бурильные трубы в процессе проходки трутся о породы и разрушают различные породы в разной степени. Кроме того, в процессе бурения скважина заполняется буровой жидкостью —

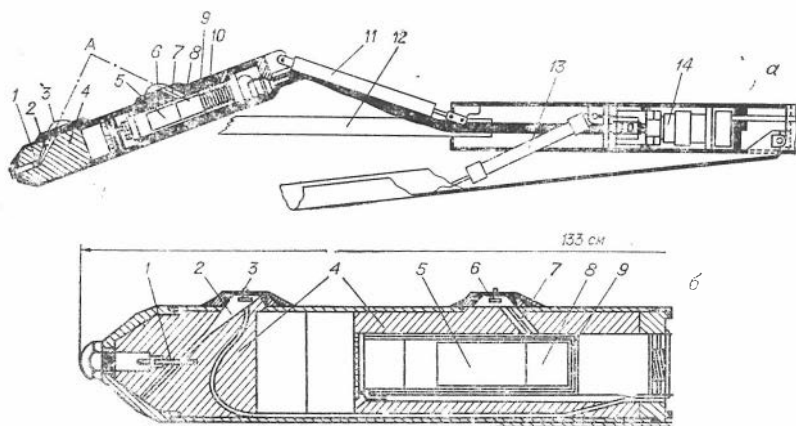


Рис. 4.10. Устройство однолучевого глубинного прибора (а) и его выносного блока (б):

1 — источник; 2 — коллимагор; 3 — источникный тензорный датчик; 4 — экран из вольфрама; 5 — фотоумножитель; 6 — детекторный тензорный датчик; 7 — коллимагор люминофора; 8 — люминофор; 9 — сосуд Дьюара; 10 — система охлаждения; 11 — стягивающая пружина; 12 — поддерживающая рейка; 13 — гидравлический цилиндр; 14 — управление гидравлической системой.

для выноса на поверхность частиц разбуренной породы. Эта жидкость также способна размывать некоторые типы горных пород (особенно глинистые). В результате этих и других факторов в скважинах образуются каверны. На показания плотномеров при этом будет оказывать действие не только порода, но и буровой раствор, заполняющий каверны.

Для исследования таких скважин геофизики создают специальные приборы. Так, Дж. Р. Херст и Р. К. Карлсон в США для этих целей создали прибор, основанный на однолучевом принципе (рис. 4.10). С помощью гидравлической системы выносное устройство длиной 133 см с источником и сцинтилляционным счетчиком рабочей стороной прижимается к породе и регистрирует однократно рассеянное излучение из области точки А (см. рис. 4.10). В месте выхода луча из коллиматора источника и в месте входа рассеянного луча в коллиматор приемника расположены тензорные датчики, фиксирующие микрокавернозность горных пород в этих точках.

Плотность горных пород с помощью этого прибора можно определять с относительной погрешностью, не выходящей за пределы 2,5%. Однако использование в приборе источников высокой активности требует специальных мероприятий по технике радиационной безопасности.

§ 11. ДВУХЗОНДОВЫЕ СКВАЖИННЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ

В процессе бурения скважин на глинистом буровом растворе на их стенках образуется глинистая корка, искажающая результаты каротажа плотности. Толщина глинистой корки определяется с помощью каверномеров. Тем не менее при определении плотностей горных пород в таких скважинах необходимо результаты измерений исправлять из-за влияния глинистой корки. Для исследования скважин в СССР и за рубежом созданы специальные двухзондовые плотмеры. В глубинном приборе при этом располагаются два приемника рассеянного гамма-излучения. Один приемник располагается на малом расстоянии от источника (порядка 15 см), другой — на большом (порядка 40 см). Источник и приемники излучения располагаются эксцентрично около корпуса прибора таким образом, чтобы регистрировать рассеянное излучение со стороны стенки скважин, к которой прижат прибор. Со стороны удаленных стенок скважины источник и приемник излучения заэкранированы свинцом или вольфрамом, т. е. примерно так же, как и в рассмотренном выше приборе, основанном на однолучевом принципе. Прижимная пружина при этом может выполнять роль каверномера.

Ближний к источнику приемник учитывает влияние глинистой корки. Получаемый результат используется для введения поправки в показания дальнего приемника. Обработка показаний обоих приемников может осуществляться либо с помощью спе-

циальных номограмм, либо автоматически с помощью счетно-решающих систем, которыми оборудуется аппаратура.

При толщине глинистой корки не свыше 13 мм плотность горных пород в нефтепромысловых скважинах с помощью таких двухзондовых приборов можно определять с относительной погрешностью 1—2%.

Аналогичные приборы созданы и для изучения рудных скважин. Так, В. А. Арцыбашев показал, что с помощью двухзондовых плотномеров можно исключать промежуточную зону между прибором и породой толщиной до 20 мм.

В США для определения плотностей пород в скважинах, бурящихся с целью поисков и разведки радиоактивных руд, созданы приборы, позволяющие исключать влияние гамма-излучения этих руд на результаты определения их плотности. С помощью этих приборов вначале проводят измерения излучения при одном положении приемника в приборе. Затем, не вынимая прибор из скважины, вновь опускают его на забой или на необходимую глубину. С помощью моторчика, имеющегося в приборе, меняют размер зонда и производят следующие измерения. Естественная радиоактивность горных пород одинаково воздействовала на результаты первого и второго измерений. При вычитании из одного замера другого влияние этой радиоактивности исключается. Полученный результат зависит лишь от изменения плотности пород. Операции по вычитанию замеров осуществляются автоматически с помощью счетно-решающих систем, имеющихся в наземном пульте прибора.

§ 12. ДВУХЛУЧЕВЫЕ ЛОКАТОРЫ ПЛОТНОСТИ

Несмотря на наличие целого ряда ядерных плотномеров, привлекающихся для изучения буровых скважин, данная проблема по-прежнему волнует исследователей и практиков. Это связано с тем, что все существующие скважинные плотномеры на своем корпусе имеют различные прижимные устройства, доставляющие много хлопот производственникам. Пружины в скважине могут заклинить, что приводит к обрыву кабеля и к аварийному состоянию на скважине. Извлечь из скважины застрявший прибор не просто, особенно из нефтяных и газовых скважин, бурящихся на большие глубины, на 2—4 км. Поэтому одной из важных задач, стоящих перед специалистами в области ядерной геофизики, является разработка бесприжимных плотномеров.

В Институте геологии и геофизики (ИГиГ) СО АН СССР ведутся исследования по созданию одного из таких приборов с одним источником и двумя детекторами, расположенными в конусообразных кольцевых коллиматорах (рис. 4.11). Регистрация однократно рассеянного гамма-излучения позволяет по величине отношения скоростей счета обоих детекторов получать информацию о плотности пород из кольцевого слоя вокруг скважины,

ограниченного в рассматриваемой плоскости треугольниками ABC и $A'B'C'$.

Для измерений однократного рассеянного излучения в приборе необходимо устанавливать источники весьма высокой активности. Поэтому на практике рассматриваемую методику проще всего реализовать с помощью скважинного генератора гамма-лучей. Включение таких генераторов на заданной глубине в скважине совершенно безопасно для обслуживающего персонала. Разработкой таких приборов в настоящее время занимаются сотрудники ВНИИ ядерной геофизики и геохимии (г. Москва).

В ИГиГ СО АН СССР для работы с источниками гамма-лучей приемлемой активности пошли по пути регистрации многократно рассеянного излучения. Глубинность метода при этом понижается, и на показании прибора значительное влияние начинает оказывать среда, заполняющая скважину.

Тем не менее в результате проведенных исследований было установлено, что и при регистрации многократно рассеянного излучения можно ослабить влияние скважины. Так, с помощью приборов диаметром 40 мм можно исследовать скважины диаметром 50—60 мм, а с помощью прибора диаметром 120 мм — скважины диаметром от 140 до 190 мм и т. д. Плотность пород в рудных и угольных скважинах при этом можно определять с погрешностью 2—3%, а при изучении нефтяных скважин — с погрешностью 3—5%.

Прибор в процессе исследования скважины всегда скользит по ее стенке. Это обусловлено еще и тем, что скважина практически всегда имеет некоторый наклон от вертикали. В связи с этим геофизиков давно занимает проблема создания бесприжимных приборов, которые получали бы информацию только со стороны стенки прибора, контактирующей с породой. На первом этапе для этих целей применялись приборы с эксцентричными экранами, в которых располагались источник излучения и детектор. В наклонных скважинах под действием силы тяжести эксцентричный экран всегда удерживает источник и детектор у

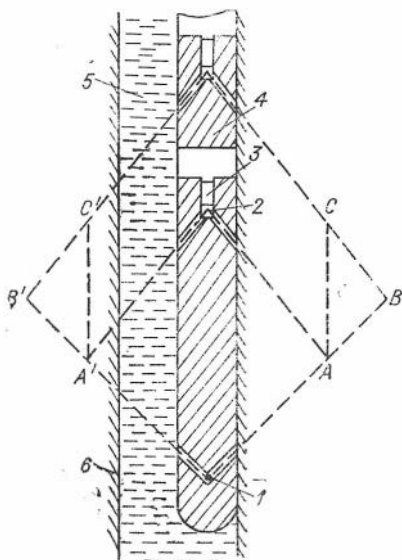


Рис. 4.11. Схема двухлучевого плотномера:

1 — источник гамма-лучей, расположенный в коллиматоре; 2 — приемники гамма-лучей, расположенные в коллиматорах; 3 — фотоэлектронные умножители; 4 — свинцовые или вольфрамовые экраны; 5 — заливочная скважина; 6 — порода; ABC и $A'B'C'$ — участки породы, в которых определяется ее плотность.

стенки породы. В настоящее время внимание исследователей обращено к созданию приборов со следящими системами, обеспечивающими получение информации из породы со стороны стенки скважины, по которой скользит прибор.

5. ЛУЧИ ВМЕСТО ПЕЧИ

§ 1. БЕТА-ЛУЧЕВЫЕ ЗОЛОМЕРЫ

Качество ископаемых углей определяется содержанием в них негорючих минеральных примесей, называемых зольными. Содержание в углях негорючих примесей определяется по весу золы, оставшейся при сжигании проб углей в специальных печах. Эта классическая методика определения зольных примесей в углях довольно трудоемка. Поэтому в последнее время для анализа проб углей на зольность стали применять ядерные методы. Для решения этой задачи наиболее широко применяется бета-лучевой метод, основанный на облучении

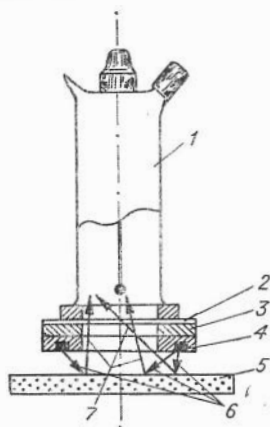


Рис. 5.1. Схематическое устройство головки бета-лучевого золомера.

1 — торцовый бета-счетчик;
2 — алюминиевый фильтр;
3 — прокладка из свинца, не пропускающая тормозное излучение из источника в рабочую область детектора;
4 — прелат бета-излучения;
5 — проба; 6 — первичное излучение, выходящее из источника; 7 — отраженное излучение, идущее в сторону окна торцевого счетчика.

порошковой пробы угля бета-лучами и регистрации прибором отраженных от нее лучей. При этом установлено: чем больше в угле минеральных примесей, тем сильнее они будут отражать бета-лучи. На использовании эффекта отражения бета-лучей создан ряд приборов. В качестве приемников отраженного излучения в них используют различные детекторы: ионизационные камеры, торцовые газоразрядные и сцинтилляционные счетчики.

На рис. 5.1 в качестве примера приведено устройство головки одного из бета-лучевых золомеров, созданного в Институте геологии и геофизики СО АН СССР. Общий вид прибора показан на рис. 5.2. С помощью таких приборов анализ проб проще всего вести для углей, компоненты зольных примесей которых не сильно отличаются по атомному номеру. К таким примесям следует отнести глинозем Al_2O_3 и кремнезем SiO_2 . Алюминий и кремний, входящие в эти окислы, по атомному номеру отличаются на единицу. Зольность таких углей

по рассмотренной методике можно определять в течении 2—3 мин с абсолютной погрешностью 0,2—0,3%.

Сложнее дело обстоит с анализом углей, зольные примеси которых более разнородны. Так, в некоторых углях имеются соединения железа, кальция и серы, атомные номера которых значительно отличаются от алюминия и кремния. Для анализа таких углей в СССР А. А. Голевым разработана методика с двумя ионизационными камерами, работа-

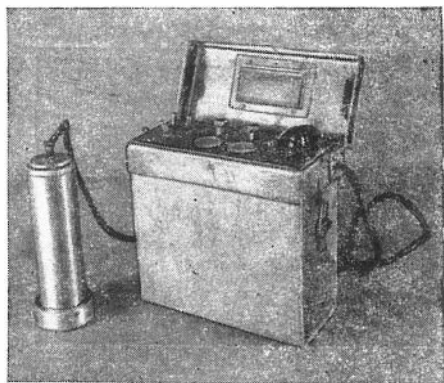


Рис. 5.2. Внешний вид бета-лучевого анализатора.

ющими по компенсационному принципу. По этой методике проба для анализа делится на две части. Каждая из частей пробы облучается от отдельного источника. Одна камера при этом регистрирует суммарный поток отраженного излучения, а другая только поток, связанный с зольными примесями. Подавление рассеянного излучения от углерода в ней осуществляется с помощью тонкого алюминиевого фильтра, устанавливаемого на пути регистрируемого потока отраженных бета-лучей. Разностный ток от этих камер не зависит от изменения атомного номера зольных примесей в интервале от 11 (натрий) до 26 (железо), а только от их количества, определяющего зольность углей.

Рассмотренные здесь бета-лучевые анализаторы могут применяться для анализа не только угольных, но и различных рудных проб. С их помощью можно анализировать около 10 химических элементов с порогом чувствительности от 0,1 до 1%.

Измерения при этом велись по методике однократных отражений бета-излучения от анализируемых проб. Однако если анализируемая проба состоит из двух частей и источник бета-излучения располагается между ними, то бета-лучи могут последовательно рассеиваться от нижнего и верхнего слоев, т. е. отражаться многократно. При регистрации такого отраженного бета-излучения, как показали Л. М. Бояршинов и М. М. Синявин, порог чувствительности можно уменьшить на порядок.

§ 2. ГАММА-ЛУЧЕВЫЕ ЗОЛОМЕРЫ

Мягкое гамма-излучение в диапазоне примерно 15—80 кэВ интенсивно поглощается атомами вещества за счет фотоэлектрического эффекта. Чем больше атомный номер элемен-

та Z , тем интенсивнее поглощается мягкое излучение. Коэффициент фотоэлектрического поглощения гамма-излучения возрастает пропорционально Z^4 , поэтому чем больше в угле примесей с большим атомным номером, тем сильнее уголь будет ослаблять поток воздействующего гамма-излучения. Это явление геофизиками также использовано для определения зольности углей. Если доля отраженного бета-излучения с увеличением атомного номера зольных примесей растет, то доля отраженного гамма-излучения при этом падает.

Присутствие в зольных примесях соединений железа и кальция также искажает результаты определения зольности углей по этой методике. Задача устранения влияния изменений этих элементов при анализе проб полностью еще не решена. Поэтому гамма-лучевые золомеры не находят широкого применения по сравнению с бета-лучевыми золомерами.

Однако гамма-лучевые золомеры, основанные на просвечивании массы угля, движущейся по ленте транспортера, используются на практике. В связи с тем, что поток угля на ленте транспортера располагается неровным слоем, его облучают двумя источниками. При этом с помощью одного источника оценивают массу угля, движущегося по ленте, и определяют поправку, которая вводится в результаты замеров со вторым источником. Такие приборы используются не только для определения зольности углей, но и для автоматической отбраковки от них пустой породы.

§ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛЬНОСТИ УГЛЕЙ НА МЕСТЕ ИХ ЗАЛЕГАНИЯ

Рассмотренные лабораторные методы ядерного анализа зольности порошковых проб хотя и являются довольно экспрессными по сравнению с методикой, основанной на сжигании проб, но не лишены недостатков. Необходимо отобрать пробы углей, доставить их в лабораторию, раздробить и растереть в порошок и только после этого оператор может приступить к анализу проб.

Однако в случае, когда необходимо оценить зольность непосредственно в процессе разработки пласта, на помощь приходит рассмотренный выше бета-лучевой анализатор (см. рис. 5.2). В связи с тем, что неровности облучаемой поверхности искажают результаты определения зольности углей, в месте замера с помощью обычной дрели, оборудованной специальной шарошкой, в течение 2—3 мин создается ровная площадка размером с пятак. Такое же время достаточно для замера. Для углей с легкими зольными примесями их содержание с помощью рассмотренного золомера определяется со средней абсолютной точностью, равной 0,4%. Испытание прибора показало, что его внедрение позволяет получить значительный экономический эффект.

Для разведки угольного месторождения бурят скважины, выявляя таким образом число угольных пластов, их мощность (толщину) и зольность. Эти данные необходимы для подсчета запасов месторождений и определения качества углей. На первом этапе изучения буровых скважин угольные пласты выявляли по данным бурения. Ископаемые угли в отличие от вмещающих их пород (песчаников, глинистых сланцев и т. д.) обладают пониженной крепостью по отношению к скорости их проходки буровым инструментом. Однако это весьма грубый способ выявления угольных пластов. Мощность угольных пластов при этом определяется весьма приблизительно, а некоторые угольные пласты вообще пропускаются. При проходке скважин на буровиков возлагается задача по отбору керна (цилиндрических образцов пород). Полученные таким способом образцы керна углей поступают в лабораторию для определения их физических свойств и зольности.

Методика выявления угольных пластов по разрезам буровых скважин и определения их зольности довольно трудоемка, поэтому геофизики начали применять различные скважинные методы (электрические и другие). Однако эти методы оказались малоэффективными, и на помощь геофизикам опять пришли лучи. В связи с тем, что бета-частицы неглубоко проникают в вещество, для исследования скважины применено более проникающее излучение — гамма-кванты. Это излучение способно рассеиваться на электронах вещества. Осуществляя регистрацию рассеянных гамма-лучей, можно определять объемную плотность углей, а по фотоэлектрическому их поглощению судить об их качестве.

Ископаемые угли по плотности примерно в 1,5—2 раза отличаются от вмещающих их пород. В результате на диаграммах против угольных пластов получают более высокие интенсивности рассеянного гамма-излучения. С помощью метода рассеянного гамма-излучения достаточно четко фиксируют угольные пласты по разрезу буровых скважин и определяют их мощность. Устройство ядерных плотномеров мы рассмотрели в гл. 4.

Для определения зольности углей в буровых скважинах созданы специальные приборы, основанные на регистрации мягкого рассеянного гамма-излучения в диапазоне примерно 30—100 кэВ. В связи с тем, что на показания прибора значительное влияние оказывают отклонения прибора от стенок, их неровности и заполнение буровым раствором, зондовое устройство прибора стали располагать в выносных блоках, т. е. примерно так же, как это делается в некотором типе плотномеров (см. рис. 4.10). С помощью таких приборов, созданных на основе газоразрядных счетчиков и тулиевых гамма-препаратов ($T=129$ дней, $E_\gamma=52$ и 84 кэВ), зольность

углей можно определять с абсолютной погрешностью, в среднем равной 2%. При работе со спектрометрической аппаратурой погрешность измерений может быть понижена до 1%.

В связи с тем, что приборы с прижимными устройствами неудобны в эксплуатации, в последнее время стали разрабатывать нейтронные скважинные зомеры. Угли наряду с углеродом содержат в своем составе значительные количества водорода. Это и благоприятствует применению нейтронных методов для выявления угольных пластов. Данное обстоятельство связано с тем, что нейтроны при соударении с ядрами водорода (протонами) теряют значительную часть энергии и эффективно замедляются. Хорошим замедлителем является также углерод. Поэтому на диаграммах нейтронного каротажа угли (особенно бурые) четко фиксируются. Неровности стенок скважин при этом значительно меньше искажают показания нейтронных методов по сравнению с гамма-лучевыми методами. При захвате ядрами атомов нейтронов возникает жесткое гамма-излучение. По регистрации этого излучения с помощью спектрометрической аппаратуры оказалось возможным определять зольность углей с абсолютной погрешностью в 3%.

Ядра атомов алюминия и кремния, входящих в состав зольных примесей углей, легко активируются нейтронами. Это позволило по изменению их наведенной активности также судить о зольности каменных углей. Оказалось, что зольность углей в диапазоне от 10 до 50% можно определять с абсолютной погрешностью 1—5%.

6. РАССЕЯНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ

§ 1. РАССЕЯНИЕ С ПОГЛОЩЕНИЕМ

В гл. 4 говорилось об использовании явления комптоновского рассеяния гамма-лучей в ядерной разведке для определения плотностей горных пород. В частности указывалось, что при измерениях рассеянного излучения на больших зондах интенсивность регистрируемого излучения с увеличением плотности горных пород убывает за счет не только более сильного рассеяния гамма-лучей, но и поглощения их при фотоэффекте. Да и вообще любое последовательное рассеяние гамма-лучей заканчивается в конце концов их фотоэлектрическим поглощением, т. е. рассеяние всегда дружит с поглощением.

Присутствие в горных породах тяжелых химических элементов (свинца и других) ведет к еще более интенсивному проявлению эффекта фотоэлектрического поглощения гамма-лучей. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению интенсивности регистрируемого гамма-излучения. Итак, чем больше в породе тяжелых элементов, тем меньшую интенсивность рассеянного излучения регистрирует прибор. По спаду интенсивности рассеянного излучения определяют содержание в рудах тяжелых химических элементов. Об использовании содружества этих двух эффектов при определении зольности углей уже говорилось в предыдущей главе. Рассмотрим использование этих эффектов для определения содержания в рудах различных металлических полезных ископаемых (железа, сурьмы, вольфрама, свинца и др.).

Метод, основанный на использовании двух рассматриваемых явлений взаимодействия гамма-излучения с веществом, в ядерно-геофизической литературе получил название селективного гамма-гамма-метода (ГГМ-с). Для определения содержания тяжелых химических элементов в горных породах применяются интенсивметрическая и спектрометрическая методики измерения рассеянного излучения. Интенсивметрическая методика измерений при этом основывается на измерении полного (суммарного или, как еще говорят, интегрального) потока рассеянного излучения. При спектрометрических измерениях рассеянное излучение регистрируют в некоторых фиксированных энергетических интервалах, т. е. по частям (дифференциально), поэтому спектрометрическую методику измерения гамма-излучения в отдельных интервалах называют часто дифференциальной методикой. О спектре регистрируемого рассеянного гамма-излучения при замерах на моделях — в песке с различным содержанием свинца — можно судить по данным рис. 6. 1. Как видим, увеличение содержания свинца в песке ведет к уменьшению площади под кривой. Провал

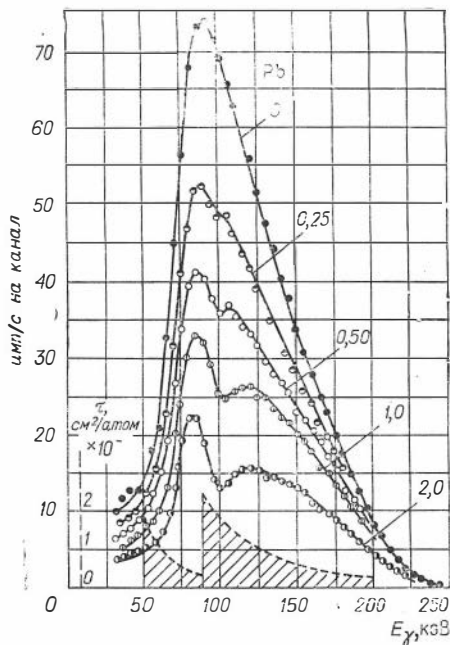


Рис. 6.1. Спектр рассеянного гамма-излучения, измеренный в скважине (по М. М. Соколову и др.).

Шифр кривых — концентрация в песке свинца в весовых процентах (штриховая кривая показывает изменение коэффициента фотоэлектрического поглощения гамма-излучения в свинце).

в области ~ 100 кэВ связан с поглощением гамма-излучения за счет *K*-скачка свинца. Измерение дифференциального спектра гамма-лучей в области этого провала позволяет надежно судить о содержании свинца в руде.

§ 2. АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ КЕРНА И ДРОБЛЕННЫХ ПРОБ

Для определения в пробах различных тяжелых элементов в СССР создан целый ряд установок. Некоторые из них показаны на рис. 6.2. С помощью рассматриваемого метода можно вести анализ кернов и дробленых проб.

В керномере излучение из источника попадает в образец керна, рассеивается в нем и через окно в свинцовой защите проходит в детектор. Свинцовая защита одновременно с фильтрами, установленными на пути первичного гамма-излучения, может умягчить излучение, т. е. служить своеобразным замедлителем высокоэнергетических гамма-лучей.

Раздробленная проба может анализироваться в емкостях большого (рис. 6.2, *а*) и малого объемов (рис. 6.2, *в*).

При работе на установках (рис. 6.2, *а* и *б*) измерения велись по интенсивметрической методике. В этом случае можно было судить лишь о суммарном содержании свинца в исследуемых объектах. Присутствие в размолотой руде 7% цинка эквивалентно содержанию в ней 1% свинца.

В установке с малыми навесками проб (рис. 6.2, *в*) умягчение жесткого излучения осуществлялось в песке. Проба при

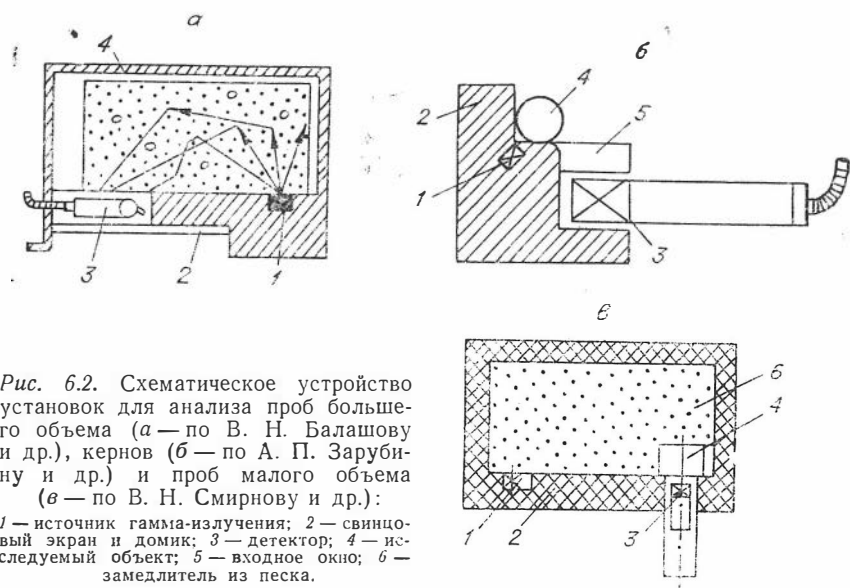


Рис. 6.2. Схематическое устройство установок для анализа проб большого объема (*а* — по В. Н. Балашову и др.), кернов (*б* — по А. П. Зарубину и др.) и проб малого объема (*в* — по В. Н. Смирнову и др.):

1 — источник гамма-излучения; 2 — свинцовый экран и домик; 3 — детектор; 4 — исследуемый объект; 5 — входное окно; 6 — замедлитель из песка.

этом облучалась только потоком рассеянного излучения. Применение спектрометрической методики измерения излучения, проходящего через образец, позволяло отдельно определять содержание в пробе свинца и бария.

§ 3. ИЗУЧЕНИЕ СТЕНОК ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СКВАЖИН

Для решения этих задач применяются приборы, основанные на измерениях по интенсивметрической и спектрометрической методике. При проведении исследований было установлено, что показания приборов в значительной степени искажаются в связи с влиянием неровностей облучаемых поверхностей и изменением их плотности. Для устранения этих факторов стали применять специальные приемы измерений, которые рассмотрим ниже при обсуждении каждой из упомянутых методик.

Для измерений по интенсивметрической методике созданы приборы типа РСР-2 и РСР-3 со сцинтилляционными счетчиками (рис. 6.3). Воздушный зазор между облучаемой пло-

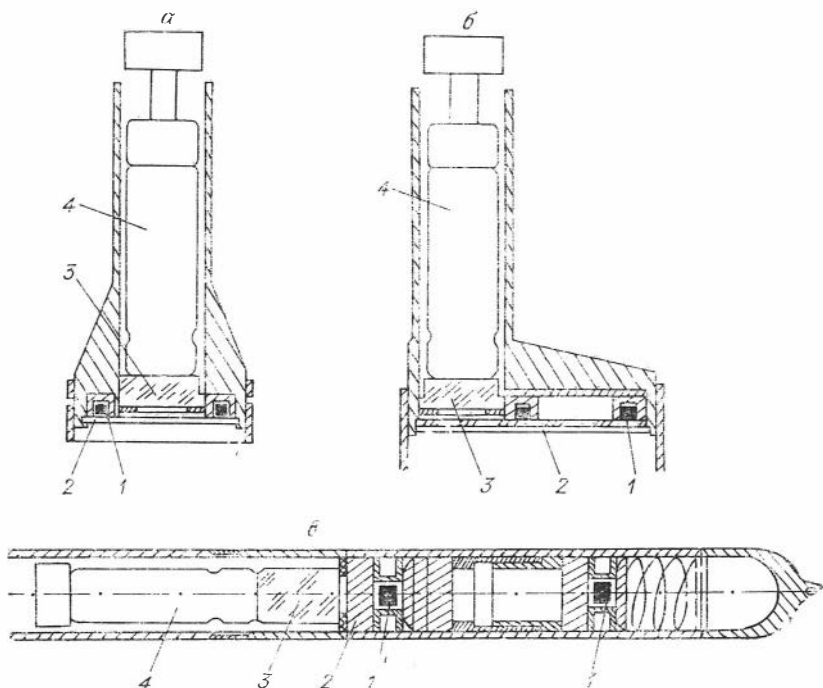


Рис. 6.3. Схематическое устройство датчиков прибора РСР-2 для измерений проб и обследования горных выработок по методике отражения излучения (а), для обследования стенок горных выработок при измерениях с двумя источниками (б) и обследования стенок сухих скважин при измерениях с двумя источниками (в):

1 — источники; 2 — свинцовые экраны; 3 — люминофоры; 4 — фотоумножители.

ской поверхностью породы в датчиках на рис. 6.3, *а* и *б* выбран оптимальным для получения максимальной интенсивности отраженного излучения и устранения неровностей облучаемых поверхностей. Использование кольцообразного источника низкоэнергетичного излучения (50—80 кэВ) в таких приборах (рис. 6.3, *а*) позволяет исключать влияние изменений плотностей пород на результаты определения в них тяжелых элементов. В приборах на рис. 6.3, *б* и *в* этот эффект достигается благодаря использованию двух источников, устанавливаемых на различном расстоянии от детектора. При соответствующем соотношении выбранных активностей источников устраняется не только влияние изменений плотностей исследуемых пород, но и влияние их неровной поверхности.

С помощью рассмотренных приборов при обследовании стенок выработок и скважин можно определять содержание железа в рудах с порогом чувствительности от 2 до 5%, сурьмы и олова с порогом чувствительности от 0,2 до 0,6% и вольфрама, ртути и свинца с порогом чувствительности от 0,1 до 0,3%. Такие разбросы в основном связаны с изменением вещественного состава руд.

В спектрометрических приборах применяется один источник гамма-излучения. Влияние неровностей облучаемых поверхностей и изменения плотностей горных пород на результаты измерений при этом устраняется при регистрации отношения скоростей счета в двух каналах (см. рис. 6.1). Так, при определении свинца в руде спектр рассеянного излучения измеряется в диапазоне примерно 95—105 кэВ (область провала спектра) и 150—160 кэВ.

При одновременном содержании в руде нескольких тяжелых элементов спектр рассеянного излучения приходится измерять в большем числе каналов. По такой спектрометрической методике измерений содержание железа в рудах можно определять, начиная с 2—3%, а свинец — начиная с 0,2—0,5%, в присутствии в рудах бария.

Применение рассмотренных методик для поисков и разведки различных полезных ископаемых позволяет получить годовую экономию на одном месторождении в пределах 100—300 тыс. руб.

7. У КАЖДОГО СВОЙ ХАРАКТЕР

§ 1. КАК ЗАСТАВИТЬ АТОМЫ ПРОЯВИТЬ СВОЙ ХАРАКТЕР?

Под действием радиоактивного излучения с орбит атомов химических элементов могут выбиваться электроны. Атомы при этом оказываются в возбужденном состоянии. Если, например, электрон выбит из наиболее близкой к ядру *K*-оболочки, то

на его место устремляется электрон с L -оболочки, и т. д. При переходе электрона с L -оболочки на K -оболочку из атома испускается фотон с весьма характерной энергией. В атомной физике это излучение называют характеристическим. Величина энергии характеристического излучения меняется в зависимости от атомного номера химического элемента. Чем больше атомный номер химического элемента, тем с большей энергией возбужденный атом может испускать фотоны. По регистрации этого излучения можно судить о содержании в исследуемой среде различных химических элементов. Другими словами, по проявленному характеру каждого элемента можно судить о содержании его в определяемых породах и рудах.

В литературе рассматриваемый метод изучения состава пород и руд получил название рентгено-радиометрического. Это связано с тем, что характеристическое излучение относят к рентгеновскому и измеряют его с помощью радиометрической аппаратуры.

В практике рентгено-радиометрического анализа в качестве источников возбуждающего излучения можно применять альфа-частицы, электроны (бета-лучи) и гамма-кванты. Однако чаще всего в качестве возбуждающего излучения используют характеристическое излучение мишеней, изготовленных из различных химических элементов. Под действием первичного излучения в таких мишенях возникает характеристическое излучение, которое и используется для облучения изучаемых сред. Меняя материал мишени, можно получать характеристическое излучение с разной энергией и соответственно возбуждать различные элементы в исследуемых средах.

Для регистрации характеристического излучения применяются интенсивметрические и спектрометрические детекторы. Последние находят наибольшие области применения.

Выделение характеристического излучения с помощью интенсивметрических счетчиков может осуществляться путем применения дифференциальных фильтров. Выше было показано (см. рис. 6.1), что в области низких энергий от долей килоэлектронвольт и примерно до 150 кэВ на графиках коэффициентов фотоэлектрического ослабления излучения наблюдаются скачки поглощения. Так, для свинца этот скачок приходится на энергию 87,6 кэВ. Для других элементов он будет принимать другие значения. Помимо K -скачков проявляются L -скачки.

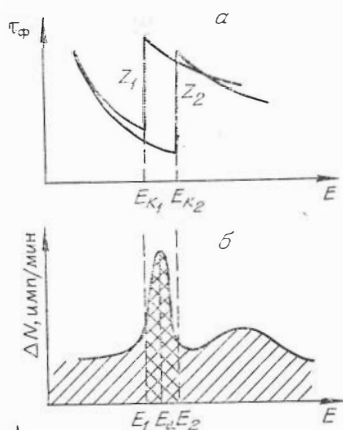


Рис. 7.1. Иллюстрация к пояснению действия дифференциальных фильтров:

a — зависимость линейных коэффициентов от энергии гамма-излучения для элементов с атомными номерами Z_1 и Z_2 ($Z_1 + 1 \approx Z_2$); b — спектр характеристического излучения определяемого элемента, измеренный по разности отсчетов.

Таким образом, если на пути потока регистрируемого излучения перед детектором поочередно устанавливать фильтр с K - или L -скачком (выше и ниже энергии характеристического излучения определяемого элемента), то мы соответственно вначале будем подавлять мешающие излучения справа от пика регистрируемого излучения, а второй раз будем регистрировать в основном излучение слева от этого пика. Разностный отсчет при этом отвечает полосе пропускания фильтров (рис.7.1).

В качестве спектрометрических детекторов излучения применяются пропорциональные и сцинтилляционные счетчики, а также полупроводниковые.

В практике геофизических исследований рентгено-радиометрический метод вначале только применялся в лабораторном анализе вещества, к настоящему времени он вышел за пределы лабораторий.

§ 2. АНАЛИЗ ПРОБ В ЛАБОРАТОРИИ

Для анализа проб в лаборатории создан целый ряд приборов. Схема одного из них представлена на рис. 7.2. Первичное излучение через отверстие в защите попадает на промежуточную мишень и возбуждает в ней характеристическое излучение. Это излучение, в свою очередь, воздействует на пробу и возбуждает в ней характеристическое излучение определяемых элементов, которое регистрируется с помощью какого-либо детектора. Для подавления мешающего излучения могут применяться дифференциальные фильтры, располагающиеся на пути потока регистрируемого излучения.

В отдельных приборах облучение проб осуществляется непосредственно под действием первичного излучения источника.

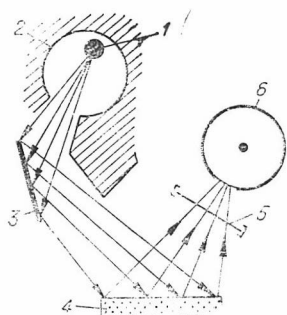


Рис. 7.2. Схема взаиморасположения различных элементов рентгено-радиометрической установки:

1 — источник первичного излучения; 2 — защита; 3 — промежуточная мишень; 4 — проба; 5 — дифференциальный фильтр; 6 — пропорциональный счетчик.

Приборы со сцинтилляционными счетчиками применяются для определения в пробах химических элементов с атомными номерами от 29 (медь) и выше и с порогом чувствительности от 0,01 до 0,05%. Приборы с пропорциональными счетчиками могут применяться для определения химических элементов с атомными номерами от 13 (алюминий) и выше и с порогом чувствительности в тысячные доли процента. С помощью приборов на полупроводниковых детекторах содержание некоторых элементов в пробах можно определить с десятитысячных долей процента.

В последнее время для анализа проб вместо радиоизотопных источников начинают применяться электронные

и рентгеновские трубки. Подавая различные напряжения на такие трубки, можно варьировать энергию излучения, воздействующего на изучаемый объект или на промежуточную мишень, и избирательно воздействовать на анализируемый элемент. Так, при облучении проб электронами из электронной трубки можно анализировать в пробах элементы с атомными номерами от 5 (бор) и выше.

Для анализа может применяться не только методика, основанная на измерении излучения, выходящего с облучаемой поверхности проб, но и методика анализа, основанная на просвечивании проб характеристическим излучением.

§ 3. ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ЗЕМНЫХ И ЛУННЫХ ПОРОД В ИХ ЕСТЕСТВЕННОМ ЗАЛЕГАНИИ

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте разведочной геофизики (ВИРГ) для опробования стенок горных выработок разработана методика и аппаратура. Датчик прибора при этом аналогичен показанному на рис. 6.3, а. Этот датчик предназначен для регистрации более мягкого излучения по сравнению с используемым в методике, описанной в гл. 6. В связи с этим в рентгено-радиометрических датчиках необходимо использовать более тонкие сцинтилляторы (~ 1 мм). Помимо приборов со сцинтилляционными счетчиками для указанных целей применяются также приборы с пропорциональными счетчиками.

Методика спектральных отношений и в этом случае позволяет избавиться от влияния неровностей облучаемой поверхности и изменений плотностей пород. Порог чувствительности элементов с атомными номерами от 20 (кальций) и выше оценивается равным 0,1—0,3%. При работе с полупроводниковыми детекторами порог чувствительности может быть понижен до 0,01—0,03%.

В ВИРГе создана установка на пропорциональных проточных счетчиках для определения в породах элементов в процессе движения автомобиля. Датчик с источником и счетчиком крепится к заднему мосту автомобиля ГАЗ-69 на расстоянии 7—8 см от поверхности земли, пульт прибора располагается в кузове автомобиля. Исследователи показали, что в отсутствии почвенного покрова с помощью этого метода можно определять содержание железа, титана и циркония в некоторых типах пород. При определении этих элементов автомобиль по маршрутам съемки может двигаться со скоростью до 20 км/ч.

В. А. Мейер и др. (Ленинградский университет) предложили и реализовали скважинную методику определения в рудах целого ряда химических элементов.

Для исследования скважин в настоящее время применяются прижимные приборы с одним и двумя источниками излучения, а также центрированные приборы (рис. 7.3.). Применение

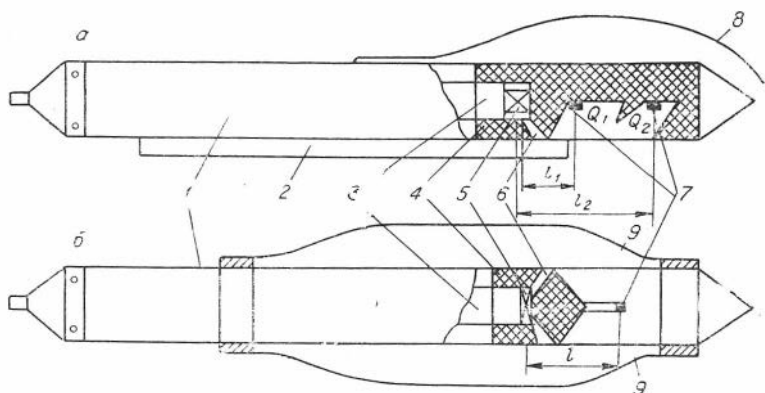


Рис. 7.3. Устройство рентгено-радиометрических каротажных приборов прижимного типа с ползьями (а) и центрированного типа (б), по Ю. А. Гринштейну:

1 — корпус прибора; 2 — ползья; 3 — фотоумножитель; 4 — свинцовый экран; 5 — люминофор; 6 — коллимационное отверстие; 7 — источник излучения; 8 — прижимная пружина; 9 — центрирующие пружины.

двух источников излучения, как и в аппаратуре селективного гамма-гамма-каротажа (см. рис. 6.3), позволяет устранять влияние неровностей стенок скважины на показания приборов. Приборы центрированного типа обеспечивают получение информации со всего периметра скважины. Кроме рассмотренных типов приборов применяются и другие.

Для того чтобы первичное и регистрируемое характеристическое излучения незначительно ослаблялись, в корпусе прибора против коллиматоров делается входное окно из материалов с низкими атомными номерами (текстолит, бериллий и др.).

С помощью шестиканальных анализаторов, используемых в приборах рентгено-радиометрического каротажа, можно одновременно определять три компонента в руде. Таким образом, в полиметаллических рудах одновременно определяют свинец, барий и цинк или свинец, цинк и железо. Кроме того, с помощью рассматриваемого метода можно определять в скважинах содержание олова, сурьмы, молибдена, вольфрама и урана. Порог чувствительности на все перечисленные элементы оценивается равным 0,1—0,3%.

Для изучения лунных пород в самоходной лаборатории «Луноход-1», высаженной на лунную поверхность 17 ноября 1970 г. для комплексных исследований, установлен специальный прибор РИФМА, основанный на рассматриваемом методе. Это, в частности, и отражено в его названии, которое расшифровывается следующим образом: рентгеновский изотопный флуоресцентный метод анализа. «Луноход» занимался порученной ему работой 10,5 месяца с регулярными перерывами, связанными с фазами Луны. (В связи с тем, что «Луноход» пополнял запасы своей энергии с помощью солнечных батарей,

поэтому как только «Луноход» по-
падал в тень отбрасываемую Землей,
его останавливали на «отдых».)

Схема выносного датчика при-
бора в процессе измерений показана
на рис. 7.4. Прибор оборудован
двумя титано-тритиевыми источни-
ками. Измерение характеристиче-
ского излучения породообразующих
элементов осуществляется с по-
мощью системы пропорциональных
счетчиков и дифференциальных
фильтров. Анализ спектра ведется
64-канальным анализатором.

Прибор рассчитан на определе-
ние породообразующих элементов
при его остановке и в процессе дви-
жения. Полученные результаты на-
ходятся в полном согласии с данны-
ми анализа лунных пород с помощью аппаратов «Сервейор»,
а также с данными анализа образцов пород, доставлен-
ных экипажами «Аполлонов» и автоматической станцией
«Луна-16»*. «Луноход-2», высаженный на поверхность Луны
16 января 1973 г., также оборудован прибором РИФМА. Ис-
точником излучения в нем служит циркониево-тритиевый препа-
рат, обеспечивающий возможность определения породообразу-
ющих элементов вплоть до кальция, титана и железа. Этот
«Луноход» также проработал около 4,5 месяца. При переходе
от «морских» пород к «материковым» было зафиксировано
уменьшение железа от 10—12 до 4 %.

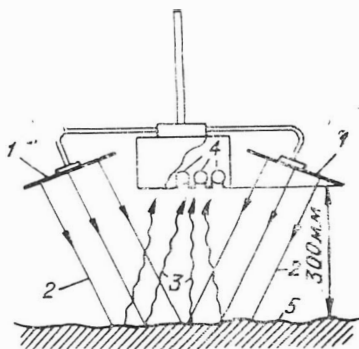


Рис. 7.4. Схема измерений с прибором РИФМА:

1 — источники; 2 — направление потока первичного излучения; 3 — идущее к детектору вторичное характеристическое излучение; 4 — пропорциональные счетчики; 5 — облучаемая порода.

§ 4. РЕНТГЕНОВСКИЕ АППАРАТЫ В ГЕОЛОГИИ

Более мощные потоки возбуждающего излучения по сравнению с получаемым от радиоизотопных источников могут быть созданы с помощью рентгеновских трубок.

Заметим, что возможность применения рентгеновского излучения для анализа вещества была установлена в 1913 г. С этого времени рентгеноспектральный анализ стал применяться для изучения вещества, в частности геологических проб. Существуют две основные разновидности рентгеноспектрального анализа: модификация, основанная на облучении электронами вещества, наносимого на анод трубки (метод первичного возбуждения), и модификация, основанная на облучении исследуемого вещества рентгеновским излучением от анода трубки (метод вторичного возбуждения). Измерение характеристического излучения в обоих случаях осуществляется с помощью специаль-

* Все эти данные приведены в главе 13.

ных кристаллов-анализаторов и регистрации излучения на фотопленку.

В ядерно-физическом (атомно-физическом) варианте рентгеноспектральные методы стали реализовываться с момента внедрения в науку и технику сцинтилляционных счетчиков ядерных излучений (см. § 2, гл. 2). Эти счетчики стали применяться для анализа спектра характеристического излучения. В последующем для этих целей используются пропорциональные и полупроводниковые счетчики.

Первые рентгеновские аппараты весили около 100 кг. Они применялись исключительно в лабораторных условиях. В последующем стали создавать переносные рентгеновские приборы весом около 10 кг. К настоящему времени советские исследователи Н. В. Белкин, Э. А. Авилов и др. разработали приборы весом около 1 кг.

На основе миниатюрных источников рентгеновского излучения могут быть созданы портативные приборы для анализа геологических объектов в полевых условиях. Подобного рода установки, естественно, могут быть размещены в космических лабораториях типа «Луноход-1» и в других.

Английскими исследователями уже создан прибор для облучения проб потоками электронов. С его помощью можно вести анализ химических элементов, начиная с бора (см. рис. 1.1).

8. «ВСТРЕЧА» РУДОЛЬФА МЕССБАУЭРА С ХРИСТИАНОМ ДОПЛЕРОМ

§ 1. КАК ПРОИЗОШЛА ЭТА «ВСТРЕЧА»?

Имя немецкого физика Рудольфа Мессбауэра стало известно после открытия им в 1957 г. резонансного поглощения гамма-лучей, получившего название эффекта Мессбауэра. Австрийский физик Христиан Доплер (1803—1853) открыл явление, суть которого сводится к изменению частоты воспринимаемых колебаний звука от движущегося относительно наблюдателя источника, и наоборот. Оно присуще, как впоследствии оказалось, всем волновым процессам. Это явление в честь его открывателя получило название эффекта Доплера (1842 г.). Казалось бы, что может быть общего между этими двумя явлениями, открытиями с интервалом более ста лет?

Гамма-излучение также имеет волновую природу. Связь между энергией E и частотой ν этого излучения дается соотношением

$$E = h\nu, \quad (8.1)$$

где h — постоянная Планка.

Таким образом, изменение частоты может наблюдаться и на гамма-лучах. Поэтому оказалось возможным, сочетая эффект Мессбауэра с эффектом Доплера, разработать аппаратуру, которая может быть использована для выявления в веществе некоторых химических элементов.

Рассмотрим эффект Мессбауэра подробнее. Его суть сводится к явлению резонансной флуоресценции гамма-лучей при их излучении, поглощении и рассеянии без потери ими энергии на отдачу излучающих и поглощающих ядер элементов. Резонансная флуоресценция наблюдается при переходе ядра из возбужденного состояния в основное стационарное состояние с испусканием фотона определенной частоты. При прохождении этого фотона через среду (мишень), состоящую из того же элемента, что и излучатель, может произойти его поглощение. В результате ядро мишени может перейти в возбужденное состояние и, спустя небольшое время, возвратиться в основное состояние, излучая фотон той же частоты. При этом наблюдается ослабление излучения по направлению первичных фотонов и излучение из мишени по всем направлениям новых фотонов той же частоты. К этому, собственно говоря, и сводятся процессы резонансного поглощения и рассеяния фотонов на ядрах облучаемой среды. Ядра излучающих или поглощающих атомов должны быть связаны в кристаллическую решетку с температурой не более 290° (по шкале Кельвина). В этом случае ввиду большой массы излучающей (поглощающей) системы фотоны высвечиваются без расходования энергии на отдачу. Другими словами, лафет орудия должен быть настолько массивным, чтобы при выстреле снаряда не испытывать отдачи.

Резонансное поглощение проходящего через пробу или рассеянного ею гамма-излучения выявляется с высочайшей чувствительностью при малейшем отклонении гамма-лучей от их резонансной частоты (энергии). Изменение частоты гамма-лучей достигается различными способами, в частности путем колебания поглотителя относительного источника (или наоборот). В этом случае поглотитель вследствие проявления эффекта Доплера будет воспринимать гамма-излучение измененной частоты. Двигая поглотитель относительно источника с различными скоростями и измеряя соответствующую интенсивность прошедшего через поглотитель или рассеянного (отраженного) излучения, можно получить мессбауэровскую кривую (спектр) поглощения. Такое содружество двух эффектов позволяет выявлять некоторые химические элементы и их соединения в изучаемых средах с высокой чувствительностью.

Резонансное поглощение гамма-квантов в общем случае зависит как от строения ядер источника и поглотителя, так и от условий внешней среды (температура, электромагнитные и гравитационные поля, природа химических связей и т. п.). Этим и обуславливаются широкие области применения эффекта Мессбауэра в физике, химии, технике, геофизике и т. п.

Эффект Мессбауэра для подавляющего большинства элементов с большой шириной уровней возбуждения проявляется при низких температурах, близких к абсолютному нулю, в отсутствии электрических и магнитных помех. Все это создает определенные трудности в применении этого метода. Эффект проще наблюдать на олове и железе.

Для регистрации излучения при реализации эффекта Мессбауэра обычно используют сцинтилляционные счетчики. Кроме того, для выявления некоторых элементов с помощью этого эффекта применяются специальные резонансные счетчики, созданные на основе газоразрядных. Отличие их от обычных газоразрядных заключается в катодe, который изготавливается из материалов, содержащих изотоп определяемого элемента. Проявление эффекта Мессбауэра на ядрах атомов катода приводит к образованию электронов внутренней конверсии, по регистрации которых и ведется определение искомого элемента в пробах.

§ 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ

Принципиальная схема установки для измерения мессбауэровского спектра резонансного поглощения гамма-квантов показана на рис. 8.1. Осуществляя регистрацию гамма-лучей, проходящих через поглотитель,двигающийся относительно источника с переменной скоростью, можно получать зависимость регистрируемой скорости счета от скорости перемещения поглотителя. Эта зависимость схематически также показана на рис. 8.1. Изменение частоты гамма-излучения в аналогичных установках может быть достигнуто с помощью различных мембран, вращающихся дисков с источниками, пьезодатчиков, а также магнитных и гравитационных полей.

Измерения проб производят при нулевой скорости N_0 и некоторой максимальной (3 мм/с) N_v . Явление резонансного поглощения может быть выявлено при построении функции

$$M = \frac{N_v - N_0}{N_v} = 1 - N_0/N_v = f(p), \quad (8.2)$$

где p — концентрация изучаемого элемента в пробе.

Операция по получению функции (8.2) может быть автоматизирована при одновременном облучении двух идентичных проб,

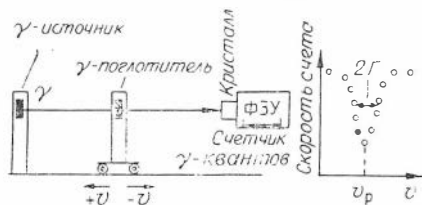


Рис. 8.1. Принципиальная схема установки для измерения мессбауэровского спектра поглощения излучения, проходящего через пробу (Γ — полуширина кривой поглощения).

из которых одна покоится, а другая движется (рис. 8.2). При нулевых концентрациях определяемых элементов в обоих пробах будем получать нулевой сигнал. Увеличение содержания в пробах определяемого элемента приводит к возрастанию величины разностного сигнала.

На основе этого принципа разработана методика и создан прибор для анализа проб на олово. Поскольку горнодобывающую промышленность в основном интересуется двуокисью олова SnO_2 (касситерит), то мессбауэровские приборы создаются для определения в пробах именно этих соединений олова. Другие соединения, содержащиеся в рудах, практически не мешают определению касситерита. Это одно из существенных достоинств методов, основанных на эффекте Мессбауэра.

В качестве источников гамма-излучения в таких приборах используют препараты SnO_2 с радиоактивным изотопом олова — ^{119}m ($T=270$ дней, $E_\gamma=23,8$ кэВ). В природных соединениях олова изотоп стакой массой встречается в количестве 8,6%. По проявлению эффекта Мессбауэра на этом изотопе и определяется содержание касситерита в руде по заранее построенным градуировочным графикам.

В СССР для определения олова в рудах создан специальный оловоискатель МАК-1 (мессбауэровский анализатор кассите-

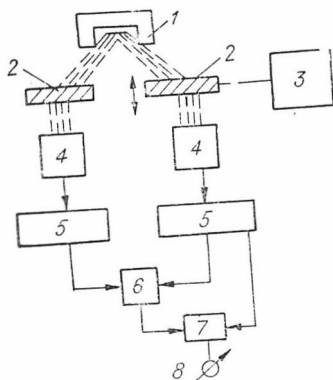


Рис. 8.2. Блок-схема для измерений по гамма-методу резонансного поглощения:

1 — источник излучения; 2 — контролируемая среда; 3 — механизмы перемещения; 4 — детекторы излучения; 5 — усилители и дискриминаторы; 6 — блок вычитания; 7 — блок деления; 8 — измеритель.

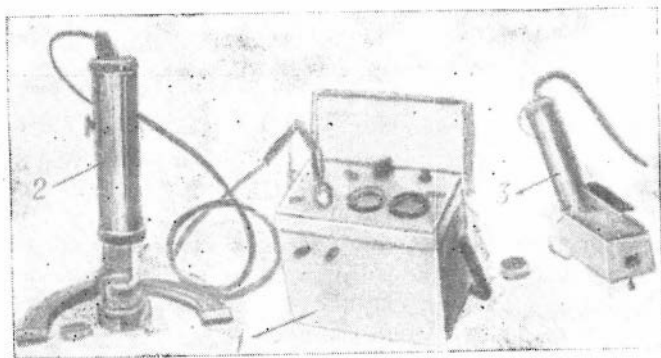


Рис. 8.3. Мессбауэровский анализатор касситерита (МАК-1):

1 — пульт прибора с автономным питанием; 2 — головка, основанная на использовании явления резонансного поглощения гамма-лучей; 3 — головка, основанная на использовании явления резонансного рассеяния гамма-лучей.

рита, показанный на рис. 8.3). Пульт этого прибора может эксплуатироваться поочередно с головками, основанными на поглощении и рассеянии гамма-лучей от исследуемых сред. Об устройстве головки, основанной на эффекте рассеяния, будет рассказано в следующем параграфе.

Порог чувствительности прибора МАК-1 с головкой, основанной на использовании явления поглощения гамма-лучей, оценивается равным 0,05%. С помощью приборов на резонансных счетчиках порог чувствительности к олову можно понизить до 0,01%. Производя замеры проб с мессбауэровским прибором и рентгенорадиометрическим анализатором, можно определять олово, связанное в касситерит, и общее олово.

Методика резонансного поглощения гамма-лучей используется также для определения соединений железа в пробах. Так, в США такие приборы использовались для определения соединений железа в образцах лунных пород, доставленных на Землю экипажами «Аполлона-11» и «Аполлона-12».

§ 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНО-РАССЕЯННЫХ ГАММА-ЛУЧЕЙ

Принципиальное устройство головки датчика, основанного на рассматриваемом эффекте, показано на рис. 8.4. Оптимальными значениями углов являются величины $\alpha=0$ и $\beta=60^\circ$.

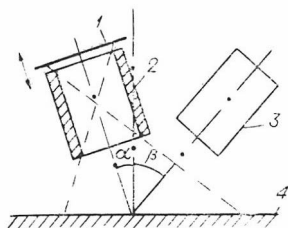


Рис. 8.4. Схема измерений по гамма-методу резонансного рассеяния гамма-лучей:

1 — источник гамма-излучения; 2 — свинцовый коллиматор; 3 — детектор; 4 — облучаемая порода.

Фотография головки мессбауэровского прибора МАК-1, основанного на эффекте рассеяния гамма-лучей, показана на рис. 8.3. С помощью этого прибора содержание касситерита определяют в коренных выходах пород: обнажениях и стенках горных выработок. Порог чувствительности прибора к олову оценивается равным 0,1%. Внедрение этого прибора в производство дает экономию 14 тыс. руб. в год на один прибор.

На этом принципе созданы также приборы для определения касситерита в стенках сухих скважин.

Комплексируя измерения мессбауэровских приборов с рентгено-радиометрическими, можно определять содержание в рудах касситерита и общего олова.

9. ЯДЕРНЫЙ БИЛЬЯРД

§ 1. ЭФФЕКТ СОУДАРЕНИЯ НЕЙТРОНОВ С ПРОТОНАМИ

Нейтроны и протоны имеют примерно одинаковую массу. Упругие соударения нейтронов с протонами подчиняются обычным законам механики, классическим примером которых является соударение бильярдных шаров. Нейтрон при ударе передает часть своей энергии протону. При лобовом ударе нейтрон может передать протону всю свою энергию.

При аналогичных взаимодействиях нейтронов с ядрами атомов других химических элементов нейтрон при соударениях будет передавать в среднем значительно меньшую энергию по сравнению с энергией, передаваемой протону. Причем чем больше будет масса ядра, тем в среднем меньшую энергию нейтрон будет передавать этому ядру.

Таким образом, протоны — весьма эффективные замедлители быстрых нейтронов, испускаемых источниками. Поэтому водородсодержащие среды и используются в качестве элементов защитных материалов от нейтронов. Это свойство водорода используется геофизиками также для определения влажности горных пород и грунтов.

На рассматриваемом принципе взаимодействия нейтронов с протонами созданы нейтронные установки для определения влажности проб в лаборатории и непосредственно в коренных выходах горных пород и грунтов.

§ 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ВЛАГОМЕРЫ

Устройство одной из установок, созданных в Институте геологии и геофизики СО АН СССР, которая может применяться для определения влажности проб, показано на рис. 9.1. Установка состоит из двух замедляющих блоков диаметром около 25 см. Блок источника при этом имеет длину 15 см, а блок детектора — 25 см. Для смены кассет с пробами блок источника может поворачиваться на оси стержня относительно блока детектора. Замедляющие блоки одновременно выполняют роль защиты оператора от нейтронов. Детектирование нейтронов осуществляется с помощью специального лю-

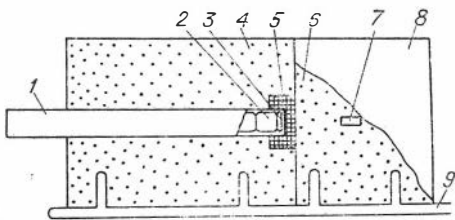


Рис. 9.1. Общий вид сцинтилляционной нейтронной установки (СНУ), созданной на основе полевого радиометра СРП-2: 1 — гильза радиометра; 2 — фотоумножитель; 3 — нейтронный люминофор; 4 — корпус установки; 5 — кассета с пробой; 6 — замедлитель (вода или парафин); 7 — источник нейтронов; 8 — кадмий; 9 — подставка.

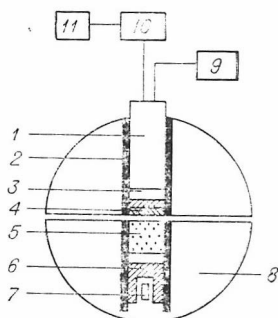


Рис. 9.2. Схематическое устройство нейтронной установки для определения влажности борсодержащих проб с регистрацией потока быстрых нейтронов (по Н. И. Сотниченко):

1 — датчик с ФЭУ-29; 2 — кадмиевый экран; 3 — люминофор Т-40; 4 — парафиново-борный фильтр; 5 — пробирка; 6 — стальной экран; 7 — источник нейтронов с выходом $1,5 \cdot 10^6$ нейтр/с; 8 — парафиновая защита; 9 — блок высоковольтного напряжения ВСВ; 10 — усилительно-дискриминационная схема; 11 — пересчетная схема ПС-100.

минофора. При измерениях в таких установках можно использовать источники быстрых нейтронов с выходом около $3 \cdot 10^4$ нейтр/с. Наибольшее число нейтронов в таких источниках имеет энергию около 5 МэВ. В замедлителе энергия нейтронов за счет упругих соударений уменьшается до теплового состояния молекул замедлителя. При комнатной температуре нейтроны приобретают энергию теплового состояния вещества (0,025 эВ). Детектор с наибольшей эффективностью регистрирует именно нейтроны с этой энергией.

О содержании влаги в пробах судят по ослаблению в ней потока тепловых нейтронов. Содержание влаги в пробах в отсутствии сильнопоглощающих элементов (бор, кадмий и др.) можно определять, начиная с 1%.

Установка, показанная на рис. 9.1, и ей подобные гораздо чаще применяются для определения в пробах элементов с высокими сечениями захвата нейтронов (см. гл. 10). Изменение содержания влаги в таких пробах мешает определению поглощающих

элементов. Для определения влажности таких проб используется методика, основанная на ослаблении в пробе быстрых нейтронов. Устройство установки показано на рис. 9.2. Для смещения спектра быстрых нейтронов в область 0,8—1,0 МэВ источник располагается в стальном цилиндре с толщиной стенок 5 см (с торца). Между стальным цилиндром и пробой располагается воздушный зазор в 2 см. Проба весом 550 г засыпалась в цилиндрическую кассету высотой 10 см и диаметром 6 см. Для устранения потока медленных нейтронов между пробой и люминофором быстрых нейтронов располагается слой парафина и бора. С целью защиты детектора от тепловых нейтронов, идущих из замедлителя, датчик снаружи окружается слоем кадмия. Для размещения и извлечения пробы нижний блок замедлителя поворачивается относительно верхнего блока.

Зависимость скорости счета быстрых нейтронов для интервала влаги $0 \div 8\%$ носит линейный характер. Абсолютная погрешность определения влажности в среднем равняется 0,1%, а относительная — 10%. Порог чувствительности метода по этим данным оценивается в 0,2% воды.

В различных геологических изысканиях бывает очень важно определить влажность грунтов. Эта задача интересует также строителей, грунтоведов и почвоведов. Классическим методом определения влажности грунтов и других им подобных объектов является термостатно-весовой способ. Для этой цели в полевых условиях отбирается проба грунта по способу режущего кольца (см. § 1, гл. 4). Затем пробу доставляют в лабораторию, взвешивают и помещают в сушильный шкаф, после чего вновь взвешивают. Влажность при этом оценивается по разности величины веса до сушки и после. Этот способ, как видим, весьма прост, но очень трудоемок и малоэффективен, особенно при определении влажности грунтов, сильно насыщенных водой. При извлечении проб и их транспортировке влага частично теряется, в связи с чем геофизиков и геологов давно занимала мысль о создании прибора для непосредственных определений влажности грунтов и других сред на месте их залегания. Эта задача оказалась посильной лишь нейтронным влагомерам, содержащим источник и детектор нейтронов.

На основе нейтронных методов к настоящему времени разработаны влагомеры для определения влажности грунтов по замерам с поверхности при помощи пешеходных (переносных) и перевозных (автомобильных) влагомеров. Созданы также влагомеры для замеров в шпурах, бурках и скважинах.

Горные породы (песчаники, известняки и др.) на глубине от дневной поверхности обычно заполнены водой, а в некоторых местах и нефтью. Поэтому при изучении скважин в районах нефтяных месторождений важной задачей является подсчет запасов нефтяных залежей. Это может быть осуществлено при оценке пористости горных пород, заполненных нефтью. Для решения этих и других им подобных задач также применяются нейтронные методы.

На рис. 9.3 приведены схемы устройств некоторых типов приборов, применяющихся для определения влажности грунтов и пористости горных пород. Нейтронный универсальный влагомер НВУ-1 создан в СССР, а радиомеры Р-19 и Р-21 — в США. Перед замерами приборы градуируются на реальных средах, затем по этим графикам определяют влажность и пористость пород.

В связи с тем, что значительная часть быстрых нейтронов отражается от облучаемой поверхности в приставном приборе НВУ-1, над источником и детектором располагается специальный отражатель из парафина, возвращающий часть нейтронов в породу. В нижней части этот отражатель делается из парафина, а в верхней части — из смеси парафина с бурой и т. д. Последнее обусловлено необходимостью защиты оператора от нейтронов. Для проверки работы прибора в его комплекте предусмотрен специальный блок из парафина. Защитный и прове-

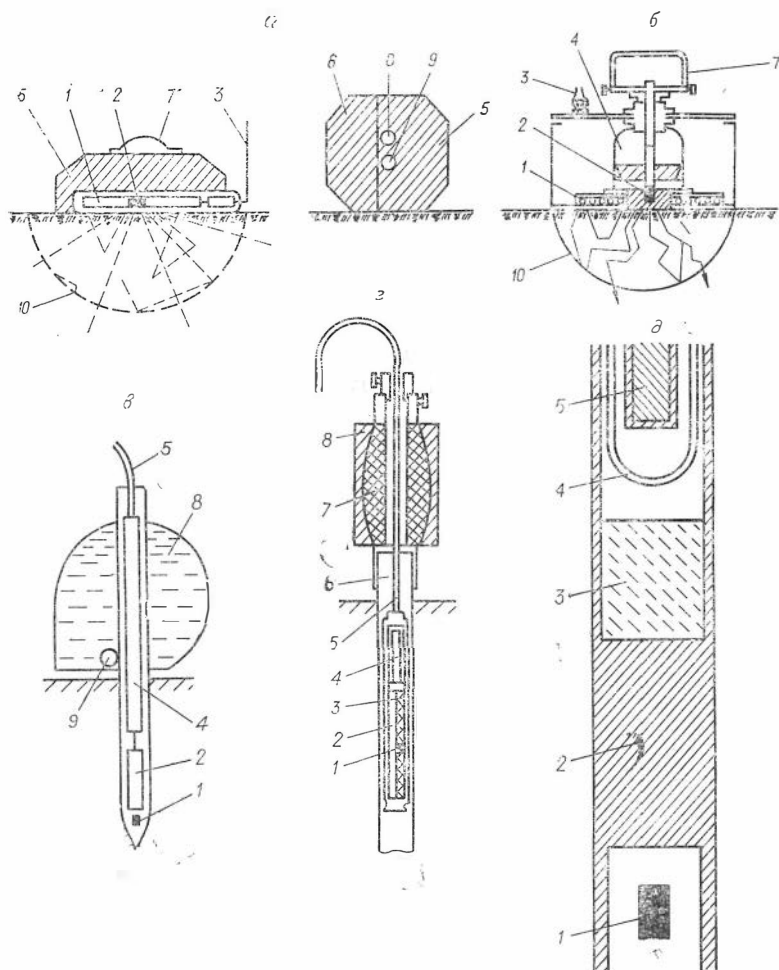


Рис. 9.3. Схематическое устройство переносных приставных влагомеров с одним НВУ-1 (а) и десятью Р-21 (б) пропорциональными счетчиками, а также зондовых НВУ-1 (в), Р-19 (г) и скважинных приборов ДРСТ-1 (д).

Для а и б: 1 — пропорциональные счетчики; 2 — источник нейтронов; 3 — кабель, идущий к пульта; 4 — экран из свинца и парафина; 5 — блок из смеси парафина с борсодержащим веществом, выполняющий роль защитного устройства и части контейнера; 6 — вторая часть контейнера из парафина, выполняющая роль контрольно-калибровочного устройства; 7 — ручка; 8 — сквозной канал для счетчика; 9 — глухой канал для источника; 10 — зона действия прибора. Для в и г: 1 — источник нейтронов; 2 — пропорциональный счетчик нейтронов; 3 — продольный свинцовый экран; 4 — радиосхема; 5 — кабель к радиометру; 6 — обсадная труба; 7 — свинцовая часть контейнера; 8 — парафиновый контейнер; 9 — вкладыш. Для д: 1 — источник; 2 — экран из железа; 3 — парафин; 4 — сосуд Дьюара; 5 — нейтронный люминофор типа ЛДНМ.

рочный блок при их сочленении выполняют роль контейнера для источника при его транспортировке. Источником нейтронов в этом приборе служит плутоний-бериллиевый препарат с выходом около $5 \cdot 10^4$ нейтр/с.

В приборе Р-21 источником нейтронов служит радий-бериллиевый препарат с выходом $8 \cdot 10^4$ нейтр/с. Для защиты оператора от гамма-лучей и нейтронов в приборе имеется экран из свинца и парафина. Общий вес прибора 19 кг. Для переноски прибора служит ручка, при помощи которой источник из рабочего положения может переводиться также в нерабочее положение (внутри экрана). Эталонировочное устройство выполнено в виде ящика и на специальных ножках устанавливается на некотором расстоянии от поверхности земли. Время одного замера равно 1—2 мин.

Если влагомер проградирован для данного типа пород с учетом всех факторов, то содержания влаги в породах с его помощью можно определять с точностью до 0,5—1% ($0,01 \text{ г/см}^3$). Порог чувствительности приставных влагомеров оценивается равным 1—2%.

С помощью перевозных влагомеров влажность почв и грунтов можно определять с относительной погрешностью 1—1,5% в отсутствии выбоин и углублений между установкой и породой. При их наличии погрешности измерений повышаются.

Зондовые и скважинные приборы более широко применяются в практике геофизических исследований по сравнению с переносными и перевозными поверхностными влагомерами. Устройство этих приборов определяется главным образом взаиморасположением источника и детектора нейтронов. По этому принципу приборов можно подразделить на имеющие нулевые размеры зондов (источник располагается вплотную к детектору) или близкие к ним и приборы со средними (20—30 см) и большими размерами зондов (40—50 см и более). В качестве примера приборов с нулевыми зондами могут служить приведенные выше зондовые влагомеры НВУ-1 и Р-19 (см. рис. 9.3, в и г).

Зондовое устройство влагомера Р-19 размещено в дюралюминиевой трубе диаметром 44 мм и длиной 380 мм. Радий-бериллиевый источник с выходом $6 \cdot 10^4$ нейтр/с размещен сбоку, несколько ниже чувствительной части рабочего объема пропорционального счетчика длиной 24 см. Для экранирования счетчика от гамма-излучения источника в зондовом устройстве против чувствительной части счетчика размещен продольный свинцовый экран. При транспортировке прибора зондовое устройство размещается внутри контейнера, изготовленного из свинца и парафина. Снизу у контейнера имеется патрубок, который при измерениях надевается на обсадную трубу, как это показано на рис. 9.3, г.

Зондовые влагомеры с малыми размерами зондов (около 5 см) широко используются для определения влажности грун-

тов при пенетрационно-каротажных исследованиях в станциях СПК (см. § 8, гл. 4) совместно с зондовыми плотномерами.

Влажность грунтов с помощью зондовых влагомеров в отсутствии зазора между прибором и породой определяется с относительной погрешностью 0,5—1%. При наличии зазора точность измерений влажности понижается.

Для снижения погрешностей при определении влажности пород при этом используют приборы со средними и большими размерами зондов. Для того чтобы измерять нейтроны, непосредственно попадающие в детектор из породы, пространство в приборе между ним и источником заполняется парафином и свинцом (см. рис. 9.3, д); при этом парафин располагается вблизи детектора, а свинец вблизи источника нейтронов. Свинец в данном случае необходим для защиты детектора от гамма-лучей источника и гамма-лучей, возникающих при неупругом рассеянии нейтронов — реакции ($n, n'\gamma$). Такие экраны особенно важно располагать в приборах, предназначенных для исследования глубоких буровых скважин, заполненных буровым раствором. Отсутствие экранов в приборе приводит к «заполнению» его полостей нейтронами, замедляющимися в скважине. Попадание этих нейтронов в детектор мешает определению пористости пластов, содержащих нефть и воду. Размещение детектора в сосуде Дьюара позволяет прибор ДРСТ-1 (двухканальный скважинный термостойкий радиометр) использовать для исследования высокотемпературных скважин (+120°С).

Пористость горных пород с помощью таких скважинных приборов определяют в среднем с точностью $\pm 2\%$. Более высокая точность получается при измерениях с приборами, оборудованными двумя высокоэффективными нейтронными детекторами, расположенными на расстоянии 70 и 90 см от источника. При измерении отношения скоростей счета этих детекторов можно значительно ослабить влияние скважины и определить пористость пород с точностью до 1%.

В случае исследования нефтяных скважин рассматриваемые приборы можно применять не только для определения пористости пород, но и для отбивки контакта между нефтью и водой в породах. Это возможно лишь в том случае, если пластовая вода в своем составе содержит повышенные концентрации хлористого натрия (поваренная соль). Так, в отдельных типах нефтяных месторождений содержание соли в пластовых водах может достигать 300 г/л.

В связи с тем, что хлор интенсивно захватывает тепловые нейтроны, на кривых записи нейтронов против минерализованных водоносных пластов фиксируются минимальные скорости. По перегибу кривой при этом в благоприятном случае можно судить о контакте между нефтью и водой в пласте. Так как геофизиков интересует не только влажность или пористость горных пород, но и их плотность, в настоящее время разрабаты-

ваются приборы, позволяющие одновременно определять все эти параметры.

Помимо рассмотренных, для определения влажности и пористости горных пород применяются приборы, основанные на регистрации гамма-лучей, выбиваемых нейтронами (см. § 3, гл. 11).

10. ПОГЛОТИТЕЛИ НЕЙТРОНОВ

§ 1. ЯДРА-ЗАХВАТЧИКИ

В природе имеется целый ряд химических элементов, ядра атомов которых способны интенсивно поглощать (захватывать) медленные нейтроны. Такие элементы можно подразделить на две группы. К первой относят обычно элементы с высокими

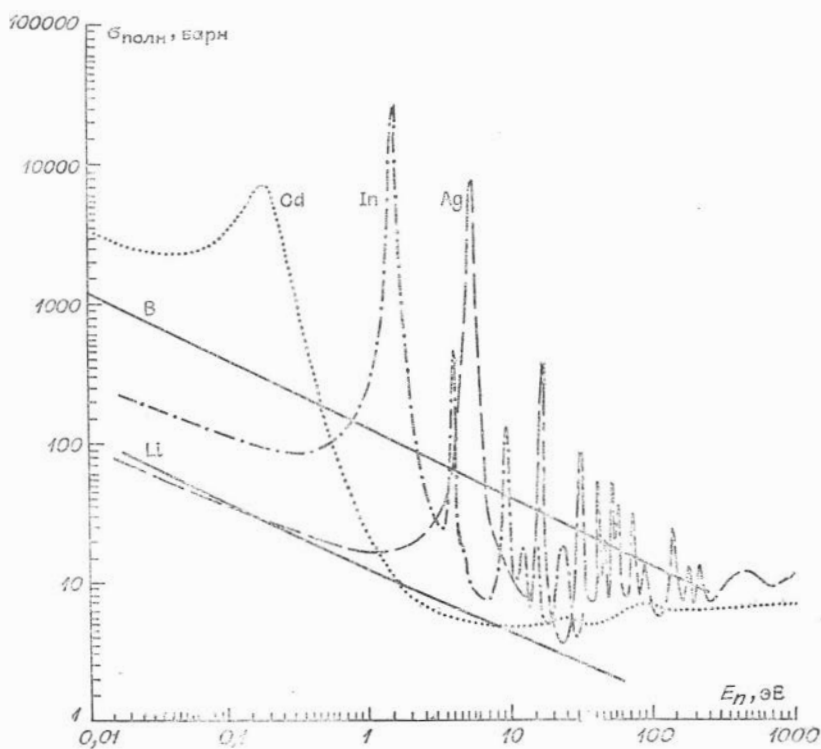


Рис. 10.1. Зависимость эффективных сечений бора, лития, кадмия, индия и серебра от энергии медленных нейтронов.

сечениями захвата медленных и особенно тепловых нейтронов: бор, кадмий, литий, хлор, отдельные редкоземельные элементы и др. Ко второй группе относят химические элементы, ядра атомов которых способны весьма интенсивно захватывать нейтроны в некоторых узких локальных областях энергий, получивших название нейтронных резонансов. К нейтронно-резонансным элементам относят серебро, золото, индий, рений, родий, уран и др.

О характере зависимости сечения захвата медленных нейтронов от их энергии для некоторых из перечисленных элементов можно судить по графикам рис. 10.1. Величина эффективных сечений взаимодействия ядерных частиц с ядрами атомов и самими атомами выражается обычно в барнах ($1 \text{ барн} = 1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$).

Из приведенного рисунка видно, что эффективное сечение в области тепловых нейтронов (0,025 эВ) для бора равно 756 барн, для лития — 71 барн и т. д. Индий в области резонанса с энергией 1,45 эВ имеет сечение, равное 27 000 барн, а серебро — в области своего резонанса с энергией 5,23 эВ — 12 500 барн. У золота в области резонанса с энергией 4,94 эВ сечение достигает 30 600 барн, а у гадолиния в области резонанса с энергией 1,93 эВ — 100 000 барн (это самая большая величина нейтронного сечения). У порообразующих химических элементов величина эффективных сечений к медленным нейтронам меняется в пределах нескольких барн. Это указывает на возможность определения содержания элементов с высокими сечениями по поглощению нейтронов в породах.

§ 2. БОР ОПРЕДЕЛЯЕТ САМ СЕБЯ

Бор — один из химических элементов, находящий широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Так, в медицине соединения бора в виде борной кислоты применяются в качестве дезинфицирующих средств. В сельском хозяйстве микропримеси бора широко применяются в качестве удобрений. Способность бора интенсивно захватывать медленные нейтроны используется в атомной технике для защиты от нейтронов (к замедлителям при этом добавляются борсодержащие вещества). Борные стержни широко привлекаются для управления режимом работы ядерных реакторов и для других целей. В последнее время борсодержащие вещества стали также применяться в качестве высокоэффективного ракетного топлива и т. д.

Вследствие большого значения, которое бор имеет в промышленности и сельском хозяйстве, каждая индустриально развитая страна постоянно нуждается в приросте его запасов, поэтому геологическим поискам бора уделяется немалое внимание. На первом этапе поисков геологи вынуждены были отбирать большое количество образцов горных пород для после-

дующего их химического анализа в условиях лаборатории. В дальнейшем геофизики воспользовались поглощающими свойствами бора для его определения в породах.

Захват нейтронов бором сопровождается вылетом из ядра заряженных альфа-частиц. Это свойство бора, как уже отмечалось § 2, гл. 2, используется для создания пропорциональных и сцинтилляционных нейтронных счетчиков. По эффектам, вызываемым альфа-частицами в счетчиках, судят о потоках нейтронов, являющихся электрононейтральными частицами.

Геофизики такие счетчики нейтронов использовали для создания разнообразных приборов с целью определения бора в природных соединениях.

Таким образом, налицо своеобразный парадокс: бор, содержащийся в нейтронных счетчиках, по существу используется для обнаружения бора, который находится в минеральных образованиях пород. Создание нейтронных лабораторных установок позволило избавиться от дорогостоящего и трудоемкого химического анализа.

Однако здесь мы должны несколько прервать наше повествование о том, как бор ищет сам себя. Дело в том, что помимо бора интенсивной способностью захвата нейтронов обладают и некоторые другие ядра химических элементов, в частности литий, при захвате нейтронов ядрами которого тоже возникает альфа-частица и ядро трития (сверхтяжелого водорода). По эффектам, вызываемым этими частицами в сцинтилляционных счетчиках, также регистрируют нейтроны и определяют бор в породах. В последнее время стали использовать высокоэффективные нейтронные пропорциональные счетчики, заполненные гелием (гелием-3). Это изотоп с эффективным сечением 5060 барн. Эффективность таких счетчиков в 4—5 раз выше эффективности счетчиков, заполненных трехфтористым бором. Гелионные счетчики могут привлекаться и для определения бора в породах.

В качестве лабораторных установок применяются приборы типа показанного на рис. 9.1. При анализе проб весом 50—100 г с помощью таких установок можно определять концентрацию бора, начиная с 0,02% и выше, в пробах весом 2—3 кг — 0,003% и выше. Нейтронные установки могут использоваться для определения в пробах и других химических элементов с порогом чувствительности: 0,1% — литий, 0,01% — кадмий, 0,0005% — гадолиний и др.

Установки типа показанной на рис. 9.1 привлекаются для анализа проб, содержание бора в которых обычно не превышает 6%. При более высоких концентрациях бора в пробах его ядра захватывают практически все нейтроны, попадающие в пробу, и установка начинает регистрировать лишь фоновое излучение. Поэтому для определения высоких содержаний бора в пробах приходится использовать специальные приемы, которые рассматриваются ниже.

Представлять читателю этот химический элемент нет надобности. Интересующихся отсылаем к книге М. М. Максимова, 1970 г. Выше отмечалось, что этот элемент обладает специфическими свойствами по отношению к нейтронам. В области энергии 5,23 эВ ядра атомов изотопа серебро-109 имеют резонансное сечение. Захват нейтронов при этой и других энергиях приводит к образованию радиоактивного изотопа — серебро-110, возникающего в реакции $\text{Ag}^{109}(n, \gamma) \text{Ag}^{110}$. Распадаясь (период полураспада $T=24,2$ с), изотоп испускает бета-частицы с энергией $E_\beta=2,24$ МэВ (60%) и 2,82 МэВ (40%) и гамма-кванты с энергией 0,656 МэВ (60%).

Если фольгу из серебра окружить слоем кадмия толщиной около 1 мм, то фольга активируется в основном под действием нейтронов в области резонанса серебра. Таким образом, устанавливая серебряную фольгу, окруженную кадмием, в поток нейтронов на время облучения t_0 не выше $5T=2$ мин, по измерению наведенной активности серебра-110 судят о потоках нейтронов с энергией в области 5,23 эВ. Измерение наведенной активности осуществляется с помощью газоразрядных или сцинтилляционных счетчиков по регистрации бета-частиц или гамма-квантов, или по суммарному потоку этих частиц. Используя аналогичным образом фольгу и т. п. из других материалов, можно создать детекторы для измерения резонансных нейтронов в других областях энергий. Такие детекторы нейтронов в ядерной физике получили название активационных.

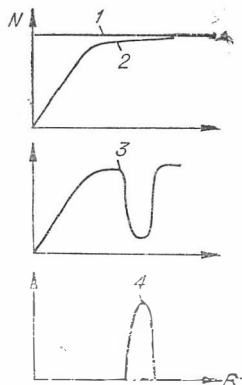
О резонансных потоках нейтронов можно также судить по регистрации гамма-излучения радиационного захвата нейтронов — реакция (n, γ) . При захвате нейтронов серебром-109 возникают гамма-кванты с энергией $E_\gamma=0,268$ (12%), 0,4–0,5 МэВ (с максимумом 2,2 МэВ) и другими более жесткими линиями. В связи с тем, что это излучение возникает мгновенно при захвате нейтронов, его можно измерять с помощью гамма-спектрометрической аппаратуры в процессе захвата нейтронов. Аналогичное гамма-излучение возникает при захвате нейтронов ядрами атомов и некоторых других элементов с резонансными сечениями. Эти детекторы в отличие от активационных получили название радиационных и применяются гораздо реже, что связано с трудностью регистрации гамма-излучения радиационного захвата на фоне аналогичного излучения кадмия и других материалов, захватывающих медленные нейтроны.

Фольга из серебра и других материалов может использоваться не только для регистрации резонансных нейтронов, но и для их выделения на фоне нейтронов других энергий. Суть этого процесса иллюстрирует рис. 10. 2. Если на пути потока нейтронов, выходящих из замедлителя, поставить кадмиевый фильтр, то он поглотит практически все нейтроны с энергией от 0,4 эВ и ниже и пропустит нейтроны с более высокой энер-

гий. Устанавливая на пути этих нейтронов фольгу нейтронно-резонансного элемента, можно деформировать спектр надкадмиевых нейтронов. Фольга будет «выедать» нейтроны в области своего резонанса. В потоке надкадмиевых нейтронов в области этих энергий на-

Рис. 10.2. Схематическая зависимость потока нейтронов от энергии:

1 — поток медленных нейтронов (условно показан одинаковым для нейтронов всех энергий); 2 — поток нейтронов, пропускаемых через кадмий; 3 — поток нейтронов, пропущенный через кадмий и резонансный фильтр; 4 — выделяемый поток нейтронов — разностная величина, получающаяся при вычитании из кривой 2 кривой 3.



блюдается пониженный поток нейтронов. Если теперь из результата замера потока надкадмиевых нейтронов вычесть второй замер, отвечающий деформированному потоку нейтронов, то результирующая величина будет соответствовать замеру потока нейтронов в выделенной резонансной области энергий. Таким образом, облучая изучаемое вещество дважды потоком надкадмиевых нейтронов и нейтронов, дополнительно пропущенных через резонансный поглотитель, получим результирующий разностный эффект, соответствующий как бы облучению изучаемой среды потоком резонансных нейтронов.

В Институте геологии и геофизики СО АН СССР на этом принципе разработана методика определения в пробах серебра и других элементов с высокими резонансными сечениями захвата нейтронов. Принцип методики ясен из рис. 10.3. Если в пробе определяется содержание серебра, то резонансный фильтр и активационный детектор также делаются из серебра. Это необходимо для исключения влияния других резонансных элементов, присутствующих в пробе. Так, в рудах, содержащих серебро, обычно встречается и индий, также имеющий высокое резонансное сечение. В случае отсутствия в пробах другого элемента с высоким резонансным сечением можно обойтись без резонансного фильтра в установке. При этом серебро в пробах определяется по методике однократных облучений.

Таким образом, по рассмотренной методике, серебро способно само себя определять. Аналогичным образом сами себя определяют и другие элементы, ядра атомов которых способны избирательно поглощать нейтроны в некоторых локальных областях энергий.

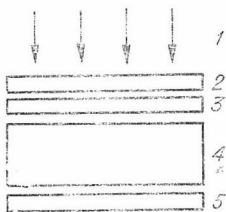


Рис. 10.3. Схема, поясняющая нейтронно-резонансный принцип анализа проб:

1 — поток нейтронов, выходящих из замедлителя; 2 — кадмий; 3 — резонансный фильтр; 4 — проба, содержащая определяемый резонансный элемент; 5 — активационный детектор.

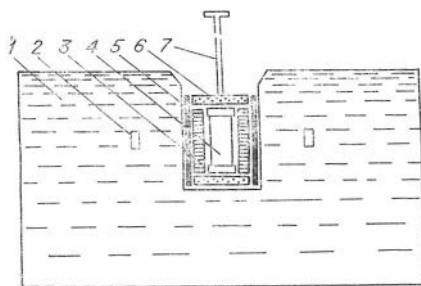


Рис. 10.4. Нейтронно-резонансная установка:

1 — замедлитель нейтронов (вода или парафин); 2 — нейтронный источник (2 шт.); 3 — проба в кольцевом цилиндрическом стаканчике; 4 — цилиндрическая фольга-детектор; 5 — цилиндрический кадмиевый фильтр; 6 — прокладка с определяемым нейтронно-резонансным элементом (2 шт.); 7 — дистанционный штырь — рукоятка.

Для определения в пробах различных элементов с высокими резонансными сечениями захвата нейтронов к настоящему времени разработан целый ряд нейтронно-резонансных установок. О принципиальном устройстве их можно судить по рис. 10.4. Нейтроны, замедленные в водородсодержащей среде, попадают во внутреннюю полость, проходят через кадмий. Во втором замере между пробой и кадмием помещается резонансный фильтр из определяемого элемента. Дискообраз-

ные прокладки необходимы для поглощения нейтронов, идущих к активационной фольге-детектору с торцов. Извлечение фольги-детектора после активации из полости осуществляется с помощью дистанционной рукоятки. Фольга-детектор с прокладкой (для извлечения) может сочленяться механическим способом или с помощью магнита. Извлеченная фольга-детектор надевается на газоразрядный счетчик, который измеряет ее наведенную активность. При количественных измерениях определяемого элемента время облучения фольги t_0 , время переноса активационного детектора t_n и время измерения его наведенной активности t_m выбираются строго определенными.

Для автоматизации процесса подачи фольги-детектора от места облучения к счетчику в замедлителе под фольгой-детектором был сделан цилиндрический канал. После облучения фольги электромагнит отключался. Фольга под действием силы тяжести скользила вниз и подавалась на газоразрядный счетчик.

С помощью рассмотренного нейтронно-резонансного метода при измерениях с двумя источниками с общим выходом $1 \cdot 10^7$ нейтр/с стало возможно определять в пробах серебро и родий с порогом чувствительности в 0,015 и 0,022%.

Аналогичным образом можно определять содержание в пробах других нейтронно-резонансных элементов. Некоторые из таких элементов имеют неблагоприятные нейтронно-активационные свойства: отсутствие радиоактивного изотопа вообще, как, например, у диспрозия, или сравнительно большой период полураспада, например, как у золота-198 ($T=2,7$ дня) и т. д. Для определения этих элементов в пробах можно воспользоваться перекрытием резонансов диспрозия ($E_p=5,35$ эВ) и золота ($E_p=4,94$ эВ) с серебром и таким образом по серебру определять содержание этих элементов в пробах соответственно с порогом чувствитель-

ности 0,3 и 0,7%. Аналогичным образом по родию определяют содержание в пробах индия с порогом чувствительности 0,06%.

Рассмотренные нейтронно-резонансные установки с активационными детекторами нашли еще одну область применения, а именно: с их помощью оказалось возможным определять содержание в пробах и таких поглощающих элементов, как бор, литий и др.

При работе с серебряным детектором установлено, что с помощью рассматриваемой методики регистрации общего потока нейтронов (без кадмия) можно определять содержание бора и лития в пробах с порогом чувствительности 0,01 и 0,07% соответственно. По регистрации надкадмиевых нейтронов бор в природных объектах определяют в присутствии лития с порогом чувствительности 0,1%. По методике комбинированных замеров без кадмиевого фильтра и с ним можно вести раздельное определение в пробах бора и лития с относительной погрешностью, в среднем равной 2 и 3% соответственно. Рассматриваемая методика может быть использована и для определения в пробах весьма высоких концентраций этих элементов (вплоть до 100%) с относительной погрешностью около 1%.

§ 4. ПРИСТАВНЫЕ БОРМЕТРЫ ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Задача поисков борных месторождений и их разведка наиболее эффективно может быть решена при разработке полевых приборов, позволяющих определять содержание этого элемента непосредственно в поле — на месте выхода горной породы. Такая необходимость поисков месторождений бора диктуется еще и следующим обстоятельством. Минеральные образования бора, являющиеся основными источниками его сырья, визуально слабо выделяются от других природных соединений. Поэтому разработка приборов, «видящих» бор в породах, имеет исключительно важное значение. В связи с этим в Институте геологии и геофизики СО АН СССР была поставлена задача по созданию легкого переносного приставного прибора, который геологи могли бы взять с собой в экспедицию для поисков минерального сырья и для проведения разведки бора в карьерах и шахтах. К настоящему времени создан такой прибор со сцинтилляционным борным детектором весом около 4 кг (рис. 10.5), позволяющий определять на месте выхода горных пород содержание бора от 0,2 до 7%.

Применение таких приборов на практике позволяет значительно повысить эффективность поисковых и разведочных работ на бор и снизить их себестоимость. При этом не нужно систематически отбирать образцы пород для их лабораторного анализа. До разработки приставного прибора, как уже отмечалось, лабораторная методика была единственным способом определения бора в породах. При работе с приставным борметром методика отбора проб окончательно не отпадает. Она необходи-

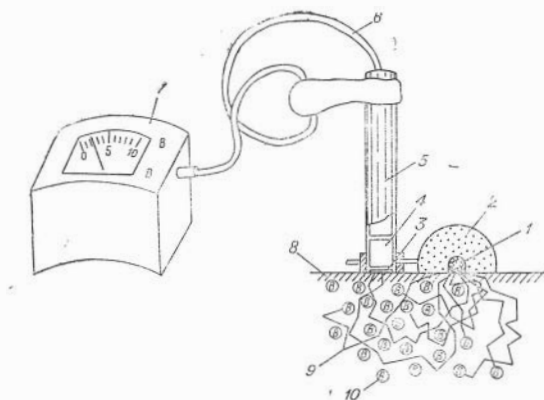


Рис. 10.5. Схематическое изображение приставного борметра:

1 — источник нейтронов; 2 — водородсодержащий парафиновый отражатель нейтронов, одновременно выполняющий роль защитного устройства для оператора; 3 — борсодержащий сцинтиллятор; 4 — фотоэлектронный умножитель; 5 — гильза датчика; 6 — кабель; 7 — пульт прибора, носимый оператором на груди (крепится с помощью ремней); 8 — изучаемая горная порода; 9 — траектории замедляющихся нейтронов; 10 — бор.

ма для градуировки прибора и для проведения контрольных замеров. Однако количество отбираемых проб от общего числа замеров весьма невелико.

Чтобы обнаружить глубоко залегающие от поверхности оруденения бора, важно выявить на поверхности земли и более низкие его концентрации. В этой связи в Институте геохимии и аналитической химии АН СССР имени В. И. Вернадского под руководством профессора В. И. Баранова (г. Москва) был создан прибор (весом около 8 кг), видящий

низкие концентрации бора в породах от 0,003 до 0,2%. Кроме того, под руководством В. И. Баранова разработаны также приборы для автомобильных поисков бора в породах, начиная с 0,003%.

С помощью этого приставного прибора можно определять в коренных выходах горных пород, кроме бора, также литий, ртуть, редкоземельные элементы и др.

§ 5. БОРМЕТРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БУРОВЫХ СКВАЖИН

Для поисков глубоко залегающих от поверхности земли месторождений бора в районах их предполагаемого развития бурят скважины и с помощью бурильных труб извлекают из них керны. О содержании бора в кернах можно судить лишь по данным лабораторного анализа. Такая методика обнаружения бора в породах, пройденных буровыми скважинами, весьма трудоемка.

В. И. Баранов и др. предложили для определения бора в породах по разрезам скважин использовать приборы с нейтронными источниками и детекторами. Устройство этого прибора аналогично применяющемуся для определения пористости горных пород (см. рис. 9.3, д).

К настоящему времени установлено, что в зависимости от типа вмещающих горных пород бор в них можно определять, начиная с концентраций 0,003—0,03%. В сухих скважинах при регистрации потока тепловых нейтронов бор можно определять

до концентраций не выше 4—5%, а в заполненных водой (или буровым раствором) скважинах содержания бора определяют до концентраций $1 \div 1,5\%$. При регистрации надтепловых нейтронов с помощью детектора, обернутого кадмием, верхний порог прибора можно поднять на $1 \div 2\%$. Бор в породах достигает высоких концентраций (13—20%), при этом он практически захватывает все тепловые нейтроны. Прибор регистрирует лишь фоновое излучение, т. е. нейтроны, идущие к детектору по скважине и по прибору. Поэтому концентрации бора в выше указанных породах отбиваются одинаковыми показаниями. При этом высокие концентрации бора в породах определяются лишь с помощью нейтронно-резонансной методики, в частности путем регистрации нейтронов в области резонанса серебра (5,22 эВ). Сечение у бора в области данной энергии падает до 54 барн (см. рис. 10.1). Это сечение по сравнению с пороодообразующими элементами не очень велико, но еще достаточно для того, чтобы судить о содержании бора в породах. Определение высоких концентраций бора в породах проще всего вести с помощью сцинтилляционных гамма-счетчиков, обернутых слоем серебра. О потоках нейтронов в области резонанса серебра можно судить по регистрации гамма-излучения радиационного захвата.

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДРУГИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ НЕЙТРОНОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ БУРОВЫХ СКВАЖИН

Рассматриваемый нейтронный метод привлекался для определения ртути, редкоземельных элементов, кадмия и др. В связи с тем, что изменение влажности горных пород мешает определению этих элементов, исследования ведут, располагая в скважинном приборе два источника нейтронов на разном расстоянии от детектора либо измеряя одновременно поток тепловых и надтепловых нейтронов. Аналогичные приемы используют и при определении бора в породах с переменной влажностью.

Так, при исследовании мономинеральных руд на ртуть ее содержание при работе по двухисточниковой методике можно определять с порогом чувствительности от 0,08 до 0,3% в зависимости от вещественного состава пород. Комплексные ртутно-мышьяковые, ртутно-сурьмяные, полиметаллические и другие руды исследуются с дополнительным применением двухисточниковой селективной гамма-гамма-методики (см. § 3, гл. 6). Содержание ртути в рудах по этой комплексной методике можно определять с порогом чувствительности 0,03% при усреднении результатов измерений по метровым интервалам.

Редкоземельные элементы при измерении потока тепловых и надтепловых нейтронов можно определять с порогом чувствительности от 0,003 до 0,01% в зависимости от вещественного состава вмещающих пород и руд. Аналогичная методика применялась для определения в полиметаллических рудах кадмия

с порогом чувствительности 0,04%. Наличие корреляционной связи кадмия с цинком позволило по этой методике определять последний, не имеющий аномальных свойств по отношению к нейтронам.

Помимо этого рассматриваемая методика применяется для определения в породах высоких концентраций марганца (от 5 до 10% и выше) и железа (от 10—15% и выше).

11. ГАММА-ЛУЧИ, ВЫСЕКАЕМЫЕ НЕЙТРОНАМИ

§ 1. РЕАКЦИИ, ПРИВОДЯЩИЕ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ГАММА-ЛУЧЕЙ

В § 3 гл. 10 отмечалось, что под действием медленных нейтронов происходит реакция (n, γ) — радиационный захват нейтронов. В эту реакцию вступают ядра атомов всех химических элементов, за исключением ядра гелия-4 (альфа-частица). С наибольшей вероятностью реакция (n, γ) происходит при энергии нейтронов от 10 эВ и ниже. В этом диапазоне энергий вероятность реакции преобладает над вероятностью упругого рассеяния нейтронов. Возникающее гамма-излучение может меняться в довольно широком диапазоне энергий — примерно от 0,2 до 11 МэВ. Причем для каждого изотопа характерно образование гамма-квантов с определенным спектром. По регистрации гамма-квантов этого спектра можно судить о природе ядер атомов, вступающих в реакцию (n, γ) .

Высечение фотонов (гамма-лучей) под действием нейтронов может происходить на целом ряде ядер атомов также в реакции $(n, n'\gamma)$ — неупругое рассеяние нейтронов. Эта реакция в отличие от рассмотренной происходит только под действием быстрых нейтронов с энергией от $0,6 \div 1$ МэВ и выше. Причем чем выше энергия нейтронов, тем с большей вероятностью протекает реакция $(n, n'\gamma)$. Величина энергии возникающих при этой реакции гамма-квантов не превосходит 7,1 МэВ. Однако для каждого ядра атома изотопа также характерно образование гамма-квантов с определенной энергией. При спектрометрических измерениях при этом можно судить о природе ядер атомов, вступающих в реакцию $(n, n'\gamma)$.

Протекание реакций $(n, n'\gamma)$ и (n, γ) отдельно по времени интервалом замедления нейтронов от быстрых ($1 \div 11$ МэВ) до надтепловых (~ 1 эВ). Величина этого временного интервала может меняться от долей до десятков микросекунд. Малые времена замедления соответствуют водородсодержащим средам и средам, содержащим высокие концентрации элементов с боль-

шими сечениями захвата медленных нейтронов (бор, гадолиний и др.). Более значительные времена замедления отвечают песчаникам, известнякам и другим породам.

При работе с изотопными нейтронными источниками, постоянно излучающими быстрые нейтроны ($E_{\text{ср}} \approx 5 \text{ МэВ}$), отделить реакцию $(n, n'\gamma)$ от реакции (n, γ) возможно лишь при облучении малых образцов, размеры которых недостаточны для прохождения полного процесса замедления нейтронов. В остальных случаях процессы, связанные с протеканием этих реакций, очень трудно отделить друг от друга.

На основе рассмотренных реакций реализуются лабораторные методы анализа пород и руд. Однако значительно шире методы, основанные на этих реакциях, применяются при изучении разрезов буровых скважин. В последнее время выясняются возможности этих методов применительно к изучению донных морских отложений, богатых различными полезными ископаемыми.

§ 2. НЕЙТРОННЫЕ ГАММА-АНАЛИЗАТОРЫ ПРОБ

По гамма-излучению неупругого рассеяния нейтронов определялось железо в рудных пробах. Схематическое изображение нейтронной гамма-установки, примененной для этих целей, показано на рис. 11.1. Используемый плутоний-бериллиевый источник имел выход $1 \cdot 10^6$ нейтр/с. Проба размещалась в кассетах размером $30 \times 20 \times 3 \text{ см}^3$. Для исключения влияния гамма-излучения радиационного захвата нейтронов установку необходимо располагать вдали от массивных предметов, которые могут создавать мешающий фон (при рассеянии от них излучения и т. п.). Железо в пробах определялось по регистрации гамма-излучения с энергией 0,84 МэВ. Ошибка измерений была оценена равной 1,6%.

Нейтронный гамма-метод с регистрацией гамма-излучения радиационного захвата нейтронов привлекается для определения 10 элементов с порогом чувствительности от 0,1 до 5%.

Породообразующие элементы можно определять, начиная с концентрации 1—5%, а металлические полезные ископаемые — начиная с 0,1—0,5%. Эти пороги чувствительности получены на установке, схематически изображенной на рис. 11.2. Для того чтобы при регистрации излучения от реакции (n, γ) не ме-

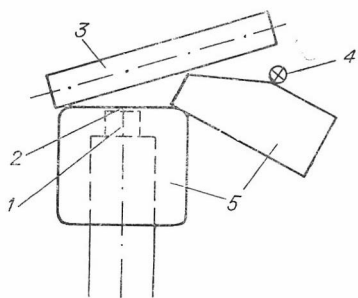


Рис. 11.1. Схема установки для анализа железа в пробах по регистрации гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов (размеры в сантиметрах): 1 — детектор; 2 — фильтр из свинца толщиной 2 мм; 3 — проба; 4 — источник нейтронов; 5 — свинец.

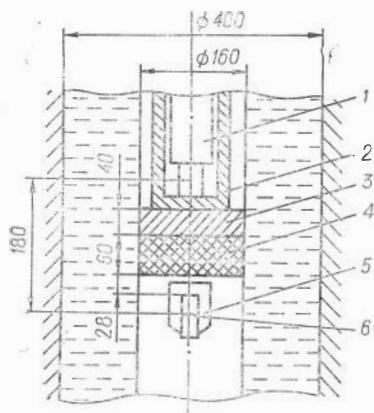


Рис. 11.2. Установка «Нейтрон-3» для измерений гамма-излучения радиационного захвата нейтронов (размеры в миллиметрах):

1 — датчик; 2 — карбид бора (B_4C); 3 — парафин; 4 — исследуемый образец; 5 — свинец; 6 — источник нейтронов.

шала реакции ($n, n'\gamma$), применяются следующие методические приемы. При регистрации гамма-квантов с энергией выше 6,1 МэВ, возникающих в реакции ($n, n'\gamma$) на кислороде, измерения ведут с полоний- или плутоний-бериллиевыми источниками ($E_n = 1 \div 11$ МэВ) с выходом около $5 \cdot 10^5$ нейтр/с. В случае необходимости регистрации гамма-излучения с энергией свыше 3,8 МэВ измерения ведут с полоний-борным источником ($E_n = 1 - 5$ МэВ) с аналогичным выходом нейтронов.

При такой же методике измерений можно определять содержание в пробах кадмия и бора с порогом чувствительности 0,03%. Кадмий определяется по реакции (n, γ), а бор по реакции

$B^{10}(n, \alpha) Li^7 + \gamma$. Возникающее в последней реакции гамма-излучение с энергией 479 кэВ испускается так же мгновенно, как и гамма-излучение, возникающее в реакции (n, γ).

§ 3. ПОЛЕВЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ГАММА-ВЛАГОМЕРЫ И СКВАЖИННЫЕ ПОРИСТОМЕРЫ

В § 3 гл. 9 отмечалось, что для определения влажности и пористости горных пород широко применяется метод, основанный на регистрации замедляющихся нейтронов. Рассматриваемое в этой главе захватное гамма-излучение также связано с замедлившимися нейтронами. Поэтому по регистрации общего потока захватного гамма-излучения также можно судить о влажности и пористости горных пород.

Для определения пористости горных пород нейтронов гамма-метод был предложен академиком Б. М. Понтекорво, опубликовавшим первую свою работу в 1941 г. Эта дата по существу относится к моменту зарождения той части ядерной геофизики, которая основывается на использовании излучений радиоизотопных источников.

Для измерения общего потока регистрируемого гамма-излучения применяется интенсиметрическая аппаратура с газоразрядными и сцинтилляционными счетчиками. В связи с этим рассматриваемая методика определения влажности и пористости горных пород получила название интенсиметрической.

Если на первом этапе для определения влажности и пористости применялась в основном методика, основанная на из-

мерении только гамма-излучения горных пород, то в последнее время для решения этих задач применяется главным образом методика, основанная на регистрации суммарных потоков гамма-лучей и нейтронов. Измерение потоков этих излучений ведется с помощью обычных гамма-счетчиков, обернутых слоем кадмия толщиной ~ 1 мм. Кадмий свободно пропускает к детектору захватное гамма-излучение горных пород, не ослабляя его. К тому же кадмий интенсивно захватывает тепловые нейтроны, несущие информацию о влажности или пористости горных пород. При захвате кадмием нейтронов также высвечивается гамма-излучение, воздействующее на детектор. Таким образом, детекторы гамма-лучей, обернутые кадмием, позволяют судить о суммарных потоках гамма-лучей и нейтронов. Об устройстве приборов, применяющихся для регистрации только одного гамма-излучения и суммарных потоков гамма-лучей и нейтронов, можно судить по данным рис. 11.3. Для защиты детекторов от прямого гамма-излучения нейтронного источника между ними располагается составной экран из железа (250—300 мм) и свинца (90 мм). Размещение сцинтилляционного счетчика в сосуде Дьюара позволяет с помощью прибора ДРСТ-1 (см. также рис. 9.3, д) исследовать высокотемпературные скважины (до $+120^\circ\text{C}$). Сцинтиллятор для защиты от активации нейтронами окружен составным фильтром из бора, свинца и кадмия. Фильтр из свинца необходим для подавления гамма-излучения, возникающего при захвате бором нейтронов, а кадмий — для поглощения характеристического излучения, возникающего в свинце под действием гамма-квантов. В скважинном приборе СП-62 для одновременной регистрации потока гамма-лучей и тепловых нейтронов газоразрядные счетчики окружены слоем кадмия толщиной 0,5—0,7 мм.

Влажность и пористость горных пород более надежно можно определять с помощью приборов, одновременно регистрирующих потоки гамма-лучей и нейтронов. Пористость горных пород в интервале от 5 до 40% можно определять с относительной погрешностью $\pm 10\%$, т. е. с абсолютной погрешностью 0,5 и 4%.

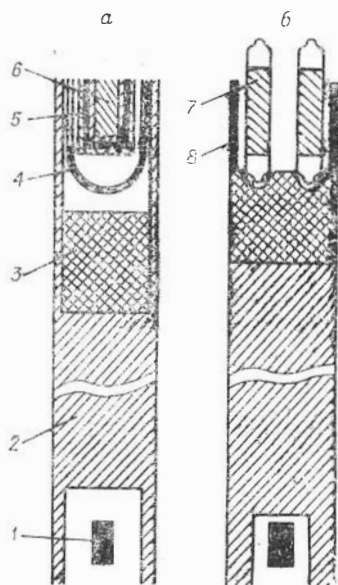


Рис. 11.3. Схема зондовой части глубоководных приборов типа ДРСТ-1 (а) и СП-62 (б), применяющихся в нефтепромысловой геофизике для регистрации соответственно потоков гамма-лучей и суммарных потоков гамма-лучей и нейтронов:

1 — источник нейтронов; 2 — экран из железа; 3 — экран из свинца; 4 — сосуд Дьюара; 5 — слоеный фильтр; 6 — люминофор; 7 — газоразрядные счетчики СП-23Г; 8 — кадмиевый фильтр.

Для определения влажности грунтов также привлекается прибор с газоразрядными счетчиками с кадмиевым фильтром — НИВ-1 (нейтронный измеритель влажности). Влажность грунтов от 2,5 до 40% определяется с абсолютной точностью $\pm 2\%$.

В нефтепромысловой геофизике рассмотренные приборы могут применяться для выявления нефтеносных пластов и отделения их от минерализованных водоносных пластов. Помимо этого рассматриваемая методика и аппаратура привлекаются для выявления газоносных пластов.

При изучении углеразведочных скважин рассматриваемые интенсивметрические методы привлекаются для выявления угольных пластов в кавернозных скважинах. Помимо того, с помощью интенсивметрической модификации нейтронного гамма-метода выявляют бороносные пласты в разрезах скважин. Рассматриваемый метод в комплексе с другими методами служит также для расчленения соленосных толщ — с целью отделения калиевых солей от натриевых и т. д.

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЕСТЕСТВЕННОМ ЗАЛЕГАНИИ ПОРОД

Выше отмечалось, что гамма-излучение, высекаемое быстрыми и тепловыми нейтронами, имеет характерный спектр для каждого химического элемента. Поэтому как только геофизикам удалось создать скважинную гамма-спектрометрическую аппаратуру, они сразу же приступили к разработке методики определения в горных породах и рудах целого ряда полезных ископаемых. К настоящему времени такая методика разработана для определения металлических элементов, приведенных в табл. 3. Как видим, при этом хром и железо определяют, начиная с единиц процентов, а никель, медь и ртуть — с долей процента.

Определение рассматриваемых элементов ведется по регистрации жесткого гамма-излучения, проходящего значительный путь в горной породе. Это позволяет получать информацию о слое породы толщиной 10—15 см. При регистрации более мягких излучений определение элементов ведется в слоях породы значительно меньшей толщины. Так, выше отмечалось, что в селективном гамма-гамма-методе, рентгено-радиометрическом методе и методе, основанном на эффекте Мессбауэра, в основном регистрируется излучение с энергией не свыше 100 кэВ. Излучение с этой энергией может выходить из слоя породы толщиной не более 5 мм. В связи с этим нейтронный гамма-метод как более глубоинный по сравнению с другими рассмотренными гамма-методами стал интенсивно внедряться в геологическую практику.

С возникновением спектрометрического нейтронного гамма-метода появилась также возможность определять зольность углей в разрезе скважин, о чем уже говорилось в § 4 гл. 5.

Возможности определения в породах некоторых полезных ископаемых по регистрации гамма-излучения радиационного захвата нейтронов

Определяемый элемент	Массовое макроскопическое сечение, см ² /г	Энергетический диапазон измеряемого излучения, МэВ	Порог чувствительности, %	Примечание
Титан	0,073	3,0—4,6 5,0—6,6	—	В комплексных титано-железистых рудах необходимо определять железо
Хром	0,035	3—5 и выше	4—5	Градуировочный график линейен для диапазона 0—10%
Марганец	0,143	4,8—6,0 6,2—10	—	Определяется в рудах карбонатного состава в диапазоне 0—15%.
Железо	0,027	4,0—6,2 6,4—9	5—6	Градуировочные графики линейны для диапазона 0—25%
Никель	0,046	8,6—9 7,4—8,2	0,5—0,7	Градуировочные графики линейны для диапазона 0—3%
Медь	0,035	3,0—6,6 6,8—9,0	0,2—0,7	Медистые песчаники
Ртуть	1,08	7,2—10 5,4—6,4 По линиям 6,44 и 5,99	0,2—0,7 0,1	Колчеданные руды

Спектрометрическая методика по сравнению с интенсиметрической позволяет более надежно выявлять контакт между нефтеносными и минерализованными водоносными пластами.

Создание полупроводниковых скважинных детекторов позволит еще более расширить возможности рассматриваемых спектрометрических методов. Существующие лабораторные полупроводниковые детекторы использовались в экспериментальных исследованиях для выявления их возможностей при поисках полезных ископаемых на дне моря. При проведении этих исследований было установлено, что с помощью прибора с источником, дающим 10^8 нейтр/с, можно определять в донных отложениях золото в количестве от $8 \cdot 10^{-4}\%$ и выше. Помимо этого, с помощью рассматриваемой методики можно определять в донных отложениях и целый ряд других полезных ископаемых — марганец, серебро и др.

При проведении поисков аппаратуру для донных исследований предполагается размещать в специальных батискафах, опускаемых на дно, или в подводных лодках — при погружении их на дно.

12. ИЗГНАННЫЕ НЕЙТРОНЫ

§ 1. КАК МОЖНО ИЗГНАТЬ НЕЙТРОНЫ ИЗ ЯДЕР АТОМОВ?

Под действием ядерного излучения радиоизотопных источников из ядер атомов некоторых химических элементов можно выбивать (изгонять) нейтроны. В качестве снарядов, выбивающих нейтроны, служат гамма-лучи и альфа-частицы. Взаимодействие их с веществом приводит к реакциям (γ, n) и (α, n) . Методы, основанные на использовании этих реакций, получили соответственно название гамма-нейтронных (фотонейтронных) и альфа-нейтронных. Гамма-лучи по сравнению с альфа-лучами обладают наибольшей проникающей способностью. Поэтому гамма-нейтронный метод в ядерной геофизике применяется гораздо шире альфа-нейтронного метода.

Под действием гамма-излучения радиоизотопных источников, имеющих энергию не больше 3 МэВ, нейтроны можно выбивать только из ядер бериллия и дейтерия. Пороги рассматриваемой реакции на ядрах атомов этих элементов соответственно равны 1,67 и 2,23 МэВ. Если энергия гамма-квантов будет ниже этих порогов, то с их помощью изгнать нейтроны из ядер этих элементов невозможно.

§ 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ БЕРИЛЛОМЕТРЫ

Природный бериллий состоит из одного стабильного изотопа с массовым числом 9 (100%). Среднее его содержание в земной коре по весу равно $3 \cdot 10^{-4}\%$. Наиболее распространенным источником бериллиевых руд является минерал берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, содержащий 5% бериллия. Промышленными считаются руды с минимальным содержанием бериллия от 0,01 до 0,1% в зависимости от масштаба месторождений и экономических условий их эксплуатации.

Из изотопных препаратов для определения бериллия используется гамма-излучение сурьмы-124 [$T=60$ дней, $E_\gamma=2,11$ (9,9%), 1,71 МэВ (45,7%)]. Таким образом, на каждые 100 актов распада сурьмы-124 возникает 55,6% фотонов, которые могут приводить к фотонейтронной реакции на бериллии.

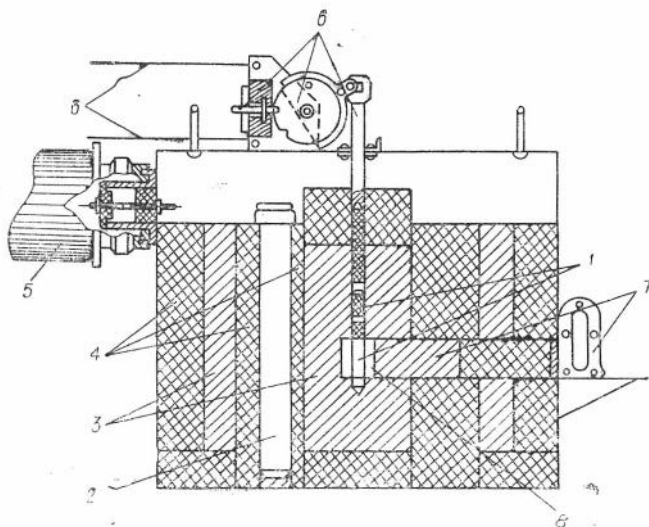


Рис. 12.1. Устройство фотонейтронной установки типа РФНУВ-4-59 (РОБ-1):

1 — источник гамма-излучения; 2 — пропорциональный счетчик нейтронов; 3 — свинцовый экран; 4 — парафиновый замедлитель; 5 — каскад предварительного усиления; 6 — приспособление для дистанционного управления источником; 7 — приспособление для подачи и извлечения проб; 8 — кассета для пробы.

Фотонейтронный метод для анализа бериллия в пробах был предложен в 1937 г. Г. В. Горшковым (г. Ленинград.) Для этих целей в СССР и за рубежом создан целый ряд бериллометров с пропорциональными и сцинтилляционными нейтронными счетчиками.

Об устройстве фотонейтронных установок с пропорциональными счетчиками можно судить на примере одного из первых приборов, созданных в СССР во Всесоюзном институте разведочной геофизики (рис. 12.1 и 12.2). В установке используется источник активностью 50 мКюри. Регистрация замедлившихся нейтронов осуществляется с помощью четырех пропорциональных счетчиков, заполненных трехфтористым бором. В последующем вместо радиометрического определителя бериллия РОБ-1 стала выпускаться аналогичная установка РОБ-1М («Берилл-1») с шестью счетчиками. В установке РОБ-1 внутренний свинцовый экран толщиной 3,5 см, окружающий пробу, предназначен для защиты детекторов от гамма-излучения. Амплитуда импульсов, обусловленных нейтронами, хотя и превосходит в 7—10 раз амплитуду импульсов, обусловленных гамма-лучами, при высокой интенсивности последних происходит наложение амплитуд импульсов, устранить влияние которых с помощью обычной системы дискриминации невозможно. Поэтому для уменьшения потока гамма-излучения в приборах данного типа и используется свинцовая защита счетчиков. Наруж-

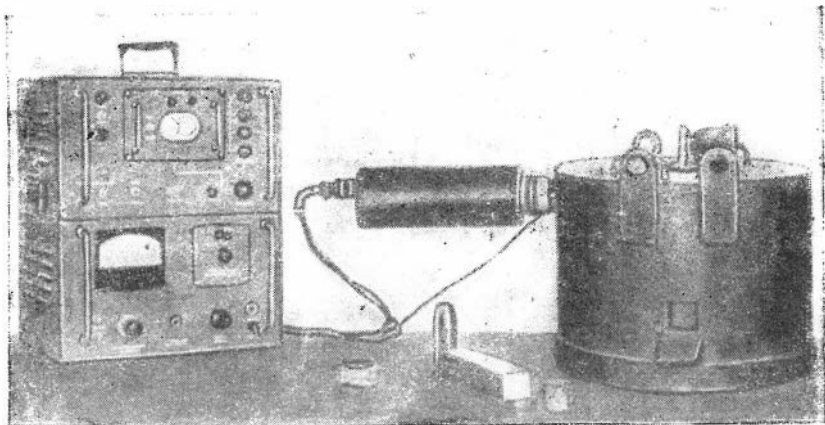


Рис. 12.2. Внешний вид фотонейтронной установки типа ФНУВ-4-59.

ный свинцовый экран предназначен для защиты обслуживающего персонала. Толщина слоя замедлителя выбрана равной 10—11 см, т. е. вполне достаточной для замедления возникающих нейтронов до тепловых энергий. Кассета имеет объем 40 см³ и рассчитана для засыпки проб весом 50 г. Перед установкой или извлечением пробы источник с помощью дистанционного приспособления перемещается в верхнее положение, а при измерениях — в нижнее (в центр пробы). С помощью установки РОБ-1 можно вести анализ проб на бериллий с порогом чувствительности $7 \cdot 10^{-4}\%$.

П. П. Клевцовым и Б. И. Поляковым (ВИРГ) для определения в металлометрических и других пробах низких концентраций бериллия ($2 \cdot 10^{-5}\%$ и выше) создана высокочувствительная установка с источником активностью 200 мКюри и двадцатью пропорциональными борными счетчиками. Замена этих счетчиков гелиевыми позволит примерно в 5 раз снизить активность источника.

А. Л. Якубовичем и др. для анализа порошковых проб создана установка «Берилл-2» на сцинтилляционных счетчиках. Установка может использоваться в двух вариантах (рис. 12.3): для анализа порошковых проб и кусков руды (штуфов). В качестве нейтронного люминофора в приборе можно использовать дисковые сцинтилляторы Т-1 или Т-2 и фотоумножитель ФЭУ-49. Источником излучения служит препарат сурьмы-124 активностью 10—20 мКюри. Навеска порошковых проб составляет 100 г. Вес штучных проб может меняться от 100 до 1000 г. Сосуд имеет диаметр 25 см и высоту 20—30 см. Порог чувствительности при анализе порошковых проб оценивается равным $5 \cdot 10^{-4}\%$, а штучных — $3 \cdot 10^{-3}\%$.

Применение фотонейтронного метода для определения в пробах бериллия позволяет повышать производительность ана-

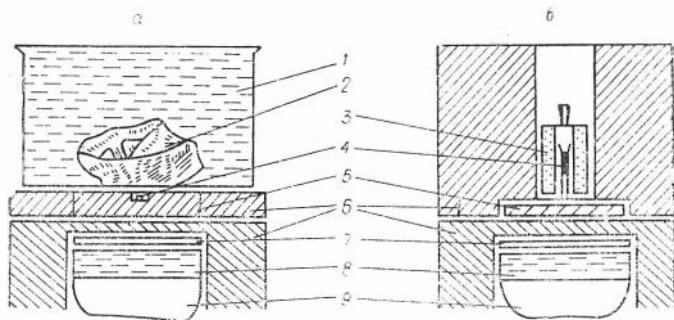


Рис. 12.3. Устройство сцинтилляционного бериллометра для анализа штучных (а) и порошковых (б) проб:

1 — сосуд с водой (замедлитель); 2 — образец штуча; 3 — кассета с порошковой пробой; 4 — источник гамма-квантов; 5 — свинцовый экран; 6 — парафиновый замедлитель; 7 — нейтронный люминофор; 8 — светопровод; 9 — фотоумножитель.

лиза в 3—5 раз по сравнению со спектральным методом и в 4,5—5,7 раза по сравнению с химическим методом. Стоимость одного анализа на бериллий фотонейтронным методом 32—83 коп., что в 2—7 раз ниже стоимости спектрального анализа и в 3,3—11 раз ниже стоимости химического анализа. Разработанная фотонейтронная методика определений бериллия в пробах необходима для анализа проб, отбираемых с целью поисков и разведки месторождений бериллия. Само собой разумеется, что разработка методики определения бериллия непосредственно в коренных выходах пород позволит еще более повысить производительность работ и снизить их себестоимость. О полевых бериллометрах рассказывается в § 4 этой главы.

§ 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ДЕЙТЕРИОМЕТРЫ

В природных объектах основным источником дейтерия является обыкновенная вода, содержание дейтерия в водороде которой в среднем равно 0,015%. В нефти, по мнению некоторых исследователей, содержание дейтерия может превосходить его содержание в воде примерно в два раза. Первые исследования по определению дейтерия в воде проведены в Англии К. П. Хайгом, опубликовавшим свои работы в 1953 и 1954 гг. В СССР первые исследования проведены В. И. Барановым и др. в Институте геохимии и аналитической химии (ГеоХИ) АН СССР.

В качестве источников гамма-излучения для фоторасщепления дейтерия применяют обычно изотоп натрия-24 [$E_\gamma=2,76$ МэВ (100%)]. Малый период его полураспада ($T=15$ ч) является существенным недостатком этого изотопа. Поэтому в последнее время для этих целей стали выпускать изотоп кобальта-56 [$T=77,3$ дня, $E_\gamma=3,25$ (12%); 2,99 (2%) и 2,61 (16%) МэВ].

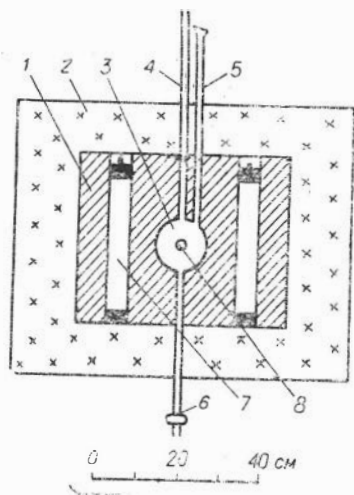


Рис. 12.4 Схематическое изображение дейтериометра ГеоХИ АН СССР:

1 — цилиндрический свинцовый блок; 2 — парафиновый отражатель; 3 — металлическая емкость для помещения пробы; 4, 5 и 6 — отводные трубки; 7 — пропорциональные счетчики; 8 — источник гамма-квантов.

К настоящему времени для анализа дейтерия созданы дейтериометры, сходные по устройству с бериллометрами. Для защиты детекторов от гамма-лучей источника последний также располагается вместе с пробой в свинцовом экране.

Устройство дейтериометра ГеоХИ АН СССР показано на рис. 12.4. В установке используется двадцать пропорциональных счетчиков с обогащенным бором-10. Объем проб выбран равным 0,6 л. Для анализа в установке используется источник активностью около 100 мКюри. Натуральный нейтронный фон этого дейтериометра составлял 12 имп/мин (0,6 имп/мин на один счетчик). Фон с источником в отсутствии пробы повышался до 16 имп/мин (за счет выбивания фотонейтронов из парафинового отражателя). Выбор пробы большого объема позволяет не только получать более высокие выходы из нее фотонейтронов, но и одновременно использовать ее в качестве замедлителя.

Такое устройство установки обеспечивало регистрацию 2,5% нейтронов от их общего числа, возникающих в пробах. Эффективность дейтериометров может быть повышена путем использования гелиевых счетчиков, а также размещения между пробой и детекторами слоя замедлителя, не содержащего дейтерия. В качестве такого замедлителя может служить очищенная от дейтерия протиевая вода, а также графит.

Содержание дейтерия в пробах вод с помощью рассмотренного дейтериометра определяется с относительной погрешностью 1,5—2,5%.

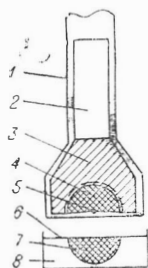
§ 4. БЕРИЛЛОМЕТРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА МЕСТЕ ИХ ЗАЛЕГАНИЯ

Для поисков месторождений бериллия в СССР и за рубежом создан целый ряд полевых бериллометров с пропорциональными борными и гелиевыми счетчиками, а также со сцинтилляционными счетчиками. В связи с тем, что в полевых бериллометрах применяются источники сурьмы-124 активностью 10—50 мКюри, приборы переносят два человека с помощью шеста длиной около 2,5 м. В СССР для определения бериллия

в коренных породах создан прибор «Берилл-3», перевозимый на одноосной тележке. Схематическое устройство этого прибора и его общий вид показаны на рис. 12.5 и 12.6. Детектор от прямого излуче-

Рис. 12.5. Схематическое устройство датчика портативного бериллометра:

1 — корпус гильзы; 2 — ФЭУ-13; 3 — плексигласовый вкладыш с люминофором; 4 — свинцовый экран толщиной 3 см; 5 — источник гамма-квантов; 6 — рабочий эталон из бериллиевой бронзы; 7 — свинцовый транспортировочный экран; 8 — парафин.



ния источника экранируется слоем свинца толщиной 3 см. Для снижения его веса экран выполнен в виде полусферы. Плексигласовый вкладыш диаметром 12 см одновременно выполняет роль замедлителя и светопровода (пропускает световые вспышки от сцинтиллятора к фотоумножителю). Для проверки работы бериллометра сверху второй части свинцовой полусферы, вмонтированной в тележку, располагается диск из бериллиевой бронзы. Наличие парафинового замедлителя позволяет использовать этот диск в качестве фиктивного эталона. Содержание в диске бериллия при этом отвечает некоторой конкретной концентрации бериллия в породе — оценивается путем сравнения с замером на реальной породе с известным содержанием бериллия.

При измерениях с источником активностью 5 мКюри с помощью этого прибора в породах можно определить бериллий начиная с 0,001% в течение 15 мин. Повышенные концентрации бериллия определяются за более короткое время.

Для определения в породах низких концентраций бериллия (от $4 \cdot 10^{-4}\%$ и выше) разработан прибор «Берилл-4» с источником активностью 30 мКюри.

Автомобильная съемка по сравнению с пешеходной является более производительной. Поэтому для поисков месторождений бериллия в местах, доступных автотранспорту, во Всесоюзном институте разведочной геофизики был разработан автомобильный прибор с источником в 0,5 Кюри и 46 про-

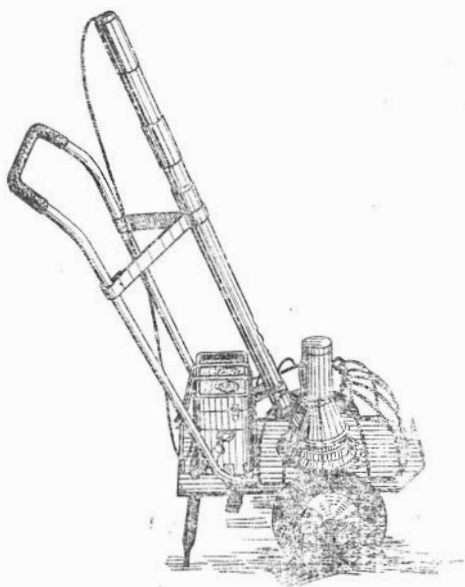


Рис. 12.6. Внешний вид бериллометра типа «Берилл-3».

порциональными борными счетчиками. При транспортировке прибора со скоростью 5—6 км/ч по маршрутам можно определять содержание бериллия в породах от 0,003% и выше. Более низкие концентрации бериллия в породах определяются только при остановке автомашины.

В СССР рассматриваемая методика стала применяться для определения бериллия в породах, пройденных буровыми скважинами, с 1958 г. В настоящее время созданную аппаратуру используют в производственных условиях. С помощью приборов на сцинтилляционных счетчиках можно не только выявлять рудные тела, но и оценивать их мощность и подсчитывать запас бериллия в его месторождениях. При поисковых работах содержание бериллия определяют с 0,005% при скорости подъема скважинного прибора 250—300 м/ч. При детализационных работах на скоростях 25—30 м/ч можно определять его концентрацию с 0,001%, а при остановке прибора (точечные замеры) — начиная с $5 \cdot 10^{-4}\%$. Применение этого метода позволило выявить целый ряд новых месторождений бериллия.

13. ТЯЖЕЛОВЕСЫ В РАЗВЕДКЕ

§ 1. САМЫЕ ТЯЖЕЛЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Из радиоактивных частиц изотопных излучателей (см. гл. 1) наиболее тяжелыми являются альфа-частицы (ядра гелия-4). Масса их равна четырем единицам, а заряд двум единицам ($2e^+$). Они способны взаимодействовать только с верхним слоем облучаемого вещества толщиной ~ 25 мк. При этом может происходить как рассеяние альфа-частиц, так и поглощение ядрами атомов вещества, приводящее к возникновению различных ядерных реакций. Изучая рассеянные альфа-частицы и вторичные частицы, появляющиеся в реакциях, можно судить о составе облучаемого вещества. К настоящему времени реализовано несколько альфа-методик, используемых для решения этих задач.

§ 2. АЛЬФА-РАЗВЕДЧИКИ ЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Изучая состав вещества, используют явление рассеяния альфа-частиц и отдельные реакции с ядрами атомов.

Свойство рассеяния альфа-частиц на ядрах атомов вещества облучаемой среды на большие углы (свыше 90°) было изучено еще немецкими учеными Г. Гейгером и Е. Мардоком в 1909 г. С. А. Аллисон (США) предложил применить это явление для

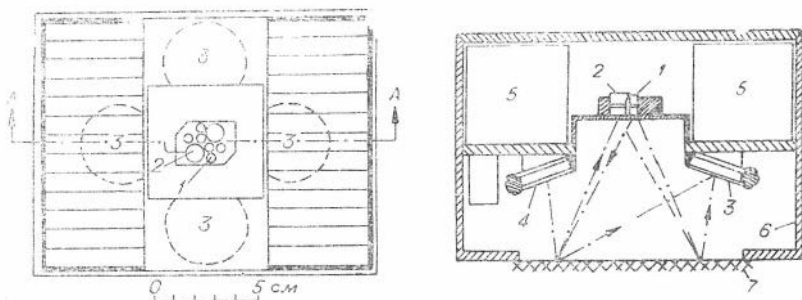


Рис. 13.1. Схема головки прибора для альфа- и протонных измерений.

1 — источник; 2 — альфа-детектор; 3 — детектор протонов; 4 — фольга, поглощающая альфа-частицы; 5 — предусилители; 6 — корпус прибора; 7 — облучаемая поверхность.

анализа облучаемой поверхности, и в 1961 г. это предложение было реализовано в США А. Л. Туркевичем.

А. Л. Туркевич показал, что методика, основанная на рассеянии альфа-частиц, может быть применена для определения легких элементов от бериллия до железа. Зависимость эффекта рассеяния альфа-частиц для этого диапазона химических элементов периодической системы Д. И. Менделеева зависит от атомного номера элементов Z в степени $3/2$ ($Z^{3/2}$). При изучении этого эффекта установлено, что помимо рассеяния альфа-частиц возникает реакция (α, p) на ядрах бора, азота, фтора, натрия, магния, алюминия и кремния. Таким образом, по регистрации рассеянных альфа-частиц и протонов, возникающих в реакции (α, p) , можно определять содержание основных порообразующих элементов. В качестве радиоизотопных источников альфа-частиц при реализации рассматриваемых методов наиболее выгодно использовать изотопы кюри-242 ($T=163$ дня, $E_\alpha=6,1$ МэВ), кюри-244 ($T=17,4$ лет, $E_\alpha=5,8$ МэВ) и плутоний-238 ($T=86,4$ лет, $E_\alpha=5,5$ МэВ), с выходом до $5 \cdot 10^9$ частиц/с. Альфа-частицы и протоны измеряют с помощью высокоразрешающих спектрометрических полупроводниковых счетчиков с амплитудными анализаторами.

Один из созданных А. Л. Туркевичем и другими приборов показан на рис. 13.1. В приборе имеется четыре источника альфа-частиц, один полупроводниковый альфа-детектор и четыре полупроводниковых протонных детектора. Для того, чтобы альфа-частицы не попадали в протонные детекторы, они заэкранированы золотой фольгой толщиной 10 мк. Созданный прибор оказался весьма миниатюрным. Общий вес его без анализатора не более 200—300 г.

Анализ вещества в земных условиях с помощью такого прибора ведут в вакуумных камерах. Приборы рассматриваемого типа использовались для анализа метеоритного вещества и горных пород. Порог чувствительности прибора к указанным выше элементам оценен равным $0,5 \div 1,0\%$.

Таблица 4

Данные анализа горных пород лунной поверхности, вес. %

Элемент	Радио волно- вой метод	Море спокойствия			Океан Бурь, «Аполлон-12»		Море Изобилия, «Луна-16»		Море До- ждей, «Луноход- 1»	Кратер Апол- лоний, «Луна- 20»	
		«Сейвейор-5»		«Апол- лон-11»							
		предваритель- ные результа- ты	уточнен- ные ре- зультаты	регонит	регонит	базальты	регонит	базальты	регонит	рего- нит	анор- тозит
Кислород	41,0±4,2	40,1±3,5	43,52	42,11	41,99	40,94	41,78	42,14	—	45,07	44,34
Натрий	2,0±0,5	2,0	0,3	0,4	0,24	0,26	0,22	0,20	—	0,41	0,30
Магний	2,2±0,5	3,2±3,2	2,65	4,8	7,24	7,05	5,26	4,25	7	5,85	7,25
Алюминий	10,7±2,4	4,3±2,4	7,63	6,9	7,41	5,93	8,12	7,23	7	12,10	10,77
Кремний	21,0±3,7	25, 2±2, 4	21,6	20,0	19,6	18,7	19,50	20,40	20	20,80	19,80
Калий	—	—	—	0,1	0,16	0,05	0,08	0,13	1	0,08	0,43
Кальций	10,6±2,6	10,4±3,5	10,35	8,6	7,14	7,63	8,72	7,44	8	10,86	13,30
Титан	—	—	4,56	4,2	1,86	2,22	2,03	2,94	4	0,34	0,23
Хром	—	—	—	0,25	0,28	0,38	0,21	0,19	—	—	—
Марганец	—	—	—	0,18	0,19	0,20	0,16	0,15	—	—	—
Железо	12,3	12, 1±4, 8	9,4	12,4	13,25	16,57	13,05	15,05	12	4,93	4,48
Сумма	99,8	97,3	100,01	98,09	99,43	99,94	99,14	100,15		100,44	100,90

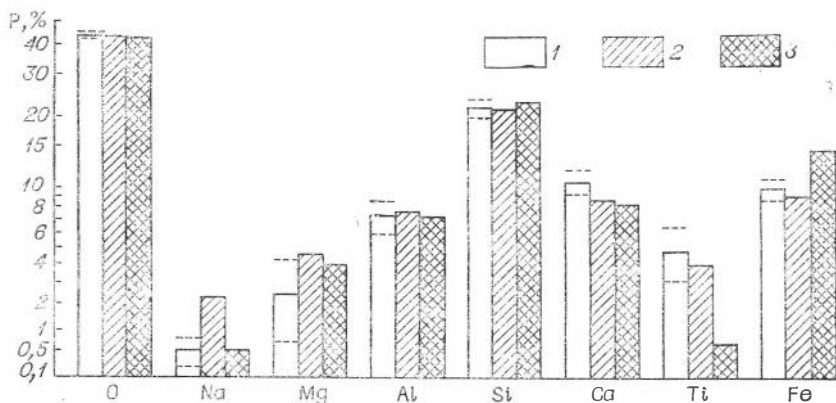


Рис. 13.2. Данные анализа лунных пород с помощью «Сервейора-5» (1) в сопоставлении с данными анализа земных океанических базальтов (2) и метеоритного вещества (3).

Карликовость рассматриваемых приборов привлекла к ним внимание ученых, занимающихся космическими исследованиями. И вот вслед за советским ядерным плотномером (см. § 7, гл. 4) на Луну устремились американские ядерные разведчики. С помощью космических аппаратов «Сервейор» № 5, 6 и 7 они были высажены на Луну в сентябре и ноябре 1967 г. и январе 1968 г. Полученные результаты анализа лунных пород в сопоставлении с другими данными приведены в табл. 4.

Решением этой задачи занимались и советские ученые. Так, В. С. Троицкий осуществил радиоволновое зондирование Луны на длине волны 3 м. Полученные результаты сравнили с данными изучения аналогичным методом земных пород и установили, что они хорошо согласуются с показателями непосредственных предварительных исследований лунных пород ядерными методами. В дальнейшем американские ученые учли влияние титана на результаты измерений и скорректировали предварительные данные.

Из приведенной таблицы видно также, что показатели «Сервейора» хорошо согласуются с материалами непосредственного анализа лунных образцов, доставленных на Землю.

Анализ табличных данных и приведенных на рис. 13.2 показывает, что лунные породы в основном отличаются от аналогичных пород земного происхождения повышенным содержанием титана и пониженным содержанием калия.

§ 3. НЕЙТРОНЫ И ГАММА-ЛУЧИ, ВЫБИВАЕМЫЕ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

Под действием альфа-частиц радиоизотопных источников, как уже отмечалось в гл. 12, может возникать реакция (α, n) . Она происходит в основном на ядрах бериллия, бора и фтора. Эта

реакция широко используется для получения нейтронов в разнообразных радиоизотопных источниках и может применяться для определения в пробах указанных элементов по регистрации образующихся нейтронов.

Под действием альфа-частиц может возникать мгновенное гамма-излучение в реакциях $(\alpha, n\gamma)$, $(\alpha, p\gamma)$ и др., а также при неупругом рассеянии альфа-частиц на ядрах атомов и при их кулоновском возбуждении. Взаимодействие альфа-частиц с ядрами атомов различных химических элементов приводит к возникновению гамма-квантов разной энергии. По регистрации этого излучения с помощью спектрометрических детекторов можно судить о содержании в изучаемых средах некоторых химических элементов, ядра атомов которых вступают в соответствующую реакцию или возбуждаются под действием альфа-частиц.

Для определения содержания отдельных элементов в пробах А. Л. Якубович и др. (СССР) создали комплексную установку с нейтронным и гамма-спектрометрическим детекторами. С помощью этой установки определяют содержание бериллия, бора и фтора в пробах с порогом чувствительности соответственно 0,02; 0,04 и 0,15%.

В реакциях (α, p) , (α, n) и других могут также образовываться различные радиоактивные изотопы. По измерению их наведенной радиоактивности судят о содержании в пробах некоторых элементов (бора, алюминия и др.).

Однако в заключение заметим, что рассмотренные в этом параграфе альфа-методы широко не применяются. Это связано в основном со слабой проникающей способностью альфа-частиц в вещество. Пробы для анализа необходимо тщательно измельчать и просушивать, однако изменение минералогического состава влияет на результаты измерений. Все это и ограничивает возможность применения рассматриваемых методов в ядерном анализе.

14. СКОЛЬКО ЛЕТ ЗЕМЛЕ, ЛУНЕ И ЧЕЛОВЕЧЕСТВУ?

§ 1. КАК ОПРЕДЕЛЯЮТ ВОЗРАСТ ЗЕМНЫХ И ДРУГИХ ОБЪЕКТОВ?

Человечество давно занимает вопрос определения возраста отдельных горных пород и Земли в целом. Решение этой проблемы оказалось возможным лишь после открытия явления радиоактивности. Известно, что распад радиоактивных ядер происходит с постоянной скоростью, не зависящей от изменения окружающих физико-химических условий.

Для определения возраста различных природных образований изучают распад различных изотопов — урана, тория, калия-40 и др. При этих исследованиях важно определить начальное (n_0) и конечное (n) содержания радиоактивного изотопа в природных образованиях. Зная их, нетрудно определить и возраст изучаемых объектов t . О начальном содержании радиоактивного изотопа в изучаемом объекте можно судить по количеству образовавшегося стабильного продукта n_c . Конечное содержание радиоактивного изотопа в изучаемом объекте определяется с помощью радиометрических, радиохимических и других методов. Указанные начальные и конечные продукты связаны между собой следующим соотношением:

$$n_0 = n + n_c. \quad (1)$$

Распад радиоактивных ядер подчиняется экспоненциальному закону

$$n = n_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где $\lambda = 0,693/T$ — постоянная распада, T — период полураспада. Обе эти величины точно известны.

Подставляя соотношение (2) в формулу (1) и произведя некоторые преобразования, получим

$$n_c = n(e^{\lambda t} - 1) \quad (3)$$

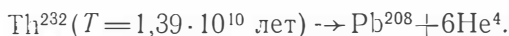
или

$$\frac{n_c}{n} + 1 = e^{\lambda t}. \quad (4)$$

Логарифмируя это выражение, запишем

$$t = \frac{2,3}{\lambda} \lg(1 + n_c/n). \quad (5)$$

Для определения возраста горных пород впервые были привлечены методы, основанные на распаде урана, актиноурана и тория:



Как видим, в качестве конечных продуктов можно использовать изотопы свинца или гелия. Эти методы получили названия соответственно свинцовых и гелиевых.

Распад калия-40 ($T = 1,25 \cdot 10^9$ лет) приводит к образованию в одной цепочке кальция-40, а в другой аргона-40. Методы, основанные на использовании этих конечных продуктов распада, получили соответственно названия калий-кальциевого и калий-аргонового.

В природе встречается также изотоп радиоактивного рубидия — рубидий-87 ($T = 5,25 \cdot 10^{10}$ лет), распад которого обуславливает образование стронция-87. Метод, основанный на опреде-

лении возраста по этим изотопам, получил название рубидий-стронциевого.

Для определения возраста геологических образований применяются и другие способы. Так, для определения молодых геологических образований используется метод, основанный на распаде радиоуглерода — углерода-14 ($T=5685$ лет). Конечным продуктом его распада является азот-14. Этот метод в литературе получил название радиоуглеродного. Он применяется не только в геологии, но и в археологии.

С помощью рассмотренных методов возраст горных пород можно определять в пределах примерно 10 периодов полураспада с момента образования замкнутой системы, т. е. важно, чтобы материнские изотопы и продукты распада не мигрировали из изучаемого объекта.

§ 2. ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ, ЛУНЫ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В соответствии с расчетами по рассмотренной выше методике возраст Земли оценивается в $4,6 \pm 0,1$ млрд. лет. Однако эта величина относится ко времени существования Земли уже со сформировавшимися оболочками (ядром и другими). Истинный возраст Земли как самостоятельно сформировавшейся планеты оценивается в пределах $4,7 \div 5$ млрд. лет.

Наиболее древние из земных пород граниты и сланцы, залегающие в Антарктиде (Земля Эндебери) имеют возраст 4 млрд. лет. Породы из Охотского горного массива (СССР) и Западной Гренландии, имеют возраст в 3,9 млрд. лет. В штате Миннесота (США) обнаружены гнейсы, имеющие возраст 3,55 млрд. лет. Самые древние породы, соответствующие указанному выше возрасту в 4,6 млрд. лет, еще нужно найти.

По образцам, доставленным на Землю с Луны из Моря Спокойствия («Аполлон-11»), Океана Бурь («Аполлон-12») и Моря Изобилия («Луна-16»), было установлено, что их возраст близок по абсолютным значениям и может быть принят равным 4,5 млрд. лет. Определение возраста пород Марса планируется в конце 80-х годов, после того как с его поверхности на Землю будут доставлены их образцы.

Возраст каменных метеоритов, собранных учеными на Земле, также оценивается в 4,5 млрд. лет.

Таким образом, возраст Земли, Луны и метеоритов определяется величинами, близкими по значению. Это дает основание считать, что возраст всей Солнечной системы равен $4,7—5$ млрд. лет. Возраст нашей Галактики оценивается в 10 млрд. лет.

На основании изучения возраста донных отложений океанов, морей, озер, рек и т. д. ученые пришли к выводу, что современные океаны образовались 150 млн. лет назад.

§ 3. О ВРЕМЕНИ ЗАРОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ И ПОЯВЛЕНИИ ЧЕЛОВЕКА НА ЗЕМЛЕ

На Земле за счет солнечной радиации, тепла Земли и других факторов происходили некоторые специфические реакции образования аминокислот, азотистых соединений, сахаров, порфиринов и др. Из этих простейших соединений в дальнейшем образовались более сложные биологические молекулы, предшественники современных белков и нуклеиновых кислот. На их основе возникли в последующем простейшие живые структуры, способные к самовоспроизведению. Этот этап химической эволюции продолжался 1—1,5 млрд. лет.

После химической начинается биологическая, дарвиновская эволюция, возникшая примерно 3—3,5 млрд. лет тому назад. Это подтверждается отдельными находками древнейших остатков микроорганизмов в горных породах, возраст которых определяется по продуктам радиоактивного распада. Так, отпечатки примитивных водных растений, найденных в ископаемых известняках Южной и Центральной Африки и, в частности, Сахары, датируются возрастом в 2,7 млрд. лет. Микроорганизмы, напоминающие современные сине-зеленые водоросли, обнаруженные в же-

Таблица 5

Этапы эволюции приматов и человека

Этапы эволюции	Время появления, млн. лет назад	Этапы эволюции	Время появления, тыс. лет назад
Плиоитек — ранняя проточеловекообразная обезьяна, напоминающая современного гиббона	37	Австралопитек развитый — пользовался примитивными орудиями (камни с несколькими отщепами)	2000
Проконсул — ранняя антропоидная обезьяна, предок шимпанзе	26	Человек выпрямленный — первый «настоящий» человек, пользовавшийся огнем и рубилами	1000
Дриопитек — первая ископаемая человекообразная обезьяна	20	Ранний человек — наиболее ранний представитель современного человека, пользовался хорошо обработанными орудиями, жил в Европе	250
Раманитек — наиболее древний предок человека по прямой линии	14	Неандерталец — пользовался кремневыми орудиями и обитал в Европе, Африке и на Среднем и Ближнем Востоке	150
Австралопитек африканский — первый человек, передвигавшийся в вертикальном положении	5—3	Кроманьонец — незначительно отличается от современного человека, жил в Европе, Африке и Китае.	40

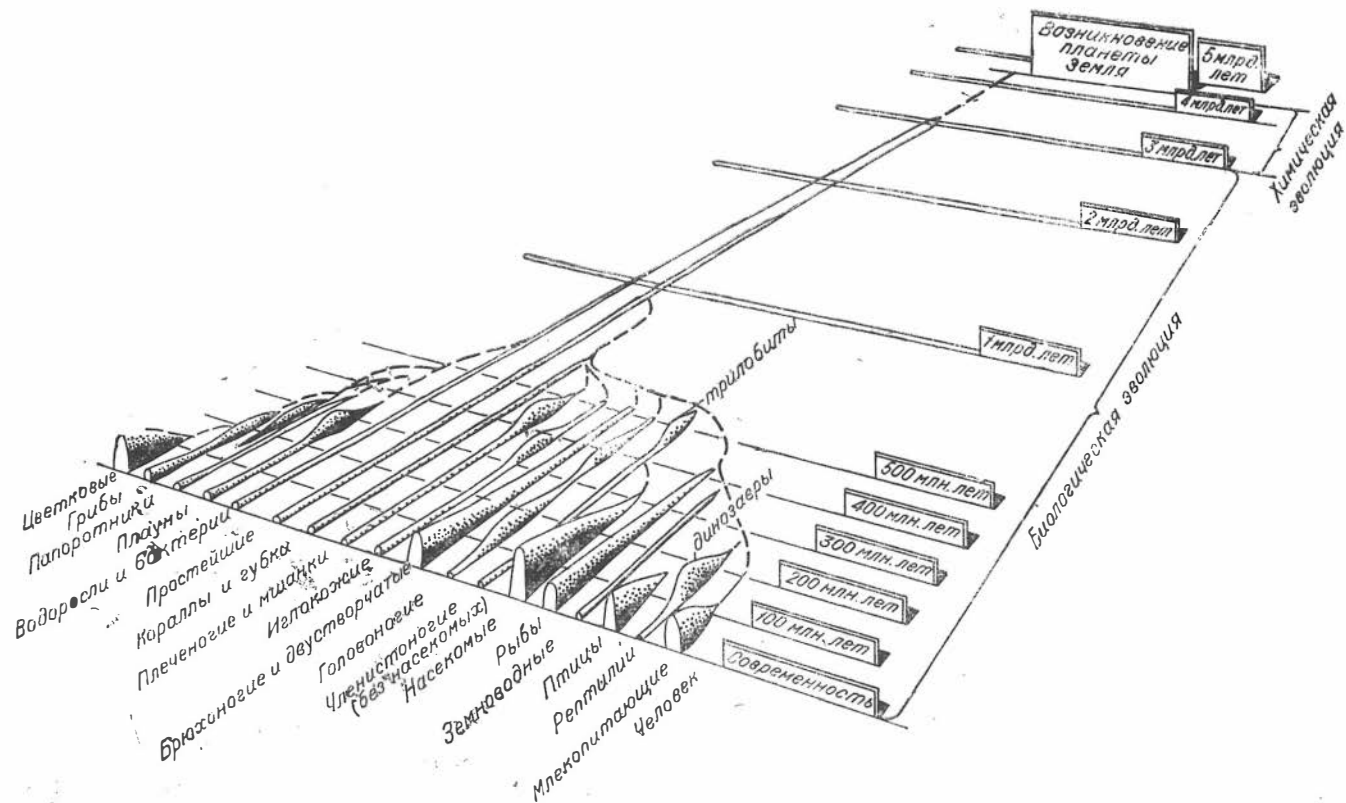


Рис. 14.1. Этапы эволюции жизни на Земле.*

См. ж. «Наука и жизнь», 1973, № 8, с. 63.

лезоносной формации Ганфлит района озера Онтарио (США), имеют возраст 1,9 млрд. лет. Морские водоросли и грибы, обнаруженные в глинистом сланце Нансач района озера Верхнее (США), имеют возраст 1,05 млрд. лет.

Эти организмы предшествуют флоре (растительности) и фауне (животным). Об этом, в частности, можно судить по данным диаграммы, показанной на рис. 14.1. Из нее видно, что наиболее интенсивное развитие флоры и фауны началось примерно 600 млн. лет тому назад. Человек на Земле появился примерно 40 млн. лет тому назад. Об этапах эволюции приматов и человека можно судить по данным табл. 5. Наиболее ранние останки древнего предка человека обнаружены в отложениях, имеющих возраст 14 млн. лет. Костные останки, находимые в горных породах, являются минерализованными так, что их возраст может определяться непосредственно по содержанию радиоактивных продуктов в костных минеральных образованиях.

15. МЕЧЕННЫЕ АТОМЫ

§ 1. КАКИЕ БЫВАЮТ МЕТКИ?

Применение меток в научных исследованиях имеет давнюю историю. Орнитологи метят (кольцуют) птиц, чтобы следить за их перемещениями. Ихтиологи метят рыб, прикрепляя к их плавникам бирки с номерами. Зоологи метят (клеймят или прикрепляют бирки к ушам и т. п.) крупных диких животных, чтобы следить за их миграцией. Полупроводниковая техника в маркировании животных произвела существенный переворот. В качестве меток стали использовать миниатюрные передатчики, питающиеся от тепла, выделяемого телом. Так метят морских плавающих животных (китов, тюленей и др.) и следят за их перемещением с помощью радиопеленгации.

Ученых давно занимала также мысль о создании меток, чтобы следить за перемещением отдельных атомов и их соединений в живом организме и растениях. Решить эти задачи оказалось возможным лишь благодаря появлению радиоактивных изотопов, дающих о себе знать испускаемыми радиоактивными частицами. Добавляя такие меченые соединения к различным веществам, удалось проследить путь отдельных веществ в растениях и живых организмах. Химики использовали такие метки для изучения процессов диффузии, диссоциации, абсорбции, десорбции и т. д.

В геологии иногда возникает необходимость изучить процессы движения подземных вод в пластах, скрытых от наблюдателя, и т. д. Добавляя к порциям воды различные меченые соединения, также можно решать эти задачи. В качестве меченых атомов стали использовать различные радиоактивные изотопы. Кроме того, оказалось, что для решения отдельных задач можно использовать другие вещества, ядра атомов которых имеют аномальные свойства по отношению к воздействию на них излучению, и т. д. Например, в гл. 10 рассказано о существовании поглотителей нейтронов. Добавляя такие поглотители нейтронов к различным веществам, можно следить за их перемещением в разнообразных средах с помощью различных ядерных методов.

Меченое вещество обычно закачивают в изучаемый пласт в одну скважину — пусковую, а появление его фиксируют в других — контрольных скважинах, которые бурят на некотором расстоянии вокруг пусковой скважины.

На этом принципе основано изучение гидродинамики подземных вод, например при эксплуатации шахтным способом различных полезных ископаемых. При горных работах часто бывает так, что в шахту с отдельных горизонтов начинает поступать вода. Для выяснения места, откуда она поступает, и используют меченые соединения. После обнаружения очага обводнения принимают соответствующие меры, воздействуя на очаг, изменяя направление движения из него потока воды. Контрольные функции опять выполняют меченые соединения.

Гидродинамику подземных вод также изучают при эксплуатации нефтяных месторождений, при так называемом законтурном или внутриконтурном заводнении пластов. Суть этого способа интенсификации добычи нефти сводится к следующему. По контуру нефтяной залежи или внутри контура бурятся скважины, и в них под давлением закачивается вода. При этом важно, чтобы вода заходила в пласт, подстилающий нефтяную залежь. Поступающая вода воздействует на нефтяной пласт и помогает интенсивнее извлекать из него нефть. Контролируют этот процесс также меченые соединения.

Подобного рода задачи возникают и перед геологами, ведущими изыскания участков для сооружения разнообразных строительных объектов. Перед проектированием таких объектов важно досконально изучить геологию и гидрогеологию местности. Для изучения направления потоков подземных вод также привлекаются меченые соединения. Подобного рода задачи встают и при контроле за плотинами и другими сооружениями в процессе их эксплуатации.

Для изучения всех вышеперечисленных задач на первом этапе исследований мечеными соединениями, как уже отмечалось, обычно служили радиоактивные вещества, легко растворимые в воде. В качестве таких соединений использовались соли иодисто-

го патрия или калия, меченые иодом-131 ($T=8,06$ дня). Этот изотоп является интенсивным гамма-излучателем. Его появление в контрольных скважинах легко фиксировалось с помощью скважинных гамма-радиометров.

В последующем для того, чтобы не загрязнять воды радиоактивными веществами, в качестве меченых соединений стали использовать нерадиоактивные вещества. Так, к порциям обычной воды добавляют тяжелую (дейтериевую) воду. По химическим свойствам она не отличается от обычной воды и вместе с ней может легко проходить через пористые горные породы. В контрольных скважинах на необходимой глубине регулярно отбирается вода. Определение содержания тяжелой воды в ней ведется с помощью дейтериометров (см. § 3, гл. 12).

При решении некоторых геологических задач важно следить за поступлением жидкости из ствола скважины в отдельные пласты. Для решения этой задачи, наоборот, необходимо использовать меченые вещества, легко абсорбирующиеся в породе в местах поступления в них жидкости. Вначале использовались радиоактивные вещества, а в последнее время стали применяться соединения с бором и кадмием. Места скопления в скважине таких соединений легко фиксировать с помощью скважинных приборов, оборудованных нейтронным источником. В качестве меченого вещества использовали также соединения фтора, легко активирующего под действием быстрых нейтронов.

Подобного рода методика шире всего применяется в нефтепромысловой геологии. Для повышения нефтеотдачи продуктивных пластов в эксплуатационных скважинах и приемистости пластов в нагнетательных скважинах (при законтурном или внутриконтурном заводнении) нефтяники стали использовать так называемый метод гидравлического разрыва, который основан на разрыве (расслаивании) пласта под действием на него закачиваемой под большим давлением вязкой жидкости. Совместно с жидкостью в разрываемые пласты задавливается крупнозернистый песок, чтобы сохранить возникшие трещины после прекращения давления в скважине. С целью контроля за этим процессом к песку и добавляют меченые соединения.

С помощью аналогичной методики с мечеными соединениями осуществляют контроль за техническим состоянием обсадной колонны нефтяных скважин и т. д.

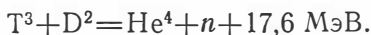
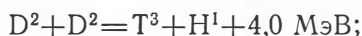
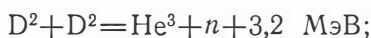
16. ЛЕГКАЯ АРТИЛЛЕРИЯ НА ПОЗИЦИЯХ

§ 1. МИРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕЗА ЯДЕР

Образование из одних легких ядер других — более тяжелых — получило название ядерного синтеза. Наиболее высокая энергия выделяется при синтезе самых легких ядер — изотопов водорода:

протива — H^1 , дейтерия — H^2 или D^2 и трития — H^3 или T^3 . Синтез этих ядер в различных комбинациях приводит к образованию ядер гелия — He^3 и He^4 с выделением колоссальной энергии.

Для реализации водородной бомбы обычно используются следующие реакции синтеза:



Как видим, наибольшая энергия выделяется в последней реакции, кроме того, она происходит при более низких энергиях дейтронов, чем две первые.

Чтобы произошли рассматриваемые реакции, ядра атомов необходимо разогнать до высоких энергий с целью преодоления кулоновских сил отталкивания ядер. В водородной бомбе необходимы высокие энергии тяжелым ядрам водорода сообщаются при атомном взрыве, основанном на делении ядер урана, плутония и т. п.

В связи с тем, что в некоторых рассмотренных реакциях выделяются нейтроны (n), физики использовали эти явления для получения мощных управляемых нейтронных источников. Высокие энергии ядрам водорода (дейтронам — d) сообщаются с помощью источников высокого напряжения.

Для получения нейтронов по рассматриваемому принципу разработаны специальные нейтронные трубки, используемые в науке и технике для решения разнообразных мирных задач. О принципиальном устройстве таких трубок можно судить по схемам, показанным на 16.1 и 16.2.

Газонаполненные трубки работают при давлении дейтерия $10^{-3} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. Электроны, вырывающиеся из накаливаемой вольфрамовой спирали, ионизируют дейтерий. Под действием приложенной разности потенциалов между катодом и анодом ионного источника они ускоряются вдоль оси трубки и попадают в ускоряющий промежуток трубки с фокусирующей диафрагмой. Под действием приложенной разности потенциалов около 100 тыс. Вольт ионы подобно артиллерийским снарядам бомбардируют тритиевую мишень. В ускоряющем промежутке трубок поддерживается определенный, вакуум, чтобы исключить соударения ионов дейтерия с атомами газов.

Созданные в Советском Союзе нейтронные трубки имеют весьма миниатюрные размеры (диаметр от 20 до 76 мм и длина от 155 до 210 мм). С их помощью можно получать потоки нейтронов до $10^8 \div 10^9$ нейтр/с. К настоящему времени создаются трубки с выхо-

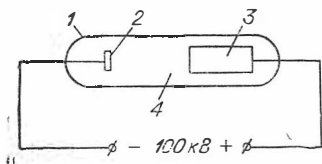


Рис. 16.1. Принципиальное устройство нейтронной трубки.

1 — стеклянный баллон; 2 — тритиевая мишень; 3 — источник ионов дейтерия; 4 — промежуток, в котором происходит ускорение ионов.

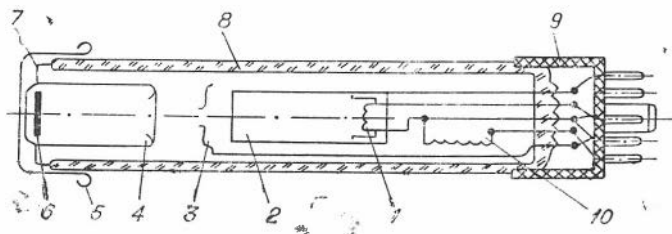


Рис. 16.2. Схема универсальной нейтронной газозаполненной трубки (УНГ-1):

1 — накаливаемый вольфрамовый катод; 2 — анод ионного источника; 3 — фокусирующая диафрагма; 4 — высоковольтный электрод; 5 — экранирующий колпачок; 6 — титано-третиевая мишень; 7 — высоковольтный вывод мишени; 8 — стеклянный баллон; 9 — цоколь; 10 — натекаль (хранилище дейтерия).

дом до 10^{10} нейтр/с. В связи с тем, что реакция синтеза происходит в поверхностном слое мишени, тритий под действием дейтронов сравнительно быстро «выгорает». Первые нейтронные трубки были рассчитаны на непрерывную работу в течение 10—20 ч. В настоящее время серийно выпускаются трубки со сроком службы 100 и даже 1000 ч. Долговечность некоторых из таких трубок осуществляется путем подпитки тритием. В ионном источнике наряду с дейтерием находится и тритий. Ионы этих изотопов ускоряются и бомбардируют мишень. Тритий при этом загоняется в мишень, что и позволяет продлевать срок ее службы.

Нейтронные трубки можно эксплуатировать в непрерывном (стационарном) и импульсном режимах. Импульсный режим является более эффективным. К тому же можно реализовать целый ряд новых нейтронных методов, что и покажем ниже.

§ 2. ВЫМИРАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ ПОМОГАЮТ ГЕОФИЗИКАМ

Геофизики, занимающиеся разработкой новых ядерных методов для решения разнообразных геологических задач, раньше других ухватились за миниатюрные нейтронные трубки и создали на их основе нейтронные генераторы для исследования буровых скважин. Академик Г. Н. Флеров в 1956 г. предложил использовать в геофизике импульсный режим работы трубок для разработки новых импульсных нейтронных методов. Реализация импульсных методов показала преимущества их по сравнению со старыми нейтронными методами, базирующимися на изотопных источниках, непрерывно излучающих нейтроны.

Для выяснения сущности импульсных нейтронных методов рассмотрим схему, показанную на рис. 16.3. Нейтроны трубкой испускаются в течение небольшого времени — порядка нескольких микросекунд ($\Delta T = n \cdot 10^{-6}$ с). Частота повторения импульсов выбирается равной от нескольких до 400 герц. Некоторые трубки работают на промышленной частоте — 50 герц.

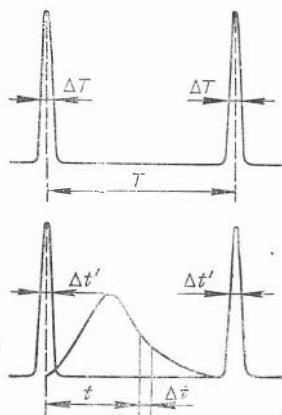


Рис. 16.3. Схема облучения и измерений при импульсных нейтронных методах:

ΔT — длительность импульсов на его полувысоте; T — время между пульсациями нейтронов; $\Delta t'$ — длительность импульса, в течение которого изучается гамма-излучение неупругого рассеяния нейтронов; t — время задержки после окончания импульса; Δt — интервал времени, в течение которого изучается распределение в скважине тепловых нейтронов или их захватное гамма-излучение.

При бомбардировке дейтронами трития возникают быстрые нейтроны с энергией 14 МэВ. Попадая в скважину, заполненную жидкостью, и в горные породы, нейтроны испытывают соударения с ядрами атомов (в основном с водородом) и уменьшают свою энергию до теплового состояния вещества. Процесс замедления нейтронов до тепловых энергий происходит обычно в течение нескольких микросекунд, т. е. соизмерим со временем действия импульса быстрых нейтронов. Тепловые же нейтроны в облучаемой среде, как правило, живут более длительное время. Так, среднее время жизни тепловых нейтронов в воде равно $2,1 \cdot 10^{-4}$ с. Для сухого песчаника среднее время жизни тепловых нейтронов равно $1,3 \cdot 10^{-3}$ с. Наличие в его порах влаги в количестве 20 и 35% приводит к уменьшению этого времени соответственно до $6,5 \cdot 10^{-4}$ и $4,6 \cdot 10^{-4}$ с и т. д.

Таким образом, если в скважине облучать породы потоком нейтронов, то в ее стволе они вымирают гораздо быстрее, чем в породах. Этим явлением геофизики воспользовались для устранения влияния буровой жидкости на результаты определения нейтронных параметров горных пород. Решить эту задачу оказалось возможным только при импульсном режиме работы скважинного нейтронного генератора.

Из рис. 16.3 видно, что после импульса быстрых нейтронов нарастание потока тепловых нейтронов со временем происходит до некоторой величины (максимума), а затем вновь начинает падать. Поэтому регистрацию тепловых нейтронов после импульса выгодно начинать не сразу, а спустя некоторое время, называемое задержкой (t). Регистрацию нейтронов или порождаемых ими в реакции (n, γ) гамма-лучей осуществляют в течение некоторого времени Δt , называемого временным окном прибора. В зависимости от решаемых задач время задержки и регистрации нейтронов или гамма-лучей выбирают различным. Задержку выгодно выбрать такой, чтобы нейтроны, распространяющиеся по стволу скважины, вымерли. Через некоторое время в скважину поступают нейтроны из породы. Эти нейтроны несут информацию о породе и регистрируются в течение времени Δt . На диаграммах нейтронного каротажа горные породы различного вещественного состава отбиваются различными значениями регистрируемого потока нейтронов, что и используется геофизиками для решения различных геологических задач при исследовании скважин.

Импульсные нейтронные методы, основанные на измерении потоков нейтронов и гамма-лучей применительно к изучению разрезов скважин, получили название соответственно импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (ИННК) и импульсного нейтронного гамма-каротажа (ИНГК). Оба метода начали прежде всего привлекаться для отбивки водонефтяного контакта в случае наличия в водоносном пласте минерализованной воды с хлористым натрием. Интенсивное поглощение хлором нейтронов приводит к резкому спаду скоростей счета нейтронов и гамма-лучей против этих пластов, обсаженных буровой колонной. По ИННК водонефтяной контакт отбивается при минерализации вод от $30 \div 50$ г/л и выше, а по ИНГК — от $10 \div 15$ г/л и выше. Оба метода при изучении указанных коллекторов привлекаются для определения пористости горных пород и их насыщенности.

Методами ИННК и ИНГК можно определять в скважинах литий, бор, марганец, железо, кадмий, редкоземельные элементы и ртуть. Методом ИНГК устанавливается также наличие в породах титана, хрома, никеля, меди и других элементов, имеющих важное народнохозяйственное значение.

Под действием быстрых нейтронов гамма-излучение может возникать в реакции ($n, n'\gamma$). Это излучение существует только в процессе импульса, поэтому при проведении разновременных измерений оно вполне отделяется от гамма-излучения, возникающего в реакции (n, γ) под действием тепловых нейтронов. Реакция ($n, n'\gamma$) прежде всего может быть использована при решении задач, связанных с определением в породах кислорода и углерода.

Скважинная аппаратура с генераторами нейтронов применяется также для изучения элементного состава горных пород по методике нейтронного активационного анализа. Этот метод пригоден прежде всего для оценки содержания кислорода, кремния, алюминия, фтора и других химических элементов.

§ 3. НЕЙТРОННЫЙ КОМБАЙН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

На основе нейтронных трубок могут быть созданы приборы для комплексных исследований горных пород одновременно несколькими методами. Такую аппаратуру можно расположить на прицепе к автомашине. Прибор дает характеристику влажности горных пород, их плотности и химического состава.

В США для измерений по нейтронному активационному методу также создана аппаратура, перевозимая на прицепе к автомобилю. Прибор четко фиксировал концентрацию серебра в руде в количестве 0,004%.

Р. Л. Колдуэлл и др. (США) разработали проект нейтронного прибора для комплексных исследований (комбайна) поверхности космических тел. Схема прибора показана на рис. 16.4. Излучение из мишени попадает в породу. С помощью детекторов гамма-

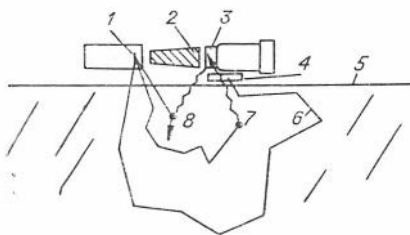


Рис. 16.4. Схема нейтронного комбайна:

1 — мишень нейтрального генератора; 2 — экран; 3 — детектор гамма-лучей; 4 — детектор тепловых нейтронов; 5 — облучаемая поверхность горных пород; 6 — траектория нейтрона, достигающего детектора; 7 — гамма-излучение радиационного захвата нейтронов; 8 — гамма-излучение неупругого рассеяния нейтронов.

лучей и нейтронов одновременно получают сведения о плотности пород и содержании в них водорода, а по гамма-излучению, возникающему в реакциях ($n, n'\gamma$) и (n, γ), судят о содержании в породах основных порообразующих элементов. Если с помощью аппаратов «Сервейор» 5, 6, 7 можно было судить о содержании в породах химических элементов в слое толщиной в несколько микрон (см. § 1, гл. 13), а с помощью прибора РИФМА (см. § 3, гл. 7) — в слое 2—3 мм, то с помощью импульсных нейтронных методов можно судить о слое породы толщиной до 1 м.

Это существенное преимущество нейтронных методов по сравнению с другими ядерными методами.

Созданная аппаратура опробована в земных условиях. В результате установлено, что с помощью этого комбайна по регистрации гамма-излучения, возникающего в реакции ($n, n'\gamma$), можно анализировать целый ряд элементов с порогом чувствительности для кислорода — 2,7%, натрия — 1,3, магния — 0,3, алюминия — 2,4, кремния — 0,6, калия — 1,7, кальция — 2,1 и железа — 0,2%.

Перед включением генератора нейтронов имеющиеся в нем детекторы могут быть использованы для изучения естественной радиоактивности горных пород. Под действием нейтронов генератора большое число элементов, содержащихся в породе, будет активироваться. Это свойство ядер также возможно использовать при изучении пород в месте высадки аппарата.

Рассмотренный комбайн вполне может быть размещен и в самоходных аппаратах типа «Луноход», высаженных на Луну с помощью космических станций. При этом изучение пород осуществляется в процессе движения самоходного аппарата по заданным маршрутам.

17. ТЯЖЕЛАЯ АРТИЛЛЕРИЯ ВЫХОДИТ НА ПОЗИЦИИ

§ 1. ТЯЖЕЛАЯ АРТИЛЛЕРИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Для изучения свойств атомных ядер физики, начиная с 30-х годов, стали создавать различные мощные ядерные орудия. позволяющие разгонять заряженные частицы до весьма высоких энергий и бомбардировать ими различные вещества. За 40 лет эта своеобразная физическая «артиллерия» прошла путь от первых

настольных и малосовершенных ускорителей до гигантских сооружений. Тем не менее и в настоящее время необходимость в конструировании миниатюрных ускорителей настольного типа не отпала. Однако если на первом этапе конструирования ускорительной техники она в основном применялась для физических исследований, то в настоящее время для этих целей используются исключительно гигантские машины, а миниатюрные ускорители применяются для решения разнообразных задач прикладного значения. Примеры тому приведены в предыдущей главе. В ней, в частности, рассказывалось о миниатюрных артиллерийских орудиях — нейтронных трубках.

Увеличение энергии заряженных частиц в ускорителе происходит в специальном ускоряющем устройстве путем взаимодействия электромагнитного поля с зарядом частицы. По форме траектории заряженных частиц ускорители подразделяются на два основных класса: линейные и циклические. В первых (в частности, в нейтронных трубках) траектория частиц близка к прямолинейной и их иногда называют ускорителями прямого действия, а во вторых — близка к круговой или спиральной. Причем в линейных ускорителях частица проходит ускоряющее устройство один раз, а в циклических — много раз. Кроме того, для циклических характерно наличие магнита, обеспечивающего устойчивое циклическое движение частиц в камере ускорителя. По характеру ускоряющего электромагнитного поля каждый из этих типов устройств, в свою очередь, подразделяется на ускорители с постоянным и переменным полями. Линейные ускорители по этому принципу подразделяются на электростатические (с постоянным ускоряющим напряжением) и импульсные (с переменным ускоряющим полем). Циклические ускорители подразделяются на установки: с переменным магнитным полем (бетатрон), с постоянным магнитным и переменным электрическим полями (микротрон, циклотрон) и с переменным магнитным и электрическим полями (синхротрон, синхрофазотрон).

Из этих устройств в ядерно-геофизических исследованиях применяются разнообразные линейные ускорители, бетатроны, микротроны и начинают использоваться циклотроны.

С помощью этих установок широким фронтом ведутся исследования по отработке различных методик ядерного анализа вещества. Заметим, что рассматриваемые орудия, как и те установки, которые были рассмотрены выше (см. § 3 и 4, гл. 3), выгодно применять на практике лишь в том случае, если с их помощью получаются какие-то качественно новые результаты: высокая точность, низкий порог чувствительности, высокая экспрессность и т. д., которые не могут быть получены при работе с радиоизотопными источниками. Кроме того, эти установки удобно использовать для анализа тех элементов и их изотопов, которые не могут быть определены более простыми приемами и методами.

Ниже остановимся на установках, широко применяющихся в ядерно-физическом анализе проб геологических объектов.

§ 2. НЕЙТРОННЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЯДЕРНОМ АНАЛИЗЕ

В § 3 и 4 гл. 3 уже рассказывалось о мощных нейтронных установках — нейтронных размножителях и ядерных реакторах, излучение которых используется для нейтронного активационного анализа проб геологических объектов. О различных видах нейтронного анализа с использованием миниатюрных нейтронных трубок излагалось в гл. 16. В этом же параграфе поговорим об устройстве мощных нейтронных генераторов и их применении для нейтронного анализа проб геологических объектов.

Для получения мощных потоков нейтронов используются разнообразные ускорители заряженных частиц: электронов, протонов, дейтронов и др. Наибольшее применение находят дейтронные ускорители, нейтроны в которых получаются в реакции $H^3(d, n)He^4$. Дейтроны в таких установках обычно ускоряются до 80—100 кэВ, а в самых мощных до 160—200 кэВ. С их помощью можно получать потоки нейтронов до 10^{10} и реже до 10^{12} нейтр/с. Эти выходы соответствуют примерно плотностям потоков 10^8 — 10^{10} нейтр/см²·с.

В качестве ускорителей при этом чаще всего используются установки прямого действия, высокие напряжения в которых создаются с помощью электростатических генераторов Ван-де-Граафа или Иоффе и каскадных генераторов Кокрофта — Уолтона.

В основу работы электростатических генераторов положен принцип электрофорной машины — машины трения. В генераторах Ван-де-Граафа заряд на высоковольтный электрод переносится с помощью бесконечной ленты, а в роторных генераторах Иоффе — с помощью ротора, приводимого во вращение электромотором. Каскадные генераторы Кокрофта — Уолтона состоят из цепочек конденсаторов и выпрямителей (кенотронов, тиратронов или газотронов), переключение которых из параллельного соединения в последовательное приводит к умножению напряжений.

Для анализа геологических проб разработана специальная лаборатория с генератором нейтронов НГ-160 (рис. 17.1, а). Высоковольтное напряжение до 160 килоВольт и ток 0,8 мА в этой установке вырабатывается с помощью электростатического роторного генератора. Нейтронный генератор может работать в непрерывном и импульсном режимах. С его помощью можно получать плотности потока быстрых нейтронов до 10^8 нейтр/см²·с, а плотности потоков тепловых нейтронов в замедлителях — до 10^6 нейтр/см²·с. Подача образцов под облучение и к измерительной установке осуществляется с помощью пневмопочты.

В последнее время для нейтронного анализа проб разработан более компактный нейтронный генератор типа НГ-150 (рис. 17.1, б), позволяющий к тому же получать на порядок более высокие стационарные плотности потоков нейтронов. Высокое напряжение в нем создается с помощью высоковольтного трансфор-

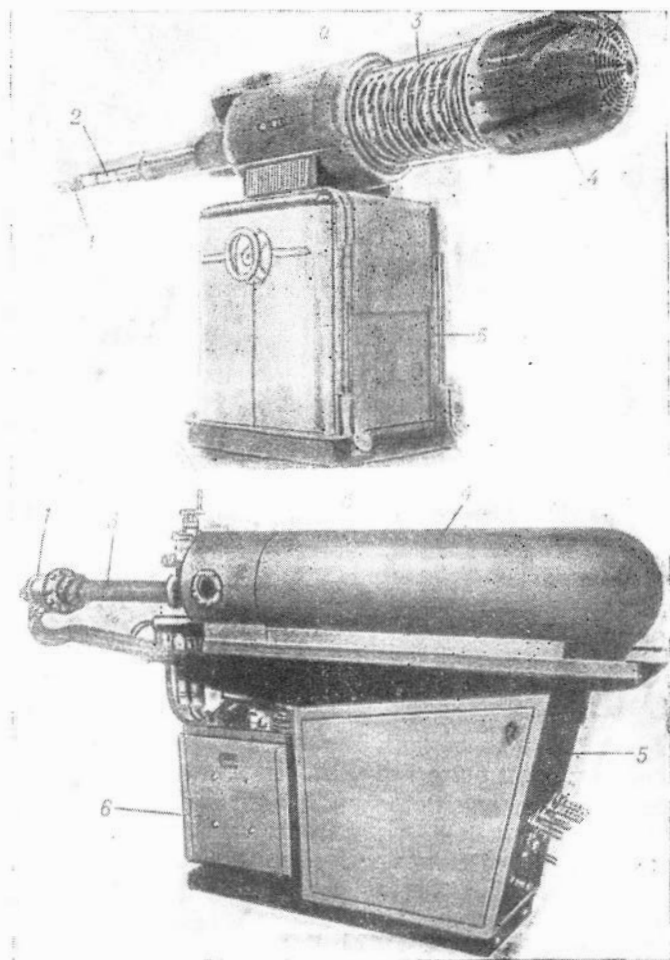


Рис. 17.1. Общий вид нейтронных генераторов НГ-160 (а) и НГ-150И (б):

а: 1 — мишенное устройство с водяным охлаждением; 2 — ионопровод; 3 — ускорительная система; 4 — высоковольтный электрод; 5 — блоки питания и вакуумный насос; б: 1 — мишенное устройство; 2 — система водяного охлаждения; 3 — ионопровод; 4 — корпус ускорительной системы; 5 — блоки питания; 6 — форвакуумный пост.

матора и выпрямителя. Ионы в нем ускоряются до 150 кэВ при токе 3 мА.

Для получения нейтронов может быть использована реакция (d, n) на бериллии $\text{Be}^9(d, n)\text{V}^{10}$, имеющая порог 350 кэВ. При энергии дейтронов 2 МэВ по этой реакции будут возникать нейтроны с энергией 6 МэВ. Помимо этого для получения нейтронов используются также реакции, образующиеся под действием протонов $\text{H}^3(p, n)\text{He}^3$, $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$ и др. Однако эти реакции по срав-

нению с упомянутыми выше более высокоэнергетичны. Порог первой из них равен 1,019 МэВ, а второй — 1,882 МэВ. Поэтому для получения нейтронов их используют сравнительно редко. В качестве ускорителей протонов и дейтронов при этом могут использоваться как установки прямого действия, так и циклического (циклотрон, см. § 4 этой главы).

Для получения мощных потоков нейтронов могут использоваться также электронные ускорители прямого действия и циклические (бетатроны и микротроны, см. следующий параграф). В качестве высоковольтных установок в ускорителях прямого действия используются генераторы Ван-де-Граафа, Кокрофта — Уолтона и др.

Нейтроны в таких установках получают путем взаимодействия тормозного гамма-излучения с бериллием или ураном. С этой целью мишень, тормозящую электроны, окружают блоком металлического бериллия или урана. В зависимости от интенсивности потока излучения с энергией свыше порога фотонейтронной реакции на указанных элементах, конфигурации и размеров бериллиевого блока получают непрерывные или импульсные потоки нейтронов различной мощности. Так, с помощью линейного электронного ускорителя на 30 МэВ в реакции (γ, n) на уране-235 получали источник нейтронов со средней энергией 0,8 МэВ с выходом $3 \cdot 10^{17}$ нейтр/с, что будет соответствовать примерно плотности потока быстрых нейтронов $3 \cdot 10^{15}$ нейтр/см²·с. Однако эти потоки нейтронов сопровождаются интенсивными пучками гамма-лучей, под действием которых также могут активироваться разнообразные радиоактивные изотопы.

В связи с этим для нейтронного активационного анализа используются в основном генераторы нейтронов, основанные на реакции $H^3(d, n)He^4$ с активацией химических элементов на быстрых нейтронах ($E_n = 14$ МэВ). Под действием этих нейтронов на легких ядрах обычно преобладают реакции (n, p) и (n, α) , а на тяжелых ($Z > 50$) — реакция $(n, 2n)$.

С помощью нейтронного генератора в настоящее время ведутся определения более 30 химических элементов с порогом чувствительности от нескольких процентов до $1 \cdot 10^{-4}\%$. В сложных пробах при этом одновременно можно определять медь, кремний и алюминий с порогом чувствительности, соответственно равным 0,05; 0,5 и 1%. Рассматриваемая методика привлекалась для одновременного определения в пробах редкоземельных элементов и т. д.

Нейтронные генераторы могут также быть использованы для активации химических элементов тепловыми нейтронами. С этой целью вокруг мишени, испускающей нейтроны, необходимо расположить замедляющее вещество (парафин, воду, пластмассу и т. п.). Обычно замедлитель выполняется в виде отдельного блока с каналом для ускорителя и проб. Этот блок устанавливается на подвижную платформу, обеспечивающую подкатку замедляющего блока вплотную к ускорителю так, чтобы его мишень рас-

полагалась внутри этого замедлителя. В случае работы с пучком быстрых нейтронов платформа должна обеспечивать быструю откатку блока от ускорителя на необходимое расстояние.

Замедлитель изготавливается обычно в виде куба с ребром около 1 м. Для размещения образцов с целью активации между мишенью и пробой должен располагаться достаточный слой замедлителя. Подачу образцов под облучение и измерение чаще всего осуществляют с помощью пневмопочты.

В каналах тепловых нейтронов получают плотности потоков примерно от $6 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^8$ нейтр/см²·с в зависимости от первичного потока быстрых нейтронов. Эти плотности потоков примерно в $600 \div 20\,000$ раз превосходят потоки в замедлителях с обычными ампульными источниками нейтронов. Следовательно, применение нейтронных генераторов при активации элементов и по тепловым нейтронам может привести к значительному повышению производительности анализа, а также к повышению его точности и понижению порога чувствительности. Так, работая с потоком тепловых нейтронов с плотностью 10^8 нейтр/см²·с, можно определить 27 химических элементов с порогом чувствительности, аналогичным получаемому при активации элементов по быстрым нейтронам.

§ 3. БЕТАТРОНЫ И МИКРОТРОНЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЯДЕРНОМ АНАЛИЗЕ

Циклические электронные ускорители — бетатрон и микрогрон — применяются в основном для получения пучков тормозного рентгеновского излучения.

Первая модель бетатрона была создана в 1940 г. в США Керстом. С его помощью можно было ускорять электроны до энергий бета-частиц радиоактивных изотопов и более, в связи с чем ускорители и получили название бетатронов.

По принципу работы бетатрон напоминает трансформатор. В трансформаторе, как известно, переменный ток, протекающий в первичной обмотке, создает в сердечнике переменный магнитный поток, что вызывает появление вихревого электрического поля, а следовательно, и переменного тока во вторичной обмотке. В бетатроне роль вторичной обмотки выполняет электронный пучок (рис. 17.2), образующийся в вакуумной камере, выполненной в виде полого тора. Эта камера располагается в воздушном кольцевом зазоре электромагнита.

Силовые линии вихревого электрического поля замкнуты вокруг индуцирующего переменного магнитного потока. На электрон, введенный перпендикулярно переменному магнитному полю, действует электродвижущая сила вихревого поля, которая увеличивает его энергию. Электрон за один оборот получает энергию, равную произведению его заряда на э. д. с. индукции во вторичном витке обмотки. В процессе движения электрон накапливает

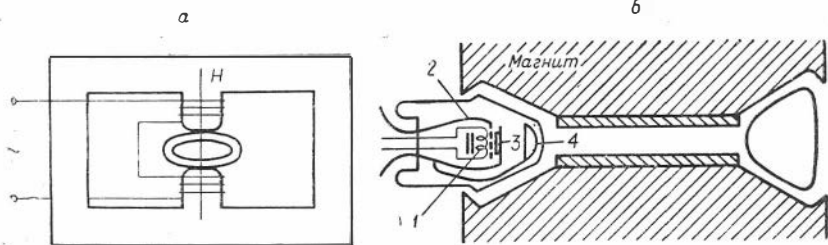


Рис. 17.2 Схема бетатрона (а) и вертикальный разрез его внутренней части (б):

1 — катод; 2 — сетка; 3 — анод; 4 — мишень.

тем большую энергию, чем больше он совершает оборотов. Для создания удобной и дешевой конструкции магнита необходимо, чтобы частица двигалась по примерно постоянной орбите. Это условие стабильности орбиты электрона выполняется, если в каждый момент времени напряженность магнитного поля на орбите будет в два раза меньше средней напряженности магнитного поля на всей площади, охватываемой этой орбитой. На практике это достигается с помощью особой формы полюсных наконечников магнита (рис. 17.2, б), создающих в центральной части ускоряющее поле, более чем в два раза превосходящее поле на орбите электронов.

Камера, в которой ускоряются электроны, изготавливается из фарфора, плексигласа или стекла. В процессе работы бетатрона в его камере должен поддерживаться вакуум до $\sim 10^{-6}$ мм рт. ст. Электроны в камеру поступают от инжектора, располагающегося внутри камеры. Питание электромагнита осуществляется переменным током с частотой в пределах 50—800 Герц.

С помощью современных бетатронов можно получать средние токи электронов до 0,01—0,1 мкА и энергией до 30 МэВ (отдельные машины создавались даже с энергией до 300 МэВ).

Л. М. Ананьев и др. (г. Томск) создали переносные малогабаритные бетатроны типа ПМБ, позволяющие ускорить электроны до 3 МэВ со средним током 0,06 мкА (ПМБ-3), 5 МэВ со средним током 0,012 мкА (ПМБ-5) и 6 МэВ со средним током 0,037 мкА (ПМБ-6). Полный вес этих установок соответственно равен 66, 69 и 128 кг. Питание установок мощностью от 0,8 до 1,5 кВт осуществляется от промышленной сети.

В СССР в 1944 г. В. И. Векслер предложил микротрон. Он работает в области микроволнового (сантиметрового) диапазона радиоволн, что и положено в основу его названия. Принципиальная схема микротрона

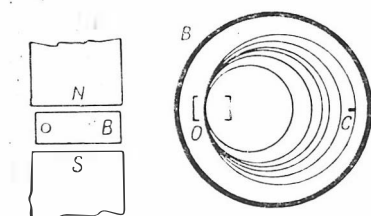


Рис. 17.3. Принципиальная схема микротрона (В — вакуумная камера; О — резонатор; С — мишень; N и S — полюсы электромагнита).

показана на рис. 17.3. На схеме изображены три основных элемента: электромагнит, камера и резонатор. Ускорение электронов происходит с помощью резонатора в камере, расположенной между полюсами электромагнита с постоянным полем. Электроны в камеру микротрона подаются от специального источника — инжектора, расположенного в резонаторе. Введенные в камеру электроны под действием магнитного поля описывают в ней окружности и, ускоряясь, за счет высокочастотного поля резонатора с каждым оборотом увеличивают радиус своей орбиты. При этом устойчивость ускорения определяется жесткой связью между частотой высокочастотного ускоряющего напряжения и частотой обращения электронов.

Электроны в камере движутся со скоростями, близкими к скорости света, и при каждом обороте увеличивают обычно свою энергию на величину, кратную их энергии покоя (0,51 МэВ). Таким образом, конечная энергия электронов в микротроне определяется числом орбит (m) и выражается формулой

$$E_{\text{кон}} = m\Delta E,$$

где ΔE — приращение энергии электрона за один оборот.

С помощью микротронов можно ускорять электроны до энергий порядка 50—100 МэВ. Однако наиболее рационально их использовать для ускорения электронов до энергии порядка 10 МэВ. Средние токи в таких ускорителях можно получать примерно до 50 мкА, т. е. в 50—500 раз более высокие, чем в бетатроне.

На принципе работы микротрона в настоящее время разрабатываются малогабаритные установки для геофизических исследований (ИГиГ СО АН СССР).

Для получения мощных потоков тормозного рентгеновского излучения используются также линейные ускорители, в качестве высоковольтных генераторов в которых используются установки Ван-де-Граафа, Кокрофта — Уолтона и резонансные электронные установки с волноводами.

Мощные пучки жестких гамма-лучей, получаемых во всех рассмотренных установках, используются для фотонейтронного анализа проб, основанного на регистрации нейтронов, возникающих в реакции (γ, n), и гамма-активационного анализа проб по наведенной активности изотопов, возникающих в реакциях (γ, γ'), (γ, n), (γ, p) и др.

С помощью фотонейтронного анализа выгодно определять содержание в пробах шести элементов с порогом чувствительности от $5 \cdot 10^{-6}$ до 0,01%.

Реакция фотовозбуждения ядер (γ, γ') используется для анализа элементов с атомными номерами $Z > 34$, т. е. при этом можно исключить влияние главных пороодообразующих элементов на результаты анализа. В настоящее время рассматриваемая реакция используется для анализа элементов, начиная от селена и кончая ртутью (см. рис. 1.1), с порогом чувствительности от десятых до сотых долей процента в зависимости от энергии и тока

пучка электронов, а соответственно и тормозных гамма-лучей.

Наведенная радиоактивность изотопов, образующихся в реакциях (γ, n), (γ, p) и других, используется для анализа 26 химических элементов с порогом чувствительности от сотых до тысячных долей процента. При этом можно анализировать элементы с различными атомными номерами, т. е. легкие и тяжелые. Рассматриваемые реакции имеют различные пороги на ядрах атомов разных химических элементов. Поэтому, варьируя энергию пучка электронов, можно раздельно определять содержание в пробах разнообразных элементов.

§ 4. ЦИКЛОТРОН И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЯДЕРНОМ АНАЛИЗЕ

Циклотрон является циклическим резонансным ускорителем нерелятивистских (со скоростями меньше скорости света) заряженных частиц (ионов) с постоянным магнитным полем и переменным электрическим (с постоянным периодом). Этот вид ускорителя предложен в 1929 г. в США Лоуренсом и разработан в 1932 г. совместно с Ливингстоном.

Циклотрон подобно микротрону состоит из трех основных элементов: электромагнита, резонансного генератора высокой частоты и камеры, в которой ускоряются ионы (рис. 17.4). Ионы в камеру вводятся инжектором. Для ускорения ионов в камере постоянно необходимо поддерживать вакуум порядка 10^{-6} мм рт. ст. С помощью электромагнита в камере создается однородное и постоянное во времени магнитное поле напряженностью до $2 \cdot 10^4$ Эрстед. Под действием этого поля частицы движутся в камере по окружности, радиус которой пропорционален импульсу частиц. Ускорение частиц происходит лишь в пространстве между дуантами благодаря разности потенциалов величиной до сотен тысяч Вольт, создаваемых высокочастотным электрическим полем резонансного генератора. После каждого перехода частицы из одного дуанта в другой величина электрического поля меняется на обратную. Поэтому частица при переходе из одного дуанта в другой каждый раз ускоряется на величину приложенного к дуантам напряжения и движется по спирали в резонансе с высокочастотным полем. Ускорение может возрасти до тех пор, пока ионы не обретут энергии, при которой нельзя пренебречь релятивистскими эффектами.

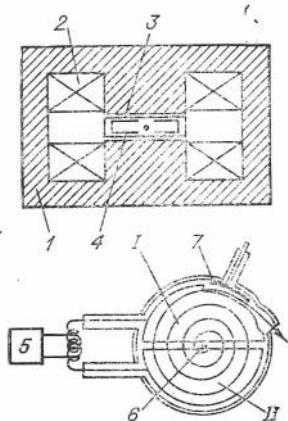


Рис. 17.4. Схема циклотрона:

1 — магнит; 2 — обмотка питания магнита; 3 — вакуумная камера; 4 — дуанты (I, II); 5 — резонансный генератор высокой частоты; 6 — источник ионов; 7 — отклоняющая пластина.

Габариты циклотрона определяются размерами электромагнита, поперечник которого достигает $1,5 \div 2,25$ м. С помощью циклотронов можно ускорять протоны, дейтроны, тритоны, гелионы (ядра гелия-3), альфа-частицы и другие более тяжелые ионы. Протоны и дейтроны можно ускорять максимум до 25 МэВ при токах в пучке соответственно 1 и 0,3 мА. Альфа-частицы и трехзарядные ионы азота можно ускорять соответственно до энергий 48 и 160 МэВ и т. д.

Для получения мощных пучков протонов и дейтронов, как уже неоднократно отмечалось, могут использоваться и линейные ускорители.

Ускоряемые тяжелые ионы углерода, азота, кислорода, хлора и других элементов используются для анализа по их рассеянию от поверхности облучаемых веществ и изучения наведенной активности изотопов, возникающих при реакции ионов с ядрами атомов различных химических элементов. По рассеянию ионов можно анализировать тяжелые ядра химических элементов, отличающихся на единицу. Это одно из существенных преимуществ ионных методов по сравнению с другими, рассмотренными выше, поскольку при этом возможен не только элементный анализ проб, но и изотопный. Тяжелые элементы с атомным номером около 200 в легкой вмещающей среде (кремнезем и т. п.) при бомбардировке ионами углерода можно определять с порогом чувствительности от 0,001 до 0,1% при токе ионов 1 мкА, энергией 35 МэВ и времени измерения 5 мин. Элементы середины периодической системы (см. табл. 1) можно определять, начиная с 0,01% и выше.

Ионы углерода с энергией 80 МэВ использовались для активации свинца. Наведенная альфа-активность возникающего при этом радона-212 ($T=23$ мин, $E_\alpha=6,26$ МэВ) измерялась с помощью полупроводникового альфа-спектрометра. Свинец по этой методике оказалось возможным определять, начиная с $1 \cdot 10^{-4}\%$.

Для анализа вещества в последние годы все чаще начинает применяться излучение ускоряемых частиц, таких как альфа-частицы, гелионы, тритоны, дейтроны и протоны. Так, дейтронный активационный анализ привлекался для определения в геологических пробах алюминия, натрия, фосфора и бора с порогом чувствительности от сотых до десятитысячных долей процента. Кроме того, с помощью рассмотренной методики изучали изотопный состав кальция в минералах. Протонный активационный анализ Л. П. Старчиком и др. использовался для анализа легких элементов от лития до серы с порогом чувствительности от сотых до десятитысячных долей процента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дорогой читатель! Вот и конец нашего повествования о ядерных разведчиках, прокладывающих себе все новые пути при изучении земных богатств и космических объектов. Настанет время, когда не будет ни одного геологического предприятия, занимающегося поисками, разведкой и разработкой различных полезных ископаемых, которое не применяло бы в своей деятельности приборов, основанных на использовании ядерных излучений. С их помощью, как было показано, можно определять в породах и рудах практически все химические элементы без разрушения проб, а подчас и непосредственно в естественном залегании пород и руд. Все это позволяет специалистам оперативно принимать необходимые решения по выявлению месторождения, его разработке и извлечению руд, а также их обогащению и т. д.

Все большее применение ядерные разведчики будут находить и в автоматических станциях, посылаемых человеком для изучения космических тел.

Возможно, некоторых читателей заинтересует эта новая отрасль геофизики и физики и они пожелают избрать ее полем своей будущей деятельности. В этой связи законны вопросы. Не все ли сделано в ядерной геофизике? Есть ли в ней «белые пятна» и «непроторенные пути»? Пора ответить и на эти вопросы.

Ядерной геофизике нужны экспериментаторы, теоретики и аппаратурщики. К настоящему времени, хотя и разработано большое число ядерных методов, многие из них нуждаются в существенном совершенствовании — необходимо повысить информативность ряда методов. Это можно осуществить, с одной стороны, реализуя отдельные новые приемы измерений, которые могут привести к увеличению глубинности методов, а с другой стороны, исключая фоновое излучение, искажающее полезные сигналы. В этих направлениях следует провести ряд экспериментальных и теоретических исследований.

Весьма важные задачи встают и перед аппаратурщиками. Прежде всего необходимо создать весьма миниатюрные приборы

для геологических экспедиций, а также различные миниатюрные оперативно-решающие системы, которые могли бы сразу же обрабатывать получаемую информацию и преобразовывать ее непосредственно для практики.

Такие миниатюрные приборы понадобятся космонавтам на Луне, Марсе и других планетах для создания обитаемых станций. При строительстве таких станций необходимо всесторонне изучить физические и химические свойства «строительных материалов». В последующем встанет вопрос о переработке горных пород планет для получения кислорода и других необходимых материалов. Ядерные разведчики окажут космонавтам неоценимую услугу.

Однако ядерным разведчикам еще много дел на Земле. С их помощью необходимо всесторонне изучить земные недра. Кроме того, взоры геологов и геофизиков уже обращены к морям и океанам — начинается изучение прибрежно-морских и океанических отложений, а в некоторых местах — и добыча различных металлических полезных ископаемых. Из-под морского дна извлекаются нефть и газ. Отрасль геофизики, занимающаяся этими проблемами, получила название морской геофизики. Однако в отличие от сухопутной геофизики морская находится в начальной стадии своего развития. Особенно это касается морской ядерной геофизики. Предстоит большой цикл исследований как для выяснения возможностей различных ядерных методов, так и для создания специальных приборов.

Вот только небольшой перечень ядерно-геофизических задач (из всего их многообразия), которые надлежит решить в ближайшем будущем.

ЛИТЕРАТУРА

- Александр П. Ядерное излучение и жизнь. М., Госатомиздат, 1959, 256 с.
- Белоусов В. В. Земля, ее строение и развитие. М., Изд-во АН СССР, 1963, 152 с.
- Бертело А. От атома к атомной энергии. М., ИЛ, 1948, 206 с.
- Векслер В. И. Ускорители атомных частиц. М., Изд-во АН СССР, 1956, 48 с.
- Войткевич Г. В. Радиогеология и ее значение в познании истории земли. М., Госгеолтехиздат, 1956, 112 с.
- Гохберг Б. М., Яньков Г. Б. Электростатические ускорители заряженных частиц. М., Атомиздат, 1960, 52 с.
- Дахнов В. Н. К познанию недр Земли. М., «Недра», 1968, 144 с.
- Иванов А. Г. Физика в разведке недр. М., «Недра», 1971, 200 с.
- Корсунский М. И. Атомное ядро. М., Гостехиздат, 1956, 428 с.
- Ло Ф. Радиоактивные изотопы на службе человека. Гостехиздат, 1961, 110 с.
- Максимов М. М. Очерк о серебре. М., «Недра», 1970, 142 с.
- Минчин С. Н., Улубеков А. Т. Земля — Космос — Луна. М., «Машиностроение», 1972, 244 с.
- Михеев Г. Ф. Изотопы экономят время и труд. М., Изд-во АН СССР, 1963, 112 с.
- Мухин К. Н. Занимательная ядерная физика. М., Атомиздат, (II изд.) 1972, 276 с.
- Намиас М. Ядерная энергия. М., ИЛ, 1955, 296 с.
- Обручев В. А. Занимательная геология. М., Изд-во АН СССР, 1961, 367 с.
- Орлов Л. И. Малые ускорители. М., «Знание», 1961, 48 с.
- Погодин С. А., Либман Э. П. Как добыли советский радий. М., «Атомиздат», 1971, 232 с.
- Поспелов П. А. Физика и нефть. М., «Знание», 1963, 32 с.
- Рабинович М. С. Ускорители заряженных частиц. М., «Знание», 1957, 47 с.
- Ратнер Б. С. Ускорители заряженных частиц. М., Физматгиз, 1960, 116 с.
- Ромер А. Неугомонный атом. М., Атомиздат, 1963, 127 с.
- Седов А. И. Радиоактивные вещества. М., Воениздат, 1963, 52 с.
- Сидоренко А. В. Геология — наука будущего. М., «Знание», 1964, 64 с.
- Судо М. М. Геология для всех. М., «Знание», 1973, 112 с.
- Хитун В. А. Счетчики ядерного излучения и счетные устройства. М., Госэнергоиздат, 1959, 72 с.
- Шебакин С. Ф. Нейтроны. М., «Просвещение», 1969, 96 с.
- Шпольский Э. В. Очерки истории развития советской физики (1917—1967 гг.). М., «Наука», 1969, 143 с.
- Щербаков Д. И. Геология на новых путях. М., «Знание», 1962, 48 с.

Специальная литература

- Арцыбашев В. А. Гамма-метод измерения плотности. М., Атомиздат, 1965, 203 с.
- Арцыбашев В. А. Ядерно-геофизическая разведка. М., Атомиздат, 1973, 400 с.
- Баранов В. И. Радиометрия. М., Изд-во АН СССР, 1955, 1956, 344 с.
- Большаков А. Ю. Рентгено-радиометрический метод исследования состава горных пород. М., Атомиздат, 1970, 133 с.
- Варварин Г. Б., Филиппов Е. М. Плотностной гамма-гамма-метод в геофизике. Новосибирск, «Наука», 1972, 230 с.
- Глессстон С. Атом, атомное ядро, атомная энергия. М., ИЛ, 1961, 648 с.
- Гольдманский В. И., Лейкин Е. М. Превращение атомных ядер. М., Изд-во АН СССР, 1958, 426 с.
- Горбушина Л. В. и др. Радиометрические и ядерно-геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. М., Атомиздат, 1970, 376 с.
- Колпаков П. Е. Основы ядерной физики. М., «Просвещение», 1969, 400 с.
- Ларионов В. В. Радиометрия скважин. М., «Недра», 1969, 327 с.
- Ларионов В. В. Ядерная геология и геофизика. М., Гостоптехиздат, 1963, 351 с.
- Методы поисков урановых месторождений. М., «Недра», 1969, 392 с.
- Мухин К. Н. Введение в ядерную физику. Изд. 2. М.—Л., Физматгиз, 1963, 720 с.
- Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Л., «Недра», 1965, 759 с.
- Ожинский И. С., Соколов П. В., Юфа Б. Я. Как искать урановые руды. М., Гостеолтехиздат, 1959, 56 с.
- Осипов В. И. Определение плотности и влажности грунтов по рассеянию гамма-лучей и нейтронов. М., Изд-во МГУ, 1968, 157 с.
- Ракобольская Н. В. Ядерная физика. М., Изд-во МГУ, 1971, 295 с.
- Суханов А. Д., Баранов Р. И. и др. Применение методов атомной и ядерной физики в горном деле. М., «Наука», 1969, 206 с.
- Тененбаум И. М. Основы рудничной радиометрии. М., Госатомиздат, 1961, 144 с.
- Ферронский В. И. Пенетрационно-каротажные методы. М., «Недра», 1969, 240 с.
- Филиппов Е. М. Прикладная ядерная геофизика. М., Изд-во АН СССР, 1962, 580 с.
- Филиппов Е. М. Курс ядерной геофизики. Ч. 1 и 2. Новосибирск, изд. НГУ, 1972, 287 с. и 315 с.
- Филиппов Е. М. Ядерная геофизика. Т. 1 и 2. Новосибирск, «Наука», 1973, 516 с. и 400 с.
- Филиппов Е. М., Вахтин Б. С., Новоселов А. В. Нейтрон-нейтронный и нейтронный гамма-методы в рудной геологии. Новосибирск, «Наука», 1972, 347 с.
- Ядерная геофизика (труды ВНИИ ядерной геофизики и геохимии). М., «Недра», вып. 1, 1968, 288 с.; вып. 3, 1968, 287 с.; вып. 7, 1969, 264 с.; вып. 9, 1971, 208 с.
- Ядерная геофизика. Алма-Ата, 1971, 158 с.
- Якубович А. Л., Зайцев Е. И., Пржиялговский С. М. Ядернофизические методы анализа минерального сырья. М., Атомиздат, 1969, 415 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
1. С чего начинается ядерная разведка?	7
§ 1. Открытие естественной радиоактивности	—
§ 2. Открытие искусственной радиоактивности и деления ядер	8
§ 3. Строение вещества	10
§ 4. Изучаемые объекты	—
2. Радиоактивные элементы дают знать о себе	13
§ 1. Естественная радиоактивность	—
§ 2. Природный ядерный реактор	15
§ 3. Измерение излучений	—
§ 4. Изучение естественной радиоактивности геологических образцов	19
§ 5. Содержание радиоактивных элементов в природных образованиях Земли	22
§ 6. О поисках радиоактивных руд на поверхности	24
§ 7. Глубинные методы поисков радиоактивных руд	26
§ 8. Прогнозирование землетрясений	27
§ 9. Ядерные пришельцы из Космоса	30
§ 10. Гамма-кванты раскрывают тайны лунных пород	32
§ 11. Гамма-излучение в разведке тайн Венеры	33
§ 12. На пути к Юпитеру	34
3. Возбужденные ядра атомов	35
§ 1. Как можно возбудить ядра атомов?	—
§ 2. Возбуждение проб нейтронами от радиоизотопных источников	36
§ 3. Нейтронный размножитель и его применение для возбуждения проб	38
§ 4. Ядерный реактор и использование его излучений для возбуждения проб	41
§ 5. Возбуждение ядер атомов химических элементов в коренных залеганиях горных пород и руд	44
4. Ядерные плотномеры	46
§ 1. Плотность горных пород	—
§ 2. Ядерные «весы»	47
§ 3. Ядерное «шило»	48
§ 4. Гамма-лучевое «взвешивание» грунтов и горных пород без отбора образцов	49
§ 5. «Взвешивание» горных пород в коренном залегании рассеянным потоком излучения	50
§ 6. Приставные плотномеры	51
§ 7. Лунный плотномер	52
§ 8. Плотностное зондирование пород	53
§ 9. Плотномеры для изучения буровых скважин	56
§ 10. Плотномеры для изучения кавернозных скважин	—
§ 11. Двухзондовые скважинные плотномеры	57
§ 12. Двухлучевые локаторы плотности	58

5. Лучи вместо печи	60
§ 1. Бета-лучевые золомеры	—
§ 2. Гамма-лучевые золомеры	61
§ 3. Определение зольности углей на месте их залегания	62
§ 4. Изучение углеразведочных скважин	63
6. Рассеяние и поглощение	64
§ 1. Рассеяние с поглощением	—
§ 2. Анализ образцов керна и дробленых проб	66
§ 3. Изучение стенок горных выработок и скважин	67
7. У каждого свой характер	68
§ 1. Как заставить атомы проявить свой характер?	—
§ 2. Анализ проб в лаборатории	70
§ 3. Изучение состава земных и лунных пород в их естественном залегании	71
§ 4. Рентгеновские аппараты в геологии	73
8. «Встреча» Рудольфа Мессбауэра с Христианом Доплером	74
§ 1. Как произошла эта «встреча»?	—
§ 2. Использование явления резонансного поглощения гамма-квантов	76
§ 3. Использование явления резонансно рассеянных гамма-лучей	78
9. Ядерный бильярд	79
§ 1. Эффект соударения нейтронов с протонами	—
§ 2. Лабораторные влагомеры	—
§ 3. Полевые влагомеры и скважинные пористомеры	81
10. Поглотители нейтронов	85
§ 1. Ядра-захватчики	—
§ 2. Бор определяет сам себя	86
§ 3. Серебро тоже само себя определяет	88
§ 4. Приставные борметры для полевых измерений	91
§ 5. Борметры для изучения буровых скважин	92
§ 6. Определение других поглотителей нейтронов при изучении буровых скважин	93
11. Гамма-лучи, высекаемые нейтронами	94
§ 1. Реакции, приводящие к возникновению гамма-лучей	—
§ 2. Нейтронные гамма-анализаторы проб	95
§ 3. Полевые нейтронные гамма-влагомеры и скважинные пористомеры	96
§ 4. Определение некоторых рудных элементов в естественном залегании пород	98
12. Изгнанные нейтроны	100
§ 1. Как можно изгнать нейтроны из ядер атомов?	—
§ 2. Лабораторные бериллометры	—
§ 3. Лабораторные дейтериометры	103
§ 4. Бериллометры для изучения горных пород на месте их залегания	104
13. Тяжеловесы в разведке	106
§ 1. Самые тяжелые радиоактивные частицы	—
§ 2. Альфа-разведчики земных и космических объектов	—
§ 3. Нейтроны и гамма-лучи, выбиваемые альфа-частицами	109
14. Сколько лет Земле, Луне и человечеству?	110
§ 1. Как определяют возраст земных и других объектов?	—
§ 2. Возраст Земли, Луны и других космических объектов	112
§ 3. О времени зарождения жизни и появлении человека на Земле	113

15. Меченые атомы	115
§ 1. Какие бывают метки?	—
§ 2. Меченые атомы в геологии	116
16. Легкая артиллерия на позициях	117
§ 1. Мирное использование синтеза ядер	—
§ 2. Вымирающие нейтроны помогают геофизикам	119
§ 3. Нейтронный комбайн для изучения земных и космических объектов	121
17. Тяжелая артиллерия выходит на позиции	122
§ 1. Тяжелая артиллерия ядерной физики	—
§ 2. Нейтронные установки и их применение в ядерном анализе	124
§ 3. Бетатроны и микротроны и их применение в ядерном анализе	127
§ 4. Циклотрон и его применение в ядерном анализе	130
Заключение	132
Литература	134

ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ ФИЛИППОВ
ЯДЕРНЫЕ РАЗВЕДЧИКИ ЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Ответственный редактор *Владимир Ильич Баранов*

Редактор *Л. В. Шалина*
Художественный редактор *В. И. Шумаков*
Художник *Е. Ф. Зайцев*
Технический редактор *А. В. Семкова*
Корректоры *И. С. Цитович, В. В. Бухалова*

Сдано в набор 2 октября 1973 г. Подписано в печать 27 февраля 1974 г. МН 00522.
Бумага тип. № 1. 60×90¹/₁₆. 8,75 печ. л., 8,7 уч.-изд. л. Тираж 2300 экз. Заказ 190.
Цена 29 коп.

Издательство «Наука», Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.