E. M. FILIPPOV

NUCLEAR GEOPHYSICS

II

NEUTRONOMETRY AND COMPLEXATION OF METHODS OF NUCLEAR GEOPHYSICS

3741

НТБ
ВНИИ
НЕФТЕГАЗГЕОФИЗИКА

PUBLISHING HOUSE «N A U K A» · SIBERIAN BRANCH
NOVOSIBIRSK · 1973

Е. М. ФИЛИППОВ

ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

II

НЕЙТРОНОМЕТРИЯ И КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» · СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
НОВОСИБИРСК · 1973

9Р53

УДК 550.835

Второй том этой книги посвящен обобщению и систематизации обширного материала, накопленного за последние 10 лет, по различным нейтронным методам и методам, основанным на применении мощных ядерных установок в геофизике и геологии, а также материала по комплексированию радиометрических и ядерно-геофизических методов при решении общегеологических задач и задач, связанных с поисками и разведкой горючих, неметаллических, металлических и радиоактивных полезных ископаемых.

Значительное внимание уделено рассмотрению нейтронных и фотонейтронных методов, а также различным импульсным методам. Описывается принципиальное устройство ядерных установок (ускорителей и т. п.) и их применение при изучении геологических объектов в лабораторных и полевых условиях. Впервые обобщен материал по использованию всевозможных ядерных методов для комплексного изучения различных геологических и геофизических задач.

Книга рассчитана на широкий круг геофизиков и геологов, занимающихся разработкой и внедрением в производство методов ядерной геофизики. Она может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов, специализирующихся в области ядерной геофизики.

Ответственный редактор
заслуженный деятель науки и техники РСФСР
доктор физико-математических наук профессор

В. И. БАРАНОВ

The abundant material collected for the last 10 years on different neutron methods based on the application of powerful nuclear sets in geology and geophysics, and also the material on the complexation of the radiometric and nuclear geophysics methods for the solution of general geophysical problems and problems connected with searches and prospectes of fuel, inmetallic, metallic and radio-active ores are described in the second volume of this book. A considerable part of this volume is devoted to the review of the radioisotopic neutrons and photoneutrons and also different impulse methods.

Also is described the principal apparatus of nuclear sets (accelerators) and its application for the research of the geological objects in the laboratory and in situ. For the first time the generalization of the material on the use of all possible nuclear methods for the complex research of different geological and geophysical problems are carried out.

This book is meant for broad range of geologists and geophysicists indulging in elaboration and incalculation of nuclear geophysics methods in industry. It may be used as a textbook for students and post-graduates, who are specializing in the nuclear geophysics.

Editor-in-cheif
Honoured Scientist
and Thechnologist of the RSFSR
Dr. Sc. (Phys.-Math.)
V. I. BARANOV

Ф 0295-1511 / 042(02)-73 496-72

©Издательство «Наука», 1973.

Раздел 5

Радиоизотопные нейтронные методы

Рассматриваются нейтронные методы, основанные на регистрации заряженных частиц, нейтронов и гамма-лучей. Кроме того, описываются нейтронный активационный и фотонейтронный методы. Показано применение методов в лабораторном анализе при изучении пород на плоской поверхности и разрезов скважин. Наибольшее внимание, естественно, уделяется скважинным методам и их возможностям при решении разнообразных геологических и геофизических задач.

Глава 21

НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ С РЕГИСТРАЦИЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Взаимодействие нейтронов с ядрами некоторых химических элементов, как указывалось в гл. 4 (см. т. I), может приводить к появлению заряженных частиц: протонов и альфа-частиц. При их регистрации можно вести анализ содержания в пробах пород и руд некоторых химических элементов. Так возникли нейтрон-протонный (НПМ) и нейтронный альфа- (НАМ) методы.

§ 1. Нейтрон-протонный метод

В гл. 4 (т. I) было сказано, что быстрые нейтроны в водородсодержащих средах наибольшую энергию передают ядрам водорода — протонам. Поэтому при регистрации протонов отдачи можно судить о содержании в облучаемой среде водорода и соответственно воды. На практике явление передачи энергии нейтронов протонам часто отождествляют с реакцией (n, p).

НПМ для анализа в пробах водорода впервые предложен И. Н. Плаксиным, Л. П. Старчиком, Г. А. Иващенко и др. [14.3, 21.4—21.6].

В общем случае связь между энергией налетающего нейтрона E_n и энергией ядра отдачи E_A с массой A дается соотношением

$$E_A = E_n \frac{4A}{(1+A)^2} \cos^2\theta, \qquad (21\text{-}1)$$

где θ — угол вылета ядра отдачи.

Масса нейтрона при выводе этой формулы принята равной единице. Для протонов с массой $A=1$ это выражение приобретает более простой вид:

$$E_p = E_n \cos^2\theta. \qquad (21\text{-}2)$$

При лобовом ударе ($\theta=0°$) нейтрон передает всю свою энергию протону ($E_p=E_n$).

Ядра отдачи других элементов, содержащихся в пробе, будут получать значительно меньшую энергию. Так, ядро кислорода при этом будет получать энергию примерно в 4 раза меньшую, чем получает протон. Поэтому при определении содержания водорода в пробах влияние ядер тяжелых элементов на результаты измерений может быть устранено с помощью тонких фильтров, пропускающих протоны и задерживающих ядра тяжелых элементов.

Решению этой задачи, как показано в работах [14.3, 21.4—21.6], благоприятствует и тот фактор, что водород имеет более высокое сечение рассеяния нейтронов по сравнению с сечениями ядер других элемен-

тов. Макроскопическое сечение рассеяния нейтронов на ядрах водорода может быть представлено следующим соотношением [14.3]:

$$\Sigma_p = 0{,}784\,\rho\,p\,\{1 : [0{,}5E_n + (0{,}27 + 0{,}06E_n)^2] + \\ + 3 : [0{,}5E_n + (1{,}22 - 0{,}06E_n)^2]\}, \qquad (21\text{-}3)$$

где ρ — плотность среды; p — относительное весовое содержание водорода в пробе.

Для коллимированного пучка нейтронов скорость счета протонов может быть представлена соотношением [14.3]

$$N = \frac{1}{3} J \Sigma_p \lambda_p \varepsilon \quad \text{при } x > \lambda_p, \qquad (21\text{-}4)$$

где J — плотность потока нейтронов; λ_p — средняя длина пробега протонов в пробе; ε — эффективность регистрации протонов; x — толщина пробы.

Далее вкратце рассмотрим вопрос о содержании водорода в природных объектах.

Природный водород состоит из смеси двух стабильных изотопов: легкого водорода H — протия (99,985%) и тяжелого водорода H^2 — дейтерия (0,015%).

Содержание водорода в земной коре совместно с гидросферой составляет по весу 1,00, или 16 ат % (по данным А. П. Виноградова). Свободный водород содержится в вулканических и других природных газах, а также в небольших количествах — в виде включений в калийных солях. Водород входит в состав воды (H_2O) в количестве 11,19% по весу. Удельный вес (плотность) воды при нормальных условиях равен 1 г/см^3. Вода в свободном состоянии может занимать поровое пространство в горных породах по объему примерно до 40%, а в рыхлых (песке, грунте и т. д.) — примерно до 70%.

Помимо свободной воды в природе встречается связанная (кристаллизационная), входящая в кристаллическую решетку ряда минералов, например, гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и т. д. Водород входит в состав нефтей, представляющих собой смесь углеводородов метанового (C_nH_{2n+2}), нафтенового (C_nH_{2n}), ароматического (C_nH_{2n-6}) и изредка других рядов. В небольших количествах в нефтях могут также присутствовать сернистые, азотистые и кислородные органические соединения и неорганические примеси. Содержание водорода в нефтях может меняться в пределах от 12 до 15%, углерода — от 84 до 86%, серы — от 0,03 до 1,00%, азота — от 0,07 до 1,70%, кислорода — от 0,5 до 1,2%.

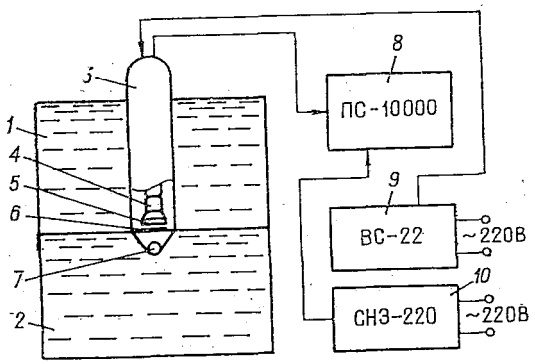


Рис. 21-1. Общий вид установки для определения содержания водорода в порошковых пробах нейтрон-протонным методом.

1 — блок детектора, *2* — блок источника, *3* — гильза приставки П-349-2, *4* — фотоэлектронный множитель со светопроводом, *5* — детектор, *6* — кассета с пробой, *7* — источник нейтронов, *8* — пересчетная установка, *9* — высоковольтный стабилизатор, *10* — стабилизатор напряжения.

Устройство одной из установок, применявшейся для определения содержания влажности в пробах, показано на рис. 21-1 [4.19]. В качестве замедлителя в ней использовался парафиновый блок диаметром 40 см. Источник нейтронов помещался в непосредственной близости от кассеты с пробой (на расстоянии 2—3 мм). Активность применяемого источника составляла $3 \cdot 10^5$ нейтр/с.

В верхнем блоке установки помещался датчик типа П-349-2 с детектором протонов, состоящим из сернистого цинка, активированного серебром. Со-

членение люминофора с фотоэлектронным умножителем типа ФЭУ-19 осуществлялось с помощью светопровода. Расстояние между люминофором и кассетой с пробой выбиралось минимальным и составляло 1—3 мм. Высокое напряжение для питания ФЭУ-19 подавалось с высоковольтного стабилизатора типа ВС-22. Импульсы регистрировались пересчетной установкой типа ПС-10000 («Флокс»), которая для улучшения стабильности работы включалась в сеть через стабилизатор напряжения типа СНЭ-220-0,75.

НПМ по сравнению с ННМ (см. § 1 гл. 22) наиболее выгодно применять для определения влаги в средах, содержащих элементы с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов (бор, литий, хлор, ртуть, редкие земли, кадмий и т. д.). Присутствие в пробе этих элементов мешает определению влаги по ННМ. В области же быстрых нейтронов они имеют сечение рассеяния значительно меньше, чем у водорода, что позволяет использовать НПМ для анализа таких проб на водород.

Для проверки возможностей НПМ при определении влажности борсодержащих проб были созданы смеси песка с бурой. Пробы засыпались в кассеты из железа диаметром 60 мм и имели толщину 0,5 мм.

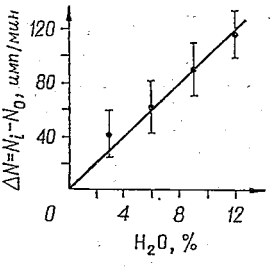


Рис. 21-2. Зависимость приращения скорости счета протонов от влажности пробы.

Результаты измерений приведены на рис. 21-2 [4.19]. Для всего рассматриваемого интервала влажностей кривая имеет линейный вид. Точность определения влажности оценивается равной 1% воды, а порог чувствительности — 2%. Вариации бора в пробах не меняли вида градуировочной кривой.

В работе [14.3] и др. показано, что при измерениях с источником $2 \cdot 10^6$ нейтр/с можно определять влагу с порогом чувствительности 0,5%, а водород — с порогом чувствительности 0,06%.

Измерения сухих проб по методу регистрации протонов отдачи показали, что увеличение содержания бора в пробе практически не увеличивает скорости счета (увеличение скорости счета примерно на 1% отмечалось лишь для проб с содержанием 12 и 15% B_2O_3). Следовательно, влияние связанного водорода, содержащегося в буре, ничтожно, им можно пренебречь.

Таким образом, метод регистрации протонов отдачи вполне применим для определения влажности борсодержащих пород.

НПМ может использоваться и для определения водорода в пробах нефтей и т. д.

При взаимодействии нейтронов с ядрами атомов ряда химических элементов может также происходить реакция (n, p). Поэтому НПМ может применяться для определения в породах, кроме водорода, и некоторых других элементов. Так, реакция (n, p) проходит под действием тепловых нейтронов на хлоре Cl^{35} (n, p) S^{35} и азоте N^{14} (n, p) C^{14}. Сечение первой из этих реакций равно 0,2 барн, а второй 1,7 барн. При определении этих элементов НПМ в пробах источник нейтронов следует располагать в замедлителе на расстоянии 4—5 см от пробы.

В работе [14.3] показано также, что НПМ может привлекаться для определения гелиона (гелий-3) в гелии. Сечение реакции $He^3(n, p)H^3$ имеет, как известно, 5500 барн (1103 см^2/г).

§ 2. Нейтронный альфа-метод

Регистрируя альфа-частицы, возникающие в реакции (n, α), можно осуществлять нейтронный альфа-метод (НАМ). Этот метод наибольшее применение находит при определении в породах бора и лития, которые

вступают в реакцию (n, α) под действием тепловых нейтронов:

$$B^{10}(n, \alpha)Li^{7},$$

$$Li^{6}(n, \alpha)H^{3}.$$

Сечения этих реакций для природных смесей элементов равны соответственно 755 (42,28 см²/г) и 71 барн (6,39 см²/г). Некоторые другие сведения об этих элементах рассматриваются в § 2 и 3 гл. 14 (т. I).

Для измерений по НАМ применяются установки, аналогичные показанной на рис. 21-1. В связи с тем, что реакции на боре и литии происходят под действием медленных нейтронов, источник при измерениях по НАМ необходимо располагать на расстоянии 3—4 см от кассеты с пробой. Естественно, пространство между кассетой и источником заполняется замедлителем.

Определение бора в пробах по НАМ рассматривается в работах [3.20, 4.19, 21.1, 21.7, 21.8]. В исследованиях [21.1, 21.8] для регистрации осколков бора (ядер гелия и лития) использовалась импульсная ионизационная камера. Содержание бора определялось от десятых долей до нескольких процентов. Время определения одной пробы занимало от 30 мин до нескольких часов.

В работах [3.20, 4.19, 21.3, 21.7] для определения бора по НАМ в качестве детектора альфа-частиц использовался сцинтиллятор, изготовленный на основе сернистого цинка, активированного серебром. В статье [21.7] показано, что зависимость скорости счета альфа-частиц от содержания бора в пределах от 0 до 7% является линейной. В работе [3.20] измерения велись для более широкого диапазона концентраций бора — от 0 до 20% (60% B_2O_3), т. е. для максимально встречающихся в природе концентраций.

Альфа-частицы измерялись с помощью той же радиометрической установки, которая применялась для детектирования протонов (см. § 1 этой главы). Источник активностью $5 \cdot 10^5$ нейтр/с размещался в замедлителе на расстоянии 3—4 см от кассеты с пробой диаметром 60 мм. Толщина слоя пробы в кассете равнялась 0,5 мм. В качестве борсодержащих сред использовались смеси песка с борной кислотой с содержанием 10, 20, 35 и 56,4 B_2O_3%. Крупность зерна не превышала 0,01 мм.

Результаты измерений приведены на рис. 21-3. При увеличении концентрации бора в пробе вплоть до максимально встречающихся в природе скорость счета альфа-частиц увеличивается прямо пропорционально концентрации бора. Точность определения бора этим методом невысока — 4,0—4,5% B_2O_3 ($\sim$1,5% B).

Возможность применения НАМ для определения лития в пробах показана в работах [6.67, 21.3]. Концентрация лития при этом определяется по регистрации альфа-частиц и тритонов. При работе с источником активностью 10^5 нейтр/с был достигнут порог чувствительности, равный примерно 0,05% лития. Навеска проб выбиралась 0,5—0,7 г.

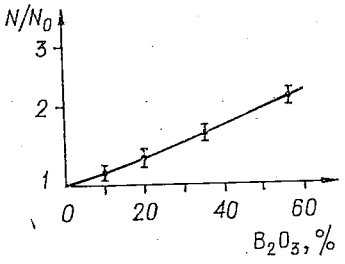


Рис. 21-3. Зависимость скорости счета альфа-частиц от содержания бора.

В связи с тем, что в НАМ и НПМ применяется практически одна и та же аппаратура, при необходимости определения в породах бора (или лития) и водорода оба эти метода можно комплексировать.

При совместном нахождении в пробах бора и лития их раздельное определение можно осуществить исходя из энергии частиц, возникающих в реакции (n, α). Так, при облучении нейтронами лития возникают альфа-частицы с энергией 2,73 МэВ, а при облучении бора — с энергией 1,49 МэВ. Применение алюминиевых фольг толщиной 0,8 мг/см²

позволяет подавлять альфа-излучение бора и регистрировать в основном излучение лития [21.7]. Раздельная регистрация альфа-частиц лития и бора может быть осуществлена также с помощью амплитудного дискриминатора.

НАМ может привлекаться и для анализа лития и бора в растворах [21.2].

К преимуществам НАМ и НПМ можно отнести то, что для реализации этих методов требуются весьма малые навески пробы ($\sim$1—3 г). Кроме того, отпадает необходимость в взвешивании пробы и введении поправки на вес, так как альфа-излучение и протоны идут главным образом от поверхности препарата. Практически устраняется и влияние таких мешающих элементов, как железо, хлор, поскольку они имеют малое сечение реакции (n, α).

Эффективность этих методов можно повысить, увеличивая размер люминофора (а в соответствии с этим и диаметр кассеты), активность применяемого источника или используя более эффективный люминофор.

Однако НПМ и НАМ имеют и ряд недостатков.

Существенное влияние на результаты этих методов могут оказать ядра отдачи серы, возникающие при облучении люминофора быстрыми нейтронами [21.7]. При воздействии нейтронов с энергией 11 МэВ энергия ядер отдачи серы составляет 1,3 МэВ, т. е. сравнима с энергией регистрируемых частиц. Однако при наличии достаточно толстого слоя замедлителя количество быстрых нейтронов может быть незначительным и этим эффектом можно пренебречь. На результаты определения бора и лития НАМ могут оказывать влияние изменения влажности проб. В связи с этим пробы перед замерами следует высушивать либо замеры по НАМ комплексировать с замерами по НПМ.

Глава 22

НЕЙТРОН-НЕЙТРОННЫЙ МЕТОД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД

Существует несколько модификаций нейтрон-нейтронного метода (ННМ), основанных на регистрации тепловых (ННМ-т), надтепловых (ННМ-н), резонансных (ННМ-р) и быстрых (ННМ-б) нейтронов. Для изучения водородсодержащих сред применяются все эти модификации, за исключением ННМ-р, хотя в принципе и она могла бы привлекаться для этих целей.

Сочетание временных анализаторов с ампульными источниками нейтронов позволяет реализовать полуимпульсный нейтронный метод ИННМ′, предложенный Е. Б. Бланковым и Ю. В. Кормильцевым [10.23] и опробованный ими на моделях скважин. Вылет из источника быстрого нейтрона фиксируется с помощью детектора гамма-излучения по гамма-квантам с энергией 4,43 МэВ, образующимся в реакции $Be^9(\alpha, n)C^{12}+\gamma$. Согласование между вылетающими из источника быстрыми нейтронами и регистрируемыми тепловыми нейтронами осуществляется методом корреляции. Рассматриваемый метод позволяет определять среднее время жизни тепловых нейтронов. Для пород, не содержащих сильно поглощающих элементов, это время меняется в пределах сотен микросекунд, а для пород, содержащих сильно поглощающие элементы,— в пределах от долей до нескольких десятков микросекунд (см. рис. 4-15—4-19).

Помимо ИННМ′-т при измерениях по рассмотренному принципу могут быть реализованы и другие его модификации: ИННМ′-р и, возможно, ИННМ′-б. Эти методы могут применяться как для изучения разрезов скважин, так и в полевой съемке. Однако на практике они не применяются, поэтому мы их не будем рассматривать.

Остановимся на методах ННМ-т, ННМ-н и ННМ-б. Эти разновидности ННМ применяются в лабораторной практике, а первые две — в полевых условиях и для изучения разрезов скважин. В полевых условиях используются влагомеры различного назначения: переносные приставного типа, передвижные (автомобильные), зондовые для исследования бурок, пенетрационные и скважинные.

Возможность создания ННМ применительно к исследованию скважин (ННК) впервые была обоснована в 1942 г. А. И. Заборовским и Г. В. Горшковым независимо друг от друга [11.5]. Первая работа по ННМ была опубликована в 1946 г. [22.21]. В дальнейшем Л. С. Полаком была создана первая скважинная аппаратура, прошедшая испытания в одной из нефтяных скважин в районе г. Бугуруслана в 1948 г. [1.27]. В США этот метод исследования скважин разработан только в 1950 г. [22.127, 22.165, 22.62].

В дальнейшем созданы лабораторные и полевые методики ННМ. Однако рассмотрение ННМ удобно начать с лабораторных методик. Прежде чем перейти к изложению этих методик, остановимся на некоторых общефизических вопросах, на которых базируется ННМ при изучении водородсодержащих сред.

Вопросы взаимодействия нейтронов с ядрами атомов вещества и с веществом в целом — как совокупностью атомов — рассматриваются в гл. 4 (т. I).

Здесь лишь заметим, что физическая сущность ННМ применительно к определению влажности различных геологических объектов сводится к рассеянию нейтронов на ядрах водорода — протонах. Связь между энергией первичного E и рассеянного на угол θ нейтрона E' (в одном акте) дается следующим соотношением:

$$E' = E\frac{1}{(A+1)^2}\left(\cos\theta + \sqrt{A^2 - \sin^2\theta}\right)^2, \qquad (22\text{-}1)$$

где A — масса рассеивающего ядра. Масса нейтронов в этой формуле принята равной единице. Из этой формулы видно, что наибольшие потери энергии нейтронов при фиксированных углах рассеяния происходят на ядрах водорода. Так, при рассеянии на угол, близкий к 90°, нейтрон теряет практически всю энергию.

При взаимодействии с ядрами вещества нейтроны рассеиваются под различными углами. Поэтому при рассмотрении процессов рассеяния нейтронов удобнее оперировать со средними значениями энергий $E_{ср}$ и средними потерями энергий $\Delta E_{ср}$ нейтронов [14.7]:

$$E_{ср} = E[1 - 2A : (A+1)^2], \qquad (22\text{-}2)$$

$$\Delta E_{ср} = 2AE : (A+1)^2. \qquad (22\text{-}3)$$

Для водорода $\Delta E_{ср} = 0{,}5E$. При рассеянии на ядрах кислорода — этого основного породообразующего элемента — величина средних потерь уменьшается примерно в 4 раза и равна $0{,}119E$. На ядрах атомов других химических элементов она становится и того меньше.

Таким образом, чем больше в среде водорода, тем быстрее замедляются нейтроны, что используется для определения влажности геологических и других объектов. Сечение водорода для большого диапазона энергий нейтронов примерно от 0,1 МэВ и до 0,1 эВ имеет постоянную величину, равную 20 барн (12 см²/г). Для тепловых нейтронов величина этого сечения несколько повышается — 35 барн (21 см²/г). Для водоро-

да, входящего в состав воды, величина сечения рассеяния несколько выше. Так, для тепловых нейтронов она равна 54 барн (32,4 $см^2/г$).

Для основных породообразующих элементов величина полного сечения близка к 1 барн. Из этого видно, что водород по сравнению с основными породообразующими элементами обладает высоким аномальным сечением рассеяния.

§ 1. Лабораторные методы определения влажности

Для регистрации нейтронов в основном применяются детекторы медленных нейтронов, с наибольшей вероятностью измеряющие тепловые нейтроны. Поэтому для определения влажности проб в основном применяется ННМ-т. Поскольку источники испускают быстрые нейтроны, для их замедления используют различные вещества: воду, парафин, оргстекло и т. д. Таким образом, всякая нейтронная установка, предназначенная для определения влажности различных проб по ННМ-т, представляет собой замедлитель с размещаемыми в ней источником, детектором и пробой. В замедлителях между источником и пробой иногда оставляют пустоты (нейтроноводы) [22.137, 25.45], что позволяет повысить величину потока нейтронов, направленных на пробу.

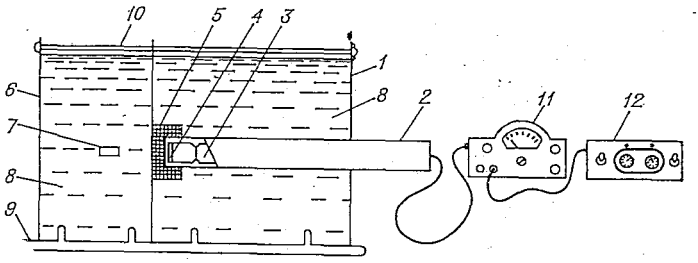


Рис. 22-1. Общий вид сцинтилляционной нейтронной установки (СНУ), созданной на основе радиометра СРП-2.

1 — блок детектора, *2* — гильза радиометра, *3* — ФЭУ, *4* — детектор нейтронов, *5* — кассета с пробой, *6* — блок источника, *7* — источник нейтронов, *8* — замедлитель (вода или парафин), *9* — подставка, *10* — стержень, на котором закрепляются блоки, *11* — пульт радиометра, *12* — приставка с электромеханическим счетчиком.

Для определения влажности проб может применяться установка РАП-2М («Нейтрон») [6.67] (см. приложение 3). Для этих целей могут быть созданы также установки на основе широко известного радиометра СРП-2. Так, в ИГиГ СО АН СССР для решения этой и других задач создана установка СНУ [4.19, 3.20, 18.7]. Общий вид ее дан на рис. 22-1. Состоит она из двух замедляющих блоков диаметром около 25 см. Блок источника имеет длину 15 см, блок детектора — 25 см. Для смены кассет с пробами блок источника может перемещаться на оси стержня относительно блока детектора. Замедляющие блоки одновременно выполняют роль защиты от нейтронов. Детектирование нейтронов осуществлялось с помощью люминофора Т-1, представляющего собой смесь сернистого цинка, активированного серебром, с примесью бора. В связи с тем, что эффективность регистрации медленных нейтронов таким детектором невелика — около 5%, в приборе использовался источник нейтронов активностью в пределах $(0{,}5—1{,}0)\cdot 10^6$ нейтр/с. При работе же с литиевыми силикатными стеклами с эффективностью около 100% активность источника можно снизить в 20 раз, т. е. довести до $(2—5)\cdot 10^4$ нейтр/с.

В связи с тем, что быстрые нейтроны источника, кроме упругих столкновений, испытывают и неупругие, для смещения их спектра в область энергий ниже 0,8 МэВ источник в некоторых установках раз-

мещают в железном блоке [14.6]. Однако введение таких блоков требует повышения активностей источника. В связи с этим в установках СНУ, РАП-2М и других они не применяются. Регистрируемые нейтроны достигают детектора в нейтронной установке не только через пробу, но и огибая ее. Поэтому каждая установка наряду с полезным регистрирует и мешающее излучение (фон). В связи с этим при конструировании установок всегда следует добиваться того, чтобы этот фон был по возможности наименьшим.

Для оценки фона может быть предложена методика, основанная на использовании проб с высоким содержанием сильно поглощающих элементов (бор и т. д.). Весьма удобно для этих целей использовать карбид бора, содержащий 78% бора. Замер, получаемый при измерениях с такими пробами, можно брать за фон установки. Однако следует учитывать, что эта величина фона при замерах с другими пробами будет несколько иной. Это обусловливается тем, что в процессе диффузии тепловые нейтроны, прежде чем попасть в детектор, могут несколько раз проходить через пробу и оказываться в замедлителе. Поэтому фон, определенный с сильно поглощающей пробой, по-видимому, самый минимальный. Тем не менее, учет его позволяет более правильно выбирать геометрию пробы, замедлителя и детектора в процессе конструирования нейтронных установок. Вычитание же величины фона из замеров определяемых проб позволяет получать градуировочные кривые с более высокой дифференциацией по сравнению с кривыми, построенными без вычета фона. Последнее справедливо только в том случае, если градуировочные кривые строят в полулогарифмических координатах.

Слой замедлителя между источником и пробой выбирается равным примерно 4—6 см. Применение в установке СНУ переносного батарейного радиометра СРП-2 позволяет замеры вести в полевых условиях.

Измерение влажности геологических объектов имеет самостоятельное значение (определение влажности грунтов и почв) и необходимо также для введения поправок (за счет изменения влажности) в результаты анализа проб на другие элементы различными ядерными методами.

При определении влажности проб грунтов и почв можно отбирать пробы в цилиндрические кассеты и обследовать их на установке СНУ. Для анализа сыпучих проб можно использовать и фигурные кассеты типа показанной на рис. 22-1.

С помощью установок типа СНУ, РАП-2М и других влажность в пробах можно определять начиная с 1%, относительная погрешность при этом не выходит за пределы 5—10% для диапазона влажности от 10 до 20%.

В работе [22.124] проведено сравнение результатов ННМ с весовым методом определения влаги в пробах почв. Установлено, что точность ННМ в 2 раза превосходит точность весового метода. Кроме того, в этой работе также показано, что стоимость анализа по ННМ на 20% дешевле по сравнению со стоимостью анализа весовым способом.

Для определения водорода в углеводородах (нефть и т. д.) и других объектах В. Е. Моттом и Д. Ф. Родесом создана специальная нейтронная установка [14.4], состоящая из плутоний-бериллиевого источника с выходом около $1{,}9 \cdot 10^7$ нейтр/с и пропорционального счетчика нейтронов с торцовым окном. Счетчик заполнялся трехфтористым бором или гелием-3. Установка с источником и счетчиком погружалась в масло, выполнявшее роль замедлителя нейтронов. Проба в кювете помещалась перед торцом счетчика в специальном зазоре. Чтобы медленные нейтроны попадали в детектор только через пробу, пространство вокруг нее заэкранировано бор-кадмиевой защитой. Абсолютная точность анализа водорода на этой установке оценена в 0,2% по весу.

Водород в углеводородах может определяться также по методике отражения нейтронного потока. Например, в работе [22.50] для этих целей создана установка, в которой плутоний-бериллиевый источник нейтронов с выходом $7 \cdot 10^5$ нейтр/с и пропорциональный борный счетчик помещались сбоку от емкости, содержащей анализируемое вещество. Абсолютная погрешность определения водорода оценена примерно в 0,06% по весу, а относительная — в 0,6%. На этой установке определяют также отношение водорода к углероду в нефти и т. д. В работе [22.119] показано, что ННМ при определении отношения водорода к углероду имеет ряд преимуществ по сравнению с БМп (см. § 4 гл. 15, т. I).

Присутствие в пробах элементов с высокими сечениями захвата нейтронов (бор, хлор и др.) приводит к искажению результатов определения влаги. Необходимо дополнительно оценивать содержание в пробах поглощающих элементов и вводить соответствующие поправки в результаты определения влаги по ННМ. Определение влажности таких проб можно проводить по НПМ (см. § 1 гл. 21). Помимо этого влажность таких проб можно определить по ННМ-б как по пропусканию быстрых нейтронов через пробу [22.17], так и по отражению от нее быстрых нейтронов [22.161]. Обе разновидности ННМ-б требуют применения источников с высоким выходом (до 10^8 нейтр/с) и проб толщиной до 14 см [22.17]. В этой работе в качестве детектора быстрых нейтронов использовался сцинтилляционный счетчик с сернистым цинком, активированным серебром, расположенный в замедлителе. Эффективность детектирования быстрых нейтронов, прошедших через пробу, с помощью такого устройства составляла 0,1%. При длительности измерений 14—15 мин точность определения влаги в пробах составляла 1%. Градуировочный график для интервала влажности грунтов от 0 до 17% носил линейный характер.

Н. И. Сотниченко [16.62] для определения влажности борсодержащих проб предложена установка, основанная на непосредственном измерении потока быстрых нейтронов (рис. 22-2). Для смещения спектра быстрых нейтронов в область 0,8—1,0 МэВ источник размещался в стальном цилиндре толщиной стенок 5 см (с торца). Между стальным цилиндром и пробой располагался воздушный зазор величиной 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 Т-40 располагался слой парафина и бора. С целью защиты детектора от тепловых нейтронов, идущих из замедлителя, датчик снаружи окружался слоем кадмия. Для установки и извлечения пробы нижний блок замедлителя поворачивался относительно верхнего блока.

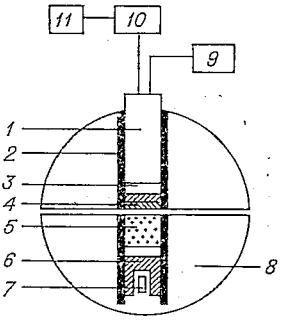


Рис. 22-2. Схематическое устройство нейтронной установки для определения влажности борсодержащих проб с регистрацией потока быстрых нейтронов.

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

Вопросы расчета спектров быстрых нейтронов в водородсодержащих средах рассматриваются в работе [22.152].

Зависимость скорости счета быстрых нейтронов в относительных единицах от содержания в пробе влаги приведена на рис. 22-3 [16.62]. Пе-

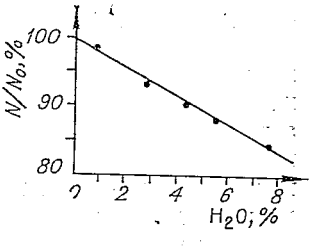


Рис. 22-3. Зависимость скорости счета от влажности пробы.

ред замерами аппаратура в течение 20 мин прогревалась, а затем не менее трех раз в течение 10 мин измерялся поток нейтронов от сухой пробы с целью определения средней величины N_0. В дальнейшем в течение 1,5 мин измерялась влажность в исследуемой пробе. При определении влажности в интервале от 0,2 до 5,3% абсолютная погрешность была в среднем около 0,1%, а относительная — 10%. Порог чувствительности ННМ-б, по этим данным, можно установить примерно равным 0,2% воды. Помимо этого, для определения влажности проб, содержащих элементы с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов (типа хлора и других), может применяться ННМ-н. Этот метод для его реализации требует применения источников нейтронов также с повышенным выходом (до 10^7 нейтр/с).

Помимо этого, для определения влаги в пробах, содержащих элементы с высокими сечениями поглощения тепловых нейтронов, может также применяться ННМ-т. Так, А. Л. Якубовичем и др. [6.67] на основе этого метода разработана методика, основанная на проведении измерений проб в плоских и фигурных кассетах. Существует также методика раздельного определения в пробах влаги и поглощающих элементов по ННМ-т и ННМ-н, которая будет рассмотрена в гл. 23.

§ 2. Физические основы метода применительно к исследованию коренных пород

1. **Основы теории метода.** Исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов в горных породах применительно к устройствам конкретных приборов является сложной математической задачей. В настоящее время такие задачи решаются при помощи метода Монте-Карло [22.25—22.27, 22.31, 22.101, 22.139, 22.163, 22.172]. Однако этот метод расчета позволяет получать лишь численные данные, которые для отдельных случаев могут быть аппроксимированы приближенными формулами. Помимо метода Монте-Карло для изучения пространственно-энергетического распределения нейтронов в породах применяется интегро-дифференциальное кинетическое уравнение Больцмана [1.27, 15.31, 20.25, 22.39, 22.41, 22.42—22.44, 22.46, 22.47, 22.86, 22.87, 22.131, 23.28, 23.32], а также метод теории групп [1.27, 11.5. 15.31, 20.25, 22.6, 22.18, 22.19, 22.56, 22.83—22.85, 22.88, 19.178, 22.125, 22.134, 22.151].

На основе этих исследований и расчетов получен целый ряд зависимостей, необходимых для выяснения отдельных закономерностей ННМ, главным образом применительно к изучению разрезов скважин.

Кроме приведенных методов расчетов для решения отдельных частных задач применялись также различные приближенные методы, основанные на использовании возрастного и диффузионного уравнений [1.27, 3.16, 4.19, 11.5, 14.4, 15.31, 17.13, 19.178, 20.25, 22.22, 22.40, 22.42—22.44, 22.51, 22.125, 22.126, 22.139, 22.164, 23.21].

В результате решения этих уравнений получены формулы для отдельных частных случаев.

При обследовании коренных выходов горных пород и грунтов ННМ возникает необходимость определения влажности на плоской поверхности породы приставными переносными и перевозными приборами, а также непосредственно в грунтах и породах при введении с помощью виброзадавливателей в них зондов влагомеров в предварительно проделанные бурки или скважины. Наиболее сложной считается задача по исследованию буровых скважин с их заполнением и обсадкой.

В геофизической практике наибольшее распространение получили методы определения влаги в грунтах пенетрационным способом и при исследовании бурок и скважин. В нефтепромысловой геофизике ННМ

привлекается для определения пористости коллекторов и решения других задач. В связи с этим к настоящему времени аналитические соотношения выведены для случая однородных сред. На практике такие соотношения в наибольшей степени отвечают случаю, когда зазор между породой и зондом отсутствует. Это, в частности, имеет место при определении влажности пенетрационными методами.

Влажность и пористость пород определяются при помощи ННМ-н и ННМ-т. Приведем соотношения для каждой из этих методик. Например, вычисления плотности потоков надтепловых нейтронов в однородных средах [1.27, 22.40]:

$$J_{\text{н}} = n\lambda_{s,\text{н}} \frac{e^{-r^2/4L_s^2}}{8\pi^{3/2}\xi_{\text{н}} L_s^3} \quad (\text{нейтр/см}^2 \cdot \text{с}), \tag{22-4}$$

$$J_{\text{н}} = \frac{n\lambda_{s,\text{н}}}{8\pi\xi_{\text{н}} L_f^3} e^{-r/L_f} \quad (\text{нейтр/см}^2 \cdot \text{с}), \tag{22-5}$$

где n — выход нейтронов из источника (нейтр/с); $\lambda_{s,\text{н}}$ — средняя длина свободного пробега надтепловых нейтронов в породе, обусловленная рассеянием; $\xi_{\text{н}}$ — средняя логарифмическая потеря энергии надтепловых нейтронов; L_s — длина замедления нейтронов; L_f — параметр замедления нейтронов $\left(L_s = \sqrt{2}\,L_f\right)$; r — расстояние от источника.

При работе с ампульными источниками нейтронов, основанными на реакции (α, n), формула (22-4) справедлива для пород, содержащих воду в количестве не свыше 5% по объему. Кроме того, этой формулой можно пользоваться для расчета в породах потока нейтронов с начальной энергией 0,1 МэВ и ниже (сурьмяно-бериллиевый источник и ему подобные). Помимо этого, уравнение (22-4) удобно при расчете потока надтепловых нейтронов в породах с высоким содержанием водорода на малых расстояниях от источника ($r \leqslant L_s$). Формулой (22-5) при этом следует пользоваться, наоборот, для расчета потока нейтронов в водородсодержащих средах на больших расстояниях ($r > L_s$).

Кроме рассмотренных формул, для расчета надтепловых нейтронов существуют и некоторые другие (см., например, статью С. А. Кантора в сб. [17.13]).

Применительно к ННМ-т Ю. П. Булашевичем [1.27] выведено следующее соотношение для однородной безграничной среды:

$$J_{\text{т}} = \frac{n\tau v}{8\pi L^2 r} e^{(L_s/L)^2} \{[1 + \operatorname{erf}(x_1)]\, e^{-r/L} - [1 - \operatorname{erf}(x_2)]\}\, e^{r/L}, \tag{22-6}$$

где $x_{1,2} = \frac{r}{2L_s} \mp \frac{L_s}{L}$; $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int\limits_0^x e^{-t^2} dt$ — интеграл ошибок;

τ — среднее время жизни тепловых нейтронов; L — длина диффузии; v — скорость тепловых нейтронов. Это соотношение применимо для тех же условий, что и формула (22-4).

В работах [1.27, 4.19] показано, что при $x > 2$ или соответственно при $r < L_s$ и $L_s > 2L$ соотношение (22-6) можно преобразовать так:

$$J_{\text{т}} = \frac{n\tau v}{8\pi^{3/2} L_s^3} \left[1 - \frac{3}{2}\frac{L^2}{L_s^2}\right] e^{-r^2/4L_s^2}. \tag{22-7}$$

При $r \gg L_s$ (22-6) приобретает вид

$$J_{\text{т}} = \frac{n\tau v}{4\pi L^2 r} e^{(L_s/L)^2 - r/L}. \tag{22-8}$$

При $L_s = 0$ это соотношение будет характеризовать диффузию тепловых нейтронов от точечного источника, расположенного в однородной безграничной среде:

$$J_{\text{т}} = \frac{n\tau v}{4\pi L^2 r} e^{-r/L}. \tag{22-9}$$

ВНИИ

К. В. Титлом [15.31] показано, что аналогичное соотношение может быть использовано и в исследованиях горных пород, пересеченных буровой скважиной, если вместо параметров, определяющих диффузию тепловых нейтронов в однородной среде, ввести некоторые эффективные параметры $\tau_{эф}$, $v_{эф}$, $L_{эф}$, определяемые экспериментально. Подстановка таких параметров в формулу (22-9) позволяет использовать ее для расчета потока надтепловых нейтронов в скважине на зондах от 30 до 60 см.

Для пород, содержащих воду в количестве свыше 5% по объему, при расстояниях $r > L_s$ С. А. Кантором [22.40] выведена следующая формула:

$$J_т = \frac{4\tau v}{8\pi L_f^3 \alpha_н}\left[e^{-r/L_f} - \frac{2(1-\alpha_н)}{\alpha_н}\frac{L_f}{r}\left(e^{-r/L_f} - e^{-r/L}\right)\right], \quad (22\text{-}10)$$

где $\alpha_н = 1 - (L/L_f)^2$.

При $r \gg L_f \gg L$ второй член в квадратных скобках становится очень малым и выражение (22-9) принимает вид

$$J_т = \frac{n\tau v}{8\pi L_f^3 \alpha_н} e^{-r/L_f}. \quad (22\text{-}11)$$

Аналогичные соотношения рассматриваются в работе Я. А. Чубека [22.125], применительно к исследованию высокотемпературных скважин — в работах Д. А. Кожевникова [3.16, 22.49], а для реальных скважин — в сборнике [19.178].

Пространственно-энергетическое распределение нейтронов на отдельных моделях изучалось также экспериментально [22.103]. Для решения некоторых задач ННК-т велись такие расчеты по методу Монте-Карло [22.176].

2. **Влияние изменений плотности и химического состава сред.** Как видно из вышеприведенных формул, характер зависимости регистрируемого эффекта от изменения влажности или пористости сред, заполненных водой и т. п., подчинен параметрам замедления и диффузии нейтронов.

Расчеты длины замедления и параметров диффузии нейтронов рассматриваются в гл. 4 (т. I). Кроме того, эти данные можно найти также в работах [3.1, 4.12, 19.65, 22.20, 22.44, 22.48, 22.49, 22.50, 22.81, 29.76]. В гл. 4 было показано, что в случае отсутствия в породах элементов с высокими сечениями захвата нейтронов нейтронные параметры практически зависят не от изменения в породах породообразующих химических элементов, а в основном от их плотности и особенно водородсодержания.

В связи с тем, что показания ННМ зависят от изменения плотности пород и грунтов, при определении их влажности или пористости каждый раз приходится вводить поправки за счет изменения этого параметра.

В работе [19.65], в частности, показано, что изменение плотности грунтов на 1 г/см^3 приводит к погрешностям определения влажности на 10—13% при измерениях по ННМ-т и на 3—4% при измерениях по ННМ-и. (По этому поводу см. также сборник [19.171].)

Для учета изменений плотности изучаемых сред в работах [14.4, 22.170] и других построены специальные номограммы, показывающие изменение градуировочных кривых в зависимости от изменения плотности пород.

Плотность пород при этом проще всего определять по ГГМ-п (см. гл. 19). Поэтому измерения по ННМ все чаще сочетаются с замерами по ГГМ-п. Для одновременного определения влажности и плотности грунтов в последнее время создаются даже комбинированные при-

боры [19.65, 19.79, 19.111, 10.116, 19.124, 19.125, 22.113, 22.149, 22.168].

Остановимся на вопросе влияния изменений вещественного состава грунтов и пород на результаты определения их влажности и пористости. При рассмотрении этого вопроса можно указать на следующие его особенности. Характер влияния изменений состава породообразующих элементов обусловливается взаимодействием с ними быстрых и тепловых нейтронов. Применяющиеся в ННМ источники нейтронов имеют энергию в среднем 4—5 МэВ (см. § 5 гл. 1). Взаимодействие этих нейтронов на ядрах атомов химических элементов, как было показано в гл. 4, приводит к упругим и неупругим соударениям. Некоторые породообразующие элементы, и особенно кислород, обладают анизотропией рассеяния быстрых нейтронов. Поэтому изменения содержания кислорода и некоторых других породообразующих элементов в породах приводят к погрешностям определения их пористости и влажности. Для исключения этого фактора в работе [19.65] предлагается спектр быстрых нейтронов специально умягчать, располагая ампульные источники в вольфрамовых или свинцовых экранах.

Для нейтронов с энергией ниже 1 МэВ вариации изменений химического состава грунтов и пород приводят к незначительному изменению длины замедления нейтронов. Диффузионные же параметры гораздо сильнее зависят от изменения в породах основных породообразующих элементов. Поэтому при определении влажности грунтов и пористости пород для исключения влияния вариаций в породах основных породообразующих элементов измерения рекомендуют вести не по ННМ-т, а по ННМ-н.

При определении влажности грунтов и пористости пород по ННМ-т особого внимания заслуживает вопрос о содержании в некоторых минералах кристаллизационной связанной воды. Рассматривая процессы взаимодействия нейтронов с веществом, в гл. 4 (т. I) мы отмечали, что при $E_n<1$ эВ энергия связи атомов в молекулах вещества $E_{св}>E_n$. Поэтому тепловые нейтроны в процессе диффузии в основном взаимодействуют не с отдельными атомами, а с агрегатами атомов, связанных в молекулы. Энергия связи водорода в молекулах свободной воды гораздо ниже энергии связи водорода с кристаллической решеткой минералов. Поэтому характер взаимодействия тепловых нейтронов с водородом свободной и связанной воды различен. Подробно этот вопрос исследован В. И. Осиповым и др. [19.65]. В этой работе, в частности, показано, что содержание в грунтах кристаллически связанной воды практически (в пределах точности измерений влагомеров) не влияет на характер градуировочных кривых $N=f(m)$. Этот вывод весьма существен для ННМ-т, поскольку при определении влажности пород по этому методу фактически отпадает необходимость введения поправок на этот фактор. Л. Г. Родэ и О. М. Нечаев [19.177] показали, что с помощью ННМ-т при работе с влагомерами на пропорциональных (СНМ-9) и сцинтилляционных счетчиках (ЛДНМ — оргстекло с пазами, заполненными светосоставом) можно раздельно определять наличие в породах свободной и кристаллизационной воды. Для использованных ими влагомеров получены два соотношения, определяющие содержание в породе водорода, связанного со свободной $p_{\text{н}}^{\text{с}}$ и кристаллизационной $p_{\text{н}}^{\text{к}}$ водой:

$$p_{\text{н}}^{\text{с}} = 0{,}27\,(N_{\text{н}} - 1{,}04N_{\text{с}}) \text{ и } p_{\text{н}}^{\text{к}} = 0{,}345\,(1{,}3N_{\text{с}} - N_{\text{н}})$$

(здесь $N_{\text{п}}$ и $N_{\text{с}}$ — соответственно скорости счета, измеренные с помощью прибора на пропорциональных и сцинтилляционных счетчиках соответственно).

Изменения в воде или породах концентрации элементов с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов также приводят к иска-

жению результатов определения влажности и пористости грунтов и пород [19.178, 19.181]. К таким элементам прежде всего следует отнести бор, хлор, железо и марганец.

Если показания нейтронных влагомеров [19.65] выражать в относительных единицах (величинах замеров, получаемых в баке с водой или в другом калибровочном устройстве), то увеличение влаги в грунтах ведет к возрастанию измеряемого эффекта. Присутствие же в породах поглощающих элементов ведет к снижению результатов, а присутствие их в воде или породе в постоянных количествах — к параллельному смещению градуировочных графиков. Подробно это будет рассмотрено в следующей главе.

С. Кейзи и Г. Коскиненом [19.65] показано, что присутствие 0,005% по весу бора в грунте с влажностью 20% снижает показания ННМ-т на 17,5%, а показания ННМ-н — всего лишь на 0,5%. Хлор практически не оказывает влияния на показания ННМ-н. Так, даже самые максимальные концентрации хлора (до 1%) в грунтах с объемной влажностью 21% могут приводить к ошибке не свыше 3,5% [19.65]. Изменение содержания железа в грунтах на 1% приводит к изменению показаний ННМ-т на 1,2—2,3% в зависимости от влажности грунта [19.65, 22.122, 22.123]. Увеличение в грунте железа от 0 до 10% по весу вызывает линейное уменьшение скорости счета тепловых нейтронов от 12 условных единиц до нуля [22.123].

Бор, литий и другие редкие элементы с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов абсорбируются в основном в глинистых породах, содержащих к тому же кристаллизационную воду. Присутствие воды в этих породах приводит, как уже отмечалось, к завышению показаний ННМ-т, а присутствие бора и др., наоборот,— к занижению. В итоге может иметь место взаимная компенсация погрешностей измерений ННМ-т, обусловленных влиянием этих факторов. Это, по мнению В. И. Осипова [19.65], и приводит в ряде случаев к тому, что градуировочные графики для глинистых и песчаных пород могут совпадать. Исключение влияния поглощающих элементов может быть осуществлено по измерению отношения скоростей счета нейтронов с помощью двухзондовых приборов [19.177].

3. **Глубинность метода.** Исследованием этого вопроса занимались С. А. Кантор [1.27, 22.39, 22.42, 22.81], А. В. Золотов [5.9, 6.16, 19.73], Я. А. Чубек [22.105], Е. И. Крапивский и В. Б. Сальцевич [16.66], В. С. Хавкин [22.175] и др. Установлено, что глубинность ННМ практически не зависит от изменения размера зонда. В наибольшей степени это справедливо применительно к исследованию пород, не содержащих водорода.

Глубинность ННМ-н может быть оценена из соотношений

$$R_{0,9} \approx 2L_s, \tag{22-12}$$

$$R_{1,0} \approx 3L_s. \tag{22-13}$$

Здесь L_s — длина замедления нейтронов (см. гл. 4).

В некоторых работах величину численного коэффициента рекомендуется брать равной 2,1—2,3 [19.73, 22.39, 22.42, 22.81].

Для ННМ-т величина глубинности может быть определена из аналогичных соотношений

$$R_{0,9} \approx 2L_м, \tag{22-14}$$

$$R_{1,0} = 3L_м. \tag{22-15}$$

Здесь $L_м$ — длина миграции нейтронов. Я. А. Чубек [22.125] считает, что формулы (22-12) и (22-14) соответствуют глубинности не $R_{0,9}$, а $R_{0,95}$.

Уравнение (22-15) используется также для оценки радиуса моделей пластов горных пород [5.9, 6.46].

Величину глубинности ННМ нетрудно оценить исходя из графиков рис. 4-4, 4-5 и 4-15. Для песчаника и воды эти величины приводятся в табл. 22-1, а для песка — в табл. 22-2.

П. Л. Олгаардом [19.79] для определения глубинности исследования грунтов в зависимости от их влажности на основе экспериментальных исследований выведена следующая формула:

$$R_{0,95} = 100(1{,}4 + 0{,}1 m_{\text{н}}),$$

где $m_{\text{н}}$ — влажность, %.

Эта формула справедлива для влагомера с пропорциональным нейтронным счетчиком, источник в котором расположен против середины счетчика. Вопросы оценки глубинности влажных грунтов и горных пород рассматриваются также в работах [19.65] и др. Для увеличения глубинности ННМ-т Б. Д. О'Хаелом [4.19] предлагается на детектор нейтронов (главным образом пропорциональный нейтронный счетчик) надевать кадмиевые кольцеобразные экраны жалюзного типа, позволяющие принимать нейтроны с некоторых определенных направлений.

Таблица 22-1

Глубинность исследования песчаника с различной водонасыщенностью

$m_{\text{н}}$, %	ННМ-н		ННМ-т	
	$R_{0,9}$, см	$R_{1,0}$, см	$R_{0,9}$, см	$R_{1,0}$, см
0	55	82,5	67	100,5
5	38	57	48	72
10	31	46,5	35	52,5
15	28	42	33	49,5
25	25	37,5	30	45
40	22	33	26	39,5
100 (вода)	15	22,5	15,5	23,2

Таблица 22-2

Глубинность исследования песка ($R_{0,9}$) с различной водонасыщенностью в зависимости от размера зонда при регистрации нейтронов с энергией 1,45 эВ

$m_{\text{н}}$, %	Размер зонда, см				
	0	20	40	60	80
0	55,0	55,0	55,7	56,3	57,5
3	37,7	38,7	41,1	44,7	48,0
10	23,3	27,0	32,2	38,8	45,5
30	13,2	18,5	26,7	33,3	39,0
100 (вода)	—	11,5	22,3	30,0	37,0

4. **Характер градуировочных кривых.** Зависимость регистрируемых скоростей счета тепловых и надтепловых нейтронов от влажности песка показана на рис. 22-4 [4.19]. Приведенные здесь кривые получены на основании обобщения расчетных и экспериментальных данных, которые, как показал С. А. Кантор [22.42], хорошо согласуются между собой. Из рисунка видно, что для нулевых и малых размеров зондов увеличение влажности среды ведет к возрастанию потока тепловых и надтепловых нейтронов. Для средних размеров зондов (примерно 20—30 см) на кривых наблюдается характерный максимум (зона инверсии). С увеличением размера зонда этот максимум смещается влево и практически исчезает. Аналогичные графики для почв и пород плотностью 0,6 и 2,0 г/см^3 для тепловых нейтронов приводятся в работе [22.163], а графики для индиевых нейтронов (1,45 эВ), рассчитанные по формуле (22-4) для песчаника, известняка, доломита и ангидрита — в работе [22.50] (см. также [22.172]).

Из изложенного видно, что для определения влажности пород по ННМ-т и ННМ-н необходимо выбирать оптимальные размеры зондов, при которых чувствительность градуировочных кривых к изменению влажности пород является наибольшей. Из рис. 22-4 видно также, что для этого наиболее подходящими являются малые размеры зондов, близкие к нулевым, и большие. Так, в статье [19.79] показано, что для погруженных в грунт вдавливанием нейтронных зондов со сцинтилляционными счетчиками кривые ННМ-т для размеров около 5 и 40 см получаются сопоставимыми (зависимость измеряемого эффекта от влажности пород при этом противоположна).

При обследовании скважин, заполненных жидкостью, для исклю-

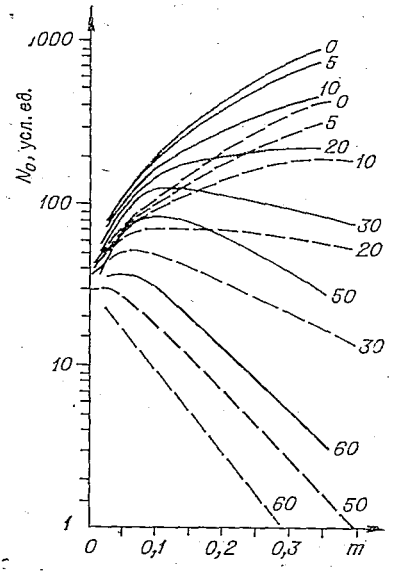


Рис. 22-4. Зависимость скоростей счета (в усл. ед.) надтепловых (пунктир) и тепловых нейтронов (сплошные кривые) от влажности песка.
Шифр кривых — размер зонда, см.

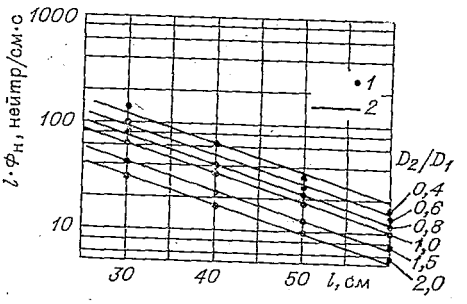


Рис. 22-5. Зависимость потока надтепловых нейтронов (в единицах $l\Phi_н$) от размера зонда в скважине диаметром 16 см.

D_1 и D_2 — соответственно групповые коэффициенты диффузии в среде, заполняющей скважину, и в породе.
1 — расчеты по одногрупповому уравнению для цилиндрической геометрии, *2* — расчеты по формуле (22-9) при длине диффузии тепловых нейтронов в породе $L=20$ см.

чения их влияния измерения приходится вести только на больших размерах зондов — порядка 50 см.

К. В. Титтл [15.31], пользуясь одногрупповым уравнением диффузии нейтронов, рассчитал распределение потока надтепловых нейтронов в зависимости от размера зонда в скважинах радиусом 5,5 и 8 см.

Сопоставление результатов расчетов для цилиндрической геометрии с расчетами по формуле (22-9), включающей эффективные параметры, приведено на рис. 22-5 [15.31]. Величина коэффициента диффузии $D_1' = D : v_н$ (см. гл. 4) для среды, заполняющей скважину, принята равной 68,8 см. Из рис. 22-5 видно, что в полулогарифмических координатах полученная зависимость является линейной. Расчетные данные для цилиндрической геометрии удовлетворительно согласуются с данными, полученными по формуле (22-9) для диапазона зондов размером от 30 до 60 см.

И. И. Тальянским и др. [22.85, 1.27] аналогичные результаты получены с помощью расчетов по методике двухгруппового приближения для однородной среды (известняк пористостью от 0 до 30%) и скважин диаметрами 20 и 30 см для диапазона зондов размерами от 10 до 50 см. Подобные расчеты также выполнялись Б. Ф. Беленьким и В. В. Владимировым [22.101]. Для обсаженных скважин подобного рода расчеты в пятигрупповом приближении произведены также О. А. Барсуковым и В. С. Авзяновым [22.7, 22.101], а Ю. Кжуком [15.31] — для пустых скважин диаметрами 15,3 и 20,3 см. Им использовалась комбинация возрастного и интегро-дифференциального уравнений. При нормировании результатов к величине, полученной в скважине диаметром 15,3 см, при наличии за колонной воды было установлено, что в этой скважине скорость счета в относительных единицах возрастает по закону, близкому к линейному, примерно от 0,24 до 0,88 при изменении пористости пласта от 0 до 40%. В скважине диаметром 20,3 см аналогичная зависимость сильнее отклоняется от линейного закона. При изменении пористости пород в указанном выше диапазоне скорость счета меняется приблизительно от 0,25 до 0,66. В обоих случаях расчетные данные удовлетворительно согласовывались с экспериментальными.

Вид градуировочных кривых $N=f(m_н)$ существенно зависит от параметров глубинного прибора (размера зонда, диаметра прибора, размера и типа экрана, расположенного между источником и детектором, и т. д.), а также от параметров скважины (диаметра, заполнения, величины глинистой корки, обсадки и т. д.) и положения в ней прибора.

Теоретическое исследование всей проблемы является довольно сложной задачей. Поэтому для ее решения исследователи в основном стали пользоваться замерами на моделях.

Модели для этих исследований чаще всего создают из насыпных сред: песка, песчаной крошки и щебня, мраморной и известняковой крошки и щебня [5.9, 6.46, 19.73, 19.158, 22.24, 22.32, 29.45]. Получаемые замеры пересчитываются при переходе от насыпных сред к реальным с помощью теории подобия [18.14, 1.27]. В ряде случаев приборы градуируются непосредственно на коренных выходах грунтов и пород с известными параметрами или используются блоки реальных сред [5.9, 11.62, 22.24, 22.114, 22.115].

В работе [22.57] для этих целей предложено использовать специальные гетерогенные модели, состоящие из плит плотных горных пород. Поровое пространство в таких средах моделируется соответствующим выбором горизонтальных зазоров между плитами и вертикальными отверстиями. Размер зазора и диаметр отверстий выбираются меньше средней свободной длины пробега нейтронов сред, заполняющих зазоры и отверстия. Объем зазоров и отверстий принимается одинаковым. Зазоры и отверстия могут заполняться любым нужным флюидом или средой, его моделирующей (плексиглас, парафин или смеси их с крошкой породы и т. д.). Аналогичные модели описаны и в работах [19.178, 22.105]. Как в статье [22.57], так и в исследованиях [19.178, 22.105] отмечается, что измерения в гетерогенных моделях точно не соответствовали реально моделируемым средам. Погрешности при этом в ряде случаев выходили за пределы точности измерений приборов. Поэтому такие модели на практике не получили широкого применения.

Первые детальные исследования вида градуировочных кривых для ННК-т изучены Ш. А. Губерманом [18.14, 1.17, 3.16] при работе со свинцовым и парафиновым экранами между источником и детектором. Скважина имела диаметр 184 мм, глубинный прибор —100 мм. Прибор располагался у стенки скважины, заполненной водой, и в ее центре. Установлено, что в интервале изменения пористости 2—3% наблюдается характерный максимум для всех зондов. Кроме того, для зондов 30, 40, 50 см характерен второй максимум. При измерениях с парафиновым экраном он соответствует пористости 20%, а при измерениях со свинцовым экраном — пористости 50%.

Для ННК-н при измерениях с парафиновым экраном наблюдались также два максимума. При этом второй — только для зондов размерами 30, 40 и 50 см. Для зонда 30 см он соответствует пористости 20%, а для других зондов — пористости $\sim$12%.

Наличие максимумов на градуировочных кривых $N=f(m_п)$ для однородных сред впоследствии теоретически пытался обосновать Д. А. Кожевников [22.103, 22.175]. Он связывал их наличие с упругими рассеяниями быстрых нейтронов на ядрах основных породообразующих элементов: кислорода, кремния, алюминия и др. Естественно, неупругое рассеяние нейтронов на этих элементах несколько влияет на длину замедления нейтронов. Однако следует заметить, что вариации породообразующих элементов в породах, и особенно кислорода, невелики. Поэтому неупругие соударения практически не влияют на замедляющие свойства горных пород. В любом случае это ни в коей степени не связано с возникновением максимумов на градуировочных кривых,

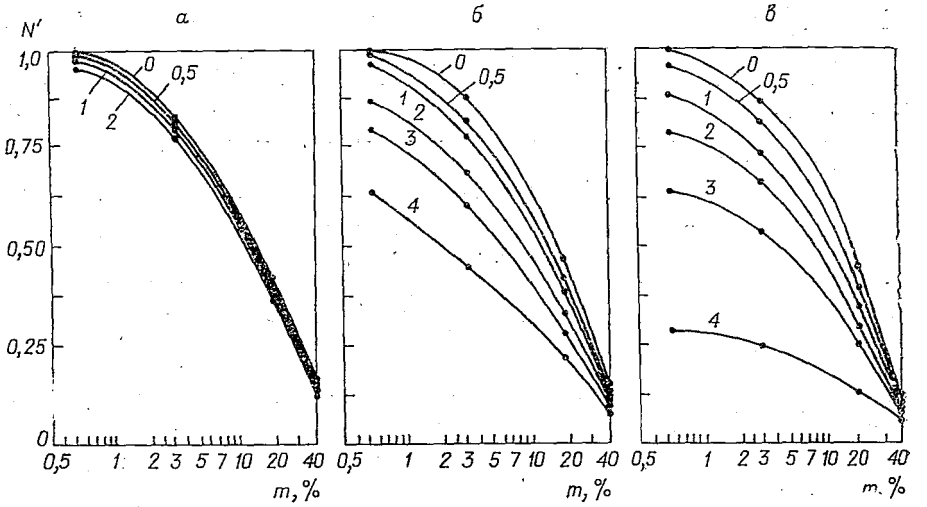


Рис. 22-6. Зависимость показаний ННК-т от пористости карбонатных пород в необсаженной скважине диаметром 130 мм (*а*), 190 мм (*б*) и 243 мм (*в*). Шифр кривых — толщина глинистой корки, см.

которые для многих типов приборов в полулогарифмических координатах являются линейными, что, в частности, подтверждается экспериментами В. П. Иванкина [19.173], который провел исследования с аппаратурой РК-60Л на зонде 35 см и измерил потоки тепловых нейтронов в скважинах различного диаметра с глинистой коркой различной толщины (рис. 22-6). Аналогичные кривые получаются и для других приборов, что будет показано ниже. Из рис. 22-6 видно, что для интервала влажности карбонатных пород от 0,5 до 40% наблюдается пологий спад кривых и максимумы отсутствуют. Скорость счета по оси ординат отложена в относительных единицах: $N' = (N_m - N_в) : (N_п - N_в)$, где N_m — замер против пород с пористостью $m = m_п = m_н$; $N_в$ — замер в баке с водой; $N_п$ — замер против плотной породы с пористостью $m = 0{,}5\%$. Минерализация пластовой воды и бурового раствора не выходила за пределы 30 г/л.

В скважине с малым диаметром градуировочные кривые для глинистой корки разной величины слабо отличаются друг от друга. С увеличением диаметра скважины градуировочные кривые с утолщением глинистой корки выполаживаются тем сильнее, чем больше диаметр скважины. Глинистая корка в процессе замеров моделировалась слоем воды — прибор при этом располагался на различных расстояниях от стенки скважины.

Аналогичные кривые для зондов размерами 27 и 50 см приводятся в работе Ю. А. Гулина и др. [5.9], а для зондов 40 и 50 см — в работе [32.2].

При определении влажности или пористости пород показания приборов обычно выражают в относительных единицах. Отпадает необходимость введения поправок на распад источника нейтронов и т. д. С этой целью измерения по ННМ требуется проводить на каких-то эталонных средах с постоянными параметрами. Эти среды используются также для проверки аппаратуры на стабильность и т. д.

При работе с приставными влагомерами в качестве эталонных сред используются парафиновые блоки, размещаемые на некотором расстоянии от поверхности земли. Прибор в процессе измерений при этом устанавливается либо непосредственно на парафиновый блок, либо на некотором расстоянии от источника (с воздушным зазором). Описание таких блоков приводится в § 3 этой главы.

Зондовые приборы при этом чаще всего эталонируются в баке с водой или в парафиновых цилиндрах, выполняющих одновременно роль защитных экранов (см. § 5 этой главы).

Скважинные приборы также эталонируются в баках с водой. При исследовании же разрезов скважин показания ННК весьма часто выражают в показаниях против опорных горизонтов. В качестве таких горизонтов чаще всего используются пласты плотных пород с пористостью 1—2%.

Ю. А. Гулиным и др. [5.9] для проверки аппаратуры ННК предложено использовать парафиновое эталонировочное устройство с воздушным зазором. Аналогичные устройства предлагается делать также из резины [32.2] и полиэтилена [22.173]. В этой работе, в частности, рекомендуется эталонировочное устройство выбрать в виде двух труб (длиной 0,9 м), вставляемых одна в другую. Толщина внутренней трубы авторами [22.173] принималась 15 мм, а наружной — 30 мм. Трубы надевались на прибор, находящийся на расстоянии 1,5 м от посторонних предметов — для исключения влияния рассеянных нейтронов. Аналогичные эталонировочные устройства с воздушным зазором можно использовать и для эталонировки приставных переносных и перевозных приборов.

Рассмотренные фиктивные эталоны могут быть использованы для построения всей градуировочной кривой $N=f(m_п)$. Разные отсчеты могут быть получены при надевании на прибор эталонировочного устройства или при вытаскивании прибора из этого устройства. Очень удобно для этих целей использовать емкости с водой с внутренним воздушным зазором. При этом перед заполнением емкости водой важно только убедиться, что она не содержит минеральных примесей (хлора и бора). Меняя уровень воды в эталоне, можно, как и при ГГК-п (см. § 1 гл. 19), получать различные отсчеты. В работе [22.117] показано, что скорость счета можно менять, надевая на прибор кадмиевые экраны. Авторы работы [22.173] предлагают для этих целей пользоваться несколькими цилиндрами, вставляемыми один в другой.

Показания приборов в таких фиктивных эталонах необходимо увязывать с реальными средами, а в дальнейшем все замеры в скважинах выражать в показаниях эталона (для какого-то одного его значения). По поводу эталонировки приборов см. также работу [22.136].

Размеры зондов, отвечающие максимумам градуировочных кривых, называют инверсионными $l_п$ (см. рис. 22-4). Показания на этих зондах не зависят от изменения влажности и пористости пород. Поэтому при определении этих параметров важно выбирать размеры зондов больше или меньше инверсионного. При определении в породах поглощающих элементов для исключения влияния влажности пород исследования ведут, наоборот, на инверсионных зондах. Размеры инверсионных зондов для каждых двух типов пород различны. Этот вопрос для целого ряда осадочных пород изучен О. Д. Беломаром и др. [22.8]. Измерения велись прибором со сцинтилляционным счетчиком, изготовленным на основе сернистого цинка с примесью бора-10 в скважинах диаметром 110—120 мм, заполненных насыщенным раствором хлористого натрия. Для большей части изученных пар пород величина инверсионного зонда соответствует размерам зондов в диапазоне от 10 до 20 см и лишь для песчаника — 5 см, а для хлористого натрия (галита) — 58 см. Показания против галита в указанных единицах на размерах зондов свыше инверсионного отбивают повышенными значениями скоростей счета.

В. П. Иванкин [22.33] считает, что при определении пористости пород в нефтяных и газовых скважинах размеры оптимальных зондов, при которых получаются минимальные погрешности, следует выбирать меньшими 40 см. М. М. Севастьяновым и Н. Н. Маренко в работе [22.78]

показано, что при исследовании сухих и заполненных водой скважин диаметром 197 мм, обсаженных колонной диаметром 127 мм, оптимальным зондом для ННК-т и ННК-н является зонд величиной 50 см. Измерения при этом велись прибором диаметром 102 мм с пропорциональным борным счетчиком. Между источником нейтронов и детектором располагался парафиновый экран толщиной 14 см.

5. **Точность метода.** Точность определения влажности и пористости пород по ННМ в соответствии с формулой (7-45) зависит от аппаратурных погрешностей Δm, от погрешностей стандартного метода $\Delta m_{ст}$ и других факторов Δm_g (температурные влияния и т. д.) [22.109]:

$$\Delta m_{\Sigma} = [(\Delta m)^2 + (\Delta m_{ст})^2 + (\Delta m_g)^2]^{1/2}. \qquad (22\text{-}16)$$

Поскольку величину Δm_g трудно оценить на практике, это соотношение можно переписать в виде

$$\Delta m_{\Sigma} \geqslant [(\Delta m)^2 + (\Delta m_{ст})^2]^{1/2}. \qquad (22\text{-}17)$$

Величина Δm определяется по градуировочному графику, величина $\Delta m_{ст}$ — из зависимости

$$m_н = \frac{\rho W}{1 + W}. \qquad (22\text{-}18)$$

Здесь $m_н$ — объемная влажность; ρ — объемная плотность; W — весовая влажность.

В соответствии с соотношением (7-40) $\Delta m_{ст}$ определяется по формуле

$$\Delta m_{ст} = m_н \left[\delta\rho^2 + (\delta W)^2 \frac{1}{(1 + W)^2}\right]^{1/2}. \qquad (22\text{-}19)$$

При сопоставлении ННМ со стандартным методом следует учитывать представительность каждого метода. Как ясно из вышеизложенного, при определении влажности по ННМ происходит усреднение по значительному объему, определяющемуся, с одной стороны, размером зонда прибора, а с другой — величиной погрешности исследования породы. Определение же влажности грунтов термостатно-весовым способом осуществляется по пробам, отбираемым с помощью режущих колец. Представительность одной такой пробы невысока. Поэтому В. И. Осипов [19.65] для повышения представительности стандартного способа рекомендует отбирать со всего объема, исследуемого ННМ, не менее 20—25 проб. Для сопоставления ГГМ-п с весовым способом достаточно бывает взять проб в 3 раза меньше [19.65]. Такие количества проб можно отбирать лишь из грунтов, залегающих недалеко от поверхности.

Гораздо сложнее с изучением пород, расположенных на больших глубинах. Об их влажности или пористости можно судить лишь по одному образцу керна, имеющему невысокую представительность, явно не сопоставимую с ННМ. Этот факт еще раз указывает на то, что измерениям по ядерным методам следует отдавать гораздо большее предпочтение, чем данным анализа керна или других единичных проб, отбираемых, например, из коренных выходов пород.

Другие вопросы, связанные с оценкой точности ННМ, рассматриваются в работе [22.33] и др.

§ 3. Приставные влагомеры и их применение

Для определения влажности поверхностных отложений в СССР и за рубежом разработаны разнообразные приставные влагомеры переносного типа. Принципиальное устройство одного из отечественных (НВУ-1) и американских (Р-21) приборов показано на рис. 22-7

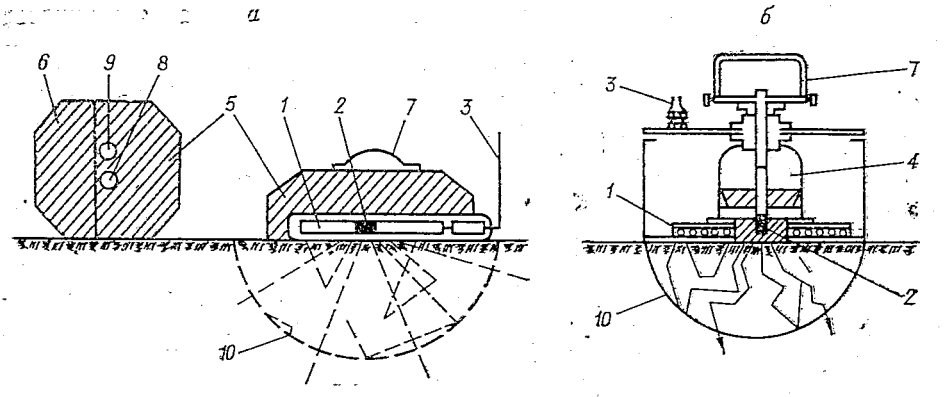


Рис. 22-7. Схематическое устройство приставных влагомеров с одним НВУ-1 (*а*) и десятью Р-21 (*б*) пропорциональными счетчиками.

1 — пропорциональные счетчики, *2* — источник нейтронов, *3* — кабель, идущий к пульту, *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.

[19.65, 19.79, 19.116]. В связи с тем, что значительная часть быстрых нейтронов отражается от облучаемой поверхности, в приборе НВУ-1 над источником и детектором располагается специальный отражатель из парафина, возвращающий часть нейтронов обратно в породу. В нижней части этот отражатель делается из парафина, а в верхней — из смеси парафина с бурой и т. д. Последнее обусловлено необходимостью защиты оператора от нейтронов. Для калибровки прибора в его комплекте предусмотрен специальный блок из парафина. Защитный и калибровочный блоки 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. Детектором нейтронов может служить пропорциональный нейтронный счетчик СНМ-11 (см. табл. 5-1). Прибор НВУ-1 используется также для исследования бурок (см. § 5 этой главы).

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. С помощью ручки источник из рабочего положения может переводиться в нерабочее (внутрь экрана). Калибровочное устройство выполнено в виде ящика и на специальных ножках устанавливается на некотором расстоянии от поверхности земли. Время одного замера 1—2 мин. Градуировочный график этого влагомера показан на рис. 22-8 [19.116]. Как видно, этот график является линейным для всего рассматриваемого диапазона влажности пород.

Описание других приставных влагомеров можно найти в работах [10.28, 22.108, 22.109, 22.118, 22.138, 22.146, 22.160, 22.155, 22.168, 32.6].

Для измерения влажности пород с поверхности в СССР выпускается также влагомер НИВ-1, основанный на измерении суммарного эффекта НГМ+ННМ-т. Он будет рассмотрен ниже, в § 3 гл. 24.

Исследователей в ряде случаев интересуют сразу плотность и влажность пород. Поэтому для одновременного определения этих параметров начинают применяться комбинированные приборы (плотномеры-влагомеры) [19.65]. Так, в Англии для этих целей разработан прибор, в котором для определения плотности используются цезиевый источник и газо-

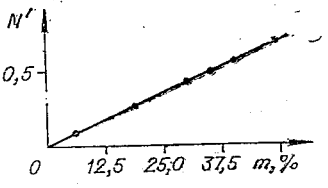


Рис. 22-8. Градуировочная кривая для приставного влагомера.

разрядный счетчик. Плотности пород определяются с поверхности по методике ГГМ-п (см. § 3 гл. 19), а плотность рыхлых пород — путем вдавливания в них штыря с источником на глубину до 15—20 см (измерения проводятся по методике ГМп) (см. § 2 гл. 18). Для определения влажности пород используется радий-бериллиевый источник и пропорциональный борный счетчик.

Компактный комбинированный прибор может быть также создан на основе одного сцинтилляционного счетчика с кристаллом йодистого натрия, окруженного слоем бора, и нейтронного гамма-источника (радий-бериллиевый или комбинация гамма-источника с нейтронным источником) [22.14, 22.15]. При измерениях с полевым гамма-спектрометром влажность пород может определяться по гамма-излучению с энергией 0,479 МэВ, возникающему при захвате бором медленных нейтронов (см. § 9 гл. 5), плотность пород — по регистрации рассеянного гамма-излучения с энергией в интервале примерно 0,2—0,45 МэВ.

На этом принципе могут быть созданы не только приставные переносные, но и автомобильные и зондовые комбинированные приборы.

При определении плотности почв и грунтов влагомер устанавливают непосредственно на поверхность этих сред и берут отсчет. При определении влажности грунтов под почвенным слоем для замеров расчищается специальная площадка.

Если влагомер проградуирован для данного типа пород с учетом всех факторов (см. § 2 этой главы), содержания влаги в породах можно определять с точностью до 0,5—1% (0,01 г/см^3). Порог чувствительности его равен 1—2%.

§ 4. Определение влажности пород в процессе движения

Исследования влажности горных пород с поверхности в процессе движения нейтронного влагомера впервые были проведены В. И. Ферронским и др. (ВСЕГИНГЕО) [19.79]. Устройство располагалось на полозьях и транспортировалось по намеченным профилям автомобилем ГАЗ-69 и т. п. Автомобильный влагомер состоял из двух пропорциональных счетчиков типа СНМ-11 (см. табл. 5-1), расположенных параллельно друг другу. Полоний-бериллиевый источник активностью около $2 \cdot 10^6$ нейтр/с располагался посредине между счетчиками. Отражателя нейтронов не было. С целью уменьшения активности источника или повышения эффективности влагомера применялся отражатель нейтронов и увеличивалось число счетчиков в приборе. В датчике влагомера находился предусилитель, соединенный кабелем с пультом автомобильного радиометра типа СГ-65 и др. Показания записывались на ленту самописцем.

При работе с двумя счетчиками глубинность такого влагомера оценивается в 15 и 30 см соответственно при влажности 15 и 3%. Однако в процессе определения влажности пород прибор позволяет определять содержание влаги в основном самом верхнем ее слое.

Точность определения влажности пород по этому методу равна 1,0—1,5% при отсутствии выбоин и углублений между породой и установкой. Если они имеются, точность измерений снижается.

Присутствие в породах хлора искажает показания ННМ-т. Для раздельного определения влаги и хлористого натрия в работе [19.48] измерения предлагается вести по методике тепловых (ННМ-т) и надтепловых (ННМ-н) нейтронов. При этом следует использовать нейтронную установку со счетчиками тепловых и надтепловых нейтронов, установленными один возле другого с одной стороны источника.

Интересующихся более подробно этим вопросом отсылаем к работам [19.48, 19.79, 22.63].

Для определения влажности используются также автомобильные установки, в которых в разные соседние бурки погружаются зонды с детектором и источником [18.26].

§ 5. Устройство зондовых и скважинных приборов

По сравнению с переносными и перевозными поверхностными влагомерами, рассмотренными в предыдущих параграфах, зондовые и скважинные приборы находят более широкое применение в практике геофизических исследований.

Устройство этих приборов определяется главным образом взаиморасположением источника и детектора нейтронов. По этому принципу их можно разделить на следующие типы:

а) приборы с нулевыми и близкими к ним размерами зондов. При работе со сцинтилляционными счетчиками нулевой размер зонда реализуется при расположении источника у торца детектора, а при работе с пропорциональными счетчиками — при размещении источника сбоку около центра счетчика. Однако влагомер при этом становится несимметричным по отношению к своей оси. Симметричный зонд в этом случае может быть создан при окружении источника группой счетчиков. Однако на этом принципе невозможно создать приборы малого диаметра. В качестве пропорциональных счетчиков при конструировании таких приборов наиболее подходящими являются СНМ-12 и СНМ-13 (см. табл. 5-1). Наконец, прибор с нулевым зондом может быть создан путем размещения нескольких источников вокруг одного счетчика или одного источника между торцами двух счетчиков. Так, в работе [22.111] описан прибор с одним счетчиком, окруженным четырьмя источниками нейтронов, а в исследовании [22.112] — прибор с источником, размещенным между торцами двух счетчиков. Кроме того, подобного рода зонд может быть реализован при размещении между двумя источниками. Последние два зонда являются симметричными. Причем первый из них следует назвать симметричным счетчиковым (источник находится между торцами двух счетчиков), а второй — симметричным источниковым (счетчик своими торцами соприкасается с источниками);

б) приборы со средними (порядка 20—30 см) и длинными (порядка 50—60 см) размерами зондов. В этом случае в пространстве между счетчиком и источником размещаются специальные экраны, предназначенные для защиты детекторов от нейтронов, распространяющихся внутри прибора. Их рекомендуется делать из парафина и свинца. Парафин должен быть вблизи детектора, а свинец — вблизи источника нейтронов. Свинец в данном случае необходим для защиты детектора от гамма-лучей нейтронного источника и гамма-лучей, возникающих в приборе за счет неупругого рассеяния быстрых нейтронов. Применяемые детекторы нейтронов обычно бывают чувствительны к гамма-лучам (см. гл. 5). К парафину иногда специально примешивают бор. Однако это не всегда целесообразно в связи с тем, что бор интенсивно поглощает нейтроны, попадающие в скважину, и уменьшает измеряемый эффект. В ряде случаев это может мешать решению поставленной задачи, например, при определении эффективных энергий (см. § 3 гл. 4 и работу [3.16] и т. д.).

Вообще же при постановке каждой конкретной задачи во время работы с прибором выбранной конструкции и исследовании скважин с определенными параметрами вопрос о выборе экранов требует специальных исследований. Вид таких экранов может быть самым разнообразным. В некоторых случаях экраны вообще бывают не нужны, например, при измерении эффективной энергии нейтронов, при работе на нулевых размерах зондов и т. д. Применительно к решаемой задаче

иногда бывает важно выбирать специальную конструкцию и других деталей глубинного прибора. Так, показания ННК существенным образом зависят от материала корпуса глубинного прибора и его толщины.

Корпус глубинных приборов обычно изготовляется из стали и дюралюминия. При исследованиях скважин предпочтительнее пользоваться приборами с дюралюминиевыми корпусами, обладающими сравнительно низкими поглощающими и рассеивающими свойствами по сравнению с железом. По этим соображениям при ННК невыгодно также применять и различные пластмассовые материалы, содержащие в больших количествах водород, обладающий высокими сечениями рассеяния нейтронов.

Для сопоставления результатов, получаемых с разными приборами, необходимо их стандартизировать. Для определения влажности рыхлых отложений применяются приборы с пропорциональными и сцинтилляционными счетчиками. Часто для этих целей приспосабливают приборы со сцинтилляционными счетчиками различного назначения: СРП-2К, РКМ-5, ПРКС, КРС, РК-ЛС-60, КУ-59 и др. [19.79].

Для определения влажности рыхлых отложений на небольших глубинах (1,5—2 м) в СССР применяется прибор НВУ-1, а в США — влагомер типа Р-19. Устройство этих приборов приведено на рис. 22-9. Описание прибора НВУ-1 приводится в § 3 этой главы.

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 находится сбоку несколько ниже чувствительной части рабочего объема пропорционального счетчика длиной 24 см. Таким образом, размер зонда у этого прибора следует считать нулевым, а само зондовое устройство асимметричным. Для экранирования счетчика от гамма-излучения источника в зондовом устройстве размещен против чувствительной части счетчика продольный свинцовый экран. При транспортировке прибора зондовое устройство располагается внутри контейнера, изготовленного из свинца и парафина. Снизу у контейнера имеется патрубок, который при измерениях надевается на обсадную трубу, как это показано на рис. 22-9, *б*. Градуировочный график этого прибора дан на рис. 22-10 [19.116]. Аналогичного типа влагомер МНР-100 [19.65] (см. приложение 4) выпускается и во Франции.

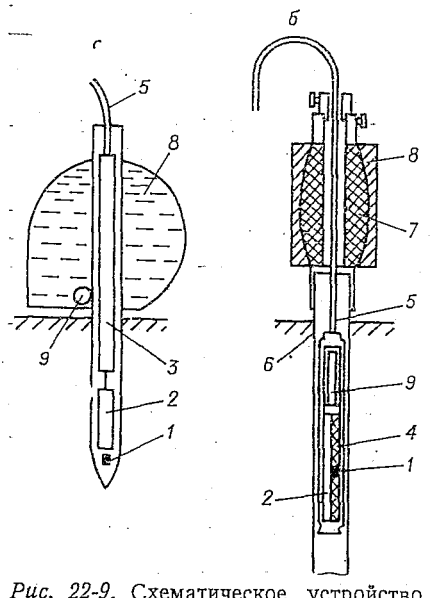


Рис. 22-9. Схематическое устройство зондовых влагомеров НВУ-1 (*а*) и Р-19 (*б*) с защитными устройствами.
1 — источник нейтронов, *2* — пропорциональный счетчик нейтронов, *3* — радиосхема, *4* — продольный свинцовый экран, *5* — кабель к радиометру, *6* — обсадная труба, *7* — свинцовая часть контейнера, *8* — парафиновый контейнер, *9* — вкладыш.

В СССР для определения влажности и плотности почвогрунтов разработана комплексная сцинтилляционная аппаратура с влагомером и двумя плотномерами (ГГМ и ГМп) диаметром 62 мм [22.171]. Аппаратура предназначена для исследования скважин диаметром 73—108 мм. В качестве фотоумножителей в зондовых устройствах установлен ФЭУ-13. Люминофором в зонде влагомера служит детектор ЛДНМ-11-7 диаметром 30 мм и высотой 60 мм. На расстоянии 30 мм от торца люминофора располагается плутоний-бериллиевый источник нейтронов с выходом 10^5 нейтр/с. Сцинтилляционный счетчик влагомера имеет хоро-

шее плато по отношению к высокому напряжению в пределах 1600—1850 В при порогах дискриминации в пределах от 90 до 115 мВ.

Зонд ГГП (см. гл. 19) содержит источник цезий-137 активностью 0,2—0,5 мг·экв радия и кристалл йодистого натрия размерами 40×40 мм, разделенные вольфрамовыми экранами: цилиндрическим длиной 30 мм у люминофора и коническим длиной 40 мм у источника. Размер зонда выбран равным 30 см. При проведении точных измерений плотности необходимо учитывать естественный фон пород [19.177].

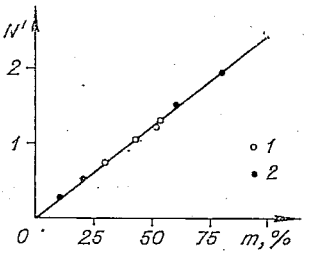


Рис. 22-10. Градуировочный график зондового влагомера Р-19.
1 — эксперимент, *2* — расчет.

Для измерений плотностей грунтов по ГМп (см. гл. 18) в комплекте прибора имеется плотномер со счетчиковым и источниковым (кобальт-60 активностью 1—2 мг·экв радия, расположенный в свинцовом экране с коллиматором) зондами, устанавливаемыми на расстоянии 30 см один от другого.

Датчики ГГМ-п и ГМ-п имеют плато счетных характеристик при напряжениях в диапазоне 1600—2000 В при уровнях дискриминации 50—120 мВ.

Для проходки скважин в комплекте прибора имеется буровой станок ПВБС-15М. Помимо этого, для влагомера-плотномера разработано также самоходное буровое устройство на шасси автомобиля УАЗ-451. В комплекте прибора имеются два блока с интенсиметрами и один блок с ЭМСом. Для непрерывной записи скоростей счета к интенсиметрам могут подключаться самописцы.

Для пенетрационных исследований грунтов по ННК с помощью гидравлических самоходных установок СУГП-10 использовались радиосхемы каротажных снарядов РК-60Л и КУ-59 с детекторами Т-1 и Т-2 [19.78, 19.79, 22.92]. С помощью установки СУГП-10 скважина диаметром 70 мм и глубиной до 25 мм может быть пройдена за 10—15 мин [18.46].

Все перечисленные приборы относятся к однозондовым. Однако для исследования рыхлых отложений применяются также двухштыревые (двухзондовые) влагомеры. В одном штыре при этом помещается источник нейтронов, а в другом — детектор, т. е. по устройству эти влагомеры подобны гамма-просвечивающим (двухштыревым) плотномерам (см. § 2 гл. 18). По аналогии с ГМп-п, на котором основаны эти плотномеры, нейтронный метод определения влажности двухзондовыми влагомерами следует назвать нейтронным методом просвечивания НМп. Однако в связи с тем, что нейтроны в этом случае в исследуемой среде претерпевают интенсивное замедление, этот метод фактически является разновидностью ННМ. В ГМп же в основном регистрируется первичное гамма-излучение, что и отличает ГМп от ГГМ. НМп и ННМ в этом смысле практически не отличаются. По этой причине нет необходимости для выделения НМп в самостоятельный раздел (параграф).

Из двухзондовых влагомеров на практике в основном применяются вилкообразные, схожие с вилкообразными плотномерами (см. рис. 18-8, *а*). Обстоятельные исследования по НМп приводятся в работах [22.96, 22.149]. Из сравнения НМп с ННМ убедительно доказаны преимущества последнего метода по сравнению с первым. В работе [22.171] описан прибор, основанный на принципе НМп, с детектором, установленным на поверхности. Измерения с такими приборами можно вести при погружении источника на глубину до 20—30 см.

Устройство зондовой части прибора ДРСТ-1, применяющегося для исследования скважин по ННК-т, показано на рис. 22-11.

С целью ослабления влияния скважины и колебаний в ней прибора на показания ННК глубинные приборы стали снабжать прижимными пружинами. Один из таких приборов, созданный польскими геофизиками, описан в исследовании [22.116]. Детектор и источник в этом приборе располагаются эксцентрично непосредственно у рабочей стороны прибора.

В СССР для одновременного определения плотности и пористости горных пород в нефтяных скважинах создан комплексный прибор ГГК-п и ННК-н с прижимными пружинами [22.2]. Зондовое устройство для ГГК-п в этом приборе находится в нижней части прибора, а зондовое устройство ННК-н — в верхней. В зонде ГГК-п кобальтовый источник располагается снизу от газоразрядного счетчика, а нейтронный в зонде ННК-н — сверху от пропорционального борного счетчика. Для регистрации надтепловых нейтронов счетчик окружался слоем парафина и кадмия. Аналогичный прибор для изучения грунтов описан в сборнике [19.181].

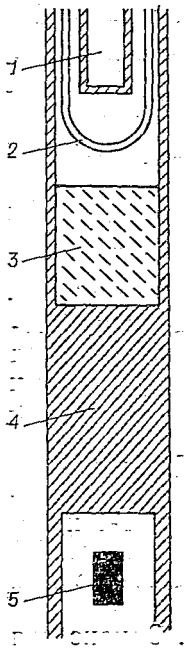


Рис. 22-11. Схема зондовой части прибора ДРСТ-1.
1 — люминофор, *1* — сосуд Дьюара, *3* — парафин, *4* — сталь, *5* — источник.

Дж. Титтманом и др. [19.178, 22.166] для исследования скважин диаметром 12,7 см (5 дюймов) и выше разработан прибор ННК-н с выносным прижимным блоком, подобным тем, которые применяются в ГГК-п и ГГК-с (см. рис. 19-16 и 20-15). Прибор одновременно с диаграммой ННК-н ведет запись ГК и изменений диаметра скважины. В наземной панели пульта прибора имеется счетно-решающее устройство, позволяющее записывать показания прибора непосредственно в абсолютных значениях пористости. Для каждого типа пород (песчаник, известняк, доломит) за счет переключателя выбирается шкала пористости. Эталонирование прибора осуществляется на специальных моделях пластов горных пород.

Для исследования нефтепромысловых скважин Ю. А. Гулиным и др. [6.63] создан двухзондовый прибор для одновременного измерения плотности потока надтепловых нейтронов на средних (25 см) и длинных (50 см) размерах зондов. Л. С. Аллен и др. [19.178] считают, что для этих целей лучше использовать приборы с большими размерами зондов — 70 и 90 см. Целесообразность применения двухзондовых приборов обосновывается в следующем параграфе.

Помимо приборов ННК-т и ННК-н для определения влажности и пористости пород может использоваться также и аппаратура ННК-б. Х. Е. Холлом [22.94] для этой цели предложен прибор с люминофором из фтористого кальция (CaF_2) размером 50×100 мм. В качестве источника нейтронов в нем применяется ампульный препарат или генератор нейтронов. Размер зонда выбран равным 48 см. При этом зонде, как отмечается Х. Е. Холлом, меньше всего сказываются колебания прибора в скважине на результатах измерений. Для устранения отклонений прибора рекомендуется снабжать его прижимным устройством.

Фтор, как известно (см. табл. 5-9), может вступать в реакцию $F^{19}(n, \alpha)\ N^{16}$ с нейтронами, имеющими энергию не ниже 3,1 МэВ. Образующийся изотоп азот-16 распадается с периодом полураспада 7,3 с с испусканием бета-частиц с максимальной энергией 10,4 МэВ и гамма-квантов с энергией 6,1 и 7,1 МэВ. Сечение этой реакции имеет широкий максимум — 0,28 барн для нейтронов с энергией 5,9 МэВ. С помощью

дискриминационного устройства, настроенного на энергию 10 МэВ, можно регистрировать бета-излучения, обусловленные рассматриваемой реакцией. Постоянная времени глубинного прибора при этом не должна быть меньше 7,3 с.

§ 6. Влияние скважины на результаты измерений

1. **Однозондовая методика.** Наиболее простой задачей является определение влажности или пористости пород в необсаженных скважинах. В этом случае на результаты измерений влияет положение прибора в скважине, наличие каверн и глинистой корки на ее стенках, а также буровой раствор, заполняющий скважины.

Значительно сложнее дело обстоит при изучении пород в обсаженных скважинах. На показаниях приборов ННК при этом отражается колонна и ее положение в скважине, а также цементное кольцо и его положение. С увеличением диаметра скважины показания ННК для малых и средних размеров зондов возрастают, а затем, после выхода

Таблица 22-3

Показания ННК-н в абсолютных (и относительных) единицах в скважинах, заполненных пресной и соленой водой (250 г/л хлористого натрия)

Вода в скважине	Зонд 25 см				Зонд 50 см			
	Диаметр скважины, мм							
	197		222		197		222	
	Пористость, %							
	1	37	1	37	1	37	1	37
Пресная	290	161	250	150	101,2	22,1	88,1	21,2
Соленая	276 (0,95)	151 (0,94)	238 (0,953)	135 (0,90)	98,6 (0,98)	21,3 (0,964)	84,5 (0,96)	18,5 (0,875)

на максимум, спадают. Для больших размеров зондов увеличение диаметра скважины сразу приводит к уменьшению показаний ННК [1.27]. Характер этих зависимостей меняется с изменением не только размера зонда, но и водородсодержания пород и содержания в них поглощающих элементов [32.2]. Показания приборов ННК зависят также от положения глубинного прибора по отношению к центру скважины. Это, в частности, видно из характера градуировочных кривых, полученных в необсаженных скважинах диаметрами 130, 190 и 243 мм (см. рис. 22-6), глинистая корка в которых моделировались слоями воды различной толщины. В случае заполнения скважины соленым буровым раствором определение пористости пород следует вести по данным ННК-н и пользоваться соответствующими градуировочными кривыми. О влиянии солености бурового раствора на результаты ННК-н можно судить по данным табл. 22-3 [5.9]. Видно, что содержание в воде 250 г/л хлористого натрия при работе на зонде 25 см в породах с пористостью 1% уменьшает показания ННК-н на 5%, а в породах с пористостью 37% — на 6—10%. При работе на зонде 50 см — соответственно на 2—4 и 6—12,5%. Следовательно, при содержании в буровом растворе порядка 50 г/л хлористого натрия его влиянием на показания ННК-н можно пренебречь, поскольку изменения показаний не будут выходить за пределы погрешностей аппаратуры.

При определении пористости пород по ННК нужно тщательно учитывать изменения диаметра скважины (с помощью каверномера) за счет как каверны, так и глинистой корки и пользоваться соответствующими градуировочными кривыми. Чтобы при высокоточных измерениях по методике ННК прибор не отходил от стенки скважины, на нем устанавливают пружинное устройство. Центрирование прибора ННК

является обязательным при определении пористости пород в обсаженных скважинах [5.9]. Градуировочные графики при этом должны строиться отдельно для зацементированной и незацементированной колонн. Характер градуировочных кривых ННК-н для зонда размером 50 см в скважинах диаметрами 197 и 222 мм, обсаженных колонной диаметром 127 мм (5 дюймов), показан на рис. 22-12 [5.9]. Погрешности определения пористости пород в обсаженных скважинах обусловливаются неизвестным положением колонны в скважине, погрешностями в определении диаметра скважины, а также тем, что точно неизвестны водородсодержание среды за колонной в скважине и содержание в этой среде хлористого натрия. Суммарные погрешности от всех этих факторов для скважины диаметром 222 м, обсаженной колонной диаметром 127 мм, приведены в табл. 22-4 [5.9]. За колонной находился глинистый буровой раствор. Видно, что наименьшие абсолютные погрешности для ННК-н наблюдаются при измерениях на зонде размером 50 см.

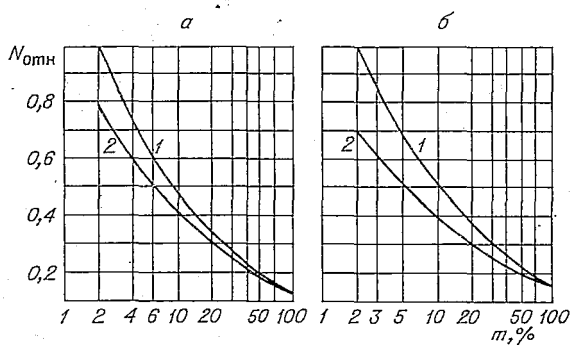


Рис. 22-12. Градуировочные кривые в обсаженной скважине диаметром 197 мм (*а*) и 222 мм (*б*) на незацементированном (*1*) и зацементированном (*2*) участках.

В скважине диаметром 197 мм, обсаженной колонной диаметром 127 мм, с пространством между колонной и скважиной, заполненным цементом, ошибки в определении пористости уменьшаются примерно в 2 раза по сравнению с данными, приведенными в табл. 22-4.

Определение пористости пород в обсаженных скважинах большого диаметра по ННК вести практически невозможно. Так, в работе [22.5] показано, что при исследовании по ННК-т скважины диаметром 30 см, обсаженной колонной диаметром 15,2 см, о пористости и насыщенности коллекторов судить практически невозможно.

2. **Двухзондовая методика.** Для ослабления влияния скважины на результаты определения пористости пород Ю. А. Гулиным и др. [5.9, 6.44] предложены и разработаны двухзондовая методика и аппаратура ННК. Измерения по ННК-н при этом ведутся на средних $N_с$ (около 20 см) и больших $N_б$ (около 50 см) размерах зондов. При определении пористости по такой методике существенно снижается влияние скважинных условий, однако погрешность измерений повышается. В частности, с помощью двухзондовой аппаратуры при измерении отношения скоростей счета $M = N_с : N_б$ можно исключать влияние глинистой корки на результаты определения пористости горных пород при исследовании необсаженных скважин [6.63].

Существенное влияние скважины и минерализации пластовой воды может быть ослаблено при измерениях отношения M на больших размерах зондов. Так, Л. С. Алленом и др. [19.178] произведены исследования по ННК-т на зондах от 30 до 90 см с плутоний-бериллиевым источником с выходом $2{,}4 \cdot 10^6$

Таблица 22-4

Абсолютные и относительные погрешности определения пористости пород по данным ННК-н в обсаженных скважинах

Размер зонда, см	Погрешность, %					
	абсолютная				относительная	
	Пористость, %					
	1	10	20	37	1	37
25	0,9	4,0	5,0	6,0	8,8	5,5
50	0,75	2,5	3,3	3,0	11	5,0

нейтр/с и пропорциональным нейтронным счетчиком диаметром 2,5 см и длиной 10,4 см. Счетчик заполнялся гелием-3, имеющим эффективное сечение захвата тепловых нейтронов 5060 барн. Корпус прибора представлял собой медную трубу с наружным диаметром 2,9 см. Все свободное пространство в трубе занималось акриловой пластмассой. Измерения велись на модели буровой скважины диаметром от 102 (4 дюйма) до 305 (12 дюймов) мм. Скважина была не обсажена и заполнена пресной водой. Пористость песчаника менялась от 3 до 50%. Поры заполнялись пресной и соленой водой с содержанием 100 г/л хлористого натрия.

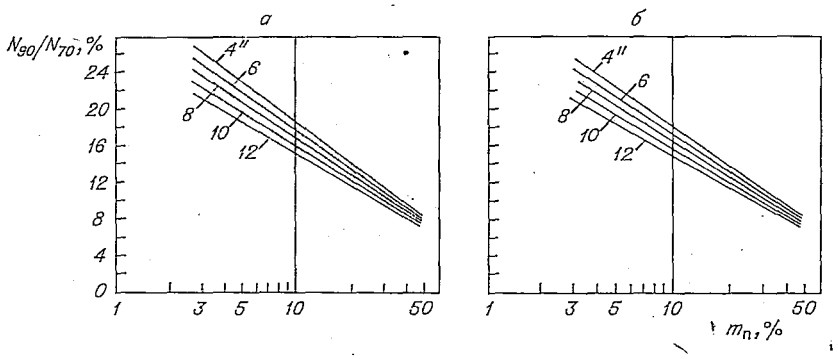


Рис. 22-13. Зависимость отношения скоростей счета на зондах 90 и 70 см от пористости песчаника, заполненного пресной (*а*) и соленой (*б*) водой. Шифр кривых — диаметр скважины в дюймах.

Результаты измерений показаны на рис. 22-13. Градуировочные кривые для всего рассматриваемого диапазона пористости в полулогарифмических координатах являются линейными. Кривые, полученные при заполнении пласта пресной и соленой водой, практически совпадают. Наибольшие различия наблюдаются при измерениях в скважинах малого диаметра для низких пористостей пласта. Например, для скважины диаметром 4 дюйма замер, соответствующий величине пористости 3%, на графике рис. 22-13, *б* отвечает пористости 3,4% на графике рис. 22-13, *а*. В случае высоких пористостей пород изменения диаметра скважины на измерения почти не влияют. Так, для песчаника с пористостью 20% изменение диаметра скважины на 2,5 см приводит к погрешности в определении пористости всего лишь на 1%, т. е. величина пористости получается равной $20 \pm 1\%$.

В работе [19.178] отмечается, что рассматриваемая методика может быть использована для исследования не только необсаженных, но и обсаженных скважин. Прибор при этом необходимо градуировать отдельно для каждого конкретного случая. Это справедливо также для приборов, расположенных эксцентрично или на оси скважины. Недостатком такой двухзондовой методики является необходимость использования источников с весьма высоким выходом ($5 \cdot 10^8$ нейтр/с). Таким образом, эту методику проще всего реализовать при работе со скважинным генератором нейтронов. В противном случае определение плотностей пород можно вести лишь по точечным замерам.

Для определения пористости пород стали также применять трех- и четырехзондовые методики.

§ 7. Области применения зондовых и скважинных приборов

1. Определение влажности рыхлых отложений. Зондовые и скважинные приборы в практике геофизических исследований в инженерной геологии применяются для определения влажности грунтов, насыпей плотин, железных и шоссейных дорог и т. д. Чаще всего ННМ-т при этом комплексируется с ГГМ-п (см. гл. 19). При надлежащем учете

всех факторов влажность пород определяют с точностью до 0,5—1%, если зондовое устройство вплотную прилегает к породе, и с точностью до 2% и более при зазоре между прибором и породой (при исследовании скважин). Порог чувствительности при определении влажности с учетом аппаратурных погрешностей оценивается в 2—3% [19.79].

Метод ННК в практике инженерно-геологических исследований применяется как для режимного контроля за влажностью, так и для определения уровня грунтовых вод и его колебаний во времени, а также влажности торфа и т. д. Совместно с методами ГК, ГГК-п метод ННК применяется также для литологического расчленения разрезов рыхлых отложений и т. д.

В. И. Ферронским и др. [19.79] для определения влажности грунтов рекомендуется исследования вести на зондах, близких к нулевым. Уплотнения грунта, происходящие при вдавливании зондов, практически не искажают результатов определения влажности. Интересующихся более подробно рассматриваемой проблемой и другими вопросами отсылаем к литературе [17.13, 18.18, 18.19, 18.40, 19.9, 19.26, 19.45, 19.49, 19.50, 19.60, 19.64, 19.65, 19.78—19.81, 19.111, 19.124, 19.125, 19.148, 22.10, 22.16, 22.28—22.30, 22.62, 22.64, 22.77, 22.80, 22.89, 22.92, 22.93, 22.98, 22.105, 22.111, 22.113, 22.122, 22.133, 22.140, 22.141, 22.144—22.147, 22.153, 22.159, 22.169, 22.170].

2. **Определение пористости горных пород,** пройденных скважинами, является одной из важнейших задач нефтепромысловой геофизики. Для решения ее необходимо применять стандартизированную отградуированную аппаратуру ННК. Подробно эти вопросы рассматриваются в п. 4 § 2 и в § 6 этой главы. Там, в частности, показано, что характер градуировочных кривых в значительной степени зависит от параметров глубинных приборов и скважин. Вопрос об устройстве зондовых приборов, применяющихся в ННК, рассмотрен в § 5.

Поры горных пород на значительных глубинах от дневной поверхности бывают нацело заполнены водой, нефтью или газом (последнее относится к районам нефтеносных и газовых месторождений). В районах развития пресных пластовых вод определение пористости пород ведут по данным ННК-т, а в районах развития сильно минеральных пластовых вод с содержанием хлористого натрия свыше 50 г/л — по данным ННК-н.

Наиболее простой задачей является определение пористости «чистых» пород (не глинистых, не загипсованных) и более сложной — глинистых [32.4] и загипсованных.

Данные определения пористости пород по результатам метода ННК в сопоставлении с данными анализа керна приведены на рис. 22-14 [22.79]. Метод ГК при этих исследованиях применяется для оценки глинистости пород. Кривая ННК построена в стандартных единицах отградуированным прибором. При исследованиях использовался радий-бериллиевый источник нейтронов. Из сопоставления кривой ННК с данными анализа керна видно, что результаты исследований удовлетворительно согласуются друг с другом.

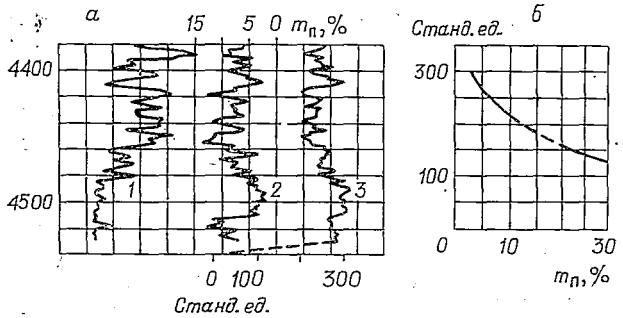


Рис. 22-14. Сопоставление результатов ННК и анализа керна (*а*); *б* — градуировочная кривая.
1 — кривая ГК, *2* — кривая пористости по керну, *3* — то же, по ННК.

Аналогичные результаты приводятся также в работе [22.132]. В ней, в частности, отмечается, что пористость пород по данным ННК можно определять с точностью 1—2%. В соответствии с этим порог чувствительности ННК к оценке пористости пород следует оценить в среднем равным 3%.

Если литология пластов неизвестна, то пористость горных пород определяют по комплексу методов ННК, ГГК-п и ГК. Для неглинистых пород достаточно использовать ННК и ГГК-п. По ГГК-п при этом определяют фиктивную пористость $m_{п\gamma}$, а по ННК — $m_{пп}$. Истинная пористость пород оценивается по данным $m_{п\gamma}$ и $m_{пп}$ (рис. 22-15 [19.178]). Такие номограммы строятся отдельно для каждой реальной скважины в зависимости от ее диаметра и заполнения. Пористость пород промежуточного состава определяется с помощью вспомогательной системы пунктирных кривых номограммы. В связи с тем, что $m_{п\gamma}$ определяется по данным плотности пород ($\rho_{\gamma\gamma}$), номограммы можно строить и в виде зависимости $\rho_{\gamma\gamma} = f(m_{пп})$. Для глинистых пород указанный комплекс дополняется методом ГК, строятся специальные номограммы [19.37, 22.36]. Аналогичный комплекс используется и для определения пористости и газонасыщенности коллекторов [19.37]. Необходимы приборы, позволяющие одновременно определять фиктивную нейтронную пористость по ННК или НГК и фиктивную пористость, оцениваемую по ГГК-п. Такие приборы могут быть сделаны на основе скважинного нейтронного генератора (см. § 3 гл. 32).

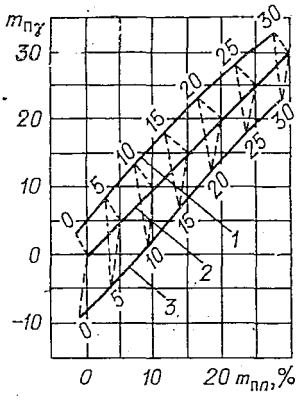


Рис. 22-15. Номограмма для определения пористости и литологического состава пород по комплексу методов ГГК-п и ННК-н

1 — песчаник; *2* — известняк; *3* — доломит.

Скорость записи кривых ННК для приборов с пропорциональными борными счетчиками при оценке пористости пород выбирается равной порядка 200—500 м/ч [1.27], а для приборов со сцинтилляционными счетчиками — до 1000 м/ч [16.44].

Вообще же скорость перемещения прибора в скважине выбирается в зависимости от мощности определяемого пласта, длины зонда, активности источника, постоянной времени прибора и регистрируемой скорости счета. (Соответствующую номограмму см. в работе [22.54]).

С целью ослабления влияния глинистой корки и скважины на результаты определения пористости пород к настоящему времени разрабатывается двухзондовая методика ННК, подробно рассмотренная нами в предыдущем параграфе. В работах [17.13, 32.9] показано, что эта методика может привлекаться для определения пористости и водонасыщенности газоносных пластов (рис. 22-16).

Некоторые другие вопросы, связанные с определением пористости горных пород по диаграммам ННК и других методов, рассматриваются в работах [6.63, 6.64, 11.14, 11.15, 15.31, 22.1, 22.7, 22.13, 22.21—22.23, 22,36, 22.52—22.55, 22.59, 22.73, 22.91, 22.95, 22.106, 22.110, 22.131, 22.134, 22.135, 22.143, 22.156—22.158, 22.167, 32.2].

3. **Отбивка водонефтяного (ВНК) и газожидкостного (ГЖК) контактов** по ННК-т осуществляется только в районах развития высокоминерализованных пластовых вод. Эта задача должна была бы рассматриваться в следующей главе. Но чтобы не возвращаться к нефтяным и газовым месторождениям, остановимся на ней в этом параграфе.

В благоприятных случаях разность показаний ННК-т против нефтеносных и водоносных пластов может достигать 40% [22.58, 22.67].

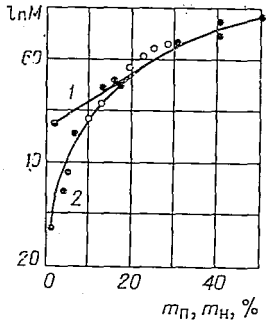


Рис. 22-16. Зависимость логарифма отношения скоростей счета от пористости (кривая *1*) и водонасыщенности газоносного пласта (кривая *2*).

Такие результаты получаются, если скважины заполнены пресным буровым раствором или цемент засолонен только против водоносного пласта. Засолонение цемента против нефтеносных пластов ухудшает показания против нефтеносного и водоносного пластов. Зона проникновения пресной воды на глубину 10 см и выше в водоносный пласт с минерализованной водой не позволяет, по данным ННК-т, отбивать ВНК. Экспериментальные результаты по изучению величины зоны проникновения и ее влияния на ННК-т рассматриваются в работе [22.66].

В статье [22.27] показано, что комплекс ННК-т и НГК в обсаженных скважинах эффективен при отбивке ВНК, если в воде содержится 50—70 г/л хлористого натрия для пород с пористостью 15—20% и 200—250 г/л хлористого натрия для пород с пористостью 5—10%. Когда вместо цемента за колонной находится соленая вода, указанный комплекс не отбивает ВНК.

Вопросы отбивки ВНК по комплексу методов ННК и НГК рассматриваются в работах [6.46, 15.31, 17.13, 22.3, 22.23, 22.61, 22.68, 22.69, 22.75, 22.82, 22.90, 22.91, 22.95—22.97, 22.99, 22.100, 22.102, 22.127].

Более эффективно задача по отбивке ВНК в пластах с минерализованной водой решается с помощью метода ИННК-т. Этот метод, как известно, по сравнению с ННК-т и НГК обладает более высокой глубинностью и возможностью избирательной регистрации излучения, идущего из пласта. Однако метод ИННК-т для его реализации требует более сложной аппаратуры по сравнению с методом ННК-т.

В нефтепромысловой геофизике метод ННК с другими методами достаточно широко применяется для литологического расчленения пород и корреляции разрезов [22.36, 22.38, 22.52, 22.60, 22.69—22.74, 22.91].

Метод ННК-т привлекается при изучении нагнетательных скважин для выявления пластов, поглощающих жидкость [22.76]. С этой целью в закачиваемую воду добавляют соединения бора (буру и т. д.). В местах проникновения этой воды в пласт могут скапливаться соединения бора. Поэтому на диаграммах ННК-т эти места будут отбиваться пониженными значениями регистрируемой скорости счета.

Помимо этого, метод ННК в комплексе с НГК может применяться для решения и некоторых других технических задач [15.31, 22.11, 22.12, 22.37, 22.120 и др.].

4. **Выявление угольных пластов.** Угли в своем составе, как известно, наряду с углеродом, содержат и водород в концентрациях от 1% (антрацит) до 10—12% (сапропилит). Оба эти элемента являются эффективными замедлителями нейтронов. Это обстоятельство в принципе и позволяет применять методы ННК и НГК для выделения в разрезе скважин угольных пластов, залегающих среди пород малой влажности.

Опробованием ННК для выявления угольных пластов по разрезам скважин занимался О. Д. Беломар и др. [22.9]. Исследования проводились с аппаратурой РК-Л-60, на зондах размерами 3, 15, 30 и 45 см. В качестве нейтронного люминофора в приборе использовался сернистый цинк с примесью обогащенного бора-10.

В результате проведенных исследований установлено, что угольные пласты четко отбиваются минимумами на зондах 30 и 45 см и максимумами — на зондах 3 см. Характер кривых согласуется с результатами

определения влажности пород (см. рис. 22-4), которые на малых зондах отбиваются максимумами скорости счета, а на больших — минимумами.

Авторы [22.9] считают, что для выделения угольных пластов зонд размером 3 см наиболее приемлем. Для исследования скважин достаточен источник активностью $(3—5) \cdot 10^5$ нейтр/с.

Помимо этого, метод ННК в комплексе с другими методами каротажа в углеразведочной геофизике может применяться для расчленения пород и корреляции разрезов.

Глава 23.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поглощающие элементы можно разделить на две группы: элементы с высокими сечениями захвата медленных и особенно тепловых нейтронов (бор, литий и др.) и элементы с высокими резонансными сечениями (серебро, индий, родий и др.). Для анализа элементов первой группы применяются методики ННМ на тепловых (ННМ-т), надтепловых (ННМ-н) и резонансных (ННМ-р) нейтронах, а для анализа элементов второй группы — методика ННМ-р. Методики ННМ-т и ННМ-н широко используются при изучении коренных пород (особенно в скважинах), в отличие от методики ННМ-р, которая для этих целей только начинает применяться.

§ 1. Методика определения бора в пробах по регистрации тепловых и надтепловых нейтронов

Природный бор состоит из смеси двух стабильных изотопов с массовыми числами 10 (18,7%) и 11 (81,3%). Среднее содержание бора в горных породах равно $3 \cdot 10^{-4}$%. В природе известно большое число борных минералов. Главнейшие из них приведены в табл. 23-1. Кернит и бура имеют первостепенное значение. На их долю приходится около 95% мировой добычи бора. Главнейшими типами месторождений бора являются гипогенные, вулканогенно-осадочные и галогенно-осадочные. Содержание бора в минеральном сырье может достигать 10%, а изредка и 20% (см. приложение 4).

Макроскопическое массовое сечение поглощения бором нейтронов в зависимости от энергии E меняется по закону

$$\Sigma = 6{,}65/\sqrt{E}. \qquad (23\text{-}1)$$

Зависимость эффективного сечения бора от энергии показана на рис. 5-3 (т. I). Для естественной смеси изотопов сечение захвата бором тепловых нейтронов равно 42 см^2/г (756 барн), а для бора-10 — 238,2 см^2/г (3813 барн).

Таблица 23-1

Важнейшие минералы борного сырья

Минерал	Химическая формула	Плотность, г/см³	Содержание бора в минерале, %
Кернит	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	1,90—1,91	11,6
Бура	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	1,69—1,72	9,35
Улексит	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$	2,4	13,37
Колеманит	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	2,42	15,80
Пандермит	$Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7H_2O$	2,43	20,15
Ашарит	$Mg_2B_2O_5 \cdot H_2O$	2,68	12,83
Гидроборацит	$CaMgB_6O_{11} \cdot 6H_2O$	2,0	15,72
Борацит	$Mg_3B_7O_{13}Cl$	2,9	19,33
Людвигит	$(Mg, Fe)_2FeBO_5$	4,0	4,78
Котоит	$Mg_3(BO_3)_2$	3,06—3,11	11,36
Сассолин	H_3BO_3	1,48	20,90
Датолит	$HCaBSiO_4$	2,9—3,0	7,27

1. **Анализ порошковых проб.** Методика анализа бора в порошковых пробах горных пород впервые разработана в ГеоХИ АН СССР В. К. Христиановым и др. [21.1]. Ими же для анализа бора была создана первая нейтронная установка типа НИХ-2 с ионизационной камерой (см. приложение 3). Первая сцинтилляционная установка (на основе специального радиометра) для анализа бора РАП-2 (см. приложение 3) сконструирована А. Л. Якубовичем и др. [6.67]. Аналогичная установка СНУ на основе широко распространенного портативного радиометра СРП-2 создана в ИГиГ СО АН СССР [4.19, 3.20, 18.7, 23.8, 23.14] (см. рис. 22-1). Применение радиометра СРП-2 для этих целей рассматривается в работе [23.40]. Создана также установка «Маяк-Н» со счетчиком СНМ-16 (см. приложение 4 т. I) [4.19].

Методика анализа бора в пробах на всех этих установках практически одинакова. Перед замерами каждая нейтронная установка вначале градуируется на пробах изучаемого месторождения с известным содержанием в нем определяемого элемента. Одна из таких кривых для установки СНУ показана на рис. 23-1.

В зависимости от детектора и геометрических параметров нейтронных установок в них используются источники нейтронов с различным выходом — от $2 \cdot 10^4$ (РАП-2М) до $2 \cdot 10^6$ нейтр/с (НИХ-2М). Порог чувствительности нейтронных установок к бору оценивается примерно в 0,02% для проб весом 50—100 г. В связи с выполаживанием градуировочных кривых для высоких концентраций бора в породах (см. рис. 23-1) возможности установок ограничиваются не только низкими, но и высокими концентрациями (примерно 6% [4.19] и 10% бора [25.45.]). Абсолютные погрешности определения бора в пробах пород для рассмотренного диапазона оцениваются соответственно равными от 0,001 до 1%. Время замера одной пробы составляет от 3 до 20 мин. Определение бора в пробах пород рассматривается также в работах [16.60, 23.58, 23.60, 25.45].

Применение ННМ-т для анализа порошковых проб позволяет повысить производительность анализа примерно в 10—20 раз по сравнению с химанализом [23.36].

Особенности определения высоких концентраций бора в пробах рассмотрим в п. 3 этого параграфа.

ННМ в практике анализа применяется также для определения содержания бора в растворах [16.62, 23.37, 23.38, 23.43, 6.59] и других объектах [23.16, 23.39].

2. **Анализ кернов и штуфов.** Эта методика анализа разработана Г. В. Остроумовым [23.44, 23.45]. На основе радиометра РАП-2М им сконструирована специальная нейтронная установка (рис. 23-2). Образец керна или штуфа помещается в цилиндрический канал. Если образец весом 500 г взять за эталонный, уменьшение веса образца до 100 г или увеличение до 700 г приводит к абсолютным ошибкам в определении бора в пределах ±0,07%. С целью уменьшения влияния неравномерностей распределения бора образец предлагается измерять в нескольких положениях и определять среднюю скорость счета, а по ней и среднюю концентрацию бора в пробе.

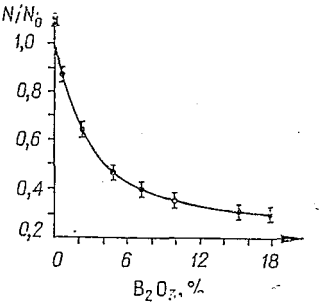


Рис. 23-1. Градуировочная кривая для определения бора в пробах на установке СНУ.

При анализе кернов установлено, что на показания прибора оказывают влияние участки керна длиной 15—20 см. Изменение диаметра керна от 6 до 10 см приводит к погрешностям в определениях бора от 0,07 до 0,1%. При работе с источником активностью (6—8) · $\cdot 10^4$ нейтр/с длительность одного замера составляет 30 с.

Рассмотренная методика может найти применение для определения не только бора, но и других поглощающих элементов в штуфах и кернах. Производительность работ ННМ-т при анализе штуфов и кернов намного выше производительности анализа порошковых проб (отпадает необходимость в их дроблении и т. д.).

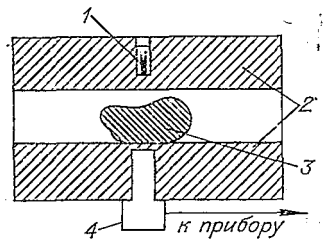


Рис. 23-2. Схематическое изображение установки, используемой для анализа штуфов и кернов.

1 — источник нейтронов, *2* — парафин, *3* — образец, *4* — детектор.

3. **Особенности методики определения высоких концентраций бора в порошковых пробах.** Выражение для нейтронов, задержанных пробой с высоким содержанием поглощающих элементов в случае коллимированного пучка, может быть представлено соотношением [23.10]

$$n = n_0 (1 - e^{-x/\lambda_a}), \qquad (23\text{-}2)$$

где n_0 — поток нейтронов, падающий на пробу; n — поток нейтронов, задержанных пробой; λ_a — длина свободного пробега нейтронов в пробе по отношению к поглощению нейтронов.

Раскрывая величину λ_a, соотношение (23-2) можно преобразовать:

$$n = n_0 \{1 - \exp [- x (\Sigma_0 + p (\Sigma_a - \Sigma_0))]\}, \qquad (23\text{-}3)$$

где p — концентрация бора в пробе; $\Sigma_a (E)$ — макроскопическое сечение захвата нейтронов бором в пробе; Σ_a — макроскопическое сечение вмещающей среды.

При содержании в пробах высоких концентраций бора ($\Sigma_0 \ll \Sigma_a$) соотношение (23-3) перепишется так:

$$n = n_0 (1 - e^{-xp\Sigma_a}). \qquad (23\text{-}3а)$$

Из этого выражения видно, что выполаживание градуировочных кривых может быть устранено за счет изменения трех факторов: толщины пробы x концентрации p и сечения Σ_a. В связи с этим для определения высоких концентраций бора в пробах и существуют три разных метода.

Методика тонкослойных проб (малых навесок) опробовалась на практике и описана в работах [6.67, 21.1, 23.41, 25.45, 28.79]. Для каждого анализируемого диапазона высоких концентраций бора в про-

бах необходимо экспериментальным или расчетным путем выбирать соответствующую толщину их. Результаты расчета по формуле (23-3) показаны на рис. 23-3 [4.19]. Плотность пробы всех расчетных кривых условно принята постоянной (1,5 г/см³). Для всего рассматриваемого диапазона концентраций бора в породах при толщинах меньше 0,5 см градуировочные кривые становятся практически линейными.

Метод тонкослойных проб на практике не получил широкого распространения в связи с трудностью выдерживания постоянных толщин для всех измеряемых проб.

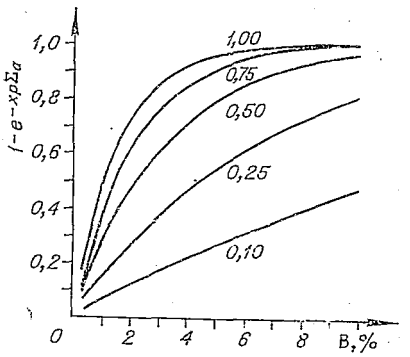


Рис. 23-3. Зависимость изменения потока нейтронов в относительных единицах от содержания в пробах бора. Шифр кривых — толщина проб, см.

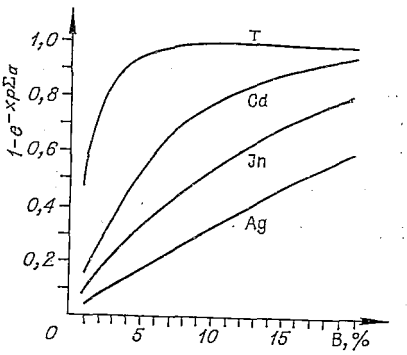


Рис. 23-4. Зависимость изменения потока нейтронов в относительных единицах от содержания в пробах бора при регистрации различных групп нейтронов: тепловых (т), надкадмиевых (Cd), индиевых (In) и серебряных (Ag).

Значительно более широкое применение для определения высоких содержаний бора в пробах получил на практике метод разбавления (разубоживания) [4.19, 21.1 и др.]. Проба с высоким содержанием бора смешивается с веществом, имеющим низкое сечение поглощения тепловых нейтронов. В геологической практике для этих целей чаще всего используется кварцевый песок.

Высокие концентрации бора по этой методике можно определять с относительной точностью 2% [21.1] Однако метод разубоживания проб имеет и свои недостатки. Исходная проба приходит в негодность и не может быть использована в других видах анализа. Кроме того, он неоперативен — требуется дополнительное время на приготовление проб и для пересчетов получаемых результатов.

Для определения высоких концентраций бора в пробах в работе [23.14] предложена новая разновидность этого способа, сводящаяся к использованию вкладыша. Материал его рекомендуется изготовлять из вещества, близкого по составу к породообразующей среде. В работе [23,14] для этих целей использовался пирофиллит ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$). Вкладыш из этого материала изготовляется в виде фигурной цилиндрической кассеты (см. рис. 22-1). Проба размещается в малой фигурной кассете и вставляется внутрь вкладыша и вместе с ним надевается на детектор. Относительная погрешность измерений по этой методике оценена в 3% [23.14].

Из рис. 5-3 (т. I) видно, что с возрастанием энергии нейтронов от тепловых и выше сечение захвата нейтронов бором резко уменьшается. Поэтому определение высоких концентраций бора в пробах можно вести также регистрацией более высоких энергетических групп нейтронов по сравнению с тепловыми. Так, для этих целей часто используется методика ННМ-н. На пути потока нейтронов между пробой и детектором устанавливается кадмиевый фильтр. Прибор становится чувствительным к нейтронам с энергией около 0,4 эВ. Эффективное

сечение бора для этих нейтронов снижается в 4 раза и становится равным 190 барн.

Если в качестве детекторов надкадмиевых нейтронов использовать не бор или литийсодержащие детекторы, а резонансные фольги, например, из индия ($E_р$=1,45 эВ) и серебра ($E_р$=5,23 эВ), то сечение захвата бором нейтронов можно уменьшить соответственно до 102 и 54 барн.

О характере градуировочных кривых, полученных по формуле (23-4), можно судить по данным рис. 23-4 [4.19]. Все кривые рассчитаны для постоянных толщины (1 см) и плотности пробы (1,5 г/см^3). Увеличение энергии регистрируемых нейтронов ведет к получению линейных градуировочных кривых для всего рассматриваемого диапазона концентраций бора в пробах. Методика и устройство прибора для определения высоких концентраций бора по этому способу более подробно рассматриваются в § 3 этой главы.

4. **Особенности методики определения бора в пробах в присутствии мешающих элементов.** Определению бора в пробах, с одной стороны, мешают переменные концентрации в них влаги, а с другой,— переменные концентрации элементов с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов [1.27, 4.19, 6.67, 23.23].

В случае, когда исследователей интересует раздельное определение в пробах бора и влаги, это может быть осуществлено двумя независимыми методами. Бор можно определять по ННМ-т, ННМ-н или ННМ-р, а влажность — по НПМ (см. § 1 гл. 21) или ННМ-б (см. § 1 гл. 22).

Если исследователей интересует только содержание в пробах бора, определение его в них можно вести по комплексной методике ННМ-т и ННМ-н с исключением влияния водорода на результаты анализа бора. Суть этой методики сводится к измерению отношения M скоростей счета тепловых ($N_т$) и надтепловых ($N_н$) нейтронов [23.54]. При выборе соответствующих геометрических параметров нейтронных установок можно добиться того, чтобы величина M зависела только от содержания в пробах бора, т. е. $M=f(P_в)$. В дальнейшем это было подтверждено на основе расчетных и экспериментальных данных, приведенных в работах [4.19, 10.23].

А. Л. Якубовичем и Е. И. Зайцевым [6.67, 16.60, 23.41] для определения бора в присутствии влаги предложена методика, основанная на двойных измерениях либо с воздушной прослойкой между детекторами и пробой и без нее, либо с плоскими и кольцевыми кассетами. В сб. [25.45] для этих целей рекомендуется пользоваться тонкослойными пробами.

При анализе проб бора из скарновых месторождений его определению могут мешать переменные концентрации железа, имеющего сечение поглощения тепловых нейтронов 2,43 барн (0,027 см^2/г) и сечение рассеяния 11,8 барн (0,119 см^2/г). Заметим, что концентрация железа в количестве 15,65% по поглощающим свойствам эквивалентна 0,01% бора. В реальных пробах содержание железа может достигать 30—40%, что приводит к абсолютным погрешностям определения бора, равным 0,02—0,03%. Если бор в пробах определять с менее высокой точностью, изменение содержания железа в них можно не учитывать. При более точных измерениях исследования следует вести с использованием плоских и кольцевых кассет [23.44]. Обработку результатов при этом производят по методике разности $\Delta M=M_0-M$. Здесь $M_0=N^0_п:N^0_к$, а $M=N^i_п:N^i_к$, где $N^0_п$ и $N^i_к$ — замеры с плоскими пробами соответственно при нулевой и i-й концентрациях; $N^0_к$ и $N^i_к$ — то же при измерении с кольцевыми пробами. Увеличение содержания железа в пробах ведет к увеличению величины ΔM, и наоборот.

При анализе проб бора из соленосных осадочных месторождений его определению мешают переменные концентрации хлора, имеющего эффективное сечение захвата тепловых нейтронов 31,6 барн (0,554 см^2/г), сечение рассеяния 15 барн (0,272 см^2/г). Концентрация хлора в пробе в количестве 0,76% по поглощающим свойствам эквивалентна 0,01% бора. Содержание хлора в соленосных толщах может достигать нескольких десятков процентов, что приводит к существенным погрешностям результатов определения бора в пробах.

Для учета влияния хлора в пробе ее вначале анализируют по обычной методике. Затем отбирается навеска весом 10 г, которая помещается в воду. Считается, что весь хлор переходит в раствор, а борные минералы выпадают в осадок. Далее раствор отбирается пипеткой и в нем на той же установке определяется содержание хлора по результатам предварительной градуировки прибора. После измерений полученный результат пересчитывается к сухой пробе [23.41].

§ 2. Определение других поглощающих элементов в пробах

Помимо бора с помощью ННМ-т можно определять содержание в пробах целого ряда других элементов (табл. 23-2). За минимально определяемую концентрацию бора в навесках 50—100 г обычно прини-

Таблица 23-2

Возможности ННМ-т при определении в пробах элементов с высокими сечениями поглощения тепловых нейтронов

Химический элемент	Массовое макроскопическое сечение тепловых нейтронов, см^2/г	Расчетные концентрации, эквивалентные 0,02 % бора, %	Минимально определяемые концентрации элементов, %	Навеска проб, кг	Литература
Бор	42,10	0,02	0,003	2—3	
Литий	6,17	0,136	0,01—0,015	—	[25.54, 28.79]
Хлор	0,554	1,52	—	—	—
Марганец	0,132	6,4	—	—	[23. 36]
Железо	0,027	31,3	~2,0	—	[23.42]
Кадмий	17,721	0,475	0,01—0,05	7	[20.50, 20.54, 20.56]
Ртуть	1,080	0,783	0,5	—	[23.32, 23.37, 23.47 23.48, 23.1]
Индий	0,988	0,855	—	—	
Гадолиний	147,200	0,0057	0,000п	—	[6.67, 23.1, 23.46]
Самарий	33,00	0,0258	—	—	
Европий	17,480	0,0486	—	—	
Диспрозий	4,070	0,21	—	—	

мают величину 0,02% (порог чувствительности), из которой исходят при расчетах. Заметим, что для проб весом 2—3 кг порог чувствительности может быть повышен до 0,003% бора. В соответствии с этим примерно в 6 раз может быть повышен порог чувствительности и на другие приведенные в таблице элементы. Редкоземельные элементы в пробах по ННМ-т можно определять лишь по их совокупности.

Производительность анализа ННМ-т на указанные элементы возрастает в несколько десятков раз по сравнению с производительностью химического метода анализа.

Более подробно вопросы методики определения в пробах рассматриваемых элементов по ННМ-т рассматриваются в работе [4.19].

§ 3. Нейтронно-резонансный анализ проб

Нейтронно-резонансный, или, точнее, нейтрон-нейтронный метод, основанный на регистрации резонансных нейтронов (ННМ-р), предложен в 1965 г. сотрудниками ИГиГ СО АН СССР Б. С. Вахтиным,

В. Я. Жаворонковым и Е. М. Филипповым [14.4]. В дальнейшем этот метод развивался как в ИГиГ СО АН СССР [4.19, 10.23, 16.62, 23.8—23.12, 28.122], так и во ВНИИ радиационной техники (ВНИИРТ) [23.17—23.19]

Сущность ННМ-р сводится к облучению пробы потоком резонансных нейтронов, выделяемых с помощью фольги из определяемого элемента, и регистрации этого потока с помощью резонансного детектора (индикатора). Методика выделения потока резонансных нейтронов рассматривается в § 6 гл. 1, а методика их регистрации — в § 8 гл. 5. Помимо этого, измерение спектра резонансных нейтронов описывается в работах [23.20, 23.22 и др.].

В самом благоприятном случае при определении в пробе какого-либо элемента с высоким резонансным сечением в качестве резонансного фильтра и детектора нейтронов необходимо использовать материалы из определяемого элемента. Если образующийся изотоп активационного детектора имеет сравнительно большой период полураспада, в качестве детектора можно взять материалы из других химических элементов, образующих короткоживущие изотопы. Резонансы этого элемента обязательно должны перекрываться резонансом определяемого элемента.

На практике в качестве резонансных детекторов весьма удобно пользоваться фольгами из серебра, родия, индия и иридия, обладающих, с одной стороны, высокими сечениями захвата резонансных нейтронов, а с другой,— малыми периодами полураспада образующихся изотопов. Фольги из этих материалов могут применяться для определения целого ряда других элементов с высокими резонансными сечениями захвата нейтронов (табл. 23-3) [23.11], образующих изотопы с неблагоприятными временными параметрами.

Некоторые другие данные о резонансных элементах приведены в табл. 5-8 (т. I). Более подробный перечень этих элементов с их параметрами применительно к ННМ-р приводится в работе [4.19].

1. **Устройство установок.** Схематическое устройство одной из простейших нейтронно-резонансных установок (НРУ) ИГиГ СО АН СССР приведено на рис. 23-5 [4.19]. Установка представляет собой бак, заполненный парафином, диаметром 45 см и высотой 30 см. В верхней центральной части блока располагается полость для установки кассеты с пробой и резонансным детектором. Кассеты прямоугольной формы 120×150 мм и высотой 10 и 20 мм. Вес пробы около 200 и 400 г соответственно. Источником нейтронов служат две ампулы плутоний-бериллиевого препарата с суммарным выходом $8{,}6 \cdot 10^6$ нейтр/с. Между источником и пробой располагается слой замедлителя толщиной 3 см.

Подача кассеты с пробой, фильтром и детекторами в полость для облучения осуществляется вручную с помощью специального стержня. Для удобства установки кассет в блоке имеется специальный жолоб и направляющая рейка, крепящаяся к блоку с помощью кронштейна

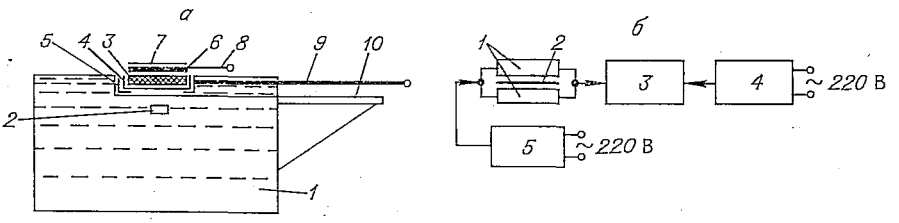


Рис. 23-5. Схематическое изображение установки НРУ.

а — собственно установка: *1* — парафин, *2* — нейтронный источник, *3* — кассета с пробой, *4* — фильтр, *5* — рамка для размещения кассеты и фильтра, *6* — фольга-детектор, *7* — защитный экран, *8* — рукоятка детектора, *9* — установочный стержень, *10* — направляющие; *б* — блок-схема регистрирующего устройства: *1* — кассеты со счетчиками, *2* — измеряемая фольга-детектор, *3* — пересчетная установка, *4* — стабилизатор, *5* — высоковольтный стабилизатор.

Таблица 23-3

Величины резонансных сечений перекрывания (в барнах) некоторых резонансных детекторов с другими нейтронно-резонансными изотопами, образующими при захвате нейтронов изотопы с неблагоприятными временными параметрами

Определяемый элемент (изотоп) (распространенность, %)	(Сечение резонанса, барн); энергия резонанса, эВ	Возникающий изотоп	Период полураспада изотопа	Элементы-детекторы						
				серебро		родий	индий		иридий	
				E_p =5,23 эВ T=24,2 с	E_p =16,6 эВ T=2,42 мин	E_p =1,26 эВ T=44 с	E_p =1,45 эВ T=13,4 с	E_p =3,9 эВ T=13,4 с	E_p =0,65 эВ T=1,45 мин	E_p =5,3 эВ T=1,45 мин
In-115 (95, 67)	(28 500) 1,45	In-116^{m_1}	54 мин	—	—	3000	27000	820	—	—
		In-116^{m_2}	2,17 с							
		In-116	13,4 с							
Pm-147	(25 000) 5,4	Pm-148	5,3 дн.	10 000	—	—	—	—	—	—
	(400) 15,4				180	—	—	—	—	—
Sm-149 (13,84)	(2200) 0,87	Sm-150	Стаб.	—	—	—	—	—	400	—
Eu-151 (47,77)	(11 000) 0,46	Eu-152	13 лет	—	—	—	—	—		—
		Eu-152^m	9,2 ч						1300	
Dy-163 (24,97)	(1000) 1,75	Dy-164	Стаб.	—	—	350	—	—	—	—
Dy-162 (25,63)	(7400) 5,35	Dy-163	»	4500	—	—	—	—	—	3000
Dy-163	(1400) 16,0	Dy-164	»	—	600	—	—	—	—	—
Ho-165 (100)	(5100) 3,9	Ho-166	27,3 ч	—	—	—	—	820	—	—
		Ho-166	>30 лет							
Er-167 (22,9)	(1850) 0,58	Er-168	Стаб.	—	—	—	—	—	1750	—
	(700) 5,95	Er-168	»	400	—	—	—	—	—	175
	(160) 15,5	Er-168	»	—	140	—	—	—	—	—
Tu-169 (100)	(16 500) 3,9	Tu-170	129 дн.	—	—	—	—	820	—	—
Lu-175 (97,4)	(850) 2,6	Lu-176m	3,7 ч	1750	—	—	—	—		
	(1750) 5,1	Lu-176	Стаб.	—	—	—	—	—		
Ta-181 (100)	(13 000) 4,28	Ta-182	115 дн.	300	—	—	—	—	—	—
		Ta-182^m	16,5 мин		—	—	—	—	—	—
Au-197 (100)	(30 600) 4,94	Au-198	2,7 дн.	6000	—	—	—	—	—	—

Резонансный детектор для удобства его извлечения располагался в специальной обойме с рукояткой. Для защиты детектора от рассеянных нейтронов сверху над ним располагается поглощающий экран, состоящий из кадмиевого и резонансного фильтров.

Резонансный детектор имел площадь 120×150 мм. Наведенная активность его измерялась при помощи кассеты бета-счетчиков типа СТС-6,

установленных в два ряда по 7 шт. в каждом. Резонансный детектор устанавливался в паз между счетчиками. Ширина паза равнялась 10 мм. Кассета со счетчиком располагалась в свинцовом домике, выложенном из свинцовых кирпичей типа БС-50. Питание счетчиков осуществлялось от высоковольтного стабилизированного выпрямителя ВСВ-1 напряжением 400 В. Для измерения скорости счета использовалась пересчетная схема ПС-10 000 («Флокс»), питавшаяся от сети через стабилизатор напряжения СНЭ-0,75-220 [4.19].

Другие аналогичные установки ИГиГ СО АН СССР описаны в работах [4.19, 9.50, 23.9, 23.12].

В ИГиГ СО АН СССР разработана установка (НРУР) (рис. 23-6). Замедлительно-защитный блок представляет собой металлический бак диаметром и высотой 80 см, заполняемый водой или парафином. В центре его расположена полость для размещения пробы и активационного детектора. Источники нейтронов с выходом около $1 \cdot 10^7$ нейтр/с (в виде двух ампул) размещаются в замедлителе. Толщина замедлителя между пробой и источником выбрана равной 1 см. Анализируемая проба помещается в цилиндрические кассеты, крепящиеся к электромагниту буртиками. Резонансный детектор в виде цилиндрической фольги крепится к железной обойме и удерживается в центре кассеты с помощью электромагнита. После окончания замера счетчик вместе с резонансным детектором подается в нижнее положение и наклоняется на определенный угол. Фольга резонансного детектора со счетчика снимается специальными захватами, после чего тот вновь устанавливается в домик. Кассета с пробой из области облучения извлекается вместе с электромагнитом системой тросиков и валиков. Замена кассеты и установка резонансного детектора осуществляются вручную за время не более 40 с. Кассета и детектор устанавливаются под облучение той же системой из тросиков и валиков. Для защиты счетчика от гамма-излучения нейтронного источника под ним помещается слой свинца. Канал (10) выложен из кадмия толщиной ~ 1 мм для поглощения тепловых нейтронов. Чтобы защитить пробу и детектор от нейтронов, приходящих снизу, на их пути устанавливается специальный резонансный поглотитель. Над счетчиком находится эбонитовый конус, направляющий фольгу-детектор на счетчик и центрирующий ее.

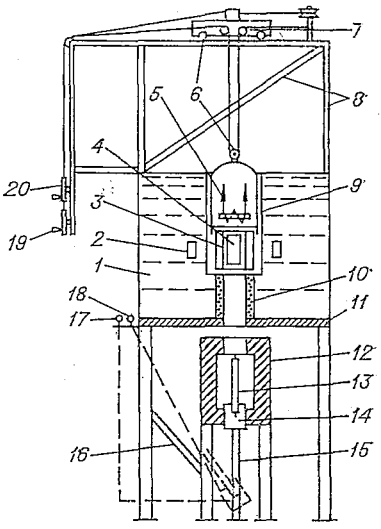


Рис. 23-6. Схема нейтронно-резонансной установки [23.62].
1 — блок-замедлитель, *2* — источник нейтронов, *3* — кассета с пробой, *4* — детектор резонансных нейтронов, *5* — электромагнит, *6* — ролики, *7* — тележка, *8* — арматура, *9* — кадмий, *10* — индиево-серебряная защита, *11* — свинец, *12* — защитный домик, *13* — счетчик, *14* — втулка, *15* — направляющая, *16* — желоб, *17* — ручка вертикального перемещения втулки со счетчиком, *18* — ручка поворота втулки, *19* — рукоятка вертикального перемещения электромагнита, *20* — то же, горизонтального.

Помимо рассмотренной, в работе [23.64] описывается аналогичная установка с одним источником, располагающимся внутри резонансного детектора нейтронов.

Установка «Резонанс-1», созданная во ВНИИРТе, показана на рис. 23-7 и 23-8 [23.17, 23.19]. Выполнена она в виде двух защитно-замедлительных блоков. Снаружи эти блоки установки облицованы органическим стеклом. В целом замедлительно-защитный блок имеет вид прямоугольного параллелепипеда размерами $616 \times 616 \times 750$ мм. В блоках имеются вертикальные и горизонтальные каналы. Вертикальные предназначены для установки нейтронных источников с выходом не

более $5 \cdot 10^6$ нейтр/с. Чтобы прямое гамма-излучение нейтронных источников не действовало на торцовые бета-счетчики, источники размещаются в специальных свинцовых экранах. Кассета выполнена в виде двух отдельных стальных камер. Установка ее и резонансных фильтров в рабочее положение производится вручную. В установке предусматривается одновременное использование двух резонансных детекторов, один из которых размещается в месте облучения, а другой — в месте измерения. Резонансные детекторы крепятся на специальной рейке, перемещающейся в канале с помощью валиков, приводимых во вращательное движение от реверсивного двигателя. Наведенная активность резонансных детекторов измеряется блоками торцовых счетчиков типа СБТ-13, укрепленными снаружи установки. Каждая пара счетчиков рассчитана на измерение наведенной активности одного резонансного детектора, предназначенного для них.

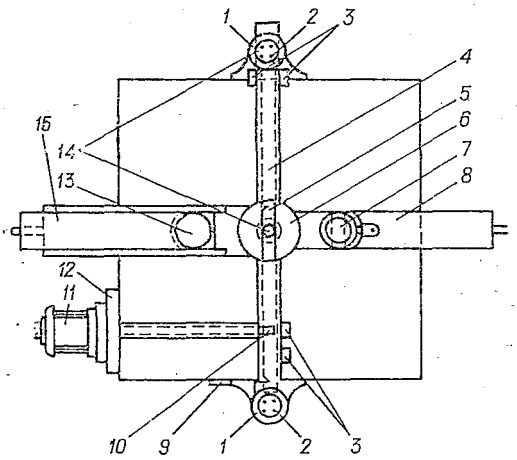


Рис. 23-7. Горизонтальный разрез установки «Резонанс-1».

1 — крепление счетчиков, *2* — торцовые счетчики бета-излучения, *3* — концевые выключатели, *4* — направляющий канал для рейки, *5* — рейка, *6* — свинцовый экран, *7* — кассета, *8* — кассетодержатель, *9* — стопор рейки, *10* — валики, передвигающие рейку, *11* — реверсивный двигатель, *12* — крепление двигателя, *13* — резонансный фильтр, *14* — резонансный детектор, *15* — направляющая фильтров.

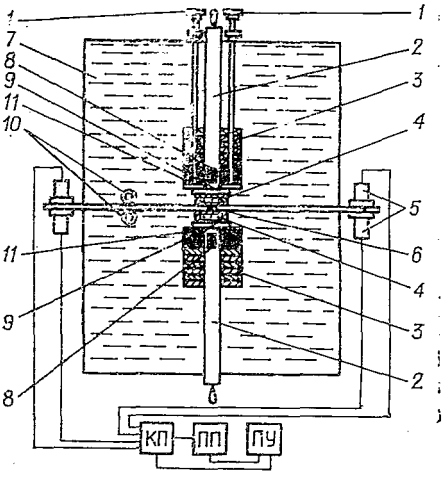


Рис. 23-8. Вертикальный разрез установки «Резонанс-1».

1 — регулировочные штанги, *2* — держатель источника, *3* — кольца из оргстекла, *4* — кассета с образцом, *5* — торцовые счетчики бета-излучения, *6* — резонансный детектор, *7* — парафин, *8* — изотопный источник нейтронов, *9* — резонансный фильтр, *10* — валики, передвигающие рейку, *11* — свинцовый экран; КП — катодный повторитель, ПП — пересчетный прибор, ПУ — пульт управления.

Оптимальный режим облучения выбирается путем размещения плексигласовых колец и источников на определенном расстоянии от пробы и путем размещения слоя замедлителя между пробой и источником.

Резонансный детектор для облучения и измерения устанавливается специальной электромеханической системой, включающей два моторных реле времени, шаговый искатель, несколько реле переменного тока и концевые выключатели. С помощью этой системы детектор для облучения и измерения можно устанавливать на 1—120 с с интервалом 0,5 с и перемещать в течение примерно 0,6 с из одного положения в другое. Включение и выключение счетчиков осуществляется также при помощи этой системы. Кроме того, система ведет отсчет циклов (от 1 до 17) облучения и измерения детекторов.

Общее число регистрируемых импульсов в течение m циклов облучения, начиная с нулевой активности детектора, определяется из соотношения [23.18, 23.19]

$$N_m = \frac{\varepsilon}{\lambda} A_\infty \frac{(1-e^{-\lambda t})^2 e^{-\lambda t_1}}{1-e^{-2\lambda(t+t_1)}} \left\{ m - (1-e^{-2m\lambda t}) \frac{e^{-2\lambda t}}{1-e^{-2\lambda t}} \right\}, \quad (23\text{-}4)$$

где λ — постоянная распада, образующегося радиоактивного изотопа; ε — полная эффективность регистрации наведенной активности; A_∞ — активность насыщения при непрерывном облучении; t — время облучения, равное времени измерения; t_1 — время транспортировки детектора.

При достаточно большом числе циклов измерения наступает динамическое насыщение, в процессе которого число зарегистрированных импульсов не зависит от номера цикла. Выражение (23-4) при этом трансформируется в следующее:

$$N_m = \frac{\varepsilon}{\lambda} A_\infty \frac{(1 - e^{-\lambda t})^2 e^{-\lambda t_1}}{1 - e^{-2\lambda(t+t_1)}} m. \qquad (23\text{-}5)$$

При измерении наведенной активности серебра-110 (T=24,2 с) зависимость функций (23-4) и (23-5) от времени измерения имеет вид, показанный на рис. 23-9 [23.18, 23.19]. Оптимальное время облучения (измерения) выбирается по максимуму кривых этого рисунка.

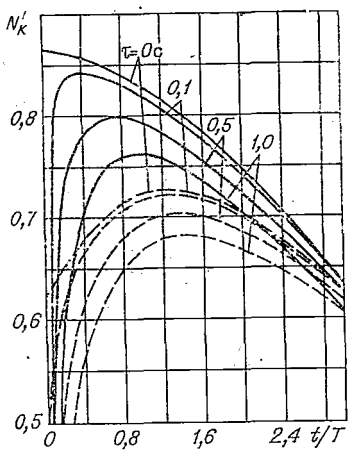


Рис. 23-9. Зависимость числа импульсов в относительных единицах ($\varepsilon\lambda^{-1}A_\infty$) от времени облучения в единицах периода полураспада (пунктирные кривые соответствуют измерениям, начатым с нулевого цикла, а сплошные — состоянию динамического насыщения).

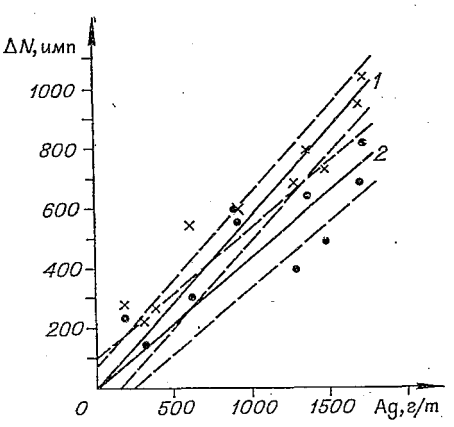


Рис. 23-10. Зависимость приращения скорости счета надкадмиевых (*1*) и резонансных (*2*) нейтронов от содержания в пробах серебра (пунктирные кривые соответствуют статразбросу).

Оптимальная величина толщины резонансного детектора может быть оценена из соотношения для эффективности регистрации нейтронов

$$\varepsilon = \frac{n}{n_0} = 1 - e^{-x\Sigma_p}, \qquad (23\text{-}6)$$

где n_0 и n — соответственно падающий и задержанный в детекторе поток нейтронов; x — толщина фольги детектора; Σ_p — макроскопическое сечение в области резонанса.

Величина x, соответствующая выходу кривой $\varepsilon = f(x)$ на асимптоту (при $\varepsilon \approx 1$), и является оптимальной. Так, в соответствии с расчетами [4.19] показано, что оптимальной толщиной для серебряного детектора есть величина порядка 0,05—0,1 мм. Такая толщина серебряной фольги достаточно прозрачна для бета-частиц наведенной активности серебра-110 (см. табл. 5-8, т. I). Величина пробега бета-частиц в серебре более чем на порядок выше полученных значений (0,05—0,1 мм).

О быстроте увеличения активности того или иного резонансного детектора можно судить по величине так называемого фактора резонансной экспрессности [23.18]:

$$F_{\text{р.э}} = \frac{A_0 q J_R}{AT}, \qquad (23\text{-}7)$$

где A_0 — число Авогадро; q — распространенность изотопа; A — атомный вес; T — период полураспада образующегося изотопа; J_R — резонансный интеграл (см. табл. 5-8).

Расчеты этого фактора для некоторых изотопов приведены в работе [23.18].

Рассмотренные установки могут использоваться в первую очередь для определения резонансно-поглощающих элементов: родия, серебра, индия, сурьмы, йода, цезия, самария, европия, гадолиния, диспрозия, гольмия, эрбия, тулия, иттербия, лютеция, гафния, тантала, вольфрама, рения, иридия, золота и урана. Из резонансно-рассеивающих элементов могут определяться кобальт, мышьяк, бром и молибден. Однако применительно к каждой группе этих элементов необходимо разрабатывать специальную методику ННМ-р. К настоящему времени такая методика существует для определения небольшого числа элементов с высокими резонансными сечениями, а также высоких концентраций бора.

2. **Определение серебра.** Природное серебро состоит из двух стабильных изотопов с массовыми числами 107 (51,35%) и 109 (48,65%). Среднее содержание серебра в земной коре по весу равно $1 \cdot 10^{-5}$%. Важнейшие промышленные минералы серебра приведены в табл. 23-4.

Таблица 23-4

Важнейшие рудные минералы серебра

Минерал	Химическая формула	Плотность, г/см³	Содержание серебра, %	Другие компоненты и примеси, %
Аргентит	Ag_2S	7,2—7,4	87,1	
Самородное серебро	Ag	10,1—11,1	100	Au, Cu, Bi, Sb, Hg
Пираргирит	Ag_3SbS_3	5,77—5,86	58,97	Sb — 22,21
Прустит	Ag_3AsS_3	5,6	65,4	As — 15,2

Самородное серебро в природе встречается редко и обычно содержит примеси других элементов: золота до 0,5—1%, висмута до 5%, сурьмы до 11% и ртути до 5%.

Серебро добывается главным образом из двух типов руд. К первому относятся свинцово-цинковые, медно-цинковые и медные. Содержание серебра в этом типе руд меняется от тысячных до сотых долей процента. Ко второму типу относятся так называемые «благородные» серебряные руды. В экономическом отношении этот тип руд имеет гораздо меньшее значение по сравнению с первым. Второй тип представлен главным образом сульфидами и сульфид-антимонитами серебра и иногда теллуристыми и селенистыми соединениями серебра. Иногда в этих рудах присутствует также кобальт, никель и мышьяк. Содержание серебра в этом типе руд в ряде случаев достигает 5%.

Из изложенного видно, что содержание серебра в рудах может меняться в пределах $\sim$0,001—5%. Захват медленных нейтронов ядрами изотопов серебра приводит к реакциям Ag^{107} (n, γ) Ag^{108} и Ag^{109} (n, γ) Ag^{110}. Серебро-110 имеет период полураспада 24,2 с и испускает бета-частицы с энергией 2,82 (40%) и 2,24 (60%) МэВ, а также гамма-кванты с энергией 0,656 МэВ (60%). Серебро-108 имеет период полураспада 2,42 мин и испускает бета-частицы с энергией 1,65 (93,8%) и

1,03(1,9%) МэВ, а также слабо интенсивное гамма-излучение и позитронное излучение.

Сечение захвата тепловых нейтронов серебром равно 62 барн, а массовое макроскопическое сечение — 0,372 см^2/г.

Изотоп серебра с атомным номером 109 в области нейтронов с энергией 5,23 эВ имеет большой резонанс с сечением 12 500 барн (70,25 см^2/г) (см. рис. 5-2, т. I). Изотоп серебра с атомным номером 107 в области нейтронов с энергией 16,6 эВ имеет также высокое резонансное сечение — 640 барн (3,595 см^2/г).

Определение серебра в пробах ННМ-р в принципе можно вести, используя тот или иной резонанс и измеряя наведенную активность фольги-детектора либо по серебру-110, либо по серебру-108.

Однако практический интерес представляет методика, основанная на резонансе серебра-109. Это обусловлено тем, что сечение захвата резонансных нейтронов у серебра-109 гораздо выше, чем у серебра-107. Кроме того, период полураспада у серебра-110, образующегося из серебра-109, имеет более приемлемую величину при разработке экспресс-анализа по сравнению с серебром-108, образующимся из серебра-107.

Результаты определения серебра в пробах по ННМ-р рассматриваются в работах [4.19, 10.23, 14.4, 16.62, 23.8, 23.9, 23.11, 23.12, 23.18, 23.19]. Измерения ведутся как на искусственных, так и на естественных пробах.

С целью выяснения возможностей ННМ-р по определению серебра его результаты сравнивались с данными ННМ-т и НА [23.9]. Измерения по ННМ-т осуществлялись на установке НИХ-2М, измерения по НА (см. гл. 25) — облучением пробы потоком нейтронов полного спектра. Наведенная активность пробы при этом определялась на той же установке, на которой измерялась наведенная активность резонансного детектора. Выявлены явные преимущества ННМ-р по сравнению с ННМ-т и НА (см. также [23.28, 23.19].

С помощью детекторов из серебра измерялся как полный спектр нейтронов ($N_п$), так и спектр надкадмиевых ($N_н$) и резонансных ($N_р$) нейтронов. Поток тепловых нейтронов определялся при вычитании $N_т = N_п - N_н$. В абсолютных значениях скорости счета убывают в следующей последовательности: $N_п$, $N_т$, $N_н$ и $N_р$. Однако при нормировке кривых $N = f(p_{Ag})$ к отсчету для нулевой концентрации было установлено, что по мере увеличения доли резонансных нейтронов в регистрируемом спектре дифференциация кривых $N = f(p_{Ag})$ возрастает, т. е. наилучшей чувствительностью к концентрации определяемого элемента обладает ННМ-р по сравнению с другими нейтронными методами изопробованных.

Результаты измерений на установке НРУ серебра в пробах толщиной 1 см (1,11 г/см^2) и 2 см (2,22 г/см^2) приведены в работе [4.19]. вых и резонансных нейтронов наблюдалась линейная зависимость для Время облучения и измерения равнялось 2 мин. Поток нейтронов, прошедших через пробу, измерялся во всех случаях с помощью серебряной фольги. Для проб толщиной 1,11 г/см^2 при измерении надкадмиедиапазона концентраций серебра в пробах от 0 до 0,2%. Для проб толщиной 2,22 г/см^2 отмечается небольшой изгиб графиков при $p_{Ag} = 0{,}1\%$. Однако в связи с тем, что для более толстых проб при низких концентрациях кривые идут круче (дифференциация возрастает), чем для тонких, порог чувствительности при анализе толстых проб получается более низким. Это, в частности, видно из табл. 23-5. Точность и порог чувствительности ННМ-р, оцененные по обычной методике с использованием градуировочного графика и формулы (7-46), имеют более грубые значения, чем при расчетах по формулам (7-29) и (7-50). Порог чувствительности ННМ-р значительно повышается при более толстых пробах.

Таблица 23-5

Точность Δp и порог чувствительности p_0 ННМ-р при определении серебра в пробах

Толщина проб, г/см²	Измерения надкадмиевых нейтронов		Измерения резонансных нейтронов	
	Δp, %	p_0, %	Δp, %	p_0, %
Оценка по графику и формуле (7-46)				
1,11	0,015	0,030	0,020	0,040
2,22	0,007÷0,01	0,015	0,020	0,030
Расчет по формулам (7-29) и (7-50)				
1,11	0,0124	0,0243	0,0155	0,0152
2,22	0,0061	0,0126	0,0165	0,0143

Когда в пробе отсутствуют другие элементы с высокими резонансными сечениями, мешающие определению серебра, его определения лучше вести при использовании только одного кадмиевого фильтра. В противном случае измерения следует вести с выделением резонансных нейтронов.

Результаты измерений естественных проб на установке НРУ с различным содержанием серебра показаны на рис. 23-10 [23.11]. Исследуемые пробы имели вес 80 г. В остальном методика измерений была такой же, как и выше. Порог чувствительности при измерениях с кадмиевым фильтром оценен в 0,025%, а при выделении резонансных нейтронов — в 0,04%.

В пробах полиметаллических месторождений определению серебра могут мешать кадмий и индий, содержание которых в пробах достигает иногда соответственно 0,01—0,02 и 0,04%. С целью выяснения влияния этих элементов была проведена серия измерений [4.19]. В связи с тем, что во всех измерениях поток нейтронов пропускался через кадмиевый фильтр толщиной 0,75 мм, присутствие в пробе 0,04% кадмия не искажало результатов, поскольку эта величина была эквивалентна увеличению толщины фильтра на 0,002 мм.

Присутствие в пробах индия сказывалось на результатах измерений с кадмиевым фильтром и со сложным фильтром из кадмия и серебра, однако при выделении резонансных нейтронов в пределах точности измерений оно не сказывалось.

Аналогичные результаты получены на установке «Резонанс-1» [23.18] (табл. 23-6). Отношение $(d_0—d)/\sigma$ характеризует относительное отклонение результатов ННМ-р от данных химического анализа. Измерения с выделением резонансных нейтронов дают наилучшие результаты. Ошибка же измерений возрастает. Большие отрицательные отклонения в случае измерения суммарного потока нейтронов обусловливаются различными замедляющими свойствами измеряемых проб и эталонов [23.18]. Большие положительные отклонения при регистрации закадмиевых нейтронов объясняются присутствием в пробе других поглощающих элементов.

3. **Определение индия.** Природный индий состоит из смеси двух стабильных изотопов с массовыми числами 113(4,33%) и 115(95,67%). Изотоп индий-115 имеет очень слабую бета-радиоактивность

Таблица 23-6

Результаты определения серебра (в единицах эквивалентной толщины d_0) по ННМ-р с регистрацией различных групп нейтронов

Содержание по данным химанализа d_0, мк	Суммарный поток нейтронов		Закадмиевые нейтроны		Резонансные нейтроны	
	$d \pm \sigma$, мк	$\frac{d-d_0}{\sigma}$	$d \pm \sigma$, мк	$\frac{d-d_0}{\sigma}$	$d \pm \sigma$, мк	$\frac{d-d_0}{\sigma}$
8	13±0,5	+10	11,3±0,7	+5	8±0,8	0
20	12,5±0,8	—10	32,8±1,1	+12	22±(1,3—3,9)	+1,5
40	24,0±1,0	—16	50,5±2,0	+5	40±2,7	0

($T=6\cdot10^{14}$ лет). Содержание индия в земной коре по весу равно $1\cdot10^{-5}$%. Повышенные концентрации его связаны главным образом с кислыми породами.

Индий собственных минералов не образует, а входит в виде примесей в целый ряд минералов. Наиболее высокие его концентрации встречаются в сфалеритах (0,05—1,0%), коломорфных касситеритах (0,001—0,6%) и некоторых сульфостанитах (0,001—0,1%).

Индий извлекается исключительно из комплексных месторождений руд гидротермального типа, в основном из касситерит-сульфидных, связанных со скарнами, олово-сульфосольных, связанных с кварцевыми и кварцево-баритовыми жилами, медноколчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений.

Содержание индия в промышленных рудах при комплексном извлечении меняется от 0,001—0,002 до 0,1%.

Захват медленных нейтронов ядрами индия приводит к образованию целого ряда изотопов (табл. 23-7). Эффективное сечение образо-

Таблица 23-7

Параметры радиоактивных изотопов индия

№ изотопа	Период полураспада T	Энергия, МэВ	
		бета-частиц	гамма-квантов
114	72 с	1,98(98,9%); 0,675(0,15)	1,3(0,15%)
114^{m_1}	50 дн.	ε — 3,5%	0,19(19,2%); ВК(80%)
114^{m_2}	2,5 с	—	0,15
116	13,4 с	3,29(100%)	—
116^{m_1}	54 мин	1,0(42%); 0,87(38%); 0,6(18%); 0,34(2%)	2,09(25%); 1,487(21%), 1,274(75%); 1,085(54%); 0,406(25%); 0,137(3%)
116^{m_2}	2,17 с	—	0,164

вания индия-114 равно 2,35 барн (0,0125 см^2/г), а индия-116—187,65 барн (0,983 см^2/г). В области энергии нейтронов 1,45 эВ индий-115 имеет резонансное сечение 27 000 барн (141 см^2/г), в области энергий 3,86 эВ — 460 барн (2,4 см^2/г), в области энергий 9,16 эВ — 124 барна (0,65 см^2/г) и т. д.

Определение индия в рудах велось как на установке НРУ при времени облучения и измерения 30 с и перерыве 8 с, так и на установке НРУР при времени облучения и измерения 1 мин. При этом в основном образовывался индий-116. Толщина резонансного индиевого детектора и фильтра равнялась 0,15 мм. Толщина проб в обоих случаях выбиралась 15 мм. При работе на установке НРУ применялись плоские кассеты диаметром 65 мм, а при работе на установке НРУР — цилиндрические. Активность источника при измерениях на НРУ принималась $8,6\cdot10^6$ нейтр/с, а на установке НРУР — $4,3\cdot10^6$ нейтр/с. Результаты измерений приведены на рис. 23-11 (кривые *1*). Порог чувствительности определения индия по надкадмиевым нейтронам на установке НРУ оценен в 0,16%, а на установке НРУР — в 0,3%. Время одного анализа составляло 1—1,5 мин (НРУ) и 2,5 мин (НРУР).

В связи с тем, что резонанс индия перекрывается с резонансом родия (см. табл. 23-2), в качестве резонансного детектора использовалась фольга из родия толщиной 0,1 мм. Облучение и измерения на установке НРУ продолжались 2 мин, перерыв — 8 с, при работе на установке НРУР время облучения и измерения равнялось 4 мин. Результаты измерений показаны также на рис. 23-11 (кривые *2*). Как

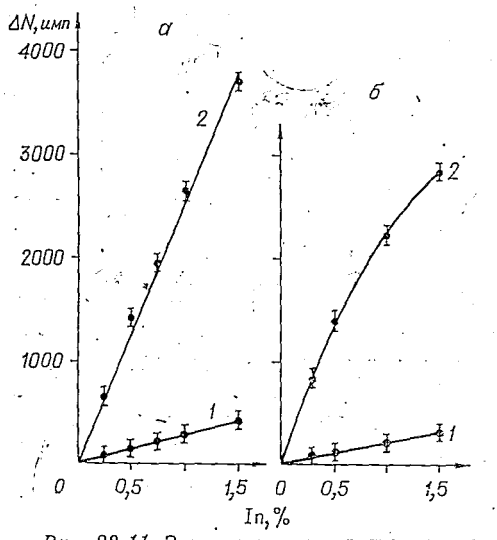


Рис. 23-11. Зависимость приращения скорости счета резонансных нейтронов индия, зарегистрированных с помощью фольг из индия (*1*) и родия (*2*), от содержания в пробах индия (*а* — измерения на НРУ, *б* — то же, на НРУР).

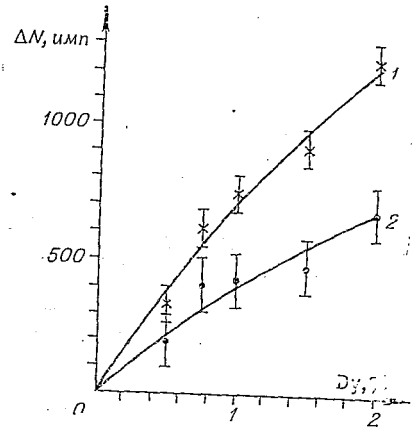


Рис. 23-12. Результаты определения диспрозия в пробах при измерениях с резонансным детектором из серебра при регистрации надкадмиевых (*1*) и резонансных (*2*) нейтронов.

видно, применение родиевого детектора позволило существенно повысить дифференциацию градуировочного графика. Порог чувствительности определения индия с помощью родиевого детектора также повысился до 0,06%. Время измерения на установке НРУ составляло при этом 4,5 мин, а на установке НРУР — 8,5 мин.

4. **Определение диспрозия.** Природный диспрозий состоит из смеси семи стабильных изотопов с массовыми числами 156 (0,0524%), 158 (0,0902%), 160 (2,294%), 161 (18,88%), 162 (25,53%), 163 (24,97%) и 164 (28,18%). Содержание диспрозия в земной коре по весу равно 0,001%. В промышленных типах редкоземельных месторождений оно меняется примерно в пределах от 0,005 до 0,6%.

Сечение захвата тепловых нейтронов диспрозием равно 1100 барн (4,08 см^2/г). Диспрозий-163 имеет резонансы для нейтронов с энергией 1,75 и 16 эВ с эффективными сечениями 1000 барн (3,7 см^2/г) и 1400 барн (5,17 см^2/г) соответственно, а диспрозий-162 — резонанс для нейтронов с энергией 5,35 эВ с эффективным сечением 7400 барн (27,6 см^2/г). Во всех случаях образуются стабильные изотопы. Поэтому определение диспрозия в пробах по ННМ-р можно вести только по перекрыванию резонансов Dy и других элементов. Как видно из табл. 23-2, в качестве резонансных детекторов для определения диспрозия можно применять серебро с сечением перекрывания 4500 барн для резонанса 5,35 эВ и с сечением 600 барн для резонанса 16 эВ, родий с сечением перекрытия 350 барн для резонанса 1,75 эВ, а также иридий с сечением перекрывания 3000 барн для резонанса 5,35 эВ.

Результаты определения диспрозия в искусственных пробах на установке НРУ с помощью детектора из серебра (0,1 мм) показаны на рис. 23-12 [23.11]. При работе с источником активностью $8{,}6 \cdot 10^6$ нейтр/с и плоскими пробами диаметром 65 м и высотой 15 мм (1,66 г/см^2) порог чувствительности оценен равным 0,2% по надкадмиевым нейтронам и 0,5% по резонансным, а абсолютные погрешности соответственно равны 0,1 и 0,25%. Время облучения и измерения составляло 2 мин, перерыв — 8 с.

5. **Определение золота.** Природное золото состоит из одного стабильного изотопа с массовым числом 197 (100%). Содержание его в

земной коре по весу равно $5 \cdot 10^{-7}$%. Наиболее высокие концентрации находятся в ультраосновных породах ($1 \cdot 10^{-5}$%).

В природе золото встречается в самородном состоянии, в смеси с серебром — электрум (Au, Ag), с содержанием до 50% серебра, в соединении с медью — медистое золото (AuCu) и в соединениях с теллуром — калаверит ($AuTe_2$) и др.

Известно несколько типов месторождений золота. Главнейшим является гидротермальный, связанный с кислыми интрузиями. Месторождения этого типа представлены жилами и линзами кварца. Наряду с золотом здесь присутствуют арсенопирит, пирротино-пирит, пирит, реже сфалерит, халькопирит, молибденит и др. Из нерудных минералов преобладают кварц, частично турмалин, альбит и др.

Золото извлекается также из комплексных руд цветных и благородных металлов, колчеданных руд, золото-кварцевых жил, скарнов и россыпей. Промышленными считаются руды с содержанием его от $1 \cdot 10^{-5}$% (россыпи) $\div 5 \cdot 10^{-4}$% (коренные руды) до $2 \cdot 10^{-2}$% (главным образом в россыпях).

Эффективное сечение захвата золотом тепловых нейтронов равно 98 барн (0,294 см^2/г), а в области резонанса с энергией 4,94 эВ — 30 600 барн (93,5 см^2/г). Захват нейтронов приводит к образованию изотопа золото-198, имеющего период полураспада 2,7 дня и испускающего бета-частицы с энергией 0,96 МэВ (99,9%) и гамма-кванты с энергией 0,412 МэВ (99,8%).

В связи с тем, что период полураспада образующегося изотопа достаточно велик, для определения золота в пробах по ННМ-р используется серебро, имеющее сечение перекрывания величиной 6000 барн.

Результаты определения золота в искусственных пробах на установке НРУ показаны на рис. 23-13 [23.11]. Пробы засыпались в плоские кассеты диаметром 65 мм и высотой 15 мм (1,66 г/см^2). Время облучения и измерения фольги детектора составляло 2 мин, перерыв — 8 с. Порог чувствительности ННМ-р к золоту по этой методике оценен в 0,07%, а абсолютная ошибка — в 0,035%.

Резонансный детектор из серебра может применяться также для раздельного определения в совместных пробах золота и серебра. Золото при этом обнаруживается по перекрыванию с резонансом серебра в области 5 эВ, а серебро — по второму резонансу с энергией 16,6 эВ. Раздельное определение серебра и золота в пробах можно вести по измерению отношения наведенной активности серебра-110 и серебра-108, аналитически выделенных из общей наведенной активности. Подробно этот вопрос рассматривается в работе [4.19].

Методика, основанная на измерении спектров нейтронов, применяется также для анализа циркония в концентратах [23.57].

6. **Определение элементов с высокими сечениями захвата медленных нейтронов.** Резонансные детекторы (индикаторы) имеют высокие сечения захвата нейтронов не только в области резонанса, но и в области всего спектра медленных нейтронов. Это позволяет использовать их также для определения в пробах целого ряда элементов с высокими сечениями захвата медленных нейтронов (бора, лития и др.).

С целью проверки возможностей ННМ-р при решении этих задач прово-

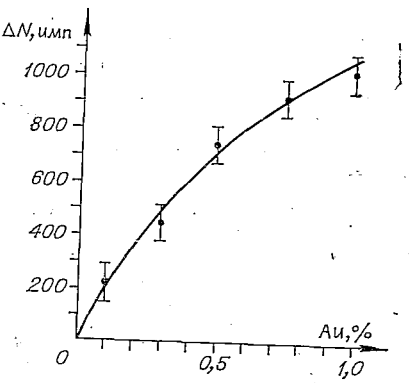


Рис. 23-13. Результаты определения золота в пробах по регистрации надкадмиевых нейтронов с помощью резонансного детектора из серебра.

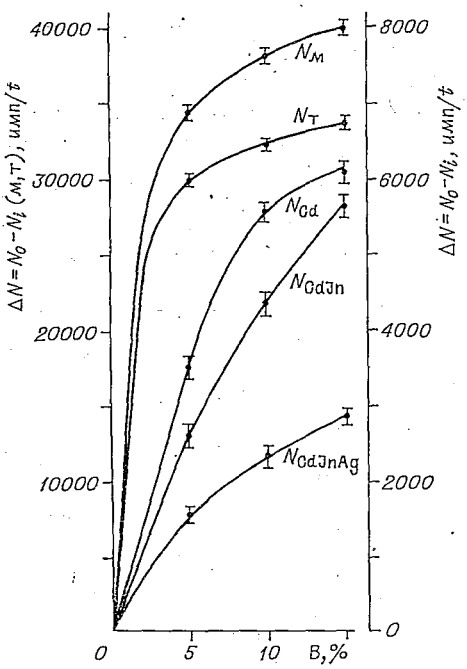


Рис. 23-14. Зависимость содержания бора от скорости счета нейтронов, измеренной детектором из серебра при регистрации сплошного спектра медленных нейтронов $N_м$, надкадмиевых N_{Cd}, тепловых $N_т = N_м - N_{Cd}$, надтепловых при использовании кадмиевого и индиевого фильтров N_{CdIn} и фильтров из кадмия, индия и серебра N_{CdInAg}.

дились эксперименты на установках НРУ [4.19, 21.15] и НРУР [23.62, 23.63].

Результаты измерений на установке НРУ по определению высоких концентраций бора показаны на рис. 23-14 [4.19]. Пробы засыпались в кассеты диаметром 62 мм и высотой 8 мм. Увеличение вклада резонансных нейтронов в регистрируемый эффект ведет к выпрямлению градуировочных кривых. Наилучшие результаты наблюдаются при работе с кадмиевым и индиевым фильтрами. Абсолютная погрешность определения бора достигает 0,1%.

Рассматриваемые установки могут использоваться для определения бора в пробах с широким диапазоном концентраций, начиная с весьма малых и кончая близкими к 100%. Так, при регистрации суммарного потока нейтронов с помощью серебряного активатора в пробах толщиной 15 мм можно определять содержание бора и лития в пробах соответственно с порогами чувствительности 0,01 и 0,07%. По регистрации надкадмиевых нейтронов бор в природных пробах можно определять в присутствии лития с порогом чувствительности 0,1%. Таким образом, по методике комбинированных замеров с кадмиевым и без кадмиевого фильтра по ННМ-р можно вести раздельное определение в совместных пробах бора и лития с относительными погрешностями 2 и 3% соответственно [19.63, 23.63].

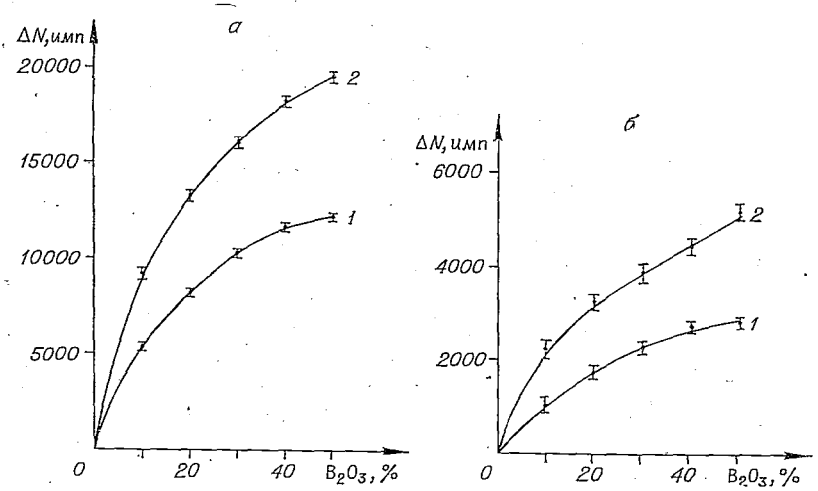


Рис. 23-15. Зависимость приращения скорости счета от содержания бора в пробах при работе с одним (*1*) и двумя (*2*) источниками активностью каждого $4{,}3 \cdot 10^6$ нейтр/с (*а* — замеры с родиевой фольгой, *б* — то же, с серебряной).

Активационные детекторы из родия и серебра использовались для определения в пробах бора вплоть до 17% (50% B_2O_3) (рис. 23-15). При замерах длительностью 8 мин с помощью родиевого активатора бор в пробах при одном цикле измерений можно определять с относительной погрешностью, не выходящей за пределы 0,3—0,5%. С такой же погрешностью можно определять бор в пробах и с помощью серебряного активатора в процессе двух циклов измерений с затратами по 4 мин на каждый цикл замеров. Более высокие концентрации бора в пробах вплоть до 100% по этим методикам можно определять с относительной погрешностью не свыше 1% [23.62].

Рассматриваемая методика ННМ-р может привлекаться для определения в пробах других элементов с высокими сечениями. Порог чувствительности при этом в 2 раза ниже значений, приведенных в табл. 23-1. Это связано с тем, что при расчетах следует исходить из концентрации бора 0,01%.

§ 4. Физические основы метода применительно к исследованию коренных пород

1. **Основы теории метода.** Расчет пространственно-энергетического распределения надтепловых и тепловых нейтронов в горных породах, содержащих элементы, сильно поглощающие медленные нейтроны, применительно к устройствам конкретных приборов и геометрии облучаемой среды является сложной математической задачей. На практике для ее решения используются различные приближения интегро-дифференциального кинетического уравнения Больцмана [1.27, 6.64, 20.25, 23.25, 23.27, 23.28, 23.30—23.33].

Для выяснения отдельных закономерностей распределения нейтронов в породах используются метод групп [1.27, 20.25, 23.53], возрастное и диффузионное приближение [20.25, 21.21, 23.23], а также другие методы расчета [23.34].

Присутствие в породе сильно поглощающих элементов в общем случае приводит к изменению как энергетического, так и пространственного распределения нейтронов. Иногда же эту задачу можно свести к изменению только энергетического распределения нейтронов в породе, особенно при изучении процессов их замедления.

Так, при нахождении точечного моноэнергетического источника в однородной безграничной среде выражение для плотности потока надтепловых нейтронов принимает следующий вид:

$$J_{\text{н}} = \eta J_{\text{н}}, \tag{23-8}$$

где $\eta = \exp\left[-\int_0^u \frac{\lambda_s}{\lambda_a}\frac{du}{\xi}\right]$ — коэффициент, учитывающий энергетическое изменение потока нейтронов в процессе замедления; значения других обозначений экспоненциального множителя приводятся в § 2 гл. 4.

Величина $J_{\text{н}}$ в зависимости от начальной энергии нейтронов, расстояний, на которых измеряется поток нейтронов, и содержания в среде водорода определяется выражениями (22-4) или (22-5)

Уравнение для плотности потока тепловых нейтронов может быть представлено таким образом:

$$J'_{\text{т}} = \frac{\lambda}{\lambda_0}\eta\Phi(\varkappa) J_{\text{т}}, \tag{23-9}$$

где $\Phi(\varkappa) = \frac{2}{\varkappa}\frac{1-\lambda^2/L^2}{\varkappa - 1 + \lambda^2/L^2} + F(\varkappa)$; $\varkappa = \lambda/\lambda_s$, функция $F(\varkappa)$ приведена на рис. 23-16 [1.27], остальные обозначения те же, что и в гл. 4 (§ 2 и 4).

Функция $J_т$ для сред, не содержащих водорода, имеет вид (22-7) при $r<L_s$ и $L_s>2L$. Для водородсодержащих сред функция $J_т$ будет иметь вид выражения (22-11) при $r\gg L_f\gg L$.

По этому вопросу см. также [16.66].

Приведенные формулы удобны при исследовании пород зондовыми устройствами. Результаты расчетов по этим формулам для пород, содержащих бор, литий, кадмий, ртуть и редкие земли, приводятся в книге [1.27].

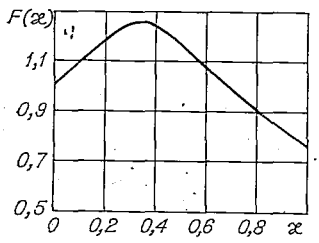


Рис. 23-16. Вид функции $F(x)$.

Применительно к приставным устройствам приборов формул нет.

Глубинность ННМ при исследовании пород и руд, содержащих сильно поглощающие элементы, несколько ниже глубинности для пород, не содержащих таких элементов (см. п. 3 § 2 гл. 22).

2. **Методика исключения влияния влажности пород на результаты измерений.** При определении содержания в горных породах поглощающих элементов изменения влажности пород могут приводить к существенным погрешностям результатов измерений. Поэтому при решении рассматриваемой задачи влияние изменений влажности надо либо исключать, либо вводить поправки в результаты:

На первом этапе исследований для ослабления влияния изменений водородсодержания горных пород на результаты определения в них сильно поглощающих элементов измерения вели на инверсионных зондах (см. рис. 22-4). Инверсия показаний ННК-т происходит не только для зависимостей $N_т=f(m_н)$, но и для зависимостей $N_т=f(D_с)$ [6.64, 23.49, 23.50], где $D_с$ — диаметр скважины. Это также справедливо и для НГК. Применительно же к ННК-н для изучаемого диапазона изменений диаметров скважин (70—130 мм) инверсия от этого параметра не наблюдалась. Однако при измерениях на инверсионных зондах устранить влияние изменений влажности горных пород полностью не удается. Так, И. П. Кошелев и др. [6.17, 6.18, 20.21, 20.54] использовали зависимость тепловых $N_т$ и надтепловых $N_н$ нейтронов от влагонасыщенности пород ($m_н$), которая при $m_н>2\%$ для больших размеров зондов в полулогарифмических координатах носит линейный характер:

$$N_т=a-b\ln m_н, \tag{23-10}$$

$$N_н=a_1-b_1\ln m_н, \tag{23-11}$$

где a, a_1, b и b_1 — постоянные.

Освобождаясь от логарифма пористости, эти два соотношения можно свести к виду:

$$N_т=a-\frac{a_1b}{b_1}+\frac{b}{b_1}N_н=A+BN_н. \tag{23-12}$$

В упомянутых работах показано, что зависимости (23-10) и (23-11) справедливы для диапазона $m_н$ от 5 до 20%. Следовательно, и соотношение (23-12) также справедливо для указанного диапазона влажности пород и руд. Для породы с постоянным содержанием поглощающих элементов все результаты измерений для указанного диапазона пористостей пород ложатся на одну и ту же кривую. Характер этой кривой зависит от параметров скважины, типа прибора, размера зонда и т. д. Об этом, в частности, можно судить по результатам, приведенным на рис. 23-17 [16.8]. Видно, что для скважины, заполненной водой, зависимость $N_т=f(N_н)$ возрастает, а для скважины, заполненной воздухом, при кривой *1* — спадает.

При исключении влияния изменений влажности пород на результаты ННК для каждой концентрации поглощающих элементов в горной породе существует зависимость $N_т=f(N_н)$. Таким образом, при изме-

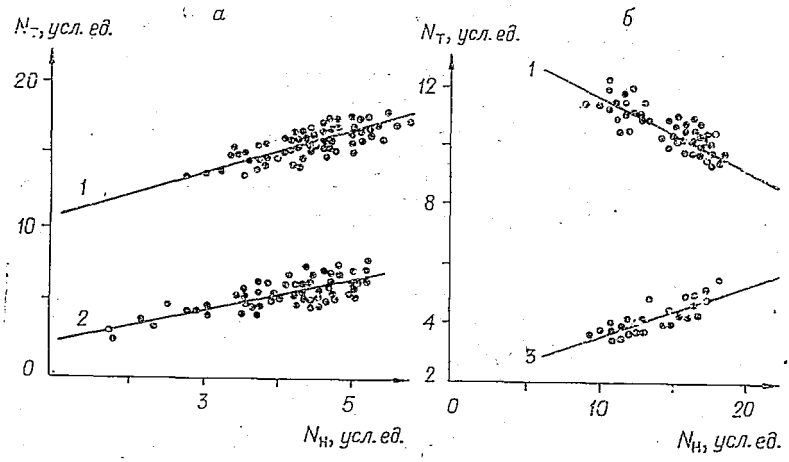


Рис. 23-17. Зависимость скорости счета тепловых нейтронов от скорости счета надтепловых нейтронов в условных единицах для скважин, заполненных водой (*а*) и воздухом (*б*).

$1 - N_т^{23} = f\left(N_н^{37}\right)$; $2 - N_т^{33} = f\left(N_н^{37}\right)$; $3 - N_т^{43} = f\left(N_н^{37}\right)$

(степень отвечает размеру зонда).

рениях по этой методике вначале необходимо построить номограмму зависимостей $N_{т,i} = f(N_{н,i})$ и в дальнейшем пользоваться ею при проведении исследований скважин и т. д.

И. И. Фельдман [6.64] для ослабления изменений влажности горных пород на результаты ННК предложил измерять отношение потока тепловых и надтепловых нейтронов. Однако результатов, подтверждающих это высказывание, в его работе не приводится. В связи с этим автором настоящей книги были проведены некоторые специальные исследования по этому вопросу [23.54].

В § 2 гл. 22 даны соотношения, описывающие распределения тепловых и надтепловых нейтронов в однородных средах. Из (22-4) и (22-7) нетрудно показать, что

$$M_1 = \frac{J_т(r)}{J_н(r)} = \frac{\tau\xi_н v}{\lambda_{s,н}}\left(1 - \frac{3}{2}\frac{L^2}{L_s^2}\right) \quad \text{при } r < L_s \text{ и } L_s > 2L. \quad (23\text{-}13)$$

Аналогично из формул (22-5) и (22-11) вытекает, что

$$M_2 = \frac{\tau\xi_н v}{\lambda_{s,н}\alpha_н} = \frac{\tau\xi_н v}{\lambda_{s,н}\left(1 - 2L^2/L_s^2\right)} \quad \text{при } r \gg L_s \gg L. \quad (23\text{-}14)$$

Видно, что на малых и больших размерах зондов величина M зависит все-таки от параметров замедления и диффузии нейтронов, которые в свою очередь обусловлены содержанием в породах влаги. Для выяснения характера этой зависимости воспользуемся данными рис. 22-4.

Зависимость величины M от влажности песка для различных размеров зонда показана на рис. 23-18. Плато имеется лишь для малых размеров зондов. Для нулевого зонда и зонда размером 5 см величина его простирается примерно от 8 до 35% влажности, для зонда размером 10 см — примерно в пределах от 10 до 22% влажности. Для больших размеров зонда

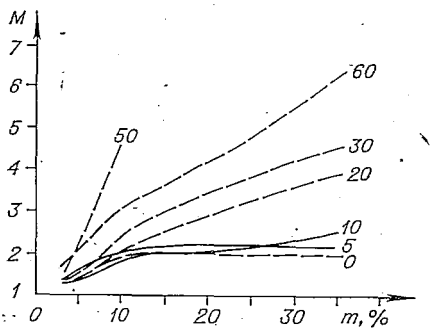


Рис. 23-18. Зависимость величины M от влажности песка для точечного детектора и источника (шифр кривых — размер зонда, см).

плато отсутствует. Аналогичные плато получены и по экспериментальным данным [4.19, 23.54].

Из изложенного видно, что, выбирая конкретную конструкцию зондового устройства, можно создать прибор, отношение скоростей тепловых и надтепловых нейтронов для которого не будет зависеть от изменения влажности пород.

Для пород, содержащих поглощающие элементы, выражения, аналогичные (23-14) и (23-15), имеют следующий вид:

$$M_1' = \lambda \cdot \lambda_a^{-1} \Phi(\varkappa)\, M_1, \qquad (23\text{-}15)$$

$$M_2' = \lambda \cdot \lambda_a^{-1} \Phi(\varkappa)\, M_2. \qquad (23\text{-}16)$$

Здесь следует подчеркнуть, что величины λ и λ_a рассчитываются для тепловых нейтронов, а $\lambda_{s,н}$ в формулах (23-13) и (23-14) — для надтепловых.

Из сопоставления выражений (23-13) и (23-14) с выражениями (23-15) и (23-16) видно, что они отличаются лишь одним и тем же множителем перед M_1 и M_2. Множитель $\lambda \cdot \lambda_a^{-1} \Phi(\varkappa)$ обусловлен наличием в породе поглощающих элементов. Следовательно, зависимость M от влажности пород приводит к таким же кривым, которые показаны на рис. 23-18. Однако наличие коэффициента $\lambda \cdot \lambda_a^{-1} \Phi(\varkappa)$ обусловливает смещение кривых параллельно самим себе.

Плато, показанные на рис. 23-18, могут быть получены и для приборов приставного типа. Однако для этих целей необходимы специальные исследования.

Для определения отношения потоков тепловых и надтепловых нейтронов удобнее всего использовать двухслойный люминофор с двумя фотоумножителями, расположенными с противоположных его торцов [23.55]. Внешний детектор делается чувствительным к тепловым нейтронам, а внутренний, экранированный, например, кадмием (или бором) и водородсодержащим материалам (пластмассой и т. д.),— только к надтепловым.

Естественно, при определении в породах элементов с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов по методике отношений тепловых и надтепловых нейтронов понижается точность и порог чувствительности. Чтобы избежать этого, необходимо уменьшить скорость каротажа или увеличить длительность замера.

А. Ю. Большаковым и др. [23.61] для раздельного определения в породах воды и поглощающих элементов предложена двухзондовая методика ДННК-т. Отношение скоростей счета M при этом зависит только от водородсодержания пород. Более подробно это рассмотрено в § 6 и 7 гл. 22. Разность же M—N' (l_2) (здесь $N'(l_2)$ — соответствующим образом нормированная скорость счета на большом размере зонда l_2) зависит только от содержания в породах поглощающих элементов. Для каждого типа приборов и диаметров скважин следует подбирать экспериментально размеры зондов.

Е. А. Соколовым и др. [16.66] разработана двухисточниковая методика ННК-т (ДННК-т). Один размер зонда рекомендуется выбирать в доинверсионной области, а другой — в заинверсионной. При этом регистрируется суммарный эффект от обоих источников. Размеры зондов и активности источников выбираются экспериментально. Естественно, для этих целей может быть использован прибор с одним источником и двумя детекторами. Можно также проводить исследования последовательно со стандартным прибором на разных размерах зондов.

§ 5. Приставные приборы и их применение

Исследованиями по разработке переносных приставных приборов для определения в породах сильно поглощающих элементов начали заниматься параллельно в Институте геохимии и аналитической химии АН СССР им. В. М. Вернадского (В. И. Баранов, В. К. Христианов и др. [23.2, 21.1], в Институте геологии и геофизики СО АН СССР (Б. С. Вахтин и Е. М. Филиппов) [3.20, 4.19, 15.19, 16.62, 18.7, 23.8, 23.13] и во ВНИИ разведочной геофизики (Э. В. Егоров, Е. А. Соколов и др. [6.17]).

Приборы ГеоХИ АН СССР созданы на основе пропорциональных борных счетчиков СНМО-5 (3 шт.) и полоний-бериллиевых источников с выходом $2 \cdot 10^4$ нейтр/с. В одном варианте прибора детекторы и источник располагались в парафиновом замедлителе — отражателе. Импульсы, поступавшие с детекторов, регистрировались специальным радиометром со стрелочным индикатором. Общий вес прибора составлял 16,5 кг. Во втором облегченном варианте прибора весом 8 кг детекторы и источник располагались в П-образном бор-кадмиевом экране. Для регистрации импульсов, поступавших с детекторов, был приспособлен пульт прибора СРП-2.

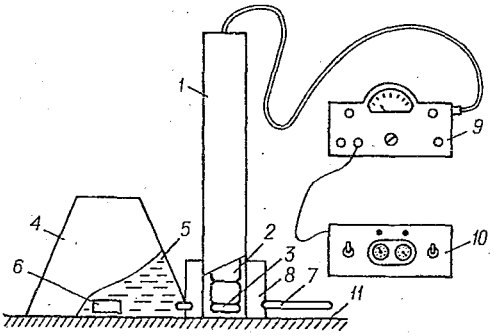


Рис. 23-19. Общий вид приставного прибора ИГиГ СО АН СССР.

1 — гильза радиометра, *2* — фотоэлектронный умножитель, *3* — люминофор тепловых нейтронов, *4* — блок источника, *5* — парафин, *6* — источник нейтронов, *7* — направляющие, *8* — обойма для крепления блока источника на гильзе, *9* — пульт радиометра, *10* — приставка с электромеханическим счетчиком, *11* — исследуемая поверхность породы.

Приборы ИГиГ СО АН СССР и ВИРГа были созданы на основе сцинтилляционных счетчиков.

Общий вид приставного прибора, созданного в ИГиГ СО АН СССР, показан на рис. 23-19 [4.19]. Источник нейтронов размещался в парафиновом блоке, выполненном в виде усеченного конуса с диаметром нижнего основания 20 см, а верхнего — 10 см и высотой 15 см. Парафин служил отражателем нейтронов и защитным контейнером. С этой целью снаружи он покрывался листовым кадмием толщиной 1 мм. Источник с выходом $\sim 5 \cdot 10^5$ нейтр/с располагался в нижней части блока в цилиндрическом канале. Блок источника с гильзой радиометра соединялся с помощью специальных направляющих прутков и алюминиевой обоймы, в которой закреплялась гильза радиометра. Размер зонда можно было менять от 13 до 23 см. Для приближения детектора к облучаемой поверхности гильза радиометра СРП-2 в нижней части была укорочена на 4 см. Никаких других изменений в приборе СРП-2 не было. Грубые определения бора в породах производились по показаниям микроамперметра. Более точно бор определялся специальной установкой с ЭМСом [3.20, 4.19]. Приставка с пультом радиометра СРП-2 соединялась через клеммы для телефона. Без приставки прибор весил $\sim$ 5 кг, с приставкой $\sim$ 7 кг.

Глубинность исследования пород с содержанием бора от 0,1 до 2% для этого прибора оценивалась в 16—24 г/см^2.

Данные о приборе ВИРГа приведены в приложении 4. Схематическое устройство датчика будет дано ниже — при рассмотрении результатов определения в породах ртути, для изучения которой этот прибор применялся.

Для определения сильно поглощающих элементов в горных породах могут также применяться приставные нейтронные приборы, рассмотренные в § 3 предыдущей главы.

Прибор ГеоХИ АН СССР использовался для определения в породах низких концентраций бора в пределах 0,003—0,2% (0,01—0,7% B_2O_3). Градуировочная кривая для этого прибора при концентрациях бора около 0,2% выходила на асимптоту, что не позволяло определять более высокие концентрации бора в породах.

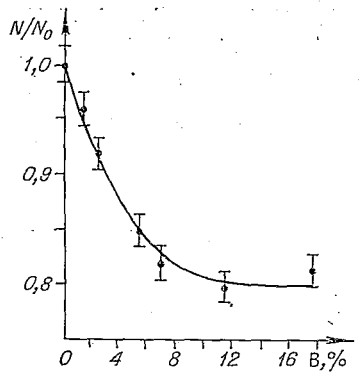


Рис. 23-20. Градуировочные кривые приставного борметра ИГиГ СО АН СССР.

Приставной прибор ИГиГ СО АН СССР применялся для определения в породах концентраций бора примерно от 0,1 до 8%. Градуировочная кривая для этого прибора показана на рис. 23-20 [4.19]. При концентрациях бора свыше 8—9% градуировочная кривая начинает выполаживаться. На основе ННМ-р создан прибор для определения бора ~0,1—10% [36.15].

Результаты сопоставления данных, полученных при работе с приставными приборами ИГиГ СО АН СССР, с данными анализа бороздовых проб приведены на рис. 23-21. Данные обоих методов удовлетворительно согласуются друг с другом, за исключением двух точек (*66* и *67*). Это расхождение связано с неравномерностью оруденения.

В связи с тем, что при измерениях по ННМ-т охватывается более значительный объем породы, чем при измерениях проб, отбираемых при бороздовом опробовании, опробованию с приставным прибором следует отдавать наибольшее предпочтение. Погрешность определения бора в коренных породах при этом в среднем не выходит за пределы 0,2—0,3%. Время измерений на одной точке равно примерно 5 мин. Создание датчика прибора с большой площадью позволит значительно уменьшить активность применяемого источника. Так, на основе ФЭУ-49 с

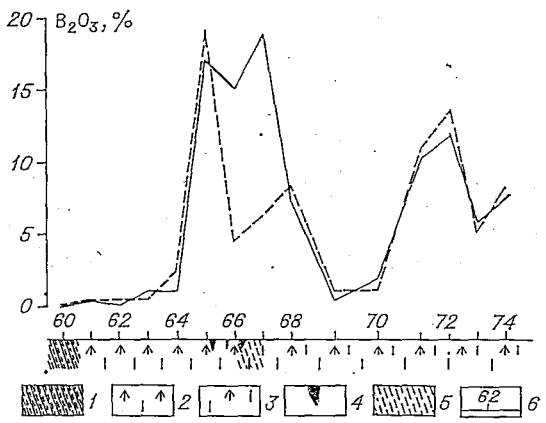


Рис. 23-21. Результаты сопоставления данных, полученных при измерениях с приставным прибором (сплошная кривая) и при анализе бороздовых проб (пунктир) по профилю на одном из месторождений бора.

1 — песчаники и алевролиты, *2* — геденбергит-датолитовые породы, *3* — гранат-датолитовые породы с геденбергитом, *4* — гнезда датолита, *5* — трещиноватые породы, *6* — номера точек наблюдения и проб.

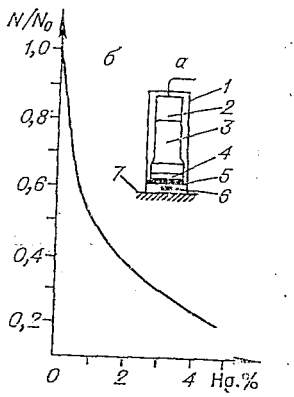


Рис. 23-22. Схема приставного устройства ВИРГа (*а*) и кривая зависимости плотности потока тепловых нейтронов от содержания ртути в бетонных блоках (*б*).

1 — корпус датчика, *2* — электронная схема, *3* — фотоэлектронный умножитель, *4* — детектор тепловых нейтронов, *5* — кадмиевый экран, *6* — источник нейтронов, *7* — исследуемая поверхность породы.

диаметром фотокатода 15 см и соответствующим ему люминофором можно сконструировать приставной прибор, который будет работать с источником, дающим выход порядка 10^4 нейтр/с.

Схематическое устройство приставного прибора ВИРГа совместно с градуировочной кривой, построенной для определения в породах ртути, приведено на рис. 23-22 [6.17]. Приставное устройство прибора было создано на основе фотоумножителя ФЭУ-24 и люминофора Т-1 диаметром 8 см. В качестве радиометра использовался пульт прибора СРП-2. Замедлительно-защитный блок у этого прибора отсутствовал, кроме того, в приборе использовался источник нейтронов активностью $2 \cdot 10^6$ нейтр/с, что затрудняло применение его на практике. Глубинность исследования пород для этого прибора оценена равной 40—50 г/см^2, порог чувствительности определения ртути — 0,2%.

Рассмотренные в этом параграфе приставные приборы могут найти применение для определения в породах редких земель, лития, марганца и др.

§ 6. Автомобильный метод

Методика автомобильных поисков предложена В. И. Барановым, В. К. Христиановым и др. (ГеоХИ АН СССР) и использовалась ими для поисков бора в соленосных отложениях [21.1].

Этот вид съемки, естественно, может применяться лишь в районах, проходимых для автотранспорта (подробнее об этом см. в § 3 гл. 10).

Установка, разработанная для поисков месторождений бора, показана на рис. 23-23 [21.1]. Размещение в приборе нейтронных и гамма-счетчиков позволяет одновременно вести исследования по ННМ и НГМ.

Для приближения источника и детекторов нейтронов и гамма-лучей к изучаемой поверхности земли вся установка размещается на скользящих полозьях. Кассеты с детекторами находятся по разные стороны от источника нейтронов, хотя в принципе их можно размещать и с одной стороны источника. Чтобы не было ухода нейтронов с исследуемой поверхности, применяется отражатель. В противном случае требуются источники высокой активности, что нежелательно по правилам техники безопасности. Размещение источника нейтронов и детекторов излучения у самой поверхности земли обеспечивает также возможнось работы с источником сравнительно невысокой активности. Источник имеет выход $1 \cdot 10^7$ нейтр/с. Размеры установки следующие: длина — 2 м, ширина — 0,6 м. Общий вес аппаратуры, включая регистрирующие устройства, составляет 170 кг. Показания записываются с помощью ферромагнитной ленты и магнитофона типа МАГ-8М или самописца автомобильного радиометра СГ-14.

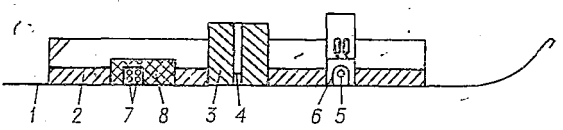


Рис. 23-23. Схема автомобильной нейтронной установки.

1 — полозья, *2* — парафиновый отражатель, *3* — замедлитель нейтронов, *4* — источник нейтронов, *5* — пропорциональный борный счетчик (1 шт.), *6* — бор-кадмиевый экран, *7* — кассета с галогенными гамма-счетчиками (4 шт.), *8* — свинцовый экран.

Толщина парафинового отражателя выбрана равной 8 см. Вместо парафина можно использовать оргстекло или воду. Для измерения нейтронов в установке применяется нестандартный счетчик, обогащенный бором-10, эквивалентный по эффективности двум счетчикам типа СНМО-5, работающим параллельно. Экранирование этого счетчика слоем кадмия толщиной 1 мм и элементарного бора толщиной 3 мм обеспечивало регистрацию нейтронов преимущественно из облучаемой породы. Счетчики гамма-квантов (СТС-6) размещались в свинцовом экране толщиной 12 мм (со стороны источника) и толщиной 4 см с других сторон.

Электронная схема описана в работе [21.1]. Постоянная времени выбиралась равной 1 и 3,5 с.

Для определения бора в породах в нейтронной установке расстояние между детекторами и источником составляло 38 см.

Глубинность ННМ и НГМ, как отмечалось в работе [21.1], не выходила за пределы 15—20 см для пород, содержащих примерно 0,03% бора. Для определения в соленосных отложениях бора использовался канал ННМ, а для определения хлора — канал НГМ. Градуировочные кривые обоих каналов показаны на рис. 23-24 [21.1]. Порог чувствительности канала ННМ-т к бору оценен в 0,003%, а канала НГМ — в 0,005% бора. В работе [21.1] отмечается, что концентрация 0,01% B_2O_3 в породе эквивалентна содержанию 0,6% NaCl, т. е. 0,003% бора эквивалентно 0,44% хлора.

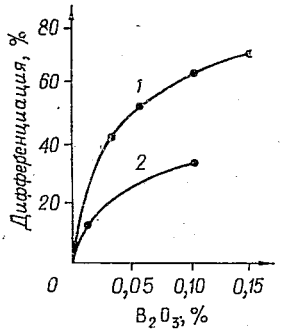


Рис. 23-24. Зависимость приращения показаний прибора (в отн. ед.) от содержания бора в почве: *1* — канал ННМ, *2* — канал НГМ.

Совместная обработка диаграмм ННМ и НГМ [21.1] позволяет вести раздельное определение бора и хлора в породах. При концентрациях хлористого натрия в породах свыше 6% по этой методике невозможно вести определения бора.

Неровности поверхности (выступы и выемки) практически не оказывают влияния на результаты определения бора в породах. На диаграммах ННМ и НГМ неровности обычно отмечаются повышенными показаниями в отличие от бороносных участков и могут быть исключены при обработке.

Результаты опробования для определения бора на одной из площадей показаны на рис. 23-25 [21.1].

Помимо определения бора в породах автомобильная нейтронная съемка может применяться для выявления ореолов рассеяния и других поглощающих элементов.

§ 7. Методы исследования скважин и шпуров с регистрацией тепловых и надтепловых нейтронов

Первые исследования по определению сильно поглощающих элементов в горных породах, пройденных буровыми скважинами и шпурами, начались с 1953 г. под руководством В. И. Баранова (ГеоХИ АН СССР) и В. Н. Дахнова (МНИ, сейчас МИНХ и ГП).

Для исследования шпуров и скважин в принципе может применяться та же аппаратура, что и для определения влажности и пористости грунтов и горных пород (см. § 5 гл. 22). Влияние скважин на результаты измерений по ННК рассматривается в § 6 гл. 22.

ННК в настоящее время применяется для определения в породах бора, хлора, марганца, железа, кадмия, ртути, редкоземельных и некоторых других элементов.

1. **Бор.** Некоторые сведения о нем даны в § 1 этой главы.

Детальные исследования по ННК-т на моделях сухих и заполненных водой скважин проведены во ВНИИЯГГе [17.13]. Измерения велись со сцинтилляционной аппаратурой (ФЭУ-35 и ЛДНМ-П) на зондах размерами 15, 20 и 30 см. Среды преобразовывались по принципу подобия. Результаты измерений показаны на рис. 23-26 (размер зонда для этого случая в работе [17.13] не указан). Переход от объемных содержаний бора к весовым следует осуществлять по графикам рис. 23-27. Из рис. 23-26 видно, что с возрастанием в породах борного ангидрида примерно от 0 и до 0,1 г/см³ в сухих скважинах и примерно от 0 до 0,05 г/см³ в заполненных водой скорость счета резко убывает. Причем

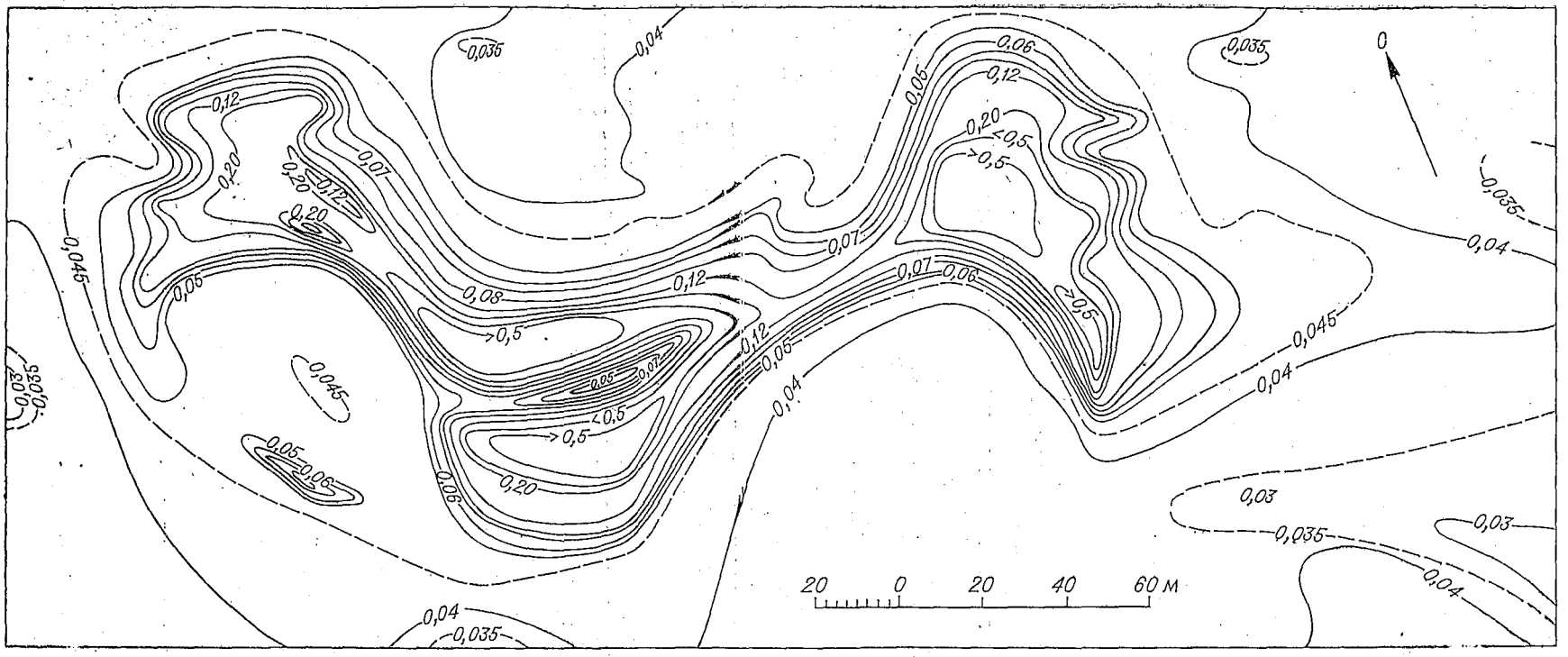


Рис. 23-25. План участка интенсивного боропроявления (шифр изолиний — концентрация борного ангидрида B_2O_3.·)

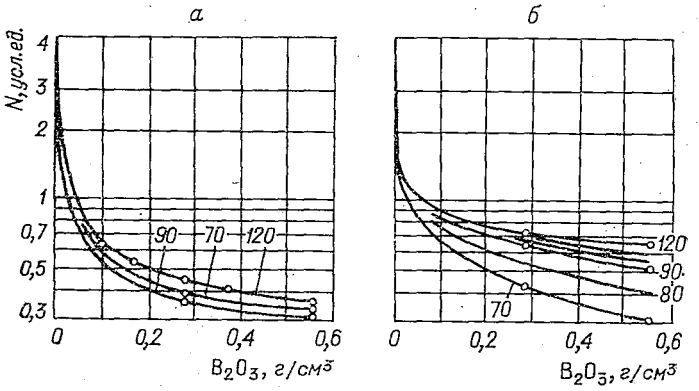


Рис. 23-26. Зависимость скорости счета тепловых нейтронов от содержания бора в породах при измерениях в сухих (*а*) и заполненных водой (*б*) скважинах. Шифр кривых — диаметр скважины, мм.

чем меньше диаметр скважины, тем резче спадает скорость счета. Для сухих скважин зависимость регистрируемых скоростей счета от диаметра меняется значительно меньше, чем для скважин, заполненных водой. При этом для скважин большого диаметра наблюдается весьма слабая зависимость $N=f(B_2O_3)$ в диапазоне концентраций от 0,1 до 0,6 г/см³ B_2O_3, указывающая на трудность определения бора по ННК-т.

С целью выяснения возможностей ННК при регистрации различных групп нейтронов В. Е. Лебедевым и др. [17.13] производились также расчеты по методу Монте-Карло для искусственной среды, состоящей из ядер водорода, бора и кислорода (H_2BO). Концентрация бора в этой среде варьировалась от 0 (H_2O) до 84,4% (H_2B). Результаты расчетов показаны на рис. 23-28. По оси абсцисс нанесены относительные концентрации бора в единицах $C_B=n_A(B)/[n_A(B+n_A(O)]$, где $n_A(B)$ и $n_A(O)$ — соответственно число ядер бора и кислорода в 1 см³ (см. формулу 1-3). Относительным концентрациям C_B при этом соответствуют следующие весовые концентрации: 1—84,4%; 1/2—35,1%; 1/4—16,2%; 1/8—7,78%; 1/16—3,82%; 1/32—1,89% и 0—0%. Из рис. 23-28 видно, что с возрастанием регистрируемого диапазона энергий нейтронов зависимость $J=f(C_B)$ становится более пологой. Наличие скважины при этом приводит к выполаживанию всех кривых.

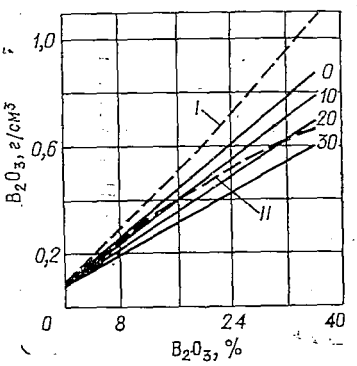


Рис. 23-27. Номограммы для перехода от объемного к весовому содержанию бора для ашарита в гипсе (I), улексита в гипсе (II) и смешанной руды (сплошные кривые, их шифр — пористость в процентах).

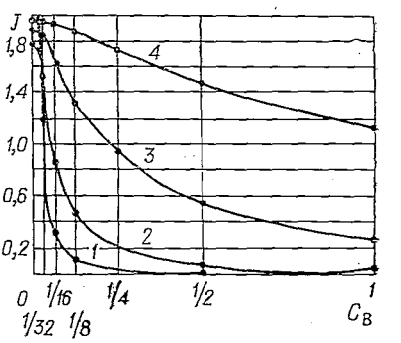


Рис. 23-28. Зависимость плотности потока нейтронов с начальной энергией 2,45 МэВ (нейтр/см² с) от концентрации бора C_B. Кривые *1—4* соответствуют энергетическим интервалам: 0—0,07; 0,07—1,0; 1,0—16; 16—256 эВ.

Таким образом, в сухих скважинах бор можно определять по методике ННК-т примерно до концентраций 4—5% В. Порог чувствительности в зависимости от типа месторождений при этом можно оценить равным 0,003—0,03%. Концентрации свыше 4—5% следует определять по методике ННК-н. Активность источника для измерений по ННК-т следует выбирать равной порядка 10^6 нейтр/с, а при измерениях по ННК-н — порядка 10^7 нейтр/с.

В заполненных водой скважинах бор по ННК-т можно определять до $p=1$—1,5% В. Порог чувствительности следует оценивать при этом в 0,03—0,1%. Для измерений достаточно использовать источники с выходом $(2—5)\cdot 10^6$ нейтр/с. Высокие концентрации (свыше 1,5%) следует определять по методике ННК-н. Относительная ошибка определения этих концентраций оценивается в 30—40%. Уменьшение этой ошибки может быть достигнуто при работе с источником с выходом 10^7 нейтр/с лишь при точечных замерах. При измерении потоков нейтронов в движении необходимы источники с более высоким выходом. Более эффективно высокие концентрации бора в породах можно определять по методике ННК-р (см. § 8 этой главы).

В работе [23.3] показано, что вкрапленные руды бора отбиваются более высокими показаниями по сравнению с породами с равномерным содержанием бора и аналогичной объемной концентрацией.

В случае изучения пород, содержащих переменные концентрации водорода (влаги), исследования скважин следует вести по какой-либо из методик, описанных в § 4 этой главы.

Определению бора в породах осадочного происхождения может мешать хлор, имеющий высокое сечение захвата тепловых нейтронов (см. табл. 23-2). Для исключения влияния хлора на результаты определения бора исследование скважин рекомендуется производить по методике ННК-н.

Определению бора в скарновых породах может мешать железо, имеющее наряду с относительно высоким сечением захвата нейтронов также высокое сечение рассеяния. Влияние железа при этом может учитываться по методике ГГК-с (см. гл. 20).

По вопросу определения хлора в породах см. п. 3 § 7 гл. 22 и § 5 гл. 34.

2. **Марганец.** Некоторые сведения об этом элементе приводятся в п. 3 § 2 этой главы.

Исследования по выявлению возможностей ННК применительно к определению марганца в горных породах, пересеченных скважиной, проведены И. И. Фельдманом [6.64, 20.50, 23.49, 23.51]. Им, в частности, показано, что при решении этой задачи при исследовании пород, не содержащих воду или содержащих ее в постоянных количествах, наибольшее предпочтение следует отдавать малым размерам зондов. Однако в породах с переменной влажностью на малых зондах влияние водорода и марганца сказывается различным образом: увеличение водорода ведет к возрастанию скорости счета, а увеличение содержания марганца — к уменьшению. Поэтому для определения марганца в породах с переменной влажностью рекомендуется выбирать средние размеры зондов (30—35 см). В этом случае относительные значения скорости счета, выраженные в значениях скорости счета против опорного пласта, обладают наибольшей дифференциацией к изменению содержания марганца в породах. Изменения содержания водорода в породах искажают показания ННК. Исключить влияние водорода на результаты определения марганца можно по одной из методик, описанной в § 4 этой главы. Полученная в работе [6.64] зависимость $M=f(\mathrm{Mn})$ показана на рис. 23-29.

Из опробованных методов ННК, НГК и НАК на марганцевых месторождениях наиболее эффективным оказался первый. В связи с тем, что на результаты ННК влияют изменения диаметра скважин, его необходимо комплексировать с кавернометрией скважин [6.64].

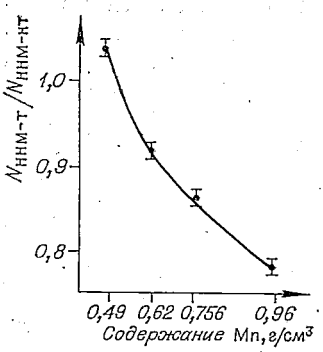


Рис. 23-29. Зависимость отношения скорости счета тепловых нейтронов к надтепловым от содержания в породах марганца (скважина сухая, зонд — 55 см).

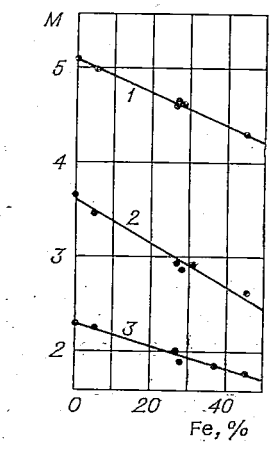


Рис. 23-30. Зависимость отношения скоростей счета M от весового содержания железа в породах, пройденных скважиной: *1* — зонд 20 см, *2* — 35 см, *3* — 40 см.

Порог чувствительности ННК к марганцу в зависимости от состава вмещающих пород можно принять равным примерно 1—10%.

3. **Железо.** Некоторые сведения о железе рассматриваются в п. 4 § 2 этой главы.

Разработкой этого вопроса занимался А. М. Блюминцев [23.5] с И. И. Фельдманом [23.6]. В этих работах приводятся исследования по тепловым и надтепловым нейтронам.

Промышленный интерес, как правило, представляют руды с содержанием железа примерно свыше 20%. Макроскопическое сечение таких руд на 90—95% обусловливается содержанием в них именно железа.

В п. 6 § 6 главы 19 показано, что некоторые руды железа обладают пористостью, ее величина может меняться от 5 до 40% [23.5]. Наличие воды в порах пород приводит к изменению замедляющих и диффузионных свойств этих руд. Увеличение пористости ведет к возрастанию среднего времени жизни тепловых нейтронов τ в руде. Это в свою очередь вызывает изменение скорости счета тепловых нейтронов. Методика оценки τ пород с импульсными источниками рассматривается в сборнике [29.42].

Заполнение скважины водой ухудшает дифференциацию кривой против руды с содержанием железа от 40 до 70%, которые практически не различаются. Этот вывод справедлив также и для измерений по надтепловым нейтронам [23.5]. Для концентраций в руде железа (50—60%) изменение пористости на 5% ведет к погрешностям в определении железа на 15—20%. Для устранения их целесообразно измерять отношение скоростей счета тепловых к надтепловым нейтронам M. Такого рода зависимость M от содержания железа в рудах реальных скважин показана на рис. 23-30 [23.6] для зондов трех размеров. Из опробованных оптимальным является зонд размером 35 см, для которого дифференциация кривых получается наилучшей. Порог чувствительности ННК к железу следует оценить равным примерно 10—15%.

4. **Кадмий.** Некоторые сведения об этом элементе приводятся в п. 5 § 2 этой главы.

Опробованием метода ННК для определения в породах кадмия занимались И. П. Кошелев и др. [15.19, 16.8, 18.9, 20.54]. Наличие корреляционной связи между кадмием и цинком использовалось в этих работах для выявления сульфидов и определения в рудах цинка.

Скважины исследовались специальным прибором диаметром 73 мм с пропорциональным счетчиком типа СНМО-5. Снаружи этот детектор окружен экраном из кадмия и аморфного бора толщиной 15 мм с продольной щелью шириной 20 мм по всей длине счетчика. С помощью рессорной пружины прибор незаэкранированной стороной счетчика прижимался к стенке скважины. Для измерения надтепловых нейтронов вместо бора счетчик со всех сторон окружался парафином, а снаружи — кадмием. Применяемый источник имел выход $(4—5)\cdot 10^6$ нейтр/с. Кривые ННК записывались со скоростью 200 м/ч при постоянной времени 6 с,

а на участках детализации скорость снижалась до 50 м/ч при постоянной времени 12 с.

Установлено, что порог чувствительности к кадмию лежит в пределах 0,03—0,05 в зависимости от состава вмещающих пород. Насыщение кривых ННК-т достигается лишь при концентрациях кадмия 3%.

Присутствие в полиметаллических рудах железа в переменных количествах (от 20 до 30%) приводит к погрешностям в определениях кадмия, а соответственно и цинка. Переменное содержание в рудах влаги также мешает определению кадмия. Поэтому ее влияние необходимо исключать. Применение для этих целей комплекса методов ННК-т и ННК-н приводит также к понижению порога чувствительности к кадмию. Таким образом, в связи с наличием в полиметаллических рудах железа и влаги метод ННК может использоваться для выявления в них лишь богатых сфалеритовых руд с содержанием цинка свыше 5% [16.8].

5. **Ртуть.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 6 § 2 этой главы.

Исследования по выявлению возможностей ННК для определения ртути в породах выполнены Э. В. Егоровым и др. [6.17, 16.76, 20.20]. Измерения велись прибором, созданным на основе радиометра СРП-2, детектором нейтронов в котором служил люминофор типа ГОИ со составом Т-2, обогащенный бором-10. В экспериментах использовался полоний-бериллиевый источник с выходом $\sim 3{,}6 \cdot 10^6$ нейтр/с. Между источником и детектором располагался экран из парафина и кадмия. Результаты ННК-т сопоставлялись с данными ГГК-с, который также выполнялся прибором, созданным на основе СРП-2. Установлено, что дифференциация кривых ННК примерно в 2 раза превышает соответствующую величину при ГГК-с. Увеличение размера зонда ННК-т ведет к увеличению дифференциации кривых.

В связи с тем, что изменение диаметра скважин искажает показания ННК, в работе [20.20] были проведены специальные исследования в сухих скважинах, диаметр которых менялся от 50 до 220 см. Выяснено, что изменение диаметра от 50 до 220 мм при работе на зонде размером 20 см приводит к изменению показаний прибора на 20—25%.

Е. А. Соколовым и др. [16.66] для исключения мешающего влияния изменений влажности горных пород велись исследования по ДННК-т. Результаты сопоставления данных ДННК-т с данными ННК-т на одних и тех же зондах (l_1=3 см, l_2=18 см) показаны на рис. 23—31. Активность источников на первом и втором размерах зондов была одинаковой. Инверсия данных ННК-т наблюдалась при $l_п \approx 10$ см. Рудоносные песчаники четко выделяются по кривой ДННК-т. Аналогичные исследования проводились в сухих скважинах на зондах l_1=5 см и l_2=35 см ($l_п \approx 22$ см). Соотношение активностей источников составляло 1 : 5, а могло вообще меняться в пределах от 1 : 3 до 1 : 8 [16.66].

В зависимости от изменения минералогического состава руд порог чувствительности ННК-т к ртути может меняться в пределах 0,08—0,3%.

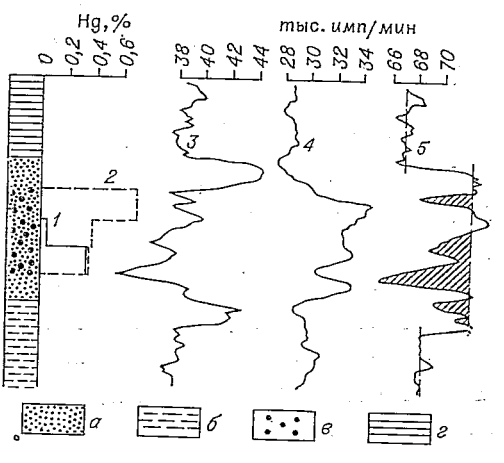


Рис. 23-31. Диаграммы ННК-т в ртутной скважине, заполненной водой: *1* и *2* — концентрации ртути в рудах по данным химического анализа керна и шлама, *3* и *4* — ННК-т на зондах 3 и 18 см, *5* — ДННК-т; *а* — песчаник, *б* — песчанистые сланцы, *в* — вкрапленность киновари, *г* — глинистые сланцы.

Таблица 23-8

Нейтронные и гамма-лучевые макроскопические сечения некоторых элементов

Элемент	Сечение для тепловых нейтронов, см²/г			Массовое макроскопическое сечение (см²/г) для гамма-квантов с энергией, кэВ			
	поглощения	рассеяния	полное	50	100	150	200
Ртуть . .	1,08	0,06	1,14	8,14	4,82	1,72	0,841
Сурьма .	0,028	0,022	0,050	10,04	1,416	0,674	0,342
Мышьяк .	0,033	0,048	0,081	3,15	0,626	0,628	0,172
Барий . .	0,005	0,035	0,040	14,14	2,60	0,89	0,41
Свинец .	0,0005	0,033	0,034	5,73	5,47	1,92	0,942
Цинк . . .	0,010	0,032	0,042	2,76	0,535	0,240	0,170
Железо .	0,027	0,119	0,146	1,93	0,372	0,196	0,200

При определении ртути в комплексных ртутно-сурьмяных, ртутно-мышьяковых и полиметаллических рудах ее оценке мешают сурьма, мышьяк, барий и другие химические элементы. Э. В. Егоровым и др. [6.17] проведены исследования по выяснению влияния сурьмы и бария на результаты определения ртути. Комплексируя метод ННК-т с методом ГГК-с, можно раздельно определять, например, содержание в комплексных рудах ртути, сурьмы и т. д.

Сравнение данных макроскопических сечений ртути и некоторых других элементов для тепловых нейтронов и мягкого гамма-излучения приводится в табл. 23-8. Макроскопическое сечение поглощения ртутью тепловых нейтронов намного превосходит макроскопические сечения других элементов. Макроскопические сечения поглощения гамма-лучей у ртути сравнимы лишь со свинцом. У других полезных ископаемых они значительно ниже, чем у ртути. Однако если учитывать истинные концентрации в рудах ртути и других элементов, макроскопические сечения резко изменяются. Об этом, в частности, можно судить по данным табл. 23-9. Промышленные концентрации ртути в 0,1% по сечениям для тепловых нейтронов сопоставимы практически со всеми другими элементами, содержащимися в рудах в количестве 10%. По гамма-лучевым свойствам макроскопические сечения ртути с содержанием 1% значительно ниже 10%-ных концентраций других элементов.

Таблица 23-9

Макроскопические сечения с учетом истинных концентраций (p) в рудах некоторых элементов, %

Элемент	Сечение поглощения для тепловых нейтронов (см²/г) с концентрацией		Массовые полные коэффициенты ослабления гамма-излучения (см²/г) для гамма-квантов с энергией, кэВ			
	(p_1)	(p_2)	(p_1)	(p_2)	(p_1)	(p_2)
			50		100	
Ртуть	$1{,}08\cdot10^{-3}$(0,1)	$1{,}08\cdot10^{-2}$(1)	$8{,}14\cdot10^{-3}$(1)	$8{,}14\cdot10^{-2}$(1)	$4{,}82\cdot10^{-3}$(0,1)	$4{,}82\cdot10^{-2}$(1)
Сурьма	$2{,}8\cdot10^{-4}$(1)	$2{,}8\cdot10^{-3}$(10)	0,1004(1)	1,004(10)	$1{,}416\cdot10^{-2}$(1)	0,1416(10)
Мышьяк	$3{,}3\cdot10^{-4}$(1)	$3{,}3\cdot10^{-3}$(10)	$3{,}15\cdot10^{-2}$(1)	0,315(10)	$6{,}26\cdot10^{-3}$(1)	$6{,}26\cdot10^{-2}$(10)
Барий	$5\cdot10^{-5}$(1)	$5\cdot10^{-4}$(10)	0,1414(1)	1,414(10)	$2{,}6\cdot10^{-2}$(1)	0,26(10)
Свинец	$5\cdot10^{-6}$(1)	$5\cdot10^{-5}$(10)	$5{,}73\cdot10^{-2}$(1)	0,573(10)	$5{,}47\cdot10^{-2}$(1)	0,547(10)
Цинк	$1\cdot10^{-4}$(1)	$1\cdot10^{-3}$(10)	$2{,}76\cdot10^{-2}$(1)	0,276(10)	$5{,}35\cdot10^{-3}$(1)	$5{,}35\cdot10^{-2}$(10)
Железо	$2{,}7\cdot10^{-3}$(10)	$5{,}4\cdot10^{-3}$(20)	0,193(10)	0,386(20)	$3{,}72\cdot10^{-2}$(10)	$7{,}44\cdot10^{-2}$(20)

Это и позволяет по комплексу методов ННК-т и ГГК-с разделять аномалии на ртутные и нертутные.

Характер зависимости измеряемого эффекта при ННК-т и ГГК-с от содержания в породах ртути и сурьмы показан на рис. 23-32 [6.17]. Кривые ННК и ГГК-с для ртути сильнее дифференцированы по сравнению с кривыми для сурьмы. Это можно использовать для раздельного определения каждого из рассмотренных элементов по комплексу этих методов. Если показания ННК и ГГК (см. рис. 13-32) выразить в эквивалентных содержаниях ртути (p_n, p_γ) в виде зависимости от содержания в комплексных рудах сурьмы, получим кривые, показанные на рис. 23-33 [6.17]. Пользуясь этой зависимостью, содержания ртути и сурьмы в рудах можно определить исходя из соотношений:

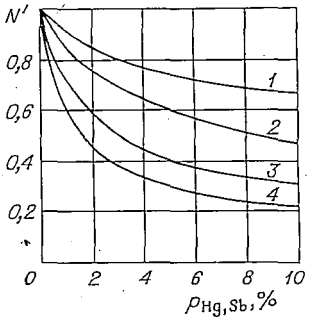


Рис. 23-32. Зависимость скоростей счета (отн. ед.) от содержания в руде сурьмы (*1* — ННК-31; *2* — ГГК-22) и ртути (*3* — ГГК-22; *4* — ННК-31).

$$p_{Hg} = \frac{\beta}{\beta - \alpha} p_n - \frac{\alpha}{\beta - \alpha} p_\gamma, \qquad (23\text{-}18)$$

$$p_{Sb} = \frac{\alpha\beta}{\beta - \alpha}(p_\gamma - p_n), \qquad (23\text{-}19)$$

где α и β — концентрации сурьмы по эффекту взаимодействия гамма-квантов и нейтронов, эквивалентные содержанию 1% ртути. В работе [6.17] эти коэффициенты оценены соответственно в 2,8 и 12,0. Соотношение (23-19) справедливо также и для бария в рудах.

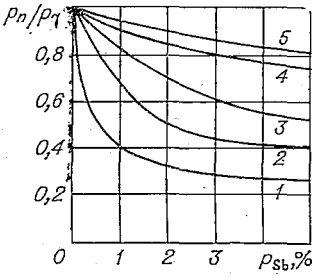


Рис. 23-33. Зависимость отношения p_n/p_γ от содержания сурьмы в комплексных рудах со следующими концентрациями ртути (%): *1* — 0,1; *2* — 0,5; *3* — 1,0; *4* — 3,0; *5* — 5,0.

На основе формул (23-18) и (23-19) построена номограмма, приведенная в сборнике [6.17]. Однако для пользования ею необходимо производить предварительный расчет по формулам, схожим с (23-18) и (23-19). В связи с этим она здесь и не приводится.

Рассмотренная комплексная методика авторами [6.17] использовалась для определения в рудах ртути и бария. Измерения велись прибором СРП-2к с соответствующей насадкой, измерения по ННК-т — с люминофором Т-1 и полоний-бериллиевым источником с выходом порядка $3 \cdot 10^6$ нейтр/с на зондах размером 25—31 см, а измерения ГГК-с с изотопом цезий-137 активностью 1—2 мл·экв радия на зондах размером 20—22 см.

Порог чувствительности комплекса методов ННК-т и ГГК-с для метровых интервалов оценен по ртути в 0,04% (0,04%/м). Средняя абсолютная погрешность определения ртути составляет 0,03%, а средняя относительная ошибка находится в пределах 4—8%.

Е. А. Соколовым и др. [6.17], В. Д. Табелевым и др. [16.62] для выделения ртути в сложных рудах с целью оценки влияния переменных концентраций влаги измерения по ННК-т рекомендуется вести на доинверсионном (7 см), инверсионном (26 см) и заинверсионном (47 см) зондах по точечным замерам. Исследования по ГГК-с при этом рекомендуется вести на зонде размером 25 см. Измерения по ННК-т на трех размерах зондов позволяли исключить влияние изменения не только влажности пород, но и каверн и диаметра скважин. Тип оруденения оценивался по характеру кривых ННК-т и ГГК-с. Если концентрации определяемого элемента одинаковы или отличаются на 15—20%, то руда считается мономинеральной. Содержание ртути в такой руде

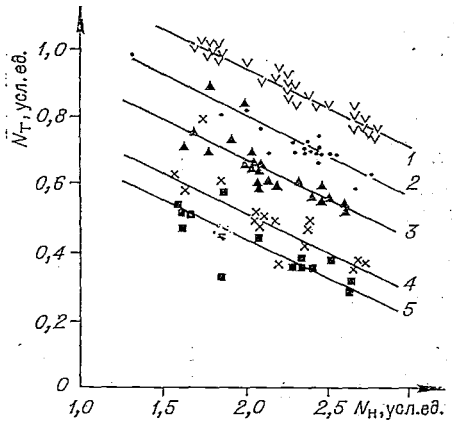


Рис. 23-34. Зависимость (отн. ед.) скорости счета тепловых $N_т$ нейтронов от надтепловых $N_н$ при измерениях в сухих необсаженных скважинах с различными содержаниями суммы редких земель в породах (%): *1* — 0,00; *2* — 0,06; *3* — 0,15; *4* — 0,30; *5* — 0,50.

определяется по ННК-т. Если же содержания по ННК-т и ГГК-с оцениваются значениями, отличающимися более чем на 20%, руда считается комплексной. Раздельное определение в руде ртути и сурьмы (или бария) ведется по изложенной выше комплексной методике.

Порог чувствительности на ртуть по этой методике при работе с указанными выше приборами и источниками оценен равным 0,08—0,1%.

6. **Редкоземельные элементы.** Некоторые сведения об этих элементах приводятся в § 9 главы 9 и § 2 этой главы.

Разработкой методики определения редкоземельных элементов в горных породах, пересеченных скважиной, занимался коллектив сотрудников Казахского филиала ВИРГа, М. М. Шварцман, И. П. Кошелев и др. [6.17, 15.19, 18.9].

Скважины исследовались специальными приборами с прижимной пружиной и бор-кадмиевым экраном с пазом в нем (см. п. 4 этого параграфа). Кривые ННК записывались на таких же скоростях, как и при определении кадмия в породах.

При сопоставлении результатов ННК-т и ННК-н они выражались в относительных единицах, значения скоростей счета в скважине нормировались к показаниям в баке с водой (высотой 1,75 м и диаметром 0,8 м).

В связи с тем, что показания ННК искажались за счет влияния переменных содержаний влаги, исследования велись по методике, описанной в п. 2 § 4 этой главы.

Размеры зондов были выбраны оптимальными — 23 см для ННК-т и 37 см для ННК-н. Первый из этих зондов является доинверсионным, а второй послеинверсионным. Увеличение водородосодержания пород приводило к противоположным эффектам на диаграммах ННК-т и ННК-н. Одна из номограмм, построенная для этих зондов, показана на рис. 23-34 [6.17].

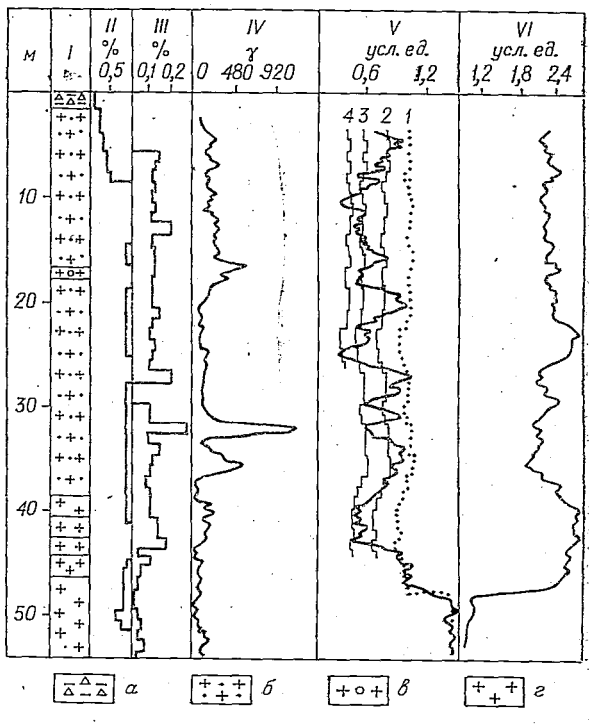


Рис. 23-35. Каротажные диаграммы по одной из скважин на редкоземельном месторождении.

I — геологическая колонка; II — выход керна; III — содержание суммы редких земель по опробованию керна; IV — диаграмма гамма-каротажа, V — диаграмма ННК-т; VI — диаграмма ННК-н. Графики *1, 2, 3* и *4* соответствуют содержанию в породе суммы редких земель 0,00; 0,06; 0,15 и 0,30%; *а* — суглинки, *б* — альбитизированные граниты, *в* — пегматитовые граниты, *г* — щелочные граниты.

Изменение водородсодержания пород не оказывает влияния на результаты определения суммы редких земель в рудах по этой методике.

В качестве примера на рис. 23-35 [6.17] приводятся результаты каротажа по одной из скважин редкометального месторождения. Авторы [6.17] отмечают, что по кривой фона (кривая *1* колонки V) можно выделить в интервале от 4 до 44 м рудную зону с содержанием суммы редких земель свыше 0,02%, принятую ими за порог чувствительности при работе с источником, имеющим выход $(4—6)\cdot 10^6$ нейтр/с. Интервалы, соответствующие кривой *3*, являются промышленными. Это зоны на глубинах 8—18; 22—26; 30—33 и 40—44 м. Из сопоставления данных ГК и ННК-т видно, что на кривой ГК пласты, содержащие редкие земли, не везде выделяются повышенными показаниями. Это указывает на отсутствие корреляционной связи между радиоактивными и нерадиоактивными элементами. Так, рудные зоны на глубинах 22—26 и 40—44 м, отвечающие промышленным концентрациям суммы редких земель в рудах, на диаграммах ГК вообще не выявляются.

В работе И. П. Кошелева и др. [18.9] показано также, что чувствительность ННК-т к определению суммы редких земель в породах меняется от 0,003 до 0,01% в зависимости от элементного состава этих пород. При концентрациях редких земель свыше 0,02—0,06% (по гадолинию) наступает насыщение кривых.

§ 8. Методика, основанная на измерении резонансных потоков нейтронов в скважинах

Как уже неоднократно отмечалось, в ННК применяются детекторы, основанные на захвате бором или литием нейтронов. Оба детектора являются широкополосными приемниками медленных нейтронов, эффективность которых меняется с энергией E по закону $1/\sqrt{E}$. Они могут применяться также для измерения эффективной энергии нейтронов путем пропускания потока нейтронов через борные фильтры (см. § 10 гл. 5). Однако по этой методике и по методике регистрации надтепловых нейтронов осуществляется также измерение потока нейтронов в широких областях энергий.

При решении же ряда задач ННК возникает необходимость измерения потоков нейтронов в некоторых узких локальных интервалах энергий. На практике эта задача может быть решена применением в приборах ННК резонансных фольг. Х. Е. Холлом [4.19] для детектирования резонансных энергий нейтронов предложены устройства, основанные на использовании гафния ($E_р$=1,1 эВ; 7,8 эВ) и индия ($E_р$=1,45 эВ). Для этих целей могут быть применены и другие резонансные фольги (см. табл. 5-8). Эти элементы, захватывая нейтроны в основном по реакции (n, γ), превращаются в радиоактивные изотопы, которые распадаются с различными периодами полураспада, испуская бета-частицы, позитроны и гамма-кванты. Х. Е. Холл для детектирования резонансных нейтронов предложил измерять наведенную активность образующихся изотопов с помощью различного типа бета- или гамма-счетчиков. Чтобы на эти счетчики не влияло гамма-излучение, возникающее в горной породе, счетчик с фольгой рекомендуется защищать снаружи свинцовым или вольфрамовым экраном толщиной $\sim$ 2,5 см. В связи с тем, что указанные фольги способны захватывать тепловые нейтроны, глубинный прибор снаружи рекомендуется окружать слоем кадмия. В зависимости от периода полураспада образующихся изотопов измерения по ННК-р следует вести либо непрерывно, либо по точечным замерам.

Задача измерения узкоэнергетических потоков нейтронов может быть решена при использовании реакции (n, γ), которая происходит при резонансных энергиях. Это и используется для регистрации резо-

нансных нейтронов в непрерывном режиме работы аппаратуры. Гамма-излучение радиационного захвата резонансной фольги-детектора лучше всего измерять с помощью сцинтилляционного счетчика, защищенного свинцом — для устранения влияния захватного гамма-излучения породы и кадмием или бором — для защиты люминофора от активации тепловыми нейтронами. Этот прием наиболее эффективно применять для определения в породах $\sim 0{,}1$—10% бора [19.63, 23.16].

Кроме того, для непрерывных измерений потоков нейтронов могут быть использованы два сцинтилляционных детектора надтепловых нейтронов, совмещенных торцами и работающих по схеме компенсации. Один из них окружается резонансным фильтром (см. § 8 гл. 5). Однако такие устройства при работе с ампульными источниками можно применять для точечных измерений резонансных нейтронов. Для измерения потоков нейтронов в процессе подъема глубинного прибора необходимо использовать мощные источники порядка 10^8 нейтр/с. Такие потоки нейтронов могут быть получены с помощью генераторов нейтронов.

Возможности ННК-р рассмотрим на примере расчетов и экспериментов.

Теоретические исследования в этом направлении проведены И. А. Козачком [23.24], рассчитывавшим пространственно-энергетическое распределение замедлившихся нейтронов в однородной безграничной среде, содержащей элементы с высокими резонансными сечениями. Им, в частности, показано, что распределение замедлившихся нейтронов $J_н(r, u)$ в среде, содержащей элементы с высокими резонансными сечениями, пропорционально плотности потока $j_н(r, u)$ замедления нейтронов до рассматриваемой энергии, умноженной на функцию, описывающую уменьшение плотности потока нейтронов за счет резонанса $P(r, u)$

$$J_н(r, u) = j_н(r, u)\, P(r, u). \qquad (23\text{-}20)$$

Функция $j_н(r, u)$ рассчитана исходя из кинетического уравнения. Однако при грубых расчетах вместо этой функции можно пользоваться соотношениями (22-4), (22-25) (при оценке нейтронных параметров не до 1 эВ, а до соответствующих резонансных энергий $E_р$, например, до 5,23 эВ в случае резонанса серебра или до 1,45 эВ в случае резонанса индия и т. д.).

Функция $P(r, u)$ в выражении (23.20) для больших значений летаргии u стремится к своему асимптотическому значению, не зависящему от координат:

$$P_{as} = 1 - \frac{J(\infty)}{\xi_н}\left[1 - \frac{C}{2} J(\infty)\right], \qquad (23\text{-}21)$$

где $C = 0{,}5772$ — постоянная Эйлера; $J(\infty)$ — эффективный резонансный интеграл, определяемый соотношением

$$J(\infty) = \frac{\pi \Gamma}{2E_р} \lambda_s n_A \sigma_р (1 + \lambda_s n_A \sigma_р)^{-1/2}, \qquad (23\text{-}22)$$

здесь Γ — полная ширина резонансного уровня; $E_р$ — энергия резонанса; λ_s — средняя длина свободного пробега нейтронов по отношению к рассеянию; n_A — число ядер в единице объема породы, на которых происходит резонансный захват нейтронов; $\sigma_р$ — максимальное сечение резонанса.

При достаточно высоких произведениях $n_A \sigma_р$, когда имеет место соотношение $\lambda_s n_A \sigma_р \gg 1$, выражение (23-22) приобретает более простой вид:

$$J(\infty) = \frac{\pi \Gamma}{2E_р} \sqrt{\lambda_s n_A \sigma_р}. \qquad (23\text{-}23)$$

Таблица 23-10

Концентрации резонансных элементов (вес. %), приводящие к уменьшению измеряемого эффекта по сравнению с вмещающей породой

Элемент	Энергия первого резонанса $E_р$, эВ	Эффективное сечение, барн	Песчаник SiO_2			Влажный песчаник (20 % H_2O)		Промышленные концентрации, %
			Вызываемый эффект, %					
			33	50	60	25	50	
As*	47	34	4,55	9,53	13	—	—	0,02—30
In	1,45	$2{,}7\cdot10^4$	0,030	0,051	0,066	—	—	$(1—2)\cdot10^{-3}$
Sb	5,7	38	1,3	3,0	4,0	—	—	0,04—50
Ta	4,2	4150	0,58	1,20	1,67	—	—	$(o,\ n—n)\cdot10^{-2}$
Sm	0,0962	$1{,}5\cdot10^4$	0,0054	0,0082	0,0099	0,1	0,2	0,01—1,2
Cd	1,93	10^5	$3{,}7\cdot10^{-4}$	$5{,}6\cdot10^{-4}$	$6{,}7\cdot10^{-4}$	0,006	0,013	0,01—1,5

* Мышьяк является интенсивным рассеивателем нейтронов.

С помощью соотношения (23-22) в работе [23.24] произведены расчеты для некоторых резонансных элементов, которые сведены нами в табл. 23-10. В ней указаны концентрации элементов, приводящие к уменьшению измеряемого эффекта по сравнению с вмещающей средой, представленной теми же элементами, что и руды, но без содержания резонансного элемента. Видно, что при помощи метода ННК-р резонансные элементы с наибольшей эффективностью могут выявляться в породах, не содержащих водорода. В этом случае ННК-р может быть применен для определения средних концентраций мышьяка и сурьмы, весьма низких концентраций самария и гадолиния, причем гадолиний можно выявлять с высокой эффективностью и во влажных породах. Промышленные концентрации индия и тантала при помощи ННК-р определять практически невозможно.

Подобные исследования должны быть продолжены применительно к цилиндрической геометрии.

Н. И. Сотниченко использовал метод ННК-р с активационно-резонансным детектором для выявления высоких концентраций бора в разрезах скважин. Для проведения ННК-р был приспособлен прибор ГНК, в котором вместо нейтронного люминофора был установлен гамма-люминофор (кристалл йодистого натрия диаметром 35 мм и высотой 30 мм). Источником нейтронов служил полоний-бериллиевый препарат с выходом порядка $3\cdot10^6$ нейтр/с. Между источником и детектором располагался слой свинца.

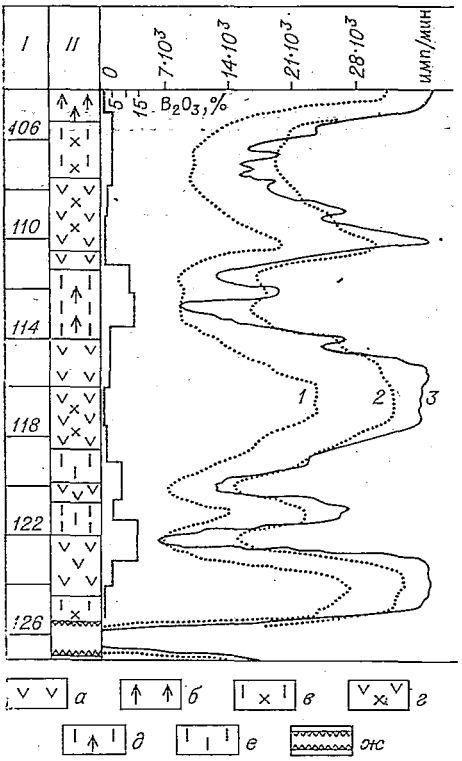


Рис. 23-36. Каротажные диаграммы ННК-т (*1* и *2*) и ННК-р (*3*).

1 — зонд 46 см, v=108 м/ч; *2* — зонд 30 см, v=400 м/ч; *3* — зонд 25 см, v=84 м/ч; *а* — кварцевая порода; *б* — геденбергит; *в* — кальцит-геденбергитовая порода; *г* — кварц-кальцитовая порода; *д* — датолит-геденбергитовая порода; *е* — датолит-гранатовая порода; *ж* — каверна.

Бор в породах измерялся по регистрации резонансных нейтронов серебра (5,23 эВ). С этой целью на кристалл йодистого натрия надевалась фольга из серебра. Чтобы она не захватывала тепловые нейтроны, на корпус прибора снаружи надевался кадмиевый экран. Прибор к стенке скважины прижимался с помощью рессорной пружины. Оптимальный размер зонда был выбран равным 25 см, а оптимальная скорость каротажа — 84 м/ч.

Результаты сопоставления диаграммы ННК-р с лучшими диаграммами ННК-т, полученными при измерениях прибором ГНК, показаны на рис. 23-36. Видно, что диаграммы ННК-р имеют более высокую дифференциацию по сравнению с диаграммами ННК-т. Градуировочная кривая ННК-т начинала выполаживаться с 2,5% бора (7,5% B_2O_3), а кривая ННК-р была линейна для всего изучавшегося диапазона концентраций бора от 0 до 5% или 0—15% B_2O_3. Однако Н. И. Сотниченко не оценены ни погрешности измерений, ни влияние диаметра скважин на показания ННК-р. Это справедливо и для кривых рис. 23-26.

Б. С. Вахтиным, В. С. Ивановым, А. В. Новоселовым и Е. М. Филипповым (ИГиГ СО АН СССР) для определения высоких концентраций бора в породах разработана методика ННК-р с радиационно-резонансными детекторами. Прибором служил каротажный радиометр ПРКС-2 с кристаллом йодистого натрия диаметром 20 мм и высотой 63 мм. Для регистрации нейтронов в области широкого диапазона энергий (0,025—10 эВ) на кристалл надевался сложный фильтр, состоящий из фольг кадмия ($E_р$ = 0,178 эВ), родия (1,26 эВ), индия (1,45 эВ), тулия (3,9 эВ), тантала (4,28 эВ) и серебра (5,23 эВ). Такой детектор чувствителен и к низким, и к высоким концентрациям бора в породах. При низких концентрациях бора регистрация нейтронов в основном осуществляется по гамма-излучению радиационного захвата кадмия, а при высоких — в основном по гамма-излучению, возникающему в резонансных фольгах [23.16, 36.15].

Для размещения источника ($1{,}1 \cdot 10^6$ нейтр/с) снизу к гильзе прибора крепилось зондовое устройство. Размер зонда выбран 25 см. Пространство между источником и детектором заполнялось свинцом. Для подавления гамма-излучения, идущего из породы, на корпус прибора против детектора крепилась свинцовая обойма толщиной 7 мм.

Исследования по ННК-р с указанной аппаратурой велись в сухих скважинах диаметрами 59,79 и 168 мм. Градуировочные кривые показаны на рис. 23-37. Увеличение диаметра скважины вело к выполаживанию кривых. Поэтому для исследования скважин большого диаметра необходимо увеличивать размер зонда и активность источника. При изучении скважин различного диаметра ННК-р необходимо комплексировать с кавернометрией, пользуясь номограммой, показанной на рис. 23-38.

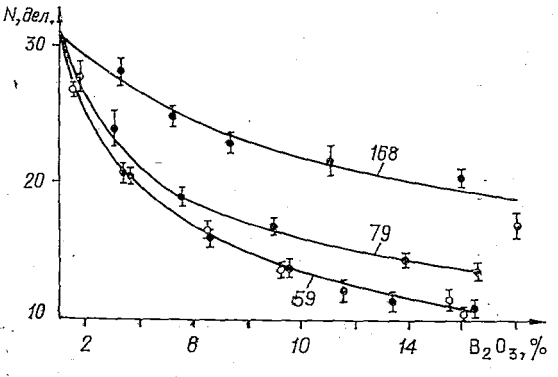


Рис. 23-37. Градуировочные кривые, нормированные при концентрации 1% B_2O_3. Нормировочные коэффициенты для скважин диаметрами 59, 79 и 168 мм приняты соответственно 1,03; 1,00 и 0,687.

Для оценки погрешностей определения бора в породах кривые рис. 23-37 были продифференцированы, после чего погрешности оценивались в соответствии с формулой (7-28). Гистограмма распределения ошибок показана на рис. 23-39. В 70% случаев относительная ошибка определения борного ангидрида в диапазоне 0—18% B_2O_3 (0—6% B) не выходила за пределы 4—12%.

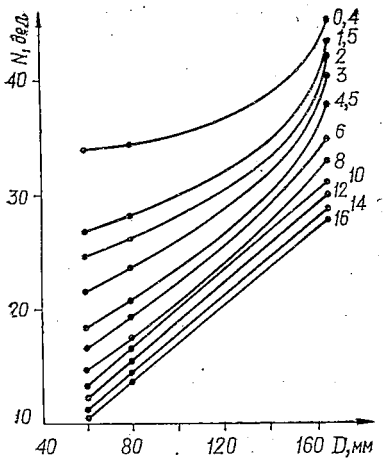


Рис. 23-38. Номограмма для учета влияния диаметра скважины. Шифр кривых — концентрации борного ангидрида, %.

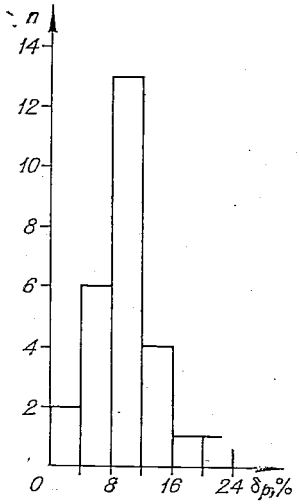


Рис. 23-39. Гистограмма распределения ошибок определения борного ангидрида.

Средняя погрешность по всем замерам оценена в 10%. Порог чувствительности ННК-р к бору равен 0,2—0,3% B_2O_3 (0,07—0,1% B).

Из изложенного видно, что для определения в породах бора может применяться гамма-сцинтилляционная аппаратура, имеющая наибольшее распространение по сравнению с приборами, оборудованными нейтронными сцинтилляторами. Если гамма-сцинтиллятор при этом обворачивать, например, только серебряной фольгой и снаружи на свинцовый экран надевать кадмий, поглощающий тепловые нейтроны, то можно создать прибор, чувствительный только к высоким концентрациям бора в породах. Это вытекает и из рис. 23-28.

Глава 24

НЕЙТРОННЫЙ ГАММА-МЕТОД

Существует две основные разновидности нейтронного гамма-метода: одна основана на измерении гамма-излучения радиационного захвата медленных нейтронов — реакция (n, γ) — НГМ, другая — на регистрации гамма-излучения неупругого рассеяния быстрых нейтронов — реакция $(n, n'\gamma)$ — НГМ′. Обе методики применяются в лабораторном анализе и при исследовании разрезов скважин. Для исследования разрезов скважин НГМ впервые в апреле 1940 г. предложен Б. М. Понтекорво [24.60]. В полевых исследованиях и при изучении разрезов скважин применяется также комбинированная методика НГМ+ННМ-т при измерениях с гамма-счетчиками, обернутыми кадмием. В связи с этим методика сокращенно обозначается также в виде НГК-Cd.

В. П. Иванкиным [24.13] для определения плотностей горных пород разработана также разновидность НГМ, основанная на измерении рассеянного гамма-излучения и называемая нейтронным гамма-гамма-методом (НГГМ). Однако в связи с тем, что этот метод только что начи-

нает применяться, мы его специально рассматривать не будем. По аналогии с ИННМ′ (см. введение к гл. 22) можно реализовать также ИНГМ′ (реакция (n, γ)) и, возможно, ИНГМ″ (реакция $(n, n'\gamma)$). Однако в связи с тем, что этот метод еще не разработан, не будем его здесь рассматривать вообще.

§ 1. Лабораторные методы анализа

Методы НГМ′ и НГМ только что начинают применяться для лабораторного анализа геологических объектов в связи с внедрением методов спектрометрии жесткого гамма-излучения, возникающего при этом. Оба метода, как отмечалось в гл. 4, в основном применяются для анализа в пробах первой трети элементов периодической системы Менделеева (примерно до цинка), за некоторым исключением. Такая ограниченность метода связана главным образом с тем, что с увеличением массы ядра возрастает число возбуждаемых уровней, что в свою очередь приводит к усложнению спектра возникающего при этом гамма-излучения. Поэтому в породах сложного состава становится практически невозможным выявить элементы с большим атомным весом.

1. **Нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния быстрых нейтронов.** Порог реакции $(n, n'\gamma)$, на которой основан НГМ′, определяется следующим соотношением [29.23]:

$$E_t = E_\gamma \frac{A+1}{A}, \qquad (24\text{-}1)$$

где E_γ — энергия первого уровня возбуждения ядра; A — массовое число исследуемого химического элемента.

С помощью НГМ′ при облучении геологических объектов в пробах прежде всего можно определять химические элементы, приведенные в табл. 24-1.

К настоящему времени разработана методика анализа в пробах руд железа [24. 42]. Природное железо, как известно, состоит из четырех стабильных изотопов с массовыми числами 54 (5,84%), 56 (91,68%), 57 (2,17%) и 58 (0,31%). Некоторые другие сведения об этом элементе рассматриваются в § 6 гл. 35.

В природе, как видно, наиболее распространен изотоп железа с массой 56. Под действием быстрых нейтронов на ядрах этого изотопа преимущественно возникают гамма-кванты с энергией 0,84 МэВ. Для энер- 1,36 барн (0,0146 см²/г). Эта величина сечения соответствует примерно гии нейтронов 4,25 МэВ сечение реакции Fe^{56} $(n, n'\gamma)$ Fe^{56} равно средней величине энергий нейтронов полоний- и плутоний-бериллиевых источников (см. табл. 1-4).

Схематическое устройство установки, использованной в работе [24.42] для анализа в пробах железа по НГМ′, показано на рис. 24-1.

Таблица 24-1

Перечень некоторых изотопов, вступающих в реакцию $(n, n'\gamma)$

Изотоп	Распространенность, %	Энергия гамма-квантов первого уровня E_γ, Мэв	Пороговая энергия нейтронов E_t, МэВ	Массовое сечение реакции (см²/г) для нейтронов с энергией (МэВ)
Углерод-12 . .	98,892	4,43	4,80	0,015 (14)
Кислород-16 .	99,758	6,06	6,44	0,0075 (14)
Магний-24 . .	78,6	1,39	1,45	0,0188 (2,5)
Алюминий-27 .	100	2,21	2,3	0,0141 (2,5)
Кремний-28 .	92,27	1,78	1,84	~0,0085 (2,5)
Сера-32 . . .	95,1	2,23	2,30	0,0071 (2,5)
Кальций-40 .	96,97	3,74	3,84	~0,006 (2,5)
Железо-56 . .	91,68	0,84	0,854	0,0118 (2,8)

Пробы облучались с помощью нейтронов плутоний-бериллиевого источника с выходом около $1 \cdot 10^6$ нейтр/с. Засыпались они в луцитовые кассеты размерами $30 \times 20 \times 3$ см^3. Гамма-излучение измерялось сцинтилляционным счетчиком, люминофором в котором служил кристалл йодистого натрия, активированного таллием, диаметром 3,8 см и толщиной 2,5 см. Измерение спектра излучения осуществлялось с помощью 400-канального анализатора. При длительности замера 10 мин абсолютная ошибка определения железа оценена в 1,6%. Более точные данные получаются при измерениях по ББМ (см. гл. 15).

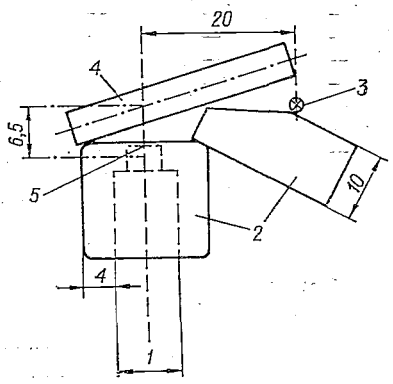


Рис. 24-1. Схема установки для анализа железа в пробах по НГМ[1] (размеры в сантиметрах).

1 — детектор, *2* — свинец, *3* — источник нейтронов, *4* — проба, *5* — фильтр из свинца толщиной 2 мм.

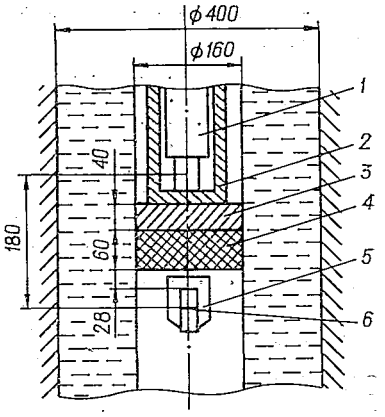


Рис. 24-2. Установка «Нейтрон-3» для измерений по НГМ (размеры в миллиметрах).

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

В связи с тем, что в ряде руд железа может встречаться марганец, при длительных замерах по реакции Mn^{55} (n, γ) Mn^{56} образуется марганец-56 с периодом полураспада 2,576 ч. При распаде этого изотопа излучаются гамма-кванты с энергией 0,845 МэВ (68,75%). Это излучение может мешать определению железа по НГМ′. Чтобы излучение в пробах не наводилось, их размеры не следует брать слишком большими. В противном случае в них могут замедляться нейтроны и происходить реакция (n, γ) на марганце. Вблизи установки НГМ′ не должны присутствовать также посторонние предметы, в которых нейтроны могли бы замедляться и диффундировать в пробу.

2. **Нейтронный гамма-метод радиационного захвата медленных нейтронов.** Реакция (n, γ), на которой основан НГМ, наибольшую вероятность имеет при захвате тепловых нейтронов и может применяться для анализа в пробах кадмия и других элементов, приведенных в табл. 24-2. Мгновенное гамма-излучение возникает и при захвате нейтронов бором.

Бор. Некоторые сведения об этом элементе содержатся в § 1 гл. 23. Гамма-излучение с энергией 479 кэВ при захвате бором медленных нейтронов, как уже неоднократно отмечалось, возникает при реакции (n, α) на изотопе бор-10. В 93% случаев эта реакция идет с образованием возбужденного ядра лития-7, переход которого в стабильное состояние происходит через $5{,}2 \cdot 10^{-14}$ с. Это время сопоставимо со временем перехода возбужденных в реакции (n, γ) ядер атомов в стабильное состояние. Поэтому методика анализа бора по гамма-квантам с энергией 479 кэВ аналогична рассматриваемой здесь методике НГМ.

Возможность определения бора в пробах пород по регистрации гамма-квантов с энергией 479 кэВ рассматривается в работе [24.11]. Измерения производились на установке СНУ (см. § 1 гл. 22), для регистрации гамма-излучения в которой использовался датчик радиометра

Таблица 24-2

Пороги чувствительности (p_0) НГМ (вес. %) при анализе проб чистых соединений, по данным ВНИИЯГГа (см. также табл. 31-1)

Элемент	Массовое макроскопическое сечение поглощения нейтронов, $см^2/г$	Энергетический интервал измерений, МэВ	Вес пробы при измерениях с кристаллом йодистого натрия различных размеров		
			1 кг		6 кг
			40×50 мм	70×70 мм	70×70 мм
Азот	0,081	8,6	0,1—0,5	1—2	—
Алюминий	0,005	6,7—7,7	5—10	—	—
Кремний	0,003	4,0—5,0	1—5	2—5	2,0
Сера	0,009	4,0—5,2	0,5—1,0	—	0,2—1,0
Кальций	0,006	5,2—6,7	5—10	2—5	2,0
Титан	0,073	5,0—6,6	—	0,2	—
Хром	0,035	7,8—10,0	0,1—0,5	0,2	—
Марганец	0,143	6,0—8,0	0,2	0,1	—
Железо	0,027	6,6—9,0	0,5	0,3	0,2
Никель	0,046	>8,0	0,3	0,2	0,1
Медь	0,035	6,0—8,0	0,5	0,3	0,2

Примечание. Для хрома и железа p_0 для проб весом 0,2 кг при измерениях с кристаллом 70×70 мм оценивается равным соответственно 0,5 и 1—2%.

СРП-2 с кристаллом йодистого натрия. Кристалл снаружи экранировался слоем кадмия толщиной 0,5 мм, чтобы он не активировался тепловыми нейтронами. Вместо алюминиевой гильзы датчика радиометра СРП-2 в экспериментах использовался картон. Это сделано для исключения влияния наведенной активности алюминия, содержащегося в материале гильзы.

В установке применялся полоний-бериллиевый источник нейтронов с выходом $5 \cdot 10^5$ нейтр/с. Расстояние между источником и пробой в замедлителе выбиралось равным 5—7 см. Гамма-излучение измерялось амплитудным анализатором типа АИ-100-1 («Радуга»). Питание счетчика осуществлялось от высоковольтного стабилизированного выпрямителя [24.11].

В качестве проб использовалась смесь сухого песка с бурой. Такие пробы толщиной 1,5 $г/см^2$ помещались в фигурные кассеты из оргстекла. Скорость счета, полученная при облучении пробы с чистым песком, принималась за фон. Приращение площади над фоновой кривой в области 479 кэВ бралось в качестве функции от содержания в пробах бора. Порог чувствительности к определению бора по рассматриваемой методике оценен примерно равным 0,03% бора, т. е. таким же, как и при измерениях по ННМ-т.

И. Н. Плаксиным и др. [24.28] для определения бора по этой методике использовалась установка, служившая для определения кадмия (см. ниже). Градуировочные графики, полученные при измерениях с газоразрядными и сцинтилляционными счетчиками соответственно для диапазонов концентраций бора от 0 до 10% и от 0 до 50%, носили линейный характер.

Сера. Природная сера состоит из четырех стабильных изотопов с массовыми числами 32(95,018%), 33(0,750%), 34(4,215%) и 36(0,017%). Среднее содержание серы в земной коре равно 0,05%. Промышленными источниками серы являются самородная сера и пирит (FeS_2). Содержание серы в минеральном сырье может меняться в пределах от 8 до 70%.

Под действием тепловых нейтронов происходит реакция S^{34} (n, γ) S^{35}, сечение которой равно 0,26 барн ($4{,}6 \cdot 10^{-3}$ $см^2/г$). Гамма-излучение, возникающее при этом, имеет энергию 0,84(47%), 2,41(30%), 2,97(13%), 3,27(19%), 4,87(12%), 5,44(48%) и 7,8(2,6%) МэВ.

Схематическое устройство установки, использованной во ВНИИЯГГе [24.12, 28.79] для определения в пробах элементов по НГМ, показано на рис. 24-2. Установка изготовлялась из материалов, имеющих по возможности наименьшее сечение радиационного захвата медленных нейтронов (дерево, плексиглас, парафин, вода). В центре установки располагался канал диаметром 16 см, в который помещались источник, проба, детектор и т. п. Для умягчения спектра быстрых нейтронов источник размещался в свинцовой оболочке толщиной 2 см. Между этой оболочкой и пробой устанавливался слой замедлителя величиной 1—2 см. Пробы засыпались в плексигласовые кассеты диаметром 15,5 см и различной высоты — в зависимости от навески используемой пробы. Для защиты детектора от потока тепловых нейтронов на их пути устанавливался слой замедлителя (парафин) толщиной 4 см. Детектор к тому же окружался слоем карбида бора. В качестве источников нейтронов применялись полоний-бериллиевый и полоний-борный с выходом $n \cdot 10^5$ нейтр/с. Собственное гамма-излучение у первого из них имеет энергию 4,43 МэВ, а у второго — 3,8 МэВ. При работе с полоний-бериллиевым источником на ядрах кислорода и углерода происходит реакция $(n, n'\gamma)$ с появлением гамма-квантов с энергией 6,06 и 4,43 МэВ соответственно. При измерениях с полоний-борным источником это излучение практически исключалось. В связи с этим полоний-бериллиевые источники в НГМ рекомендуется применять в основном для анализа элементов при регистрации жесткого гамма-излучения с энергией свыше 6,06 МэВ, а полоний-борные — при регистрации излучения с энергией свыше 3,8 МэВ.

Для определения серы в серных рудах измерялось гамма-излучение радиационного захвата в диапазоне энергий 4,2—5,2 МэВ. Это излучение измерялось с помощью кристалла йодистого натрия диаметром и высотой 7 см. Спектр излучения фиксировался анализатором АИ-100 или СГС-1 (см. гл. 6).

В серных рудах в значительном количестве находится кальций, содержание которого также необходимо было измерить. В работе [24.12] показано, что кальций фиксируется по излучению с энергией $E_1 = 5{,}4 = 6{,}4 - 1$; $E_2 = 5{,}9 = 6{,}4 - 0{,}5$ и $E_3 = 6{,}4$ МэВ. В связи с этим определение его велось при регистрации излучения в диапазоне 5,2—6,7 МэВ.

Для анализа использовались пробы весом 6 кг. Раздельное определение серы и кальция велось с помощью системы из двух уравнений. Порог чувствительности при определении серы оценен равным 0,2—1% в зависимости от содержания в пробах кальция. Порог чувствительности кальция составлял 1—5%. Относительные погрешности измерений на оба эти элемента не выходили за пределы 5%. Время измерений равнялось 15 мин.

Железо. Об этом элементе см. в пункте, посвященном НГМ'. При захвате железом тепловых нейтронов по реакции Fe^{56} (n, γ) Fe^{57} возникают гамма-кванты с энергией 1,63(6,1%), 1,72(6,4%), 5,92(8,7%), 6,03(7,9%), 7,28(5,3%) и 7,64(31,5%) МэВ. Наиболее интенсивным является гамма-излучение с энергией 7,64 МэВ, которое и используется для анализа железа в пробах по НГМ. Железо в пробах руд измерялось на установках рис. 24-3 [24.42].

В работе [24.42] для анализа железа применялся плутоний-бериллиевый источник с выходом $1 \cdot 10^6$ нейтр/с. Детектором служил кристалл йодистого натрия, активированный таллием, диаметром 4,4 см и толщиной 5,1 см. Чтобы кристалл

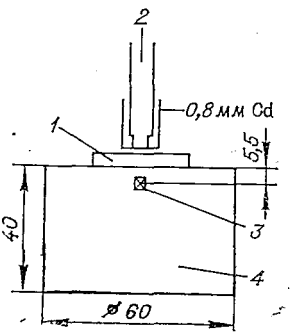


Рис 24-3. Установка для измерений по НГМ (размеры в сантиметрах).
1 — проба, *2* — детектор, *3* — источник нейтронов, *4* — парафин.

не активировался нейтронами, его снаружи окружали слоем кадмия. Гамма-излучение радиационного захвата кадмия имеет в основном энергию 0,56 МэВ, поэтому оно не мешает определению железа.

Из породообразующих элементов, содержащихся в рудах железа, в его определении создавать помехи могут марганец и кремний. Марганец, как известно, имеет высокое сечение радиационного захвата нейтронов — 12,6 барн (0,137 см^2/г) и испускает жесткие гамма-кванты с энергией, близкой к величине 7,64 МэВ. Так, у марганца имеется линия с энергией 7,04(9,1%), 7,15(5,5%) и 7,26(12,3%) МэВ. Поэтому при совместном нахождении в рудах железа и марганца их необходимо подвергать дополнительному анализу. Марганец при этом может быть определен по НА (см. гл. 25). Алюминий также вступает в реакцию (n, γ) и испускает гамма-кванты с энергией 7,7 МэВ (30%).

В связи с этим в спектре алюминия, кроме этой линии, проявляются гамма-кванты с энергией $E_1=6{,}7=7{,}7-1$; $E_2=7{,}2=7{,}7-0{,}5$ МэВ. Однако массовое макроскопическое сечение реакции (n, γ) примерно в 5 раз ниже, чем для железа. Кроме того, алюминий в рудах железа содержится в небольших количествах и поэтому не мешает определению железа [14.3]. У кремния же наиболее интенсивной является линия с энергией 4,93 МэВ и, следовательно, наибольшее влияние будет оказывать при измерении гамма-квантов диапазон энергий 3,9—4,9 МэВ.

В работе [14,3] показано также, что определению железа в рудах может мешать изменение пористости и влажности проб. Для устранения этого фактора предлагается измерять отношение скоростей счета, обусловленных содержанием в пробе железа ($E_\gamma=7{,}64$ МэВ) и кремния ($E_\gamma=4{,}93$ МэВ). Однако это справедливо лишь в том случае, если концентрации этих элементов в рудах взаимосвязаны. Иначе в качестве опорной линии следует использовать гамма-кванты других энергий. Наилучший результат следует ожидать при регистрации какой-либо другой линии гамма-квантов железа.

При работе с источником $1{,}2\cdot10^7$ нейтр/с в отсутствие мешающих элементов железо может быть определено с точностью до 1% [14.3].

В трудах [24.18, 28.79, 32.9] для определения железа в рудах гамма-излучение измерялось в диапазоне энергий 6,6—9,5 МэВ (рис. 24-4 *а*). Градуировочный график для этого типа руд показан на рис. 24-4, *б*. Измерения велись для проб весом 0,2; 1 и 6 кг. Порог чувствительности при определении железа в таких пробах оценен соответственно равным 0,5; 0,3 и 0,2%. Относительная погрешность определения железа в пробах весом 0,2 кг для концентрации от 20% и выше составляла 2%, а для проб весом 1 кг при содержании железа свыше 30%—1—2%.

В исследовании [24.18] показано, что с помощью НГМ можно опробовать железо в отбитой руде весом порядка 40 кг непосредственно в карьерах и горных выработках. А. М. Блюминцев и др. [14.4] показали также, что НГМ может быть использован и для определения железа в вагонетках. Источник и детектор при этом могут располагаться с разных сторон вагонетки, т. е. по просвечиванию пучка (методика НГМп).

Никель. Природный никель состоит из четырех стабильных изотопов с массовыми числами 58(67,6%), 60(26,16%), 61(1,25%) и 62(3,66%). Среднее содержание никеля в горных породах по весу равно $8\cdot10^{-3}$%. Содержание никеля в рудах может достигать 0,26—5%. В реакцию (n, γ) вступает изотоп никель-58. Захват нейтронов в этой реакции приводит к возникновению жестких гамма-квантов с энергией 6,84(10,8%), 8,51(12,3%) и 8,996(28%) МэВ. Из этих линий для анализа никеля удобно использовать последнюю. В связи с тем, что никель встречается в совместных железо-никелевых рудах, определению в них никеля мешает железо. С этой целью измерение спектра радиационного

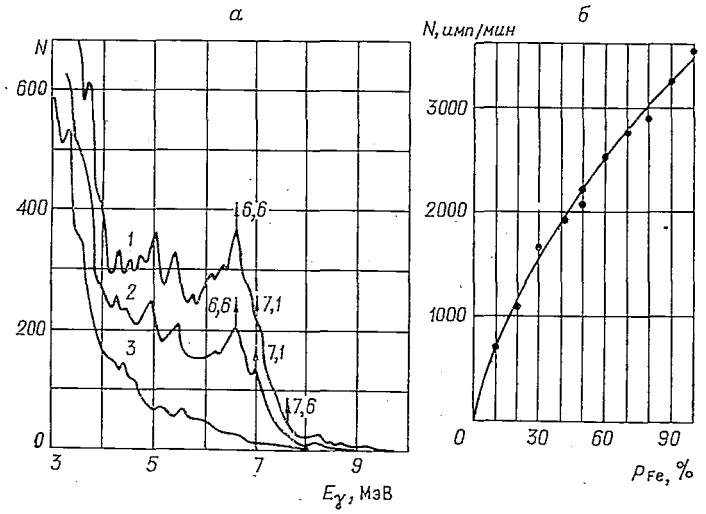


Рис. 24-4. Спектр гамма-излучения (*а*) и градуировочный график (*б*) руд железа в пробах.
1 — железо (100%), *2* — железо (40%) и песок (60%), *3* — песок (100%).

захвата гамма-лучей в работе [14.3] предлагается вести в двух областях энергий: 7,4—8,2 МэВ (при определении железа) и 8,6—9,5 МэВ (при определении никеля). Порог чувствительности при определении никеля оценен в 0, *n*%.

При измерениях на установке «Нейтрон-3» в случае работы с АИ-100 определение никеля в рудах велось по измерению спектра в интервале энергий 7,8—8,0 МэВ. Изменение железа в рудах от 10 до 50%, как отмечается в работе [24.18], практически не влияло на определения никеля в пробах. При работе с аппаратурой, обеспечивающей стабилизацию энергетической шкалы излучения с точностью до ±0,5%, содержания никеля в пробах весом 0,2; 1 и 6 кг можно определять с порогом чувствительности соответственно 0,3; 0,2 и 0,1%. Концентрации ниже 0,5% в больших навесках проб можно устанавливать с абсолютной точностью 0,05%, а концентрации свыше 0,5% — с абсолютной ошибкой 0,09%. При анализе проб весом 1 кг с содержанием никеля свыше 0,5% относительная погрешность не выходит за пределы 4—5%

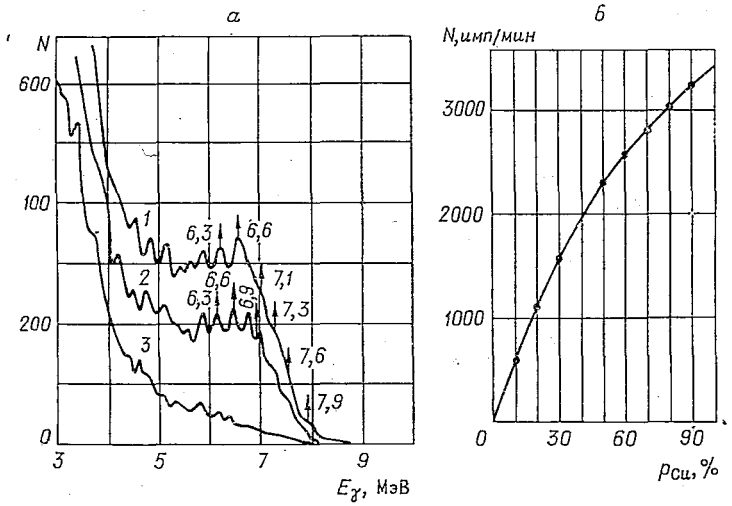


Рис. 24-5. Спектр гамма-излучения (*а*) и градуировочный график (*б*) меди в пробах.
1 — медь (100%), *2* — медь (40%) с песком (60%), *3* — песок (100%).

Допустимой по требованиям ГКЗ считается погрешность 7% при содержании в рудах никеля свыше 1%.

Содержание железа в совместных рудах оценивалось по измерению излучения в диапазоне энергий 6,5—7,7 МэВ. Абсолютная погрешность составляла 0,9%.

Медь и некоторые другие элементы с невысокими атомными номерами.

Природная медь состоит из двух стабильных изотопов с атомными номерами 63 (69,1%) и 65 (30,9%). Среднее содержание меди в земной коре по весу равно 0,02%. В промышленных рудах содержание меди может меняться примерно от 0,3 до 10%. Реакция (n, γ) происходит преимущественно на изотопе медь-63. При этом возникают жесткое гамма-излучение с энергией 7,91(22%), 7,63(11%), 7,29(8%) МэВ и другие, менее интенсивные линии.

Спектры меди и смеси меди с песком показаны на рис. 24-5, *а*, а градуировочный график — на рис. 24-5, *б* [24.12]. Медь в рудах следует определять по регистрации гамма-излучения с энергией 6,3—7,9 МэВ. Из табл. 24-2 видно, что порог чувствительности меди меняется от 0,2 до 0,5% в зависимости от веса проб и размеров люминофора.

В работе [24.18] отмечается, что НГМ может также привлекаться для анализа хрома в рудах с порогом чувствительности 0,2—0,5%, удовлетворяющим требованиям ГКЗ. Помимо этого, НГМ привлекается для определения в пробах титана и марганца (см. табл. 24-2). Более высокий порог при определении марганца может быть получен при измерениях по НА (см. гл. 25). По методике НА также успешно определяются кремний и алюминий.

Кадмий. Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 4 § 2 гл. 23.

Природный кадмий состоит из восьми стабильных изотопов с массовыми числами 106(1,24%), 108(0,87%), 110(12,32%), 11(12,67%), 112(24,15%), 113(12,21%), 114(28,93%) и 116(7,61%). Гамма-излучение, возникающее в радиационном захвате, рассматривается в § 9 гл. 5. Наиболее интенсивной линией является излучение гамма-квантов с энергией 0,56 МэВ (70%).

Разработкой методики НГМ для определения кадмия в пробах занимались И. Н. Плаксин и др. [24.27, 24.28]. Измерения производились на установке, показанной на рис. 24-6. Источником служил полоний-бериллиевый препарат с выходом около $3 \cdot 10^5$ нейтр/с. Излучение измерялось при помощи газоразрядного счетчика типа СТС-6. Градуировочный график для диапазона кон-

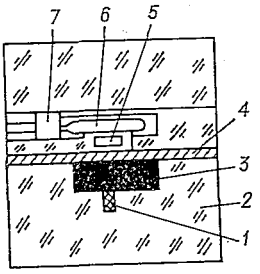


Рис. 24-6. Установка для определения кадмия в пробах.
1 — источник нейтронов, *2* — замедлитель (парафин), *3* — свинец, *4* — борный экран, *5* — проба, *6* — газоразрядный счетчик, *7* — усилитель.

центраций кадмия 0—0,4% носил линейный характер. Порог чувствительности оценен равным 0,035%, т. е. примерно соответствующим измерениям по ННМ-т.

В работах [24.27, 24.28] показано, что с более высокой селективностью содержание кадмия по линии 0,56 МэВ может быть установлено с помощью сцинтилляционного счетчика и амплитудного анализатора. Кристалл йодистого натрия для защиты от потока нейтронов экранировался слоем лития.

НГМ применялся также для определения алюминия, кремния, кальция и хрома [28.79].

Для решения рассмотренных задач начинают использоваться германий-литиевые детекторы [24.69].

§ 2. Общеметодические вопросы применительно к изучению разрезов скважин

Исследование пространственного распределения гамма-излучения радиационного захвата применительно к конкретным условиям измерения по НГМ является сложной математической задачей. Это связано с необходимостью изучения в таких средах как тепловых нейтронов, так и возникающих при их захвате гамма-квантов. Вывод соотношений даже для наиболее простых случаев — однородные среды и идеализированные скважины — является достаточно сложным [1.27, 16.66].

Для реальных условий измерений (скважина — пласт) привлекается метод Монте-Карло [22.176, 24.8].

НГМ в настоящее время при исследованиях коренных пород применяется в основном для изучения разрезов скважин. В полевых условиях НГМ используется лишь совместно с ННМ при определении бора в породах (см. § 6 гл. 23). Начинает применяться для изучения морского дна [24.68].

1. **Интенсиметрическая методика измерений.** При исследовании скважин методом НГК могут использоваться различные приборы, как специальные (рис. 24-7), так и приспособленные для этих целей. Экранирование размещенного в сосуде Дьюара кристалла йодистого натрия бором, свинцом и кадмием необходимо для предотвращения активации его медленными нейтронами. Свинец требуется для подавления излучения с энергией 479 кэВ, возникающего при захвате бором нейтронов, а кадмий — для подавления характеристического излучения, возникающего в свинце. При подготовке к исследованиям с такими приборами в зависимости от конкретно решаемой задачи необходимо тщательно подбирать размеры зондов, толщины свинцовых экранов, расположенных между источником и детектором, толщины и материалы корпуса прибора, толщины фольг, надеваемых на детекторы, а также жестко фиксировать положение в приборе источника, детектора и т. д. Подробные исследования в этом направлении проведены Н. К. Кухаренко и Я. Н. Басиным [6.63, 32.2]. Экран между источниками и детектором рекомендуется составной — около источника должна быть расположена сталь, а около детектора — свинец толщиной около 9 см (см. рис. 24-7). Суммарную толщину экрана в интенсиметрических приборах, применяющихся для решения задач нефтепромысловой геофизики, следует выбирать не ниже 25—30 см. Комбинация свинца с чистым или борным парафином нежелательна.

Свинцовый экран рекомендуется размещать вплотную к торцам катодов счетчиков или к торцам сцинтилляторов (см. рис. 24-7) для подавления излучения, распространяющегося по скважине.

Для подавления рассеянного гамма-излучения корпус прибора необходимо изготовлять из толстой стальной трубы. Кроме того, если толщина трубы оказывается недостаточной, для подавления мягкого излучения детекторы необходимо окружать дополнительными экранами из Pb, W или стали.

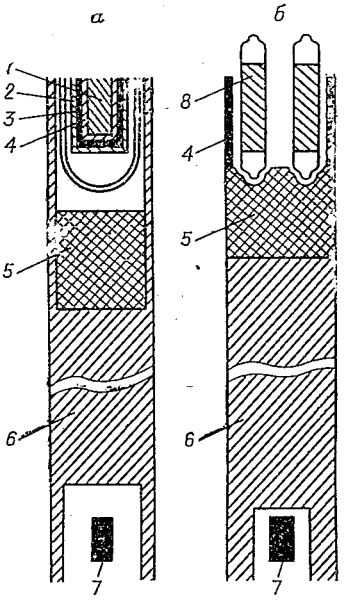


Рис. 24-7. Схематическое устройство зондовой части глубинных приборов типа ДРСТ-1 (*а*) и СП-62 (*б*), применяющихся в нефтепромысловой геофизике для исследования скважин по НГК и НГК-Cd [32.2].

1 — кристалл NaI(Tl); *2* — фильтр из бора; *3* — то же, из свинца, *4* — то же, из кадмия, *5* — свинцовый экран, *6* — сталь, *7* — источник, *8* — счетчики СИ-23Т.

Размер зонда следует выдерживать с высокой точностью, поскольку известно, что его изменения на 5 мм приводят к изменению дифференциации кривых НГК на 2%. Источник и детекторы необходимо размещать строго в центре прибора. Некоторые другие рекомендации применительно к НГК рассматриваются в сборнике [29.11].

Показания НГК в значительной степени зависят также от изменения диаметра скважины, её заполнения и обсадки. Поэтому при проведении количественной интерпретации все эти факторы необходимо точно учитывать. Аппаратуру при этом надлежит градуировать применительно для каждой конструкции прибора и конструкции скважины. Подробно об этом см. в работах [1.27, 12.28, 12.62, 22.54, 22.81, 22.102, 29.11].

По аналогии с формулами (22-14) и (22-15) глубинность для НГК может быть представлена следующими приближенными соотношениями:

$$R_{0,9} \approx 2\sqrt{L_м^2 + (\lambda')^2}, \qquad (24\text{-}2)$$

$$R_{1,0} \approx 3\sqrt{L_м^2 + (\lambda')^2}, \qquad (24\text{-}3)$$

где $L_м$ — то же, что и в формулах (22-14) и (22-15); λ' — средняя длина свободного пробега первичного гамма-излучения радиационного захвата нейтронов в породе, см. формулу (1-11).

Результаты расчета глубинности по приведенным формулам в сопоставлении с экспериментальными данными и расчетными данными ННК-т приведены в табл. 24-3. Величина λ' для рассматриваемых сред в среднем равна 10 см. Из таблицы видно, что для сред с низким водородсодержанием величины глубинностей НГК и ННК-т мало отличаются. Для сред с высоким водородсодержанием глубинность НГК значительно выше глубинности ННК-т. Это связано с тем, что величина $L_м$ с увеличением водородсодержания пород резко падает, а величина λ' возрастает. Особенно вклад величины λ' заметен для воды. Экспериментальные данные НГМ с расчетными меньше всего разнятся для пород с влажностью в пределах 0—10%. Это связано с тем, что плотность среды, на которой производился эксперимент, точно не известна [12.28]. Для сред с высоким водородсодержанием значительное расхождение расчетных данных с экспериментальными связано с тем, что интенсиметрический прибор в основном регистрирует низкоэнергетическое рассеянное гамма-излучение. Пробег в среде этого излучения значительно меньше пробега первичного излучения, учитываемого в расчете.

Таблица 24-3

Сопоставление глубинностей НГК и ННК-т при исследовании песчаника

$m_н$, %	$R_{0,9}$, см			$R_{1,0}$, см	
	Эксперимент	Расчет		Расчет	
	НГК	ННК-т	НГК	ННК-т	НГК
0	60	67	70	100,5	104,6
5	44	48	52	72	78
10	32	35	40	53	60
15	27	33	39	50	58
25	21	30	36	45	54
40	14	26	33	40	49
100 (вода)	—	15,5	52	23,2	78

Изменение размера зонда также оказывает влияние на величину глубинности метода. Из экспериментов известно [12.28], что с ростом размера зонда глубинность вначале растет, а затем, достигнув максимума, спадает. Так, установлено, что для терригенных разрезов величина максимума $R_{0,9}$ соответствует размерам зондов 45—50 см, а для карбонатных —60—70 см.

Для реализации метода НГК-Cd с газоразрядными счетчиками рекомендуется каждый счетчик или все одновременно в приборе НГК окружать кадмиевой фольгой тол-

щиной 0,5—0,7 мм (см. рис. 24-7, *б*). Такое устройство глубинного прибора позволяет реализовать комплексный метод НГК+ННК. По сравнению с аппаратурой НГК прибор НГК-Cd при том же источнике обладает повышенной скоростью счета (на 30—40%) и повышенной чувствительностью к влажности (пористости) пород. Кроме того, аппаратура НГК-Cd значительно менее чувствительна к содержанию хлора в буровом растворе (примерно в 2 раза) и в пластовой воде за счет уменьшения эффекта НГК и увеличения эффекта ННК-т [6.63, 14.4].

Для подавления мягкого гамма-излучения детекторы рекомендуется дополнительно экранировать свинцом или вольфрамом. При работе с дюралюминиевыми или тонкими стальными корпусами, наоборот, можно осуществлять преимущественно регистрацию мягкого гамма-излучения и реализовать комплексную методику НГГК и ННК-т.

2. **Спектрометрическая методика измерений.** Для изучения спектра гамма-излучения радиационного захвата необходимы высокостабилизированные скважинные гамма-спектрометры [3.16, 19.175, 23.6, 24.30, 24.65, 24.66]. Конструктивные материалы глубинного прибора под действием нейтронов могут активироваться и создавать мешающий фон, который в принципе может быть компенсирован [24.17]. С целью уменьшения этого фона корпус прибора делают из специальных материалов: пластмасс, стекловолокна, бораля, бористой стали и стеклопластика, приготовленного на основе алюмоборсиликатного стекла и т. д. При изготовлении корпуса прибора из других материалов, не содержащих бора, его рекомендуется покрывать слоем из смеси карбида бора с эпоксидной смолой в отношении 1:1 [24.39]. Для защиты йодистого натрия от активации нейтронами необходимо применять борные фильтры (толщиной свыше 1,5 г/см^2), свинец и кадмий (см. рис. 24-7, *а*). Однако и этой толщины бора оказывается недостаточно в связи с наличием у йода нейтронных резонансов в области энергий от 20,5 до 205 эВ, в результате чего возникает изотоп — йод-128 с периодом полураспада 25 мин, испускающий бета-частицы с энергией 2,12(76%) и 1,65(15,5%) МэВ и гамма-кванты с энергией 0,455 МэВ (17,16%) и другие менее интенсивные линии. Это затрудняет спектрометрию захватного гамма-излучения с энергией ниже 2,12 МэВ.

Кроме того, мешающее влияние может оказывать возникающее в кристалле захватное гамма-излучение, спектр которого может простираться в более высокую область энергий. В исследовании [24.39], в частности, показано, что при работе на зонде 30 см спектр захватного гамма-излучения в области энергий 3—6 МэВ (в кристалле йодистого натрия с борным покрытием 1 г/см^2) может меняться в пределах 20—50% в зависимости от влажности породы. Учет влияния изменения влажности может производиться по методике ННК-н на том же размере зонда [24.39].

Для решения отдельных частных задач при помощи СНГК достаточно измерить спектр в области одной энергии гамма-лучей захвата. Для решения других задач бывает достаточно определить соотношение мягкой и жесткой компонент рассеянного гамма-излучения. Однако для решения большинства задач спектр захватного излучения необходимо измерять в довольно широком диапазоне энергий для учета и исключения мешающих элементов. При этом, чтобы оценить в породе m элементов, необходимо получить систему из $m+1$ уравнений. Ядерно-геофизическую аппаратуру необходимо снабжать соответствующими счетно-решающими системами, которые позволяли бы на кривых НГК сразу же записывать концентрации определяемых элементов или другие изучаемые параметры. Возможности СНГК существенно расширяются при использовании парных спектрометров [19.175, 32.9].

При проведении как НГК, так и особенно СНГК весьма существенным является выбор источника с невысокой средней энергией $E_{ср}$ быстрых ней-

тронов для того, чтобы избавиться от гамма-излучения, возникающего в реакции $(n, n'\gamma)$. Наиболее приемлемы источники полоний-литиевый ($E_{ср}=0{,}48$ МэВ), полоний-фторный ($E_{ср}=1{,}4$ МэВ) или полоний-борный ($E_{ср}=2{,}7$ МэВ) (см. табл. 1-4). В связи с тем, что первые два из них не выпускаются, исследование скважин ведут с полоний-борным источником. Нижняя граница реакции $(n, n'\gamma)$, как уже отмечалось в § 1 гл. 4, соответствует энергиям нейтронов 0,6—1 МэВ. Поэтому при облучении горных пород быстрыми нейтронами полоний-борного источника в реакции $(n, n'\gamma)$ возникают гамма-кванты с энергией

Таблица 24-4

Глубинность $R_{0,9}$ спектрометрического НГК при регистрации гамма-квантов с энергией 4 МэВ

Смоделированная порода	Плотность, г/см³	Влажность, %	Диаметр, мм: скважины	Диаметр, мм: глубинного прибора	Скважина	Размер зонда, см	$R_{0,9}$, см
Песчаник	2,65	1,6	106	62	Сухая	20	16,9
					Заполненная водой	20	15,1
						0	12,6
Водонасыщенный песчаник	2,11	33	117	71	Сухая	20	15,1
					Заполненная водой	20	14,4
						0	12,3
						0	11,2*
Каменный уголь (зольность 35%)	1,27	—	110	78	Заполненная водой	20	17,5

* Величина глубинности оценена при регистрации гамма-квантов с энергией 2 МэВ.

в среднем не выше 3 МэВ. На долю гамма-квантов с энергией 3—6 МэВ, как показали экспериментальные исследования [24.39] на моделях песчаника и глин, доля гамма-излучения, обусловленного реакцией $(n, n'\gamma)$, равна примерно 10% от суммарного нейтронного гамма-излучения этого диапазона. Следовательно, при измерениях с этим источником с точностью 10% гамма-кванты с энергией в диапазоне 3—6 МэВ будут возникать только в реакции (n, γ). Применение полоний-литиевого и полоний-фторного источника позволило бы этот порог жесткого гамма-излучения реакций $(n, n'\gamma)$ снизить соответственно до 1 и 2 МэВ и повысить точность определения жесткого спектра ($E_\gamma > 3$ МэВ).

Для оценки глубинности СНГК в работе [14.4] были произведены специальные эксперименты и расчеты, результаты которых приведены в табл. 24-4. Эти данные получены путем экспериментального измерения распределения нейтронного поля в породах и последующего расчета гамма-излучения, достигающего точечного детектора. Расчет велся по лучевому приближению. Из таблицы видно, что глубинность для рассматриваемых пород не выходит за пределы 10—20 см. (По этому вопросу см. также [19.175].)

§ 3. Области применения интенсиметрической методики при изучении коренных пород

1. Определение влажности пород. Для определения влажности грунтов в скважинах глубиной до 6 м В/О «Изотоп» выпускает специальный прибор — нейтронный индикатор влажности (НИВ-1) [19.65, 19.79],

основанный на принципе метода НГК-Cd (см. приложение 4). Прибор в своем комплекте имеет: зонд весом 0,8 кг, диаметром 38 мм и длиной 272 мм, контрольно-калибровочное устройство, состоящее из парафина с бором весом 12,7 кг и габаритами 430×300×240 мм, и пульт радиометра М-30М весом 5,5 кг и габаритами 153×272×214 мм. Контрольно-калибровочное устройство одновременно выполняет роль контейнера для источника. В нерабочем состоянии блок с детектором отсоединяется от нижней части зонда с источником, которая располагается в контейнере. Перед измерениями детекторный блок сочленяется с блоком счетчика, и прибор может использоваться по назначению.

Источником излучений в приборе служат плутоний- или полоний-бериллиевые препараты с выходом 10^5 нейтр/с. Поток гамма-лучей и нейтронов измеряется при помощи четырех газоразрядных счетчиков типа СТС-5, каждый из которых обернут слоем кадмия. Счетчики прямого гамма-излучения источника защищены свинцовым экраном толщиной 3 см.

Для измерения влажности пробуривают специальные скважины обсаживаемыми тонкостенными алюминиевыми трубами (диаметром 50 мм), имеющимися в комплекте прибора. Контрольно-калибровочное устройство перед измерениями устанавливается над устьем скважины и закрепляется к выступу обсадной трубы. Зондовое устройство освобождается от обжима и опускается в скважину.

Прибор НИВ-1 используется для определения влажности грунтов в диапазоне от 2,4 до 40% с точностью ±2%. Для решения этой задачи привлекаются и другие приборы, основанные на принципе ННМ (см. § 5 гл. 22). Вопросы по определению влажности грунтов по НГК-Cd рассматриваются также в работах [15.31, 19.15, 19.181] и др.

2. **Определение пористости горных пород.** Для решения этой задачи интенсиметрический метод НГК в нефтепромысловой геофизике начал привлекаться раньше других методов ядерного каротажа. В последующем внедрение в практику геофизики метода ННК показало, что пористость пород терригенных (песчано-глинистых) коллекторов с помощью этого метода можно определять с более высокой точностью (см. п. 2 § 7 гл. 22) по сравнению с НГК. Однако метод НГК в настоящее время продолжает применяться для определения пористости карбонатных пород и песчаников, не содержащих глину.

Характер зависимости показаний НГК от пористости пород в общем согласуется с результатами ННК-т [18.14, 1.27]. Так, при исследовании на модели скважины диаметром 184 мм с прибором диаметром 100 мм, в котором пространство между источником нейтронов и детектором гамма-лучей (ВС-11) было заполнено свинцом, для зондов размерами 30 и 40 см наблюдались по два максимума. При измерениях на зондах размерами 50 и 60 см в случае, когда прибор был прижат к стенке скважины, наблюдался только один максимум в области низких значений пористости (2—3%). В связи с этим для определения пористости пород по НГК стали использовать большие размеры зондов. Детальные исследования на моделях карбонатных пластов горных пород произведены В. П. Иванкиным [19.174]. Результаты этих исследований, полученных при работе с аппаратурой НГГК, показаны на рис. 24-8. Минерализация бурового раствора и воды, заполняющей поры пород, не свыше 30 г/л. Показания прибора выражены в относительных величинах: $N' = (N_м - N_в)(N_п - N_в)^{-1}$, где $N_м$ — замер против пласта с пористостью $m_п$; $N_п$ — замер против плотного пласта ($m_п = 0{,}5\%$); $N_в$ — замер в баке с пресной водой. Чем больше диаметр скважины, тем сильнее расходятся кривые друг от друга. Изменение толщины глинистой корки моделировалось слоем воды между прибором и породой. Однако эти расхождения значительно меньше, чем при ННК-т (см. рис. 22-6). Приведенные данные вполне согласуются с расчетными [24.63, 24.64].

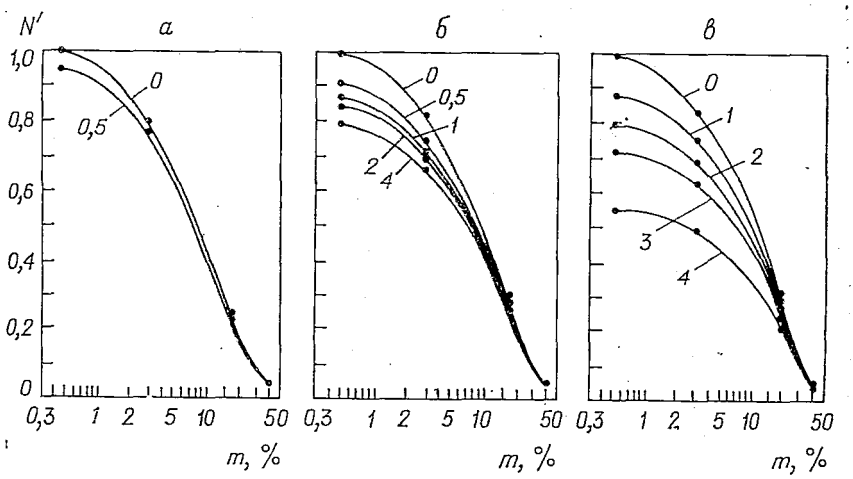


Рис. 24-8. Зависимость регистрируемой скорости счета захватного гамма-излучения (отн. ед.), измеренной на зонде размером 60 см, от пористости карбонатных пород в скважинах диаметром 130 (*а*), 190 (*б*) и 243 (*в*) мм. Шифр кривых — толщина глинистой корки, см.

Аналогичные эксперименты рассматриваются в работах [3.16, 12.28, 24.4, 24.10, 24.19, 24.26, 24.31].

В. Н. Стариковым [22. 176] показано, что спад кривых $\ln N = f(m_п)$ связан с захватом нейтронов в скважине. Аналогичная зависимость для пласта при $m_п$ от 0,5 до 5—10% возрастает, а затем убывает.

Для пластов с высоким содержанием хлористого натрия в воде характер градуировочных кривых может измениться на обратный [12.28], т. е. увеличение пористости пород ведет не к убыванию скорости счета, а к возрастанию. Это связано исключительно с увеличением в воде хлора, интенсивно вступающего в реакцию (n, γ). С этим же связано и увеличение интенсивности регистрируемого гамма-излучения.

В последующем было установлено, что при определении пористости пород лучшие результаты получаются при измерениях по НГК-Cd.

Для определения пористости горных пород по НГК-Cd в нефтепромысловой геофизике применяется стандартная аппаратура ТРК, ДРСТ-1 и другая с кадмиевыми экранами счетчиков канала НГК. Характер градуировочных кривых, полученных В. П. Иванкиным [19.173] на моделях карбонатных пластов одним из таких приборов на зонде 60 см, показан на рис. 24-9. Минерализация пластовых вод и бурового

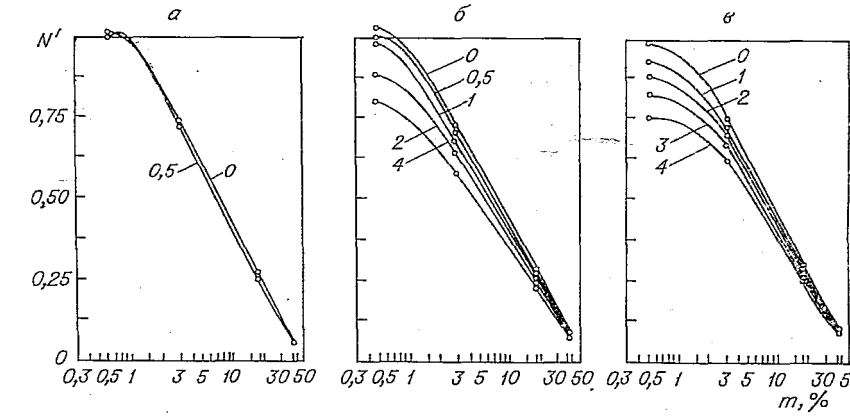


Рис. 24-9. Зависимость скорости счета (отн. ед.) от пористости карбонатных пород при измерениях в скважинах диаметром 130 (*а*), 190 (*б*) и 243 (*в*) мм. Шифр кривых — толщина глинистой корки, см.

раствора не свыше 30 г/л. По оси ординат отложены те же величины, что и на рис. 24-8. Из сопоставления рис. 22-6, 24-8 и 24-9 видно, что изменения толщины глинистой корки меньше всего сказываются на показаниях НГК-Cd. На этих моделях проводились также исследования с аппаратурой РК-60 и РК-62 по методике НГК-Cd [24.10]. При сопоставлении полученных результатов с результатами исследования реальных скважин установлено различие показаний против опорных пластов, обусловленное, по всей видимости, различием в плотностях модельных и реальных сред и т. п.

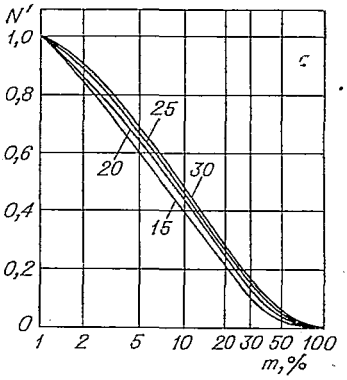


Рис. 24-10. Палетка для определения пористости карбонатных пород при измерениях на аппаратуре НГГК-62 для зонда размером 60 см в скважинах различного диаметра. Шифр кривых — диаметр скважины (см).

Весьма обстоятельные исследования по разработке методики НГК-Cd применительно к поставленной задаче проведены во ВНИИЯГГе Н. К. Кухаренко, Я. Н. Басиным и др. [17.13, 22.102, 32.2]. Измерения велись по методике опорных горизонтов против плотного пласта ($m_п = 1—2\%$) $N_п$ и пласта размытых глин $N_к$ (против каверны). Одна из таких палеток, построенная для скважин разного диаметра без глинистой корки, показана на рис. 24-10. По оси ординат отложены величины

$$N' = \frac{N_m - N_1}{N_п - N_1},$$

где N_m — скорость счета против пласта с пористостью m; N_1 — скорость счета в баке с пресной водой в условных единицах (определяется с помощью специальной палетки по значениям $N_к$). Величины N_m и $N_п$ соответствуют нормализованным условиям, т. е. отсутствию глинистой корки в случае пресного бурового раствора при содержании хлористого натрия в нем не более 2 г/л, а в пластовой воде — не более 5 г/дм³.

При наличии глинистой корки, определяемой по микрокавернометрии, и минерализованного бурового раствора, удельное сопротивление которого определяется по резистивиметрии, в полученные результаты необходимо вводить поправки K, оцениваемые по специальным палеткам (рис. 24-11). По оси ординат отложена величина, аналогичная N' при замене N_m на N'_m (скорость счета для реальных ненормализованных условий).

Величина N_1 определяется по палетке, показанной на рис. 24-12. Если прибор полностью размещается в каверне, необходимо пользоваться пунктирными кривыми, а если он длиннее каверны,— сплошными.

Рассматриваемая методика может быть использована лишь для определения пористости карбонатных пород с пористостью 5% и выше. Относительная погрешность при этом не выходит за пределы 10%. При обследовании обсаженных скважин с помощью НГК-Cd можно вести лишь качественную интерпретацию пористости коллекторов.

3. **Разделение коллекторов по их водонефтегазонасыщенности.** Метод НГК, как и ННК-т, может привлекаться для выявления ВНК в терригенных отложениях (см. п. 3 § 7 гл. 22 и § 3 гл. 33). Величина эффекта на контакте в благоприятном случае может достигать 15—20% [12.28]. Изменение вещественного состава пород и других факторов может приводить к ухудшению и даже исчезновению этого эффекта. Для исключения влияния изменения водородсодержания пород измерения по НГК рекомендуется вести на инверсионных зондах (20—25 см). При отбивке

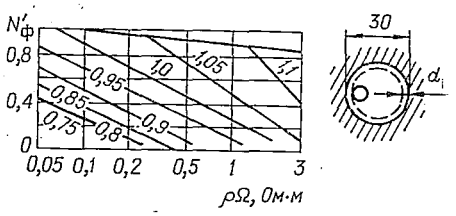


Рис. 24-11. Палетка для оценки поправочных коэффициентов K для учета минерализации бурового раствора при работе с приборами НГГК-60 и НГГК-62. Шифр кривых — значения K.

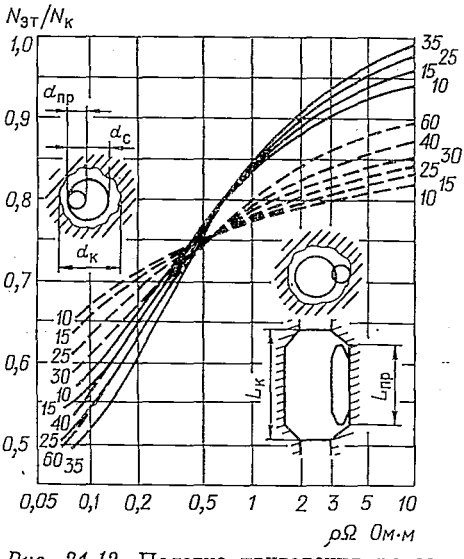


Рис. 24-12. Палетка приведения показаний НГК против размытых глин ($N_к$) к показаниям в пресной воде ($N_э$). Сплошные кривые — 0,5 ($d_к$ — $d_с$), пунктир — $d_к$.

ВНК в карбонатных коллекторах метод НГК комплексируют всегда с методом ННК-т.

Замещение воды или нефти в пластах газом ведет к уменьшению их водородсодержания. Это позволяет по методике НГК выявлять газоносность коллекторов. Так, если замеры НГК в газоносном коллекторе $N_г$ нормировать к аналогичным показаниям при заполнении того же коллектора водой $N_в$, то функция $N' = N_г / N_в = f(m_г)$ возрастает с увеличением коэффициента объемной газонасыщенности $m_г$, причем тем интенсивнее, чем выше пористость коллекторов [12.28]. Проникновение фильтрата бурового раствора в газоносный пласт нарушает характер этой зависимости. В этом случае газоводяной контакт (ГВК) может быть выявлен после обсадки скважины, когда контакт восстановлен. Поэтому замеры НГК проводят через определенные промежутки времени. Другие примеры применения НГК и НГК-Cd для решения этих задач рассматриваются в § 3 гл. 33.

В нефтепромысловой геофизике метод НГК привлекался для определения мест затрубной циркуляции воды в скважинах и положения пакера [24.38], а также для выявления [24.32], исследования и изоляции пластов, поглощающих жидкость [24.37]. Метод НГК в комплексе с ГК используется для выявления водоносных горизонтов [24.15] и каверн в скважинах [24.40].

4. **Выявление угольных пластов.** Метод выявления угольных пластов НГК основан, как и метод ННК (см. п. 4 § 7 гл. 22), на замедлении и диффузии нейтронов на водороде, содержащемся в больших количествах в углях.

А. Н. Макаровым и др. [1.27] установлено, что метод НГК позволяет наиболее четко выявлять в разрезе скважин пласты бурого угля с содержанием водорода порядка 5—7%. При залегании бурых углей среди пород с влажностью до 30—35% (2—3,5% водорода) на кривых НГК (при работе на зондах размером выше инверсионного) можно выделять пласты угля по минимальным значениям интенсивности гамма-излучения радиационного захвата. При исследовании скважин выявлено, что угли хорошо выделяются на зондах размером около 40 см с полоний-бериллиевыми источниками с выходом $(3—6)\cdot 10^6$ нейтр/с при скоростях подъема глубинного прибора 80—100 м/ч и постоянной времени 12 с. Небольшие изменения диаметра скважин (не свыше 5 см) практически не влияют на показания метода НГК. Это, по существу, и является одним из основных преимуществ методов НГК и ННК по сравнению с ГГК, весьма чувствительным к изменениям диаметра скважины. Поэтому для выявления буровых углей в кавернозных скважи-

нах наиболее рационально использовать именно методы ННК и НГК.

Зольность углей по НГК можно определять с абсолютной погрешностью до 5—8%.

Более подробно возможности применения НГК для исследования угольных скважин рассматриваются в работах [33.6, 24.9, 24.47, 24.52, 24.62].

5. **Выявление сильно поглощающих элементов.** Показания НГК при определении в породах различных химических элементов так же, как и показания ННК, искажаются из-за изменений содержания влаги в породах. Поэтому при разработке методики НГК в рассматриваемом случае необходимо влияние влаги учитывать или исключать.

При интенсиметрических измерениях это осуществимо посредством регистрации отношения скоростей счета M гамма-излучения и нейтронов (тепловых, надтепловых или резонансных и т. д.), т. е. показания НГК необходимо нормировать к данным ННК [23.54]. Заметим при этом, что поле нейтронов, регистрируемых в скважине при ННК, и поле нейтронов, формирующих захватное гамма-излучение в породе при НГК, несколько отличаются друг от друга. Тем не менее при выборе оптимального размера зонда можно добиться их подобия. В результате на кривой зависимости указанного выше отношения M от влажности породы $m_{\text{п}}$ может быть получен пологий участок (плато). Доказательства этого положения приведены в работах [4.19, 23.54].

Подобная методика может быть реализована при размещении гамма-детектора в точке, равной плотности тепловых нейтронов. Чтобы гамма-детектор все время удерживался в таких точках, в работе [24.24] в глубинном приборе предлагается устанавливать сервомотор. Для больших размеров зондов связь между скоростью регистрируемого излучения N_γ и влажностью пород $m_{\text{п}}$ при $m_{\text{п}} > 2\%$ носит линейный характер:

$$N_\gamma = a' + b' \ln m_{\text{п}}, \qquad (24\text{-}4)$$

где a' и b' — постоянные. Комбинируя метод НГК с ННК-т или ННК-н (см. формулы (23-11) и (23-12)), можно записать, по аналогии с выводом формулы (23-13):

$$N_\gamma = A' + B' N_{\text{т}}, \qquad (24\text{-}5)$$

$$N_{\text{т}} = A'' + B'' N_{\text{н}}. \qquad (24\text{-}6)$$

Здесь A', B', A'' и B'' определяются из экспериментальных исследований.

Функции (24-5) и (24-6), как и (23-13), не зависят от содержания влаги в породах.

При исследовании скважин, буримых на бор, метод НГК может привлекаться в основном для качественной интерпретации. В отдельных случаях при этом можно вести и количественную интерпретацию [24.33, 23.52]. По этому поводу см. также § 1 гл. 34. Метод НГК в комплексе с другими ядерными методами привлекается также для расчленения соленосных толщ (см. § 5 гл. 34). В работе [24.67] для этих целей построена специальная номограмма.

§ 4. Области применения спектрометрической методики при изучении коренных пород

СНГМ с выделением излучения отдельных химических элементов привлекается для решения разнообразных геологических задач. Все химические элементы с точки зрения возможностей их определения по СНГМ обычно подразделяют на три группы, приводящие к образованию низкоэнергетического гамма-излучения с энергией ниже 4 МэВ (водород, калий, магний и др.— см. табл. 31-1); излучения со средней энер-

гией 4—6 МэВ (ванадий, ртуть и др.) и высокоэнергетического излучения с энергией свыше 6 МэВ (титан, хром, марганец, железо, никель, медь и др.).

Рассматриваемый метод используется для изучения разрезов скважин и донных отложений с выявлением излучения в основном элементов третьей группы и отчасти второй и первой.

1. **Изучение разрезов скважин.**

Нефтяные скважины. В нефтепромысловой геофизике метод СНГК с выделением излучения хлора привлекается для определения ВНК [12.28, 12.34, 24.58]. Регистрация жесткого излучения при этом позволяет значительно повысить эффект отбивки ВНК по сравнению с замерами по НГК (см. § 3 гл. 33). В работе [24.58] для решения этой задачи предложено измерять жесткое излучение хлора в диапазоне энергий 6,2—7,7 МэВ и нормировать регистрируемую скорость счета к потоку тепловых нейтронов, измеряемых с помощью соответствующего детектора, расположенного вблизи гамма-детектора.

Для одновременного измерения потока гамма-лучей радиационного захвата и нейтронов Х. Е. Холлом [24.50] предложено использовать два люминофора (йодистый натрий и йодистый литий, сочлененные торцами) и один фотоумножитель. Разделение потока гамма-лучей и нейтронов осуществляется амплитудным анализатором по вспышкам сцинтилляций от электронов, выбиваемых гамма-лучами, и альфа-частиц с ядрами трития, возникающих под действием тепловых нейтронов на ядрах лития. Порядок установки детекторов разнообразный. Так, при необходимости вблизи фотоумножителя можно устанавливать либо литиевый, либо натриевый люминофоры. По измерению отношения потока гамма-лучей и нейтронов для некоторых оптимальных размеров зондов можно получать результаты НГК, не зависящие от изменения водородсодержания пород.

В связи с тем, что увеличение водорода и сильно поглощающих элементов в породе приводит на некоторых зондах к одним и тем же эффектам, с помощью рассматриваемой методики при выборе оптимальных параметров приборов можно добиться исключения влияния на результаты определения состава горных пород по НГК и НАК вариаций не только водорода, но и сильно поглощающих элементов.

Аналогичная методика может быть использована при измерениях как в скважинах, так и на плоской поверхности пород нейтронным гамма-методом и методом нейтронной активации. Одновременно регистрировать гамма-излучение и тепловые нейтроны удобнее всего прибором с одним датчиком. В качестве таких датчиков могут быть использованы сцинтилляционные счетчики с одним кристаллом (см. § 9, гл. 5).

Для ведения количественной интерпретации по отбивке ВНК иногда рекомендуется измерять спектр гамма-излучения водорода и хлора двухзондовыми приборами [24.20, 24.36].

При изучении нефтепромысловых скважин важной задачей является также изучение литологии коллекторов. Спектры гамма-излучения, полученные при изучении силикатных песчаников и известняков, показаны на рис. 24-13 и 24-14 [15.31, 24.41]. Исследования проводились при помощи глубинного прибора диаметром 90 мм с кристаллом йодистого натрия размерами 6,3×6,3 см, окруженного борным фильтром. Размер зонда выбран равным 46 см. В качестве источника нейтронов использовался плутоний-бериллиевый препарат с выходом $1{,}4 \cdot 10^7$ нейтр/с. Пространство между источником и детектором заполнялось свинцом толщиной 25,4 см с конусообразными скосами у источника и детектора.

Пик, соответствующий энергии гамма-квантов 2,23 МэВ, четко проявляется на всех кривых. Хорошо выражены пики, обусловленные кремнием и кальцием. Наличие пика с энергией 1,8 МэВ авторы [15.31]

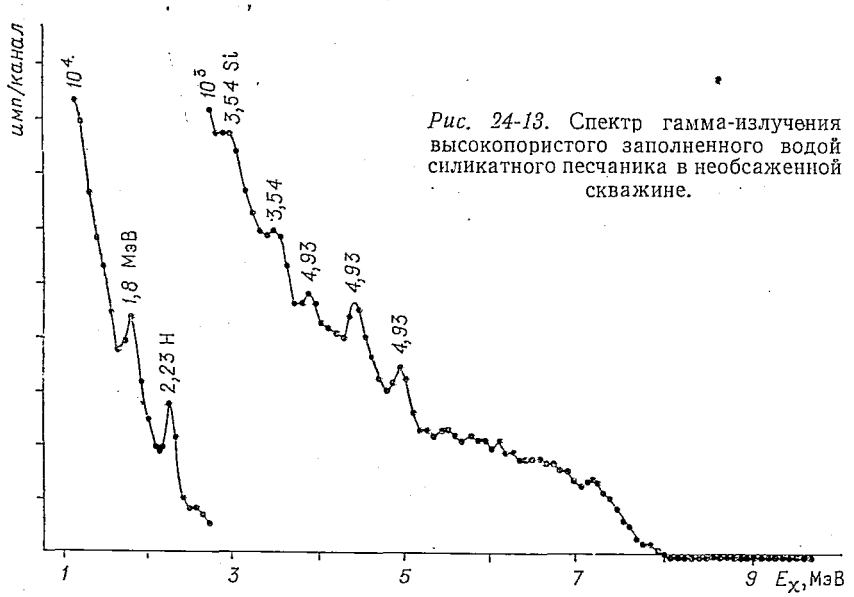


Рис. 24-13. Спектр гамма-излучения высокопористого заполненного водой силикатного песчаника в необсаженной скважине.

связывают с неупругим рассеянием быстрых нейтронов на кремнии. Другой возможной причиной его образования они считают реакцию (n, p) на кремнии, приводящую к возникновению алюминия-28, испускающего при распаде гамма-кванты с энергией 1,78 МэВ. Вопросы по расчленению пород на литологические разности рассматриваются также в § 2 гл. 31.

Угольные скважины. Зольность бурых углей с более высокой точностью (выше 5—8%) может быть определена методом СНГК по соотношению M жесткой (E_γ=3—10 МэВ) и мягкой (E_γ=1,6—2,5 МэВ) составляющих спектра захватного гамма-излучения. Величина M для бурых углей в 2—3 раза ниже по сравнению с вмещающими породами. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что содержание в золе бурых углей таких породообразующих элементов, как кремний, алюминий, железо и кальций, создающих жесткую часть спектра, невелико, с дру-

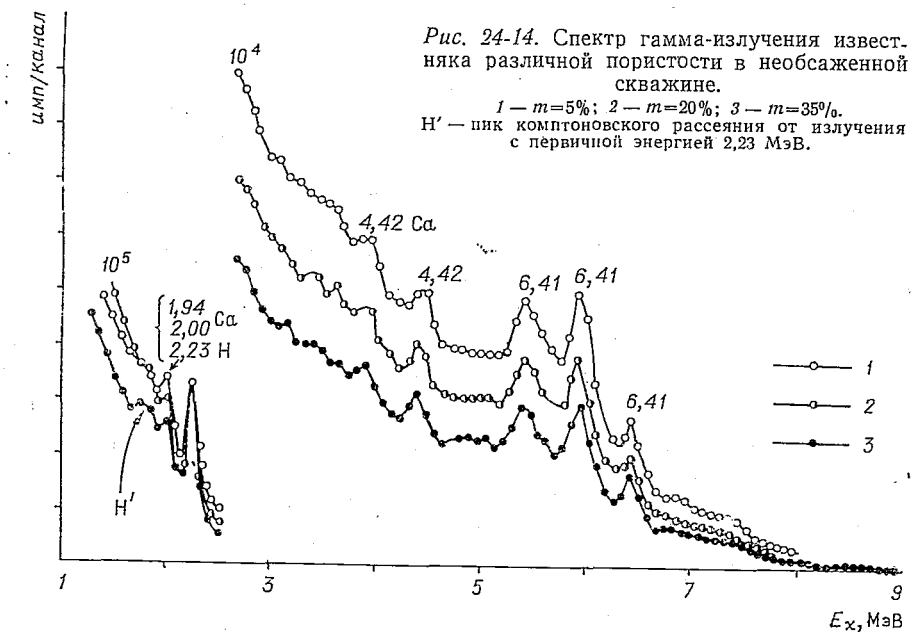


Рис. 24-14. Спектр гамма-излучения известняка различной пористости в необсаженной скважине.
1 — m=5%; *2* — m=20%; *3* — m=35%.
H' — пик комптоновского рассеяния от излучения с первичной энергией 2,23 МэВ.

гой,— как уже говорилось, сравнительно высоким содержанием в них водорода, формирующего мягкую составляющую часть спектра. К тому же заметим, что нормировка показаний СНГК к компоненте, обусловленной захватным излучением водорода, одновременно позволяет исключать влияние изменений его концентрации на результаты определения зольности. Последнее более подробно будет показано ниже.

Характер изменений жесткой и мягкой составляющих спектра захватного гамма-излучения, измеренного в одной из скважин Подмосковного буроугольного бассейна, показан на рис. 24-15 [14.4, 16.83, 24.48].

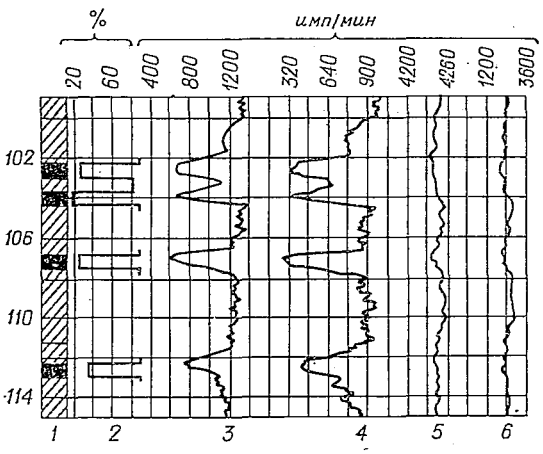


Рис. 24-15. Пример выделения угольных пластов по данным СНГК.

1 — разрез скважины по данным бурения; *2* — зольность по данным химанализа керна; *3* и *4* — скорости счета, полученные при измерении жесткого гамма-излучения (E_γ=3—10 МэВ); *5*, *6* — то же, мягкого (E_γ=1,5—2,5 МэВ); *3*, *5* — исследования с полоний-бериллиевым источником; *4*, *6* — то же, с полоний-борным.

Скважины исследовались прибором СГС-1 на зонде размером 30 см с кристаллом йодистого натрия размерами 30×30 мм при постоянной времени 5 с, скорости подъема глубинного прибора 50 м/ч и источником с выходом порядка $2 \cdot 10^6$ нейтр/с.

Из рис. 24-15 видно, что диаграммы, полученные при измерении мягкого гамма-излучения, практически не дифференцированы, в то время как на диаграммах, полученных при регистрации жесткого гамма-излучения, угольные пласты отбиваются резкими минимумами, причем кривая, полученная с полоний-борным источником, сильнее дифференцирована по сравнению с кривой, полученной с полоний-бериллиевым источником.

В работах [14.4, 24.48] показано, что характер зависимости регистрируемого отношения от зольности углей в интервале от 15 до 80% является линейным.

Зольность бурых углей по рассматриваемой методике можно определять с точностью ±3% [24.48]. Эта величина превосходит точность кернового опробования, равную 6%, и примерно сопоставима с точностью, полученной при исследовании методом ГГК-с (см. гл. 20). Однако метод СНГК по сравнению с ГГК-с обладает существенными преимуществами: а) он не зависит от изменений диаметра скважины по крайней мере от 90 до 170 мм; б) в нем отсутствуют прижимные пружины на глубинных приборах СНГК и т. д.

В работе [24.39] отмечается, что для выявления в разрезе скважин пластов бурых углей и определения их зольности может быть приспособлена стандартная радиометрическая аппаратура типа РК-60Л. Так, в Подмосковном буроугольном бассейне для этих целей в приборе РК-60Л был установлен ФЭУ-13 и кристалл йодистого натрия размерами 40×50 мм с борной экранировкой люминофора и корпуса прибора. Исследования проводились на зонде размером 20 см с полоний-борным источником с выходом примерно $2 \cdot 10^6$ нейтр/с и дискриминацией мягкого гамма-излучения ниже 3 МэВ. Этой аппаратурой было обследовано свыше 40 скважин. Результаты подтвердили высокую эффективность рассматриваемого метода по сравнению со стандартными методами ГК и ГГК. Средняя квадратичная ошибка определения зольности достига-

ла 2,9%, а по ГК и ГГК — соответственно 7,3 и 8,4%. Более подробно результаты исследования буроугольных скважин методом СНГК рассматриваются в работе [24.48].

Для каменных углей и антрацитов применение СНГК менее эффективно ввиду невысоких концентраций в них водорода.

Я. Н. Басиным [24.2] для определения зольности углей предложена методика, основанная на измерении отношения жесткой части захватного гамма-излучения с энергией выше 5 МэВ к скорости счета тепловых нейтронов или общей интенсивности захватного гамма-излучения. Нормировка измеряемого эффекта позволяет исключать изменение водородсодержания углей и геометрии измерений. Определение зольности углей по этой методике можно вести с плутоний- или полоний-бериллиевым источниками. На показания НГК при этом влияет, помимо кремния, алюминия, железа и кальция, также и кислород, вступающий в реакцию $(n, n'\gamma)$. Излучение углерода с энергией 4,43 МэВ, возникающее при этой реакции, подавляется дискриминатором. Указанные источники, по нашему мнению, могут найти применение и при вышеописанной методике определения зольности углей по регистрации мягкой и жесткой составляющих спектра. При этом под жестким излучением следует понимать гамма-кванты с энергией свыше 5 МэВ, а под мягким — в области спектра водорода 1,6—2,5 МэВ.

Определение углерода в углях по НГК′ рассматривается в § 5 этой главы.

Рудные скважины. При спектрометрических измерениях в настоящее время для исключения влияния вариации влажности горных пород и других факторов применяется методика спектральных отношений. Так, Э. Г. Эйфе [24.39] показано, что величины спектральных отношений меняются незначительно при изменении в довольно широких пределах нейтронных и гамма-лучевых параметров горных пород, а также скважинных условий и аппаратурных факторов. Например, изменение пористости пород от 1,6 до 33%, плотности среды от 1 до 2,6 г/см^3, диаметра скважины от 110 до 220 мм и размера зонда от 20 до 60 см приводит к изменению спектральных отношений всего лишь на ±5% при измерении спектра гамма-излучения в интервале от 3 до 10 МэВ. Скорость же счета, измеренная по обычной методике, при этом меняется в более широких пределах. Так, в [14,4] показано, что при измерении спектра гамма-излучения радиационного захвата нейтронов с энергией свыше 2 МэВ изменение содержания воды в породах от 0 до 30% по весу и эффективного атомного номера пород в пределах от 7 до 26 приводит к изменениям формы спектра на 20—25%.

Аналогичные исследования проводились также авторами [23.6] при измерении жесткого гамма-излучения с энергией выше 6—6,4 МэВ. Установлено, что изменение объемной влажности в пределах от 0 до 45% обусловливает увеличение скорости счета на 15%, а изменение плотности породы от 1,7 до 2,7 г/см^2 (мраморная крошка и мрамор) при неизменной влажности — увеличение скорости счета на 10% для скважины, заполненной водой, и на 15—20% для сухой скважины.

Метод СНГК может привлекаться для определения в породах целого ряда рудных полезных ископаемых (табл. 24-5). Приведенные в этой таблице элементы имеют высокие сечения захвата тепловых нейтронов, превосходящие в несколько раз соответствующие сечения для основных породообразующих элементов: кислорода, кремния, алюминия, магния, кальция и некоторых других (см. табл. 31-1).

Руды перечисленных элементов имеют сравнительно простой компонентный состав металлов. Так, руды железа являются монокомпонентными и только иногда содержат марганец. Руды хрома, марганца, никеля и меди, как правило, двухкомпонентные, содержат один из указанных элементов и железо. Это обстоятельство позволяет существенно

Таблица 24-5

Возможности СНГК при определении в породах некоторых полезных ископаемых

Определяемый элемент [литература]	Массовое макроскопическое сечение, см²/г	Энергетический диапазон измеряемого излучения, МэВ	Порог чувствительности, %	Примечание
Титан [14.4, 24.39]	0,073	3,0—4,6		В комплексных титано-железистых рудах необходимо определять железо
Хром [14.4, 24.14]	0,035	3—5 и свыше 7	4—5	Градуировочный график линеен для диапазона 0—10%
Марганец [14.4, 32.9]	0,143	4,8—6,2 6,2—10		Определяется в рудах карбонатного состава в диапазоне 0—15%
Железо [14.4, 16.83, 23.6, 24.39, 24.49, 24.51, 24.53, 24.55, 32.9]	0,027	4,0—6,2 6,4—9	5—6	Градуировочные графики линейны для диапазона 0—25%
Никель [3.16, 14.4, 24.21, 24.30, 24.65, 24.66, 24.70]	0,046	8,6—9 7,8—8,2 7—7,4; 8,2—8,8; 8,9—9,9	0,5—0,7 0,1—0,4	Градуировочные графики линейны для диапазона 0—3%
Медь [14.4]	0,035	3,0—6,6 6,8—9,0	0,2—0,7	Медистые песчаники
»		7,2—10 5,4—6,4		Колчеданные руды
Ртуть [18.69, 25.3]	1,08	По линиям 6,44 и 5,99	0,1	

упростить методику анализа руд по разрезам скважин. Для их определения, как отмечается в работе [14.4], достаточно изучать жесткий спектр в двух энергетических интервалах. Одной из трудностей при определении в горных породах рассматриваемых элементов является нарушение для высоких концентраций металла в руде линейной зависимости между интенсивностью регистрируемого излучения и содержанием в них определяемых элементов. В связи с этим для каждого типа руд приходится строить свою градуировочную кривую. Нарушение линейности кривых обусловливается, с одной стороны, самопоглощением нейтронов в породе, с другой,— интенсивным поглощением захватного гамма-излучения за счет увеличения плотности и эффективного атомного номера руд. Это и приводит к выполаживанию кривых.

Более детально результаты по определению элементов, приведенных в табл. 24-4, анализируются в соответствующих параграфах гл. 35, а также в книге [4.19].

Кроме рассмотренных элементов при помощи СНГК можно выявлять в породах и другие: алюминий, серу и фосфор.

При захвате нейтронов ядрами алюминия образуются гамма-кванты с энергией 7,72 (35%) МэВ и другие менее интенсивные линии. Макроскопическое массовое сечение алюминия приведено в табл. 31-1. В связи с тем, что это сечение невелико, при помощи СНГК можно определять лишь высокие его содержания в породах и, в частности, выявлять бокситы, содержание алюминия в которых меняется от 15 до 32%. Однако переменное содержание в этих рудах железа мешает определению алюминия.

Сведения о гамма-квантах радиационного захвата серы приводятся в п. 2 § 1 этой главы. Там же даны и другие данные по этому элемен-

ту. Содержание серы в породах по СНГК можно определять начиная с 1% по регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 4,0—5,0 и 5,1—6,7 МэВ [29.78].

В работе [24.12] показано, что СНГК может привлекаться также для определения фосфора в фосфоритах (см. § 4 гл. 34).

2. **Изучение морского дна.** Выше неоднократно отмечалось, что в настоящее время с каждым годом все большее внимание обращается поискам и разведке полезных ископаемых на дне моря. Разработкой методики СНГМ применительно к решению этой задачи занимаются в США Ф. Е. Сенфтле и др. [24.68, 30.48]. Установлено, что на показания приборов СНГМ сильное влияние оказывает излучение хлора, содержащегося в морской воде. Для определения полезных ископаемых в дон-

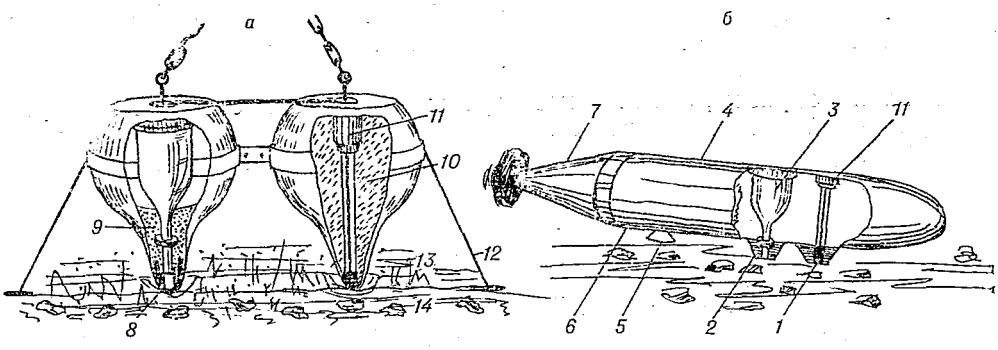


Рис. 24-16. Аппаратура для исследования морского дна с корабля (*а*) и подводной лодки (*б*).

1 — источник нейтронов, *2* — германиево-литиевый детектор, *3* — сосуд с жидким азотом для охлаждения детектора, *4* — местоположение анализатора, *5* — освещение, *6* — отсек для двух человек, *7* — отсек с двигателем, *8* — борный экран, *9* — свинец, защищающий детектор от излучения, идущего из воды, *10* — полиэтиленовый экран-замедлитель, *11* — мотор, управляющий положением источника, *12* — треножник, *13* — илистые отложения, *14* — уплотненные осадки.

ных отложениях на фоне излучения хлора и других мешающих химических элементов необходима аппаратура с высоким энергетическим разрешением. Для этих целей авторы считают наиболее приемлемым германиево-литиевый детектор. В качестве источника нейтронов они предлагают использовать калифорний-252 с выходом около 10^8 нейтр/с. Аппаратура с таким детектором и источником может спускаться на дно с корабля или устанавливаться на подводной лодке (рис. 24-16). Детектор и источник размещаются в выступах так, чтобы при установке прибора (подводной лодки) на дно они погружались в ил на некоторую глубину. Для защиты от нейтронов детектор окружается слоем бора.

При работе с германиево-литиевым детектором объемом 30 $см^3$ на моделях установлено, что по СНГМ можно определять марганец по пикам 6,04; 6,24 и 6,55 МэВ. Для определения золота можно использовать пики с энергией 5,23 и 5,43 МэВ (измерения проводились при погружении прибора в морскую воду с содержанием золота в донных осадках в количестве $8{,}5 \cdot 10^{-4}\%$).

При определении в осадках элементов с высокими резонасными сечениями (марганец, серебро, золото и др.) авторы предлагают контейнер с источником покрывать слоем кадмия. Наличие кадмия приводит к резкому поглощению потока тепловых нейтронов. Такие элементы, как хлор, кремний, алюминий и др., слабее вступают в реакции (n, γ) и меньше создают помех при определении вышеуказанных элементов. Опыты подтвердили это. Однако количество импульсов в каждом канале при этом уменьшается, что в свою очередь приводит к уменьшению порога чувствительности установки.

§ 5. Нейтронный гамма-каротаж неупругого рассеяния быстрых нейтронов

Некоторые элементы, вступающие в реакцию $(n, n'\gamma)$, приведены в табл. 24-1. При измерениях по НГК′ на показания прибора значительное воздействие оказывает гамма-излучение радиационного захвата, от которого практически невозможно избавиться при работе с любым источником нейтронов. Эффект от НГК′ на фоне эффекта от НГК может быть выявлен лишь при измерениях с двумя источниками с разным спектром быстрых нейтронов. Однако к настоящему времени наш выбор ограничен двумя типами источников — с относительно жестким и мягким спектрами. К первому, как известно (см. табл. 1-4), относятся плутоний- и полоний-бериллиевые препараты с максимальной энергией около 11 МэВ и средней энергией около 4,5 МэВ, а ко второму — полоний-борные препараты с максимальной энергией ~4,5—5,0 МэВ и средней энергией 2,7 МэВ.

Таким образом, если горные породы по разрезам скважин один раз облучать потоком нейтронов с жестким спектром, а второй — с мягким, то при обработке получаемых данных по разностной методике можно будет определять в породах лишь два элемента — углерод и кислород, имеющие пороги реакции $(n, n'\gamma)$, соответственно равные 4,80 и 6,77 МэВ (см. табл. 24-1). При измерениях с полоний-борным источником реакция $(n, n'\gamma)$ практически не происходит на ядрах углерода и кислорода. Поэтому, нормируя результаты измерений с жестким и мягким нейтронными излучателями по измерению спектра гамма-излучения при энергиях свыше 6,1 МэВ, можно раздельно определять содержание углерода и кислорода в породах [14.4]. Авторы считают, что спектр гамма-излучения свыше этой энергии обусловлен исключительно захватным излучением, и отмечают, что ошибка, возникающая при таком допущении, в самом неблагоприятном случае не выходит за пределы 15%.

В работе М. Г. Крутикова и др. [24.12] показано, что при определении кислорода по рассмотренной методике эффект НГК может достигать 20—25% (в случае облучения песка, насыщенного водой), а при определении углерода в карбонатных породах — 35—40%.

Рассматриваемая методика НГК может быть применена для выявления в разрезах угольных пластов. В соответствии с этим в книге [14.4] изучена глубинность метода НГК′. Для пласта сухого угля плотностью 1,27 г/см³ глубинность для зонда размером 20 см оценена равной 13 см, т. е. на 4,5 см меньше соответствующей величины для СНГК (см. табл. 24-3). Для водонасыщенного угольного пласта глубинность НГК′ уменьшалась до 10 см, а для водонасыщенного песчаника — до 6,1 см.

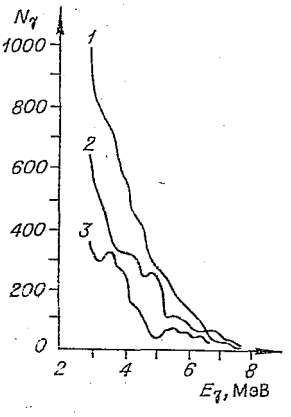


Рис. 24-17. Спектр гамма-излучения (в отн. ед.), полученный при облучении угольного пласта с зольностью 30%.

1 — спектр, полученный с полоний-бериллиевым источником, *2* — то же, с полоний-борным источником, *3* — разностный спектр.

Спектр гамма-излучения, полученный по разностной методике на одной из скважин Подмосковного угольного бассейна, приведен на рис. 24-17. Исследования проводились с прибором типа СГС-1 с кристаллом йодистого натрия размерами 30×30 мм в скважине диаметром 92 мм, заполненной водой. Выход нейтронов для полоний-бериллиевого источника составлял $5{,}7 \cdot 10^6$ нейтр/с, а для полоний-борного — $3{,}7 \cdot 10^6$ нейтр/с. Как видно из рис. 24-17, в разностном спектре, соответствующем реакции $(n, n'\gamma)$, четко выделяются пики, обусловленные кислородом (область энергий $E_1 = 6{,}1 - 1{,}02 = 5{,}08$ МэВ, $E_2 = 6{,}1 -$

$-0{,}51=5{,}69$ МэВ и $E_3=6{,}1$ МэВ) и углеродом (область энергий $E_1=$ $=4{,}43-1{,}02=3{,}41$ МэВ, $E_2=4{,}43-0{,}51=3{,}92$ МэВ и $E_3=4{,}43$ МэВ).

В работе [14.4] отмечается, что метод НГК′ может применяться для определения зольности углей, однако по точности он уступает СНГК при регистрации жесткого и мягкого гамма-излучения (см. § 4 этой главы).

Е. М. Кадисовым [29.23] произведены измерения на моделях песчаных пластов пористостью 40%, насыщенных нефтью и водой и обсаженных пятидюймовой колонной с толщиной цементного кольца 4 см. При регистрации излучения углерода в диапазоне 3,4—4,4 МэВ на контакте этих пластов был получен эффект величиной 16%.

Другие элементы по рассматриваемой методике НГК′ могут быть определены при измерениях с источниками нейтронов с более мягким спектром, чем у полоний-борного источника. К таковым следует отнести полоний-фторный и полоний-литиевый, имеющие максимальные энергии соответственно 2,8 и 1,32 МэВ (см. табл. 1-4). При измерениях по разностной методике, например с полоний-борным и полоний-фторным препаратами, можно определять кальций в породах, а при измерениях по разностной методике с полоний-фторным и полоний-литиевым источниками — магний, алюминий, кремний, серу и т. п.

Д. Д. Оуен [24.57] для выявления нефтеносных пластов в скважинах с помощью трехканального анализатора рекомендует измерять спектр гамма-излучения с энергией 1,78 МэВ (кремний N_{Si}); 3,74 МэВ (кальций N_{Ca}) и 6,06 МэВ (кислород N_O) и записывать диаграммы отношений N_{Si}/N_O и N_{Ca}/N_O. Для нефтеносных пластов любой пористости эти отношения, по мнению Д. Д. Оуена, постоянны, а для водоносных пластов величина этого отношения уменьшается. Водородсодержание пластов измеряется по методике ННК-н нейтронным детектором (йодистый литий), имеющимся в приборе.

Разработка импульсной микросекундной радиометрической аппаратуры позволяет реализовать полуимпульсный И′НГМ′ на основе ампульных источников, в которых наряду с нейтронами возникают гамма-кванты. Так, под действием альфа-частиц в реакции на бериллии образуются гамма-кванты с энергией 4,43 МэВ.

Метод И′НГМ′ для исследования разрезов скважин предложен коллективом сотрудников ВНИИ ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ). Вылет быстрого нейтрона из ампульного источника фиксируется с помощью специального детектора по гамма-квантам с энергией 4,43 МэВ. Гамма-кванты неупругого рассеяния нейтронов на ядрах углерода, содержащихся в породе, регистрируются вторым детектором спустя несколько микросекунд. Оба детектора работают на схему совпадений микросекундной радиометрической аппаратуры. Второй детектор от гамма-квантов, вылетающих из источника, защищен свинцовым экраном.

Глава 25

НЕЙТРОННЫЙ АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД

Нейтронный активационный метод (НА) с ампульными источниками в настоящее время достаточно широко применяется в лабораторном анализе проб горных пород и руд, а также при исследовании разрезов

скважин (НАК — нейтронный активационный каротаж) и начинает внедряться в практику полевых ядерно-геофизических исследований (для опробования обнажений, стенок горных выработок и рыхлых отложений — при изучении ореолов рассеяния).

Радиоактивные изотопы могут возникать под действием быстрых нейтронов (НА-б) в реакциях (n, p), (n, α), $(n, 2n)$, $(n, n'\gamma)$ и других, тепловых (НА-т) и резонансных нейтронов (НА-р) — преимущественно в реакции (n, γ).

Под действием нейтронов и других ядерных частиц могут образовываться радиоактивные изотопы в возбужденном состоянии. В стабильное состояние эти изотопы переходят через метастабильную стадию. Метастабильное состояние ядра характеризуется определенным средним временем его жизни τ, меняющимся в пределах 10^{-5}—10^{-13} с. Переход ядра из возбужденного состояния в метастабильное сопровождается испусканием гамма-квантов с энергией E. Спустя время τ ядро, переходя в стационарное состояние, испускает гамма-кванты с энергией E'. Измерив с помощью схемы совпадений с задержкой, равной τ, гамма-кванты с энергией E и E', можно судить о содержании в среде исследуемого элемента. Метод, основанный на измерении запаздывающих совпадений изотопов, возникающих под действием нейтронов, назовем нейтронным активационным анализом запаздывающих совпадений (НАзс). Этот метод прежде всего может применяться для определения целого ряда элементов в лабораторных условиях, а также при опробовании стенок горных выработок и изучении разрезов скважин. По сравнению с НА этот метод обладает значительно большей селективностью.

Метод НАзс предложен В. С. Авзяновым и др. [3.16] и опробован на модели сухой скважины применительно к определению вольфрама. Однако в практике ядерно-геофизических исследований он еще не применяется, поэтому в этой главе больше на нем останавливаться не будем.

Ниже рассмотрим физические основы метода НА и области его применения.

§ 1. Физические основы метода

Число радиоактивных ядер, образующихся в единице объема вещества в единицу времени под действием нейтронов любой группы, описывается соотношением

$$q = n_A p_i C_i \int_0^E \sigma(E_n) J(E_n)\, dE_n , \qquad (25\text{-}1)$$

где n_A — число ядер в единице объема вещества (см. формулу (1-3)); p_i — концентрация определяемого элемента в изучаемой среде; C_i — распространенность активирующегося изотопа; $\sigma(E_n)$ — эффективное сечение ядерной реакции возбуждения ядра изотопа; $J(E_n)$ — плотность потока нейтронов, нейтр/см^2·с.

Величину q часто называют скоростью образования радиоактивных ядер.

Для нейтронов данной конкретной энергии соотношение (25-1) можно записать в более простом виде:

$$q = n_A p_i C_i \sigma J_i = \rho \sum p_i C_i J_i . \qquad (25\text{-}2)$$

Здесь Σ — макроскопическое массовое сечение; ρ — плотность вещества.

Сечения ядерных реакций для различных химических элементов можно найти в справочниках В. К. Кюнца и И. Шинтлмейстера [2.15], Р. К. Коха [2.14], И. В. Медниса [25.46], А. И. Алиева и др. [25.62], И. А. Маслова и В. Ф. Лукницкого [25.82], нейтронных атласах [4.2, 4.3, 4.14] и книгах [3.20, 25.13, 25.83].

В процессе облучения нейтронами изучаемого объекта происходит накопление ядер активирующихся изотопов и их распад. При некотором времени, обусловливающемся периодом полураспада изучаемого изотопа, наступает равновесие между этими двумя процессами, соответствующее образованию определенного числа радиоактивных ядер, отвечающих насыщению

$$n_0 = \frac{q}{\lambda} = \frac{qT}{0,693}, \qquad (25\text{-}3)$$

где q — то же, что и в выражениях (25-1) и (25-2); T — соответственно постоянная распада и период полураспада.

В зависимости от времени облучения изучаемого объекта t_0 число образующихся радиоактивных ядер одного изотопа определяется соотношением, аналогичным (5-3):

$$n(t_0) = n_0 (1 - e^{-\lambda t_0}) = n_0 (1 - e^{-0,693 t_0/T}). \qquad (25\text{-}4)$$

Нарастание радиоактивности образца по этому закону показано на рис. 25-1. При времени $t_0 = T$ наводится примерно 50% радиоактивных ядер, при $t_0 = 5T$—97% и $t_0 = 7T$—99%. Отсюда видно, что выбор времени активации свыше T может привести лишь к удвоению наведенной активности. Увеличение времени свыше $5T$ вообще нерационально, поскольку радиоактивность образца практически уже не возрастает.

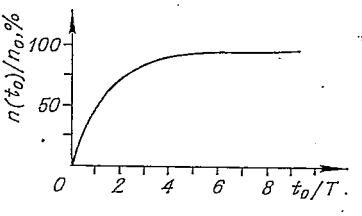


Рис. 25-1. Кривая нарастания радиоактивности образца.

Из соотношения (25-4) видно, что рост числа радиоактивных ядер по мере облучения происходит по асимптотическому закону, стремящемуся к величине n_0, и лишь только для малых продолжительностей облучения ($t_0 \ll 0,693T$) накопление числа радиоактивных ядер происходит по закону, близкому к линейному:

$$n(t_0) = 0,693\, n_0 t_0/T = q t_0. \qquad (25\text{-}5)$$

Если в образце образуется не один, а несколько радиоактивных изотопов, общее их число накапливается в соответствии с соотношением [25.30]:

$$n(t_0) = \sum_{i=1}^{m} n_{0i} (1 - e^{-\lambda_i t_0}), \qquad (25\text{-}6)$$

где m — число компонент.

Распад радиоактивных ядер атомов одного наведенного изотопа в образце после его извлечения из зоны активации или после извлечения из нее источника в зависимости от времени t подчиняется закону:

$$n = n(t_0)\, e^{-0,693 t/T} = n_0 (1 - e^{-0,693 t_0/T})\, e^{-0,693 t/T} = n_0 f(t_0, t, T). \qquad (25\text{-}7)$$

С. Поповым [25.51] для удобства пользования этим соотношением предложено изображать его в пространственной системе координат.

В связи с тем, что величина потока бывает точно не известна и на практике в большинстве случаев невозможно точно учесть геометрию измерений, исследования по НА ведут относительным способом по сравнению с замерами наведенной активности эталонов.

Скорость счета регистрируемого излучения наведенной активности в зависимости от времени t_0 и t меняется по закону

$$N = a\lambda n = aqf(t_0, t, T), \qquad (25\text{-}8)$$

где a — коэффициент пропорциональности.

Это соотношение чаще всего записывают в виде:

$$N = N_0\, e^{-\lambda t} = N_0\, e^{-0{,}693\, t/T}, \qquad (25\text{-}9)$$

где $N_0 = aq(1 - e^{-\lambda t_0})$ — скорость счета в момент времени $t = 0$.

При содержании в образце нескольких радиоактивных изотопов изменение его наведенной активности со временем происходит по закону

$$N = \sum_{i=1}^{m} N_{0i} e^{-\lambda_i t}, \qquad (25\text{-}10)$$

где N_{0i} — скорость счета i-го изотопа с постоянной распада λ_i.

Поскольку горные породы и руды являются средами со сложным химическим составом, для изучения содержания в них интересующего нас изотопа на возможно меньшем фоне излучения других изотопов пользуются следующими методическими приемами. Продолжительность облучения породы или руды выбирается такой, чтобы число активированных ядер изучаемого изотопа было по возможности наибольшим по сравнению с изотопами других активированных ядер. Излучение изучаемого изотопа регистрируется в то время, когда оно составляет наибольшую часть от суммарного излучения всех активированных изотопов. Время измерений наведенной активности выбирается обычно не свыше $5T$. Если образующийся радиоактивный изотоп при распаде не сразу превращается в стабильный, а проходит, например, еще через одну стадию распада, количество второго радиоактивного изотопа в облучаемой среде определяется соотношением

$$n_2 = \frac{n_0 T_1 T_2}{0{,}693\,(T_1 - T_2)} \left\{ (1 - e^{-0{,}693\, t_0/T_1}) e^{-0{,}693\, t/T_1} - \frac{T_2}{T_1} (1 - e^{-0{,}693\, t/T}) \right\}, \qquad (25\text{-}11)$$

где T_1 и T_2 — соответственно периоды полураспада первого и второго изотопов.

Методика графического разделения таких изотопов рассматривается в работе С. Г. Малахова [25.44].

Поскольку при измерении изучения на показания детектора, кроме излучения наведенной активности, действует и фоновое излучение, интервал времени замера следует выбирать исходя из следующего соотношения:

$$t = \frac{N + N_\Phi}{(N - N_\Phi)^2 (\delta N)^2}, \qquad (25\text{-}12)$$

где N и N_Φ — скорости счета регистрируемого суммарного излучения и излучения фона; δN — задаваемая погрешность измерения скорости счета.

Если периоды полураспада образующихся при активации изотопов заранее неизвестны, замеры следует проводить до тех пор, пока скорость счета излучения наведенной активности не станет меньше соответствующей величины естественного фона. На практике обычно бывает заранее известно большинство образующихся изотопов, но неизвестно их соотношение. Так, если в породе присутствуют два изотопа с известными периодами полураспада, но неизвестными соотношениями интенсивностей их излучения, то полная продолжительность измерения периодов полураспада выбирается такой:

$$t = \frac{T_к \cdot T_д}{T - T_к}, \qquad (25\text{-}13)$$

где $T_к$ и $T_д$ — соответственно периоды полураспада короткоживущего и долгоживущего изотопов.

Методика измерений по НА, таким образом, сводится к следующим основным операциям: облучению породы в течение времени t_0, доставке

проактивированного образца к детектору или детектора к месту облучения, определяемого временем $t_п$ (**время переноса**, время паузы), и измерению наведенной активности в течение времени t.

Длительность паузы может быть различной в зависимости от способа транспортировки образца от места облучения к месту измерения и наличия в образце других радиоактивных изотопов, мешающих определению в нем искомого химического элемента или изотопа. Для повышения точности и надежности НА прибегают к многократным облучениям и измерениям (подробнее об этом см. в работе [25.13]). Полное число импульсов, обусловленных наведенной активностью одного изотопа, определяется соотношением

$$N_\Sigma = N_0 \int_0^{5T} e^{-\lambda t}\,dt = \frac{N_0}{\lambda}(1 - e^{-5\lambda T}) = 0{,}96873\,\frac{N_0}{\lambda} = 1{,}396\,N_0 T. \quad (25\text{-}14)$$

Фактически же при НА наведенная активность измеряется в интервале времени от $t_п$ до $t \leqslant 5T$. Для этого случая соотношение (25-14) имеет следующий вид:

$$N_\Sigma = \frac{N_0}{\lambda}\,(e^{-\lambda t_п} - e^{-\lambda t}). \quad (25\text{-}15)$$

Идентификация определяемого в пробе элемента (изотопа) осуществляется на основе изучения периодов полураспада и видов излучений, испускаемых радиоактивными изотопами. Радиоактивность образцов при этом устанавливается интенсиметрической или спектрометрической аппаратурой.

При определении изотопов по измерению периодов полураспада экспериментальные данные $N = f(t)$ можно нанести на полулогарифмический бланк. В случае, если в изучаемом объекте образовался один изотоп, на графике получается прямая линия, отвечающая зависимости (25-9). Величина 0,5 N соответствует периоду полураспада определяемого элемента. Эта величина может быть определена также по результатам измерения скорости счета в два разных момента времени t_1 и t_2. Взяв отношение скоростей счета, получаем:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{-0{,}693\,\Delta t/T},$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$.

Из этого соотношения имеем:

$$\left.\begin{aligned} T &= 9{,}693\,\Delta t\,[\ln (N_1/N_2)]^{-1}, \\ \lambda &= (\Delta t)^{-1} \ln (N_1/N_2). \end{aligned}\right\} \quad (25\text{-}16)$$

При наличии в среде двух изотопов со значительно отличающимися периодами полураспада скорость счета в соответствии с формулой (25-10) определяется соотношением

$$N = N_1(t) + N_2(t) = N_{01}e^{-\lambda_1 t} + N_{02}e^{-\lambda_2 t},$$

где N_{01} и N_{02} — скорости счета соответственно первого и второго изотопов при $t = 0$.

При достаточно больших значениях времени t член, отвечающий короткоживущему изотопу, становится практически равным нулю; имеем уравнение с одним неизвестным $N_2 = N_{02}e^{-\lambda_2 t}$, отвечающее изотопу с большим периодом полураспада. На графике в полулогарифмических координатах для больших значений t получаем прямую линию (рис. 25-2). При продолжении этой линии до пересечения с осью ординат появляется кривая $N_2(t)$ для всего рассматриваемого диапазона времен. Вычитая значения $N_2(t)$ из суммарной кривой $N(t)$, получаем график $N_1(t)$ для короткоживущего изотопа.

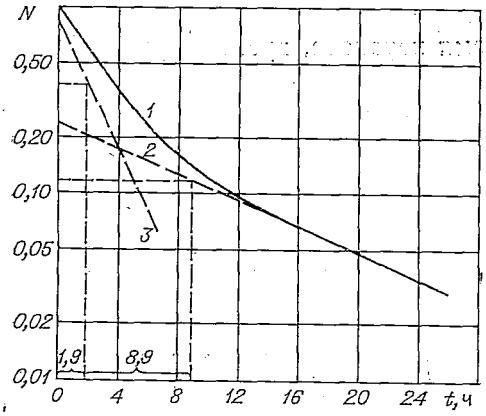


Рис. 25-2. Изменение со временем скорости счета наведенной активности пробы.

1 — суммарная кривая, *2* — кривая распада долгоживущего изотопа, *3* — кривая распада короткоживущего изотопа.

Интервалы времени, соответствующие уменьшению активности изотопов на 50%, отвечают их периодам полураспада. Из рис. 25-2 видно, что кривой *2* отвечает период полураспада, равный 8,9 ч, а для кривой *3* —1,9 ч.

При наличии в пробе трех изотопов, значительно отличающихся по периоду полураспада, можно аналогичным способом разбить кривую на три составляющих и определить периоды их полураспада.

В общем случае, если известно, что в образце имеются m радиоактивных элементов с неизвестными значениями начальных скоростей счета $N_{01}, N_{02}, \ldots, N_{0m}$ и постоянных распада $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_m$, по значениям скоростей счета излучения в $2m$ различные моменты времени $t_1, t_2, \ldots, t_{2m}$ можно определить все эти неизвестные. Приходится решать систему $2m$ уравнений. Общее аналитическое решение этой задачи можно найти в работах [25.6, 6.63] и др. Заметим, что изложенный в [25.6] метод пригоден, лишь когда периоды полураспада исследуемых изотопов заметно различаются. При идентификации изотопов можно также пользоваться специальной системой координат [25.13, 25.14].

При анализе одной компоненты, определяемой по формуле (25-14), абсолютная и относительная ошибки измерений постоянной распада определяются из соотношений [25.13]

$$\Delta\lambda = \frac{\sqrt{N_1 \cdot N_2}}{\Delta t N_1 N_2}, \qquad (25\text{-}17)$$

$$\delta\lambda = \frac{\sqrt{N_1 \cdot N_2}}{N_1 N_2 \ln (N_1 N_2)}. \qquad (25\text{-}18)$$

В случае двух компонент, содержащихся в исследуемой среде, выражения, аналогичные (25-17) и (25-18), значительно усложняются [25.13].

Изменения содержаний в пробах элементов с высокими сечениями захвата нейтронов приводят к погрешностям НА. В этом случае замеры по НА следует комплексировать с замерами ННМ (см. гл. 23). Это справедливо для проб весом свыше 5—40 г. Для малых же навесок проб влияние элементов с высокими сечениями можно не учитывать [25.30].

Выражение для порога чувствительности при определении в среде одного элемента может быть представлено в следующем виде [7.6, 25.13]:

$$p_0 = \frac{K_н^2 f(\lambda, t_0, t)}{2\varepsilon J \rho \Sigma} \left(1 + \sqrt{1 + 8N_ф / K_н^2}\right), \qquad (25\text{-}19)$$

где $f(\lambda, t_0, t) = \lambda (1 - e^{-\lambda t_0})(1 - e^{-\lambda t})$. Эта формула для некоторых значений постоянных распада имеет минимум, соответствующий наименьшей чувствительности; остальные обозначения ясны из данных гл. 7.

При большой величине фона соотношение (25-19) может быть представлено так:

$$p_0 = \frac{K_н f(\lambda, t_0, t)}{\varepsilon J \rho \Sigma} \sqrt{2N_ф}. \qquad (25\text{-}20)$$

Для пренебрежимо малых значений фона соотношение (25-19) примет вид

$$p_0 = \frac{K_н^2 f(\lambda, t_0, t)}{\varepsilon J \rho \Sigma}. \qquad (25\text{-}21)$$

Повысить порог чувствительности можно за счет увеличения числа циклов (n) облучения и измерения:

$$p_{0n} = \frac{p_{01}}{n}, \qquad (25\text{-}22)$$

где p_{01} — порог чувствительности в случае одного цикла, а p_{0n} — случае n циклов.

Оценка порога чувствительности в случае определения в пробе двух компонент рассматривается в работе [25.13].

§ 2. Методика анализа проб

НА для анализа геологических объектов с применением ампульных источников нейтронов впервые был применен Ирвингом в США (1957 г.). Однако наиболее интенсивные исследования в этом направлении с 1957 г. стала проводить Д. И. Лейпунская [25.41]. В настоящее время НА достаточно широко используется для определения в пробах фтора, алюминия, кремния, ванадия, марганца, кобальта, меди и индия, а также натрия, калия, селена, серебра, цезия, вольфрама и золота. Помимо этого метод НА применялся также для анализа редкоземельных элементов в пробах пород [14.3]. Однако высокие сечения отдельных элементов, не активирующихся при этом или дающих долгоживущие изотопы, мешают определению элементов, дающих короткоживущие изотопы. Поэтому для определения этих элементов в последнее время стали использовать в основном излучение генераторов нейтронов и ядерных реакторов (см. гл. 28).

Для анализа вышеперечисленных элементов создан ряд установок и методик анализа. В практике ядерно-геофизических исследований наибольшее применение находят методики активации на быстрых (НА-б) и тепловых (НА-т) нейтронах. В работе [4.19] указано на возможность реализации НА-р. Сущность этого метода, как и ННМ-р (см. § 3 гл. 23), сводится к методике двойных замеров с кадмиевым, а также с кадмиевым и резонансным фильтрами из определяемого элемента. Каждый раз при этом измеряется наведенная активность самой пробы, в частности, характерный спектр гамма-квантов изучаемого изотопа. Разностный спектр этих двух замеров и является мерой селективного определения искомого элемента. Исследованиями в этом направлении занимались авторы [23.18, 23.19], облучая фольги из индия и золота. Однако для анализа геологических объектов метод НА-р до настоящего времени еще не применялся.

1. **Нейтронно-активационные установки.** Для НА разработаны стационарные нейтронные установки для измерений в условиях лабораторий и облегченные установки — для анализа в полевой обстановке.

Устройство одной из стационарных установок изображено на рис. 25-3 [25.25, 25.26, 25.45]. В парафиновом замедлителе находятся четыре горизонтальных канала. Они сгруппированы по два и расположены в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Источник нейтронов с выходом около 10^7 нейтр/с устанавливается в центре блока таким образом, что два канала от него располагаются снизу, а другие два — сверху. Чтобы каналы сильно не искажали поле нейтронов в замедлителе, в них вводятся плексигласовые бруски с гнездами для проб. В каждой паре каналов один предназначен для активации проб

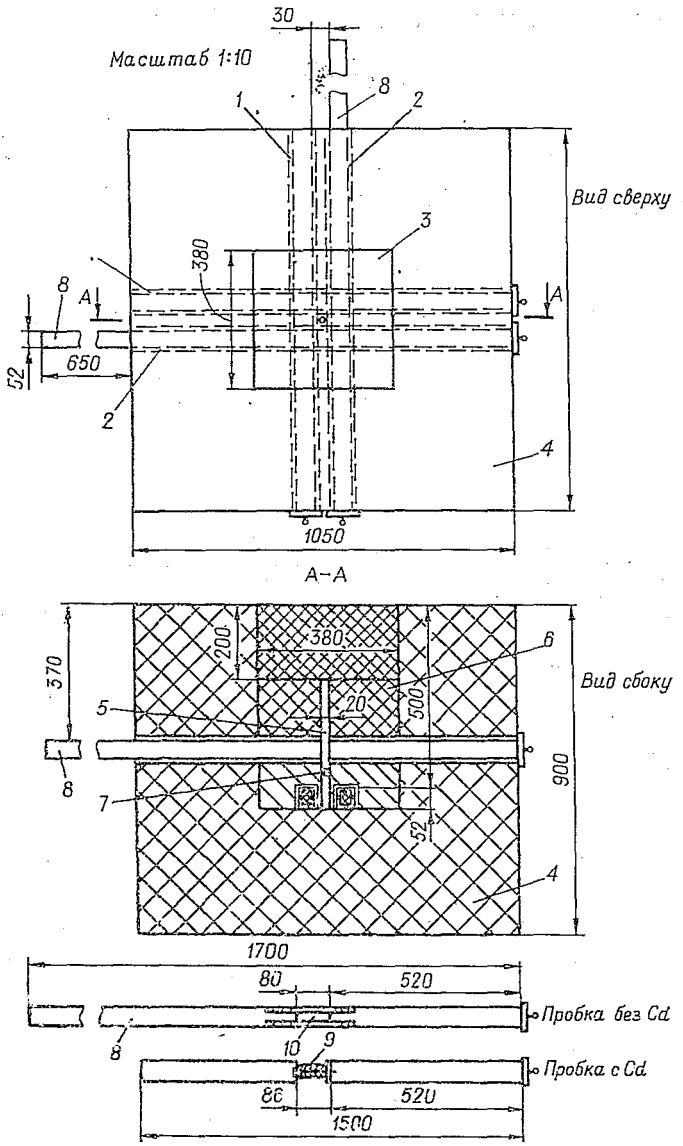


Рис. 25-3. Устройство четырехканальной активационной установки (размеры в миллиметрах):

1 — камеры с пробками — пеналами (с кадмиевыми экранами), *2* — то же без кадмия, *3* — защитная крышка, *4* — парафин, *5* — канал для нейтронного источника, *6* — центральная секция активационного блока, *7* — источник нейтронов, *8* — плексигласовые бруски-пеналы, *9* — кадмиевый экран, *10* — гнездо для кассеты.

сплошным спектром нейтронов, другой — надкадмиевым (быстрые нейтроны). Пробы засыпаются в цилиндрические кольцеобразные кассеты. Бруски без кадмиевых экранов в рабочем состоянии установки выступают за нее с нерабочих сторон куба. При извлечении или установке пробы в канал для облучения брусок выводится из блока настолько, чтобы обеспечился доступ к гнезду. Все пространство в канале остается заполненным остальной частью бруска. Брусок с кадмиевым экраном является составным. Кадмиевый стакан наглухо соединен с задней частью бруска. Для извлечения или установки пробы из блока вынимается передняя часть бруска. В торце бруска имеется цилиндрический стержень с вертушкой. Кассета с пробой надевается на этот стержень и

закрепляется с помощью вертушки. Кадмиевый же стакан, за исключением передней крышки, укрепленной на извлекаемой части бруска, все время остается в центре куба. Это сделано для того, чтобы при пользовании другими каналами не искажалось поле нейтронов в зоне облучения, поскольку установка рассчитана на одновременную работу во всех четырех каналах. Установка может быть приспособлена для облучения проб не только в кольцевых цилиндрических кассетах, но и в плоских.

Устройство одной из облегченных нейтронно-активационных установок изображено на рис. 25-4, *а* [25.5]. Для изготовления 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. В процессе измерений важно, чтобы анализируемые пробы оставались всякий раз в своих строго фиксированных положениях (пробкодержатель с пробой, например, от замера к замеру не следует поворачивать относительно его оси и т. п.). В противном случае это приводит к дополнительным погрешностям измерений. Промежуточного замедлителя может и не быть. Описание другой одноканальной установки приводится в [25.26]. Двухканальная установка описана в [25.80].

Созданы также установки, обеспечивающие автоматическую или полуавтоматическую подачу образцов для облучения и измерения [25.8, 25.60, 25.61]. Измерения наведенной активности в зависимости от конкретной задачи могут вестись счетчиками различного типа, размещенными в свинцовых домиках, показанных на рис. 23-4, *б*.

ВНИИЯГГом и Восточным геофизическим трестом Министерства геологии РСФСР совместно с ОКБ Министерства геологии СССР разработана для серийного выпуска трехканальная установка типа «Нейтрон-2» (см. приложение 3) [25.59]. Образцы в этой установке активируются смешанным потоком нейтронов, а также потоком тепловых и надтепловых нейтронов. Источник нейтронов с выходом 10^7 нейтр/с размещается в свинцовом экране для получения равномерного потока нейтронов. Свинцовый домик, имеющийся в комплекте прибора, допускает возможность измерения наведенной бета-активности при помощи двух торцовых бета-счетчиков типа СБТ-10 или пластмассового сцинтиллятора с ФЭУ-13, а гамма-активности при помощи кристалла йодистого натрия. Установка рассчитана на активацию проб весом 5 г. При работе с такими навесками вес проб и эталонов необходимо тщательно выдерживать постоянным. При работе с большими навесками в случае измерения гамма-активности пробы следует каждый раз взвешивать и учитывать изменения их веса. При бета-измерениях, если толщина проб превышает толщину насыщения по отношению к бета-излучению (см. 15-2), вес проб можно не учитывать.

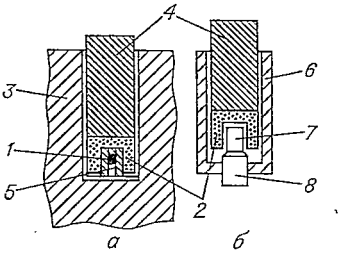


Рис. 25-4. Устройство одноканальной облегченной нейтронно-активационной установки (*а*) и измерительного блока (*б*).

1 — источник нейтронов, *2* — кассеты с пробой, *3* — замедлитель (вода или парафин), *4* — парафиновый пробкодержатель кассеты, *5* — промежуточный замедлитель, *6* — свинцовый домик, *7* — кристалл йодистого натрия, *8* — фотоэлектронный умножитель.

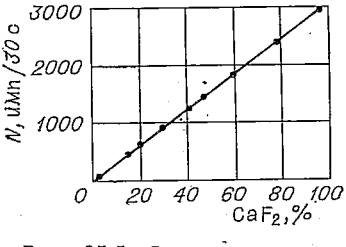


Рис. 25-5. Зависимость регистрируемой скорости счета от содержания в пробах флюорита.

Размещение в нейтронно-активационных установках источников с выходом 10^7 нейтр/с позволяет в каналах быстрых нейтронов получать плотности потоков от $5 \cdot 10^2$ нейтр/см$^2 \cdot$с (боковые каналы) до 10^5 нейтр/см$^2 \cdot$с (центральные каналы), а в каналах тепловых нейтронов — плотности потоков от 10^2 нейтр/см$^2 \cdot$с (боковые каналы) до 10^4 нейтр/см$^2 \cdot$с (центральные каналы) [15.31, 25.58].

В США в настоящее время для исследований по НА созданы мощные нейтронные установки, дающие плотность потока быстрых нейтронов величиной $9 \cdot 10^7$ нейтр/см^2 с [25.75]. Источник состоит из 12 капсул америций-241-кюрий-242-бериллиевого препарата мощностью около 4000 Ки (по кюрию-242). На такой установке можно вести анализ 73 химических элементов.

При измерениях по НА в полевых условиях нейтронно-активационные установки необходимо устанавливать в местах с незначительным изменением температуры. В противном случае это приводит к дополнительным погрешностям измерений. Так, при определении алюминия увеличение температуры на 4,5° ведет к ошибке в 1%.

При измерении спада наведенной активности во времени удобно использовать соответствующую самозаписывающую аппаратуру.

Вопросы техники безопасности применительно к нейтронно-активационным установкам рассматриваются в работе [25.30].

2. **Определение фтора.** Природный фтор состоит из одного стабильного изотопа с массовым числом 19 (100%). Некоторые другие сведения об этом элементе приводятся в приложении 6. Основным природным соединением фтора является флюорит (CaF_2), имеющий важное практическое значение. Содержание фтора в минеральном сырье может быть примерно от 15 до 40%. Попутно фтор также извлекается при переработке апатитов и фосфоритов, содержание его в них может меняться от 2 до 3,5%.

Под действием быстрых нейтронов ампульных источников могут происходить реакции $F^{19}(n, p)O^{19}$ и $F^{19}(n, \alpha)N^{16}$. Порог первой реакции равен 3,9 МэВ, второй — 1,57 МэВ. Реакции (n, p) и (n, α) для нейтронов деления имеют сечения соответственно $5 \cdot 10^{-4}$ барн ($1{,}6 \cdot 10^{-5}$ см^2/г) и $4{,}5 \cdot 10^{-3}$ барн ($1{,}43 \cdot 10^{-4}$ см^2/г). Реакция (n, α) имеет максимум сечения для нейтронов с энергией 6 МэВ — 0,265 барн ($8{,}4 \cdot 10^{-3}$ см^2/г). Кислород-19, возникающий в реакции (n, p), с периодом полураспада 29,1 с испускает бета-частицы с энергией 4,6 (41%) и 3,25 (59%) МэВ и гамма-кванты с энергией 1,36 (70%) и 0,2 (30%) МэВ. Азот-16, возникающий в реакции (n, α), имеет период полураспада 7,4 с, испускает бета-частицы с энергией 10,3 (20%), 4,3 (40%) и 3,8 (40%) МэВ и гамма-кванты с энергией 7,11 (21%); 6,13 (55%) и 2,7 (1,1%) МэВ.

Под действием тепловых нейтронов может происходить также реакция $F^{19}(n, \alpha)F^{20}$, имеющая сечение $9{,}4 \cdot 10^{-3}$ барн ($2{,}98 \cdot 10^{-4}$ см^2/г). Изотоп фтор-20 с периодом полураспада 10,7 с испускает бета-частицы с энергией 5,42 МэВ (100%) и гамма-кванты с энергией 1,63 МэВ (100%).

Для анализа фтора используется методика НА-б. Е. М. Лобановым. А. А. Хайдаровым и др. [25.60, 25.61] для этих целей на основе реакции (n, α) разработана методика и автоматизированное устройство с источником, имеющим выход около $6 \cdot 10^6$ нейтр/с. Для анализа брались пробы весом 1 кг, которые облучались в течение 30 с и затем автоматически в течение 2 с подавались к детектору (кристалл йодистого натрия размерами 40×50 мм с фотоумножителем типа ФЭУ-13). С помощью этого детектора регистрировались гамма-кванты с энергией свыше 4 МэВ в течение 30 с. Для получения достаточной статистики измерения проводились по методике, включающей до 10 циклов. Порог чувствительности при этом оценен равным 1%.

В. И. Прокопчиком и Т. И. Субботиной [25.53, 25.77] при облучении проб в течение 42 с (пауза 3 с, время измерения 30 с) при реги-

страции гамма-излучения с энергией от 2 МэВ и выше аналогичным детектором при пяти циклах измерений получен порог чувствительности на фтор 0,25% при работе с источником $5 \cdot 10^6$ нейтр/с и 0,1% — при работе с источником $2 \cdot 10^7$ нейтр/с. Вес проб составлял 200—500 г. Градуировочный график для всего изучаемого диапазона концентраций носил линейный характер (рис. 25-5).

В качестве оптимального режима измерений в работе [25.53] рекомендуется время облучения и замера выбирать по 14 с, время паузы — по 2 с, а число циклов при автоматической транспортировке образца — равным 12. Общие затраты времени составляют 6—7 мин.

Определению фтора в пробах мешает реакция O^{16} (n, p) N^{16}. Однако в связи с тем, что порог ее достаточно велик (10,22 МэВ), а сечение невелико — для нейтронов деления около $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ барн ($5{,}3 \cdot 10^{-7}$ см^2/г),— вклад от нее, как показано в работе [25.61], составляет менее 2%.

Е. П. Вязниковым и В. В. Глассоном [10.23] для анализа фтора использовалась реакция (n, p). В случае отсутствия в пробах кремния измерения с регистрацией бета-излучения проводятся при одном цикле облучения на установке, показанной на рис. 25-3. Для исключения влияния активации алюминия измерения проводят в кадмиевом канале. Время облучения и измерения выбирают по 1,5 мин, а паузу — 10—15 с. Анализ одной пробы занимает около 5 мин. В смену на этой установке можно проводить измерения 70—80 проб.

Если в пробах присутствует кремний, измерения проводятся в два этапа. Первый выбирается таким же, как и при отсутствии в пробах кремния. При этом бета-счетчики регистрируют наведенную активность, обусловленную фтором и кремнием. Кремний определяется при втором цикле. На активацию и измерение при этом затрачивают по 3 мин. Активационные параметры кремния приводятся в следующем пункте. При паузе, равной 2 мин, удается практически полностью избавиться от влияния излучения кислорода-19. По результатам этого замера вводится поправка в первый замер, используемый для определения фтора. Затраты времени на анализ одной пробы по этой методике составляют 16—18 мин, что позволяет произвести за смену около 20 анализов.

Раздельное определение фтора и кремния при одном цикле облучения осуществлялось при спектрометрических измерениях: фтор оценивался по регистрации гамма-квантов в области 200 кэВ, а кремний — в области 1,79 МэВ. Вклад рассеянного излучения от гамма-квантов с энергией 1,79 МэВ в область 200 кэВ измерялся по методике спектральных отношений [10.23]. При этом использовались пробы весом 25 г, источник с выходом $2 \cdot 10^7$ нейтр/с, кристалл йодистого натрия размерами 150×150 мм с колодцем 30×40 мм и спектрометром типа СГС-1. Порог чувствительности при анализе фтора оценен равным 0,7%. Анализу подвергались пробы с содержанием фтора до 38% и кремнезема до 80%. На облучение и измерение пробы затрачивалось по 1,5 мин при паузе 10—15 с, т. е. временные затраты были такими же, как и при измерениях проб, не содержащих кремния.

Вопросы определения фтора в пробах с помощью торий-бериллиевого источника с выходом $2{,}8 \cdot 10^7$ нейтр/с рассматриваются также в работах [25.65, 25.68]. Порог чувствительности в этих работах оценен равным 0,25% фтора.

Метод НА применяется также для определения фтора в горнообогатительной промышленности [16.86, 25.77].

3. **Определения алюминия и кремния.** Некоторые сведения об этих породообразующих элементах рассматриваются в § 1 гл. 24.

Природный алюминий состоит из одного стабильного изотопа с массовым числом 27 (100%). Под действием тепловых нейтронов на ядрах алюминия происходит реакция $Al^{27}(n, \gamma)Al^{28}$. Эффективное сечение этой реакции равно 0,21 барн ($4{,}69 \cdot 10^{-3}$ см^2/г).

Природный кремний состоит из трех стабильных изотопов с массой 28 (92,27%), 29 (4,68%) и 30 (3,05%). Под действием быстрых нейтронов на кремнии преимущественно происходит реакция $Si^{28}(n, p)Al^{28}$, имеющая порог 3,9 МэВ. Эффективное сечение ее для нейтронов деления равно $4 \cdot 10^{-3}$ барн ($8{,}63 \cdot 10^{-5}$ см^2/г).

Обе реакции используются для определения рассматриваемых здесь элементов. В итоге образуется один исходный изотоп алюминий-28, имеющий период полураспада 2,31 мин и испускающий бета-частицы с энергией 2,865 МэВ (100%) и гамма-кванты с энергией 1,79 МэВ (100%).

При одновременном определении обоих элементов пробы облучаются дважды сплошным спектром нейтронов и надкадмиевыми нейтронами на установках, показанных на рис. 25-3 или 25-4. Результаты измерений в случае исключения фона могут быть представлены в виде следующих уравнений [16.60, 25.25, 25.26, 25.29, 25.30]:

$$N_1 = N_{Al} + N_{Si}, \qquad (25\text{-}23)$$

$$N_2 = aN_{Al} + bN_{Si}, \qquad (25\text{-}24)$$

где a и b — коэффициенты, характеризующие снижение активации алюминия и кремния при измерениях в кадмиевом экране. Величины этих коэффициентов на каждом типе нейтронно-активационных установок определяются при измерениях эталонных проб из чистых соединений Al_2O_3 и SiO_2, при этом они облучаются в канале без кадмия и с кадмием. Скорости счета, обусловленные каждым из анализируемых элементов, определяются из соотношений

$$N_{Al} = \frac{bN_1 - N_2}{b - a}; \quad N_{Si} = \frac{N_2 - aN_1}{b - a}.$$

Концентрации искомых элементов определяются по этим значениям путем сопоставления с замерами эталонных проб.

При определении только одного алюминия измерения следует вести с полоний-борным источником нейтронов, в спектре которого практически отсутствуют быстрые нейтроны с энергией выше порога реакции (n, p) на кремнии.

Отдельное определение кремния в пробах можно вести при измерениях с плутоний- или полоний-бериллиевыми источниками при размещении проб в кадмиевых экранах.

Наиболее совершенной методикой определения алюминия и кремния в пробах считается методика, основанная на использовании серийно выпускаемой установки «Нейтрон-2» [10.8, 25.25, 10.23]. Измерение естественного фона — 3 мин, облучение пробы — 4 мин, пауза — 1 мин, регистрация наведенной активности — 8 мин. Облучение пробы во втором канале производилось спустя 0,5—1,5 ч после первого облучения, т. е. когда активность пробы спадала до величины естественного фона. Эффективность методики может быть повышена за счет облучения двухсекционных проб [25.13]. Одна секция пробы облучается в кадмиевом экране, другая — без кадмия. Наведенная активность измеряется с помощью двух групп бета-счетчиков типа СБТ-10 (по 25 шт. в каждой группе).

При работе на четырехканальной установке порог чувствительности для рассматриваемой методики оценен равным 2—3% для глинозема (1—1,5% алюминия) и 3—5% для кремнезема (1,5—2,5% для кремния). Относительная погрешность измерений для глинозема оценивается в 1—3%, а для кремнезема — в 2—5%. Стоимость анализа одной пробы на одноканальной установке равна 60—80 коп., а на четырехканальной меньше. Аналогично в работе [25. 46] показано, что стоимость химанализа в 2,5 раза дороже стоимости НА.

Т. Н. Бланковой и др. [25.15, 25.16] в ИГиГ СО АН СССР разработана методика одновременного определения алюминия и кремния в навесках проб менее 10 г с применением двух плутоний-бериллиевых нейтронных источников с общим выходом $8{,}6 \cdot 10^6$ нейтр/с. Наведенная бета-активность измерялась сцинтилляционным счетчиком (пластмассовый люминофор толщиной 5 мм и ФЭУ-13). Пробы от места облучения к детектору транспортировались с помощью специальной механической системы за 30 с. Общие затраты времени на анализ одной пробы составляли 25 мин, относительная погрешность измерений для глинозема равнялась 2,7%, для кремнезема — 1%.

И. С. Штрайном и В. С. Лионом [25.13] для анализа алюминия и кремния в почвах применялся америций-бериллиевый источник. Наведенная активность измерялась по гамма-лучам сцинтилляционным счетчиком. При анализе проб весом 50 г порог чувствительности для алюминия равнялся 0,01%, для кремния — 1%, относительная погрешность измерений — 20%.

Для определения алюминия в нефелиновом минеральном сырье в работах [25.5, 25.49] использовалась установка, показанная на рис. 23-4, с полоний-борным источником с выходом $2{,}6 \cdot 10^6$ нейтр/с. Пробы весом 0,9 кг засыпались в фигурные кассеты высотой 90 мм и внутренним диаметром 100 мм. При засыпке в кассеты пробы утрамбовывались. Пробы активировались в течение 7 мин, пауза равнялась 10 с, а время измерения пробы — 400 с. Пробы измерялись в свинцовом домике (см. рис. 25-4, *б*) с помощью кристалла йодистого натрия диаметром 40 мм и высотой 50 мм. Абсолютная ошибка измерений равнялась 0,09%, а при измерениях с кристаллом йодистого натрия размерами 70×70 мм — 0,06% при анализе проб весом 0,9 кг — и 0,05% — при анализе проб весом 1,2 кг.

Применение в установке (рис. 25-4, *а*) плексигласового промежуточного замедлителя толщиной 2,5 мм позволяло устранять влияние изменения влажности проб. Применение НА для анализа алюминия по этой методике позволило повысить производительность анализа в 10—15 раз по сравнению с производительностью химического анализа [25.5].

При больших временах облучения проб (свыше ~4 мин) определению алюминия и кремния могут мешать реакции $Al^{27}(n, p)Mg^{27}$ и $Si^{30}(n, \alpha)Mg^{27}$. Порог первой реакции равен 2,1 МэВ, эффективное сечение для нейтронов деления — $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ барн ($6{,}25 \cdot 10^{-5}$ см²/г), для второй реакции данные отсутствуют. Период полураспада магния-27 составляет 9,5 мин, энергия бета-частиц — 1,75 (58%) и 1,59 (42%) МэВ, энергия гамма-квантов — 1,015 (30%) и 0,83 (70%) МэВ.

Определению рассматриваемых элементов могут мешать и реакции $V^{51}(n, \gamma)V^{52}$ и $Ag^{107}(n, \gamma)Ag^{108}$, если при 1 г алюминия в пробе будет также содержаться ванадий в количестве 0,1 г и выше и серебро в количестве 0,04 г и выше, что маловероятно [25.13].

Ю. Татаром [25.72, 25.74] отдельно и совместно с М. Бересом [15.31] метод НА по активации алюминия и кремния был использован для анализа зольности проб углей. Отсутствие в зольных примесях соединений железа и кальция позволило авторам определять зольность по НА с абсолютной погрешностью 0,2%. Метод НА привлекался также для анализа отбитой массы угля с точностью 1% [15.4, 25.23].

Результаты анализа на кремний и алюминий могут также использоваться для литогеохимических, петрографических, палеогеографических, палеотектонических и других исследований [25.27]. В работах [25.34, 25.48] показано, что по активации кремния можно осуществлять сортировку руд, связанных с кварцевыми жилами.

Методика определения в пробах алюминия и кремния рассматривается также в работах [25.70, 25.71, 25.73].

4. **Определение натрия и калия.** Природный натрий состоит из одного стабильного изотопа с массовым числом 23 (100%). Среднее содержание натрия в земной коре по весу равно 2,64%. В зависимости от типа горных пород его может быть от 0,57 до 3,0%. Основным промышленным источником натрия является поваренная соль (галит) с содержанием натрия 39,34%. Аналогичные сведения о калии приводятся в § 7 гл. 10.

На атомных ядрах рассматриваемых элементов в основном происходят под действием тепловых нейтронов реакции $Na^{23}(n, \gamma)Na^{24}$ и $K^{41}(n, \gamma)K^{42}$. Эффективные сечения этих реакций равны соответственно 0,536 барн ($1{,}4 \cdot 10^{-2}$ см^2/г) и 1,24 барн ($1{,}82 \cdot 10^{-2}$ см^2/г), периоды полураспада 15 и 12,5 ч. Изотоп натрий-24 излучает бета-частицы с энергией 1,4 МэВ (100%) и гамма-кванты с энергией 2,76 (100%) и 1,5 МэВ (100%), а изотоп калий-42 — бета-частицы с энергией 3,52 (82%) и 1,9 МэВ (18%) и гамма-кванты с энергией 1,51 (18,2%) и 0,32 МэВ (0,2%).

Раздельное определение этих элементов в совместных пробах можно вести по регистрации бета-частиц и гамма-квантов. Результаты обрабатывались аналогично тому, как описывалось в предыдущем пункте. Время облучения выбирается равным 2,5—5 ч, пауза — 10—15 ч для исключения влияния излучения марганца, время измерений — 1—2 ч.

Порог чувствительности при анализе алюмосиликатных пород при работе с источником, имеющим выход $1{,}6 \cdot 10^7$ нейтр/с, оценивается равным 0,1% для натрия и 1% для калия [25.12]. Относительная ошибка измерений в обоих случаях равна 8%. Для определения калия в пробах пород более производительным и более точным является БМ (см. § 7 гл. 10). Аналогичные вопросы рассматриваются также в работе [25.66].

5. **Определение ванадия.** Природный ванадий состоит из двух изотопов с массовыми числами 50 (0,25%) и 51 (99,75%). Первый из этих изотопов обладает слабой радиоактивностью и распадается с периодом полураспада в $4 \cdot 10^{14}$ лет. Среднее содержание ванадия в земной коре по весу равно 0,015%. В промышленных типах месторождений содержание ванадия может меняться от 0,01 до 5%. В собственно ванадиевых рудах, связанных с песчаниками, содержание ванадия может достигать 1,8—3,3%, в карнотитовых рудах — 0,9—1,2%, окисленных зонах полиметаллических месторождений — 0,5—2%, ванадийсодержащих фосфоритах — 0,1—0,2%, ванадийсодержащих магнетитах — несколько выше 0,1%, ванадийсодержащих титано-магнетитах — 0,1—5%.

Для определения в пробах ванадия по НА используется реакция на тепловых нейтронах $V^{51}(n, \gamma)V^{52}$, имеющая эффективное сечение 4,5 барн (0,0531 см^2/г). Ванадий-52 имеет период полураспада 3,76 мин и испускает бета-частицы с энергией 2,45 МэВ (100%) и гамма-кванты с энергией 1,44 (100%) МэВ.

Определению ванадия в рудах по НА-т мешают алюминий и медь. Активационные характеристики радиоактивного изотопа алюминия рассматриваются в п. 3 этого параграфа, а меди — в п. 8. Массовое макроскопическое сечение активации алюминия более чем на порядок меньше сечения активации ванадия, однако концентрации алюминия в рудах могут значительно превышать концентрации ванадия. Поэтому разделение изотопов ванадий-52 и алюминий-28 по периодам подураспада не всегда достигается с достаточной точностью. Если содержание в пробах алюминия не превышает 7—10%, при измерении бета-активности проб ванадий можно определять начиная с 0,1% и выше при работе с источником около 10^7 нейтр/с [1.27, 6.63]. Вес проб составлял несколько десятков грамм, время облучения — 6 мин, пауза — 3 мин, измерение — 15—20 мин. При содержании в пробах алюминия свыше 10% для раздельного определения ванадия и алюминия следует использовать как периоды полураспада, так и энергии гамма-квантов. Детальные иссле-

дования в этом направлении с применением генератора нейтронов и пульта прибора СГС-1 (см. гл. 28) проведены в ИГиГ СО АН СССР [10.23].

В связи с тем, что изотоп медь-66 обладает слабым гамма-излучением (9% от общего числа распадов), раздельное определение ванадия-52 и меди-66 может быть осуществлено при раздельных измерениях бета- и гамма-излучения [6.63].

При анализе руд железа, практически не содержащих алюминия и меди, порог чувствительности на ванадий оценивается равным 0,01%, а относительная погрешность измерений — 5% [25.12]. Стоимость анализа по НА на ванадий равна 75—80 коп, а химанализа 97 коп [25.46]. Более подробно методика определения ванадия в пробах руд рассматривается в работе [25.30].

6. **Определение марганца.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 3 § 2 гл. 23. При радиационном захвате тепловых нейтронов образуется изотоп марганец-56 с периодом полураспада 2,56 ч, испускающий бета-частицы с энергией 0,65—2,81 МэВ и гамма-кванты с энергией 0,845—2,13 МэВ (см. табл. 5—8).

При использовании источника с выходом около 10^7 нейтр/с на четырехканальной установке (см. рис. 25-3) пробы марганца облучают 20—40 мин. Пауза выбирается 10—30 мин для устранения влияния наведенной активности алюминия-28, возникающего при облучении алюминия и кремния (см. п. 3 этого параграфа). Наведенная бета-активность измеряется в течение 5 мин. Порог чувствительности при анализе марганца в почвах, осадочных породах и железо-марганцевых рудах оценивается равным 0,01—0,1%.

Для раздельного определения в пробах марганца и алюминия М. Бересс [14.4, 25.67] предложена следующая методика при облучении проб весом 40 г потоком около $1{,}4 \cdot 10^7$ нейтр/с полоний-бериллиевого источника. Пробы облучались 4,6 мин сплошным спектром нейтронов. Наведенная активность измерялась газоразрядными счетчиками в два временных интервала: 0,4—5,4 мин для определения алюминия и кремния и 60—65 мин для определения марганца. Погрешность анализа на основе повторных замеров оценена 0,78% для марганца, 0,28% для кремния и 0,90% — для алюминия. При увеличении времени облучения проб до 78, 156 и 312 мин погрешность определения марганца снижалась соответственно до 0,11; 0,095 и 0,077%.

В железосодержащих пробах под действием быстрых нейтронов происходит реакция $Fe^{56}(n, p)Mn^{56}$, которая может мешать определению марганца. Однако порог этой реакции достаточно велик (5 МэВ), а сечение невелико — 0,0185 барн ($2 \cdot 10^{-4}$ см^2/г). Поэтому при анализе марганцевых руд влияние железа можно не учитывать. В пробах с высоким содержанием марганца раздельное определение этих элементов может быть произведено при измерениях в каналах с кадмием и без кадмия. Уверенно определять железо в таких пробах можно при соотношении концентраций $\frac{p_{Fe}}{p_{Mn}} > 100$ [25.13].

7. **Определение кобальта.** Природный кобальт состоит из одного стабильного изотопа с массой 59 (100%). Среднее содержание его в горных породах по весу равно $3 \cdot 10^{-3}$%. Кобальт извлекается из комплексных руд, и в основном из мышьяково-кобальтовых, совместно с Au, Ni, Ag и другими металлами с содержанием кобальта до 1—2%; из сернисто-кобальтсодержащих руд меди, железа и никеля с несколько меньшими концентрациями кобальта и из окисленно-кобальтовых руд совместно с марганцем при содержании кобальта от десятых долей процента до 10%.

При активации медленными нейтронами кобальта образуется короткоживущий изотоп кобальт-60 m с периодом полураспада 10,5 мин и

энергией гамма-квантов 59 кэВ при практическом отсутствии бета-частиц (0,28% от общего количества распадов). Макроскопическое массовое сечение активации кобальта равно 0,164 см²/г (16 барн).

При анализе кобальта в рудах образуются всевозможные изотопы, на фоне излучения которых необходимо выделять мягкое гамма-излучение с энергией 59 кэВ, что может достигаться при гамма-спектрометрии с тонкими люминесцентными кристаллами. Порог чувствительности оценивается примерно равным 0,03% [25.45].

8. **Определение меди.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 2 § 1 гл. 24. Под действием тепловых нейтронов на ядрах изотопов меди происходит реакция (n, γ) с образованием радиоактивных изотопов с массовыми числами 66 [T=5,1 мин, E_β=2,63 (91%); 1,65 (9%) МэВ и E_γ=1,064 МэВ (9%)] и 64 [T=12,8 ч, E_β= 0,66 (19%); 0,57 (39%) МэВ, электронный захват — 42%, E_γ=1,34 0,5%); 0,51 МэВ (38%)]. Эффективные сечения образования рассматриваемых изотопов равны 1,8 барн (0,0164 см²/г) для меди-65 и 4,3 барн (0,0405 см²/г) для меди-63.

При определении меди по короткоживущему изотопу медь-66 мешающее влияние оказывает изотоп алюминий-28, возникающий под действием тепловых нейтронов на алюминии и быстрых нейтронов на кремнии. С. А. Дубинским и др. [25.13, 25.30] для раздельного определения меди-66 и алюминия-28 использовалась методика, основанная на спектрометрической аппаратуре с кристаллом йодистого натрия 70×80 мм с регистрацией излучения в области энергий 1,79 МэВ (алюминий-28) и 1,064 МэВ (медь-66). Для анализа брались пробы весом около 1 кг и источник с выходом около $1{,}8 \cdot 10^7$ нейтр/с. Истинная скорость счета изотопа медь-66 определялась из соотношения

$$N_{Cu} = N_{1,064} - aN_{1,79},$$

где $N_{1,064}$ — скорость в канале для излучения меди-66 и алюминия-28; $N_{1,79}$ — скорость счета алюминия-28 в канале для его излучения; a — отношение скоростей счета алюминия-28 в канале 1,064 МэВ к скоростям счета в канале 1,79 МэВ, измеренных при облучении эталонных проб. Порог чувствительности при анализе медных руд равен 1,0—0,3% [25.12, 25.32], относительная погрешность измерений — 2,5—3% [14.3]. Время облучения и измерения выбиралось по 10 мин.

В. Н. Балашевым и др. [6.17] при анализе на медь медных и медно-свинцовых концентратов, не содержащих кремния, при использовании источника с выходом 10^7 нейтр/с, проб весом 120—150 г, размещаемых в плоских кассетах размерами 6×8 см, и 10 газоразрядных счетчиков типа СТС-5, расположенных в 2 ряда, была получена относительная ошибка 1% — при анализе медного концентрата с содержанием меди 20—25% — и 5% при анализе в свинцово-цинковом концентрате с содержанием меди в пределах 1,5—3%. Пробы активировались в течение 10 мин, пауза 2 мин, наведенная активность измерялась 10 мин в два интервала: 0—5 и 5—10 мин.

А. А. Абдуллаевым, Е. М. Лобановым и др. [19.76] для анализа меди-64 использовался источник с выходом около $4 \cdot 10^7$ нейтр/с. От излучения алюминия-28 избавлялись выдержкой образца в течение 30 мин. Помимо алюминия-28 определению меди в рудах мешал изотоп марганец-56. Разделение изотопов меди и марганца осуществлялось с помощью спектрометрической аппаратуры по фотопикам 0,51 МэВ (медь) и 0,84 МэВ (марганец). Порог чувствительности на оба элемента был равен 0,03% [19.76, 25.1]. Аналогичные вопросы рассматриваются также в работе [25.70].

9. **Определение селена.** Природный селен состоит из шести стабильных изотопов с массовыми числами: 74 (0,87%), 76 (9,02%), 77 (7,58%),

78 (23,52), 80 (49,82%) и 82 (9,19%). Среднее содержание селена в земной коре по весу равно $6 \cdot 10^{-5}$%. Селен в природе встречается в сульфидных месторождениях в количестве от тысячных долей процента до 1%. Извлечение селена обычно осуществляется из продуктов металлургической переработки медных, полиметаллических и никелевых руд.

Под действием тепловых нейтронов в реакции (n, γ) могут возникать следующие радиоактивные изотопы: селен-77 ($E_\gamma = 0{,}162$ МэВ (10%), $T = 17{,}5$ с); селен-81 m, ($E_\gamma = 0{,}103$ МэВ, $T = 57$ мин); селен-81 ($E_\beta = 1{,}38$ МэВ (100%), $T = 18{,}2$ мин); селен-83 ($E_\beta = 3{,}4$ МэВ (100%), $T = 67$ с) и селен-83 ($E_\beta = 1{,}5$ МэВ (100%), $E = 25$ мин).

В работе [28.34] анализ селена в селенистых песчаниках велся по изотопу селен-77 m. Пробы облучались в замедлителе с полоний-бериллиевым источником с выходом около $7 \cdot 10^6$ нейтр/с. Наведенная активность измерялась сцинтилляционным счетчиком с кристаллом йодистого натрия 40×50 мм и амплитудным анализатором АИ-100—1. Порог чувствительности при этом равнялся 0,01%. Концентрации селена в пределах $(2—10) \cdot 10^{-2}$% определялись с относительной погрешностью в среднем 8,4%. На анализ одной пробы затрачивалось не более 5 мин.

10. **Определение серебра.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 2 § 3 гл. 23. Серебро в пробах может определяться по короткоживущему (серебро-110) или долгоживущему (серебро-108) изотопам. В. Н. Балашевым и др. [6.17] для этих целей использовался первый изотоп. Источник, детекторы и навески проб были такими же, как и при анализе меди (см. выше). Время измерения фона, облучения и измерения наведенной активности составляло 1 мин. Порог чувствительности НА к серебру при этом равнялся 0,005%, а относительная погрешность — около 2%.

Определение серебра в пробах рассматривается также в работе [25.69]. Автором использовался радий-бериллиевый источник с выходом около $6 \cdot 10^5$ нейтр/с. Расхождения между НА и химанализом для концентраций от 1 до 3% Ag в среднем не выходили за пределы 0,24—0,94%.

11. **Определение индия.** Подробные сведения об этом элементе рассматриваются в п. 3 § 3 гл. 23. При измерениях по НА для определения индия используется изотоп индий-116 с периодом полураспада 54 мин, излучающий бета-частицы с энергией 0,85 МэВ и гамма-кванты с энергией от 0,1 до 2,1 МэВ. Массовое макроскопическое сечение активации индия тепловыми нейтронами равно 0,811 см^2/г (155 барн).

Элементами, мешающими определению индия, могут быть цинк и марганец, образующие изотопы с периодами полураспада, равными соответственно 52 мин (цинк-69) и 2,6 ч (марганец-56), и макроскопическими сечениями активации 0,09 и 0;14 см^2/г. Изотоп цинк-69 является чистым бета-излучателем, и поэтому на измерения гамма-излучения он не влияет. Присутствие же 0,1% марганца при измерениях с интенсиметрической аппаратурой не позволяет измерять в руде индий в количестве от 0,01% и ниже.

Использование полоний-бериллиевых источников с выходом около $1{,}8 \cdot 10^7$ нейтр/с и газоразрядных бета-счетчиков позволяет по НА при отсутствии цинка определять содержание индия в рудах и рудных концентратах от 0,01% и выше в течение 1—1,5 ч (время облучения 20 мин, пауза 20 мин, время измерения 20—30 мин).

При работе с источником, имеющим выход около 10^8 нейтр/с, и измерении спектра гамма-излучения А. А. Абдуллаевым и др. [19.76, 25.1] порог чувствительности на индий был оценен равным 10^{-3}—10^{-4}%, относительная погрешность — 3%.

Аналогичная аппаратура С. А. Дубинским и др. [25.13, 25.31] использовалась для раздельного определения в пробах марганца и индия при регистрации излучения в диапазоне энергий 0,8—0,9 МэВ и 1,0—

1,5 МэВ соответственно. Порог чувствительности на индий оценивается еще выше — 10^{-5}—10^{-4}%.

12. **Определение цезия.** Природный цезий состоит из одного стабильного изотопа с массовым числом 133 (100%). Содержание цезия в земной коре по весу равно $7 \cdot 10^{-4}$%. В природе цезий встречается обычно совместно с рубидием и собственных минералов не имеет. Наиболее высокие концентрации этих элементов встречаются в некоторых минералах пегматитовых жил. Так, в ортоклазах содержание цезия может достигать 0,1%, в микроклинах — 0,47%, в мусковитах — 0,19%, в биотитах — 3%, в лепидолитах — 0,47%, в бериллах (воробьевите) — 2,8—3,8%, в поллуцитах — 28%.

Цезий из пород и руд извлекается попутно с другими полезными ископаемыми: литием, бериллием, калием и т. д.

В отдельных типах месторождений содержание цезия может достигать следующих величин: в магматических — от 0,01 и ниже, в пегматитовых — 0,05—0,5% и ниже и в осадочных месторождениях калийных солей — $n \cdot 10^{-4}$%.

При захвате ядрами цезия тепловых нейтронов возникает изотоп цезий-134 m (сечение 3 барна — $1{,}36 \cdot 10^{-2}$ см^2/г), период полураспада которого 3,15 ч, испускаются гамма-кванты с энергией 138 (0,8%) и 128 кэВ (31,3%). Для измерений этого излучения применялся сцинтилляционный гамма-спектрометр с кристаллом йодистого натрия диаметром 30 мм и высотой 10 мм [14.3]. Пробы минералов, содержащих цезий, весом 40—50 г активировались в течение 1 ч. Пауза выбиралась равной 20 мин — с целью устранения наведенной активности короткоживущих изотопов. Для устранения влияния долгоживущих изотопов, образующихся при активации натрия, рубидия и хлора, измерялось излучение в интервале энергий 1—2 МэВ. Время измерений выбиралось равным 20 мин. При работе с источником с выходом $1{,}5 \cdot 10^7$ нейтр/с концентрация цезия в 1% определялась с относительной погрешностью 7% [25.58]. Порог чувствительности при анализе на цезий оценивается равным примерно 0,1%.

13. **Определение вольфрама.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 2 § 3 гл. 15. Природный вольфрам состоит из пяти стабильных изотопов с массовыми числами 180 (0,135%), 182 (26,41%), 183 (14,40%), 184 (30,64%) и 186 (28,41%). Под действием тепловых нейтронов происходит радиационный захват с образованием изотопа вольфрам-187, имеющего период полураспада 24 ч и испускающего бета-частицы с энергией 1,33 (30%) и 0,63 МэВ (70%) и гамма-кванты с энергией 776 (5%), 686 (17%), 552 (12,5%), 480 (40,3%, 134 (37,8%) и 72 кэВ (40,3%). Эффективное сечение этой реакции равно 34 барн (0,11 см^2/г).

Для определения вольфрама в концентратах руд применялся источник с выходом $1{,}4 \cdot 10^7$ нейтр/с [25.50, 25.57]. Время активации выбиралось равным 1,5 ч, пауза — 20 мин (для спада активности алюминия-28). Если в пробах присутствует изотоп молибден-101 (T=14 мин), паузу следует увеличивать до 1,5—2 ч. Время измерений выбирается равным 30 мин. Детектором излучения служил торцовый бета-счетчик. Для широкого диапазона концентраций вольфрама (0—60%) градуировочный график носил линейный характер. При наличии мешающих элементов содержание вольфрама можно определять с использованием гамма-спектрометрии.

А. А. Абдуллаевым и др. [6.46, 25.2] для определения вольфрама в пробах весом 100 г применялся полоний-бериллиевый источник с выходом 10^8 нейтр/с. Пробы облучались в течение 24 ч, спустя 1 ч измерялось гамма-излучение с энергией в области пика 134 кэВ. Концентрации вольфрама в пределах 0,4—1% определялись с относительной точностью 10—11%. По данным работы [6.46], порог чувствительности при опре-

делении вольфрама по этой методике можно оценить равным 0,02%. В работе [25.78] для этих целей использовался источник с выходом 10^7 нейтр/с.

14. **Определение золота.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 5 § 3 гл. 23. Там же, в частности, показано, что при захвате медленных нейтронов образуется изотоп золото-198 с периодом полураспада 2,7 дня.

Золото в пробах определялось Е. П. Вязниковым и В. В. Глассоном [25.24]. Создана специальная нейтронно-активационная установка с водным замедлителем и полоний-бериллиевым источником с выходом $5 \cdot 10^7$ нейтр/с. В канале облучения при этом удалось создать поток $8 \cdot 10^4$ нейтр/с. Наведенная активность определялась по гамма-квантам с энергией 411 кэВ сцинтилляционным счетчиком с кристаллом йодистого натрия 70×70 мм и ФЭУ-24 и одноканальным анализатором ААДО-1 (см. гл. 6). Спектр измерялся при ширине окна 2 В. Для навесок проб 360 г порог чувствительности был равен $1{,}5 \cdot 10^{-4}$% (1,5 г/т). Временной режим облучения, к сожалению, не указан. Авторы [25.24] отмечают, что при измерениях с кристаллом йодистого натрия размерами 120×120 мм с колодцем 20×60 мм может быть получен порог чувствительности $4 \cdot 10^{-5}$% (0,4 г/т).

Определению золота по этой методике могут мешать изотопы медь-64 ($T=12{,}8$ ч, $E_\gamma=510$ кэВ), мышьяк-76 ($T=1{,}1$ дня, $E_\gamma=549$ кэВ) и сурьма-122 ($T=2{,}8$ дня, $E_\gamma=563$ кэВ). Так, в рудах Бодайбинского золоторудного месторождения содержание меди достигает $(0{,}1—1) \times 10^{-2}$% и мышьяка — 10^{-2}% [25.24]. При оценке порога чувствительности на золото вклад от этих элементов был следующим: 1,3% от сурьмы; 0,65 — от мышьяка и 0,012% — от меди (вклад от излучения золота принимался за 100%).

§ 3. Методика пешеходных исследований

Пешеходная съемка применяется для определения в породах фтора и меди. В работах [16.83, 25.28] приводятся результаты определения фтора в ореолах рассеяния с целью поисков апатитов, а в работе [16.86] — фосфоритов (см. табл. 10—2), флюоритов и редкометальных месторождений.

Исследования во всех случаях велись примерно по одинаковой методике. В исследованиях [16.83, 25.28] для измерений наведенной активности азота-16 снимался почвенный слой на глубину 25 см с сечением выемки 20×20 см. Породы облучались полоний-бериллиевым источником с выходом около $9 \cdot 10^6$ и $1{,}8 \cdot 10^7$ нейтр/с. С целью безопасности работ для установки и извлечения источника нейтронов использовались секционные (по 1,5 м) дюралюминиевые штанги длиной соответственно 3 и 4,5 м и весом 1,5 и 2 кг. Источник крепился к тросику, протянутому внутри штанги, и мог выпускаться на 20—30 см (для удобства погружения в закопушку). Перед активацией в закопушке в течение 1 мин измерялся фон. Порода активировалась в течение 30 с, пауза — 5 с и время измерений — 30 с. Измерения велись с помощью спектрометра СП-3 в интегральном (с порогом дискриминации 3 МэВ) и дифференциальном режимах. В последнем случае спектрометр настраивался на максимум спектра наведенной активности фтора. Для данной методики измерений фон в основном обусловливается влиянием космической радиации и составляет 124 ± 18 имп/мин при интегральных измерениях и -7 ± 2 имп/мин при дифференциальных.

При шаге съемки 10 м бригада из двух человек (рабочий и оператор) за смену может производить измерения в 100—120 пунктах в случае учета фона. Если же фон не учитывать, производительность может быть примерно удвоена.

Порог чувствительности метода НА к фтору оценивается равным 0,05% [16.86].

В работе [25.39] показана возможность применения рассматриваемого метода для определения фтора в стенках горных выработок. Точки облучались нейтронами полоний-бериллиевого источника с выходом $(5{,}4—9)\cdot 10^6$ нейтр/с в течение 20 с, пауза — 10 с, первый замер 20 с, вновь пауза — 10 с и второй замер — 20 с. Для воспроизводимости результатов определений облучения и замеры в каждой точке повторялись по 3—4 раза. Исследуемая поверхность перед началом измерений по возможности выравнивалась, и в эту точку с помощью четырехметровой штанги устанавливался источник. Наведенная активность измерялась специальным радиометром. Уверенно при этом фиксировались концентрации фтора, начиная с бортовых (10%).

Е. Я. Куренко, В. И. Герасимовым и др. [17.13] НА применялся для определения меди в медистых песчаниках по изотопу медь-66 (T=5,1 мин). Породы при этом облучались в течение 10 мин источником с выходом $2\cdot 10^7$ нейтр/с, расположенным в парафиновом отражателе толщиной 5—6 см. За это время рудная залежь по меди-66 насыщалась до 74%, а по мешающим излучателям — алюминий-28 (T=2,3 мин) — до 95%, марганец-56 (T=2,56 ч) — до 4%. Пауза выбиралась равной 2,5 мин. Активность меди-66 за это время уменьшалась на 29%, алюминия-28 — на 55% и марганца-56 — на 0,4%. Наведенная активность измерялась в диапазоне энергий 1,00—1,10 МэВ в течение 25—30 мин с помощью кристалла йодистого натрия 40×50 мм, ФЭУ-13Б и анализатора «Орбита». По результатам измерений строилась функция $N=f(t)$ и расчленялась на три составляющие.

В результате исследований установлено, что пороговые концентрации меди-66 (0,2—0,4%) можно определять с относительной погрешностью 10—15%.

§ 4. Автомобильная съемка

Разработкой автомобильной методики определения фтора в ореолах рассеяния занимались Б. С. Камышев, И. П. Кошелев и др. (Каз. ВИРГ) [16.86]. Создана транспортабельная установка со сцинтилляционными счетчиками (два кристалла размерами 150×100 м) и полоний-бериллиевым источником с выходом до $8\cdot 10^7$ нейтр/с. В пространстве между ними располагались экраны из парафина, бора и свинца для устранения фона, обусловленного первичным излучением источника и вторичным излучением, возникающим при неупругом рассеянии нейтронов и их радиационном захвате. Излучение с энергией 3 МэВ дискриминировалось. Размер зонда выбирался равным 3 м, скорость движения прибора 3—4 км/ч. Чувствительность прибора составляла в среднем 1100 имп/мин на 1% фтора. Порог чувствительности к фтору оценен в 0,08% в процессе непрерывных измерений и в 0,03% при остановках прибора. Градуирование прибора осуществлялось по анализу проб весом до 2,5 кг на этой же установке. Пробы набирались в цилиндрические кассеты размерами 150×40 мм. Проба с помощью 4-метровой штанги устанавливалась на 30 с под источник для активации, а затем — на 15 с под детекторы для измерения наведенной активности. Пауза составляла 5 с. Порог чувствительности к анализу проб оценен в 0,03%.

§ 5. Общеметодические вопросы применительно к исследованию разрезов скважин

Нейтронный активационный каротаж (НАК) применительно к исследованию разрезов скважин подразделяется в зависимости от периодов полураспада образующихся изотопов на две модификации:

1) непрерывный каротаж при измерении наведенной активности короткоживущих изотопов с периодами полураспада от нескольких секунд до нескольких минут;

2) каротаж по точечным измерениям при изучении наведенной активности долгоживущих изотопов с периодами полураспада свыше нескольких минут.

Естественно, такое деление НАК является чисто условным в связи с тем, что при определении в породах короткоживущих изотопов могут возникать задачи, требующие измерений при точечных замерах и т. д.

Для изучения скважин НАК приспосабливается стандартная аппаратура ГК, ГГК, НГК и т. д. На первом этапе исследований используется в основном интенсиметрическая аппаратура, а в последние годы — все более широко гамма-спектрометрическая, позволяющая значительно расширить круг решаемых задач [6.63, 25.10 и др.].

Источник с выходом около $(0{,}5—1)\cdot 10^7$ нейтр/с с целью исключения гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов и гамма-излучения радиационного захвата нейтронов, а также собственно гамма-излучения источника устанавливается на значительном расстоянии от детектора: 1,5—2 м при непрерывных измерениях и 2—4 м при точечных измерениях. При исследовании пород с высоким водородсодержанием обычно выбираются наименьшие расстояния, а при изучении пород с низким водородсодержанием — наибольшие расстояния. Источник размещается либо непосредственно в корпусе прибора, либо на кабеле, либо крепится к корпусу прибора с помощью штанги. При высокоточных измерениях НАК из его показаний обычно исключают те, которые обусловлены влиянием естественной радиоактивности горных пород.

Активация ядер атомов химических элементов, как уже неоднократно отмечалось, может происходить под действием быстрых и медленных нейтронов. Для устранения активации быстрыми нейтронами необходимо использовать источники, испускающие нейтроны с энергией ниже порогов ядерных реакций на быстрых нейтронах. В настоящее время наш выбор, к сожалению, в этом отношении ограничивается полоний-борным источником (см. табл. 1-4). Однако наиболее подходящим для этих целей были бы полоний-фторный и полоний-литиевый источники. Для снижения спектра быстрых нейтронов источники можно размещать в свинцовых экранах или лучше в вольфрамовых.

При измерениях с плутоний-бериллиевым или полоний-бериллиевым источниками образуются изотопы под действием как быстрых, так и медленных нейтронов. Определить вклад изотопов, обусловленных медленными нейтронами, можно лишь при работе с источниками с низкоэнергетическим спектром быстрых нейтронов.

При проведении измерений гамма-излучения активированных изотопов по точечным (дискретным) замерам необходимо точно устанавливать детектор излучения против облучаемого участка породы или руды. Так, при исследованиях на модели пласта пористостью 20% в скважине диаметром 11 3/4″ (30 см), обсаженной стальной колонной 6″ (15,2 см), установлено, что смещение сцинтилляционного детектора на ± 5 см от точки облучения породы ведет к ошибке измеряемой скорости счета примерно на 10%.

Показания НАК существенно зависят от изменения плотности и влажности пород. Например, в работе [25.13] показано, что при активации породы плотностью 2,8 г/см^3 изменение плотности на 0,1 г/см^3 приводит к изменению показаний НАК-б на 2%. Изменение влажности породы на 10% ведет к изменению показаний НАК-б $\sim$ на 5%.

Увеличение диаметра сухих и заполненных водой скважин приводит к уменьшению активируемости ядер атомов изучаемых пород [25.13].

Существенное снижение влияния изменений диаметра скважины, плотности и влажности горных пород, а также их вещественного соста-

ва может быть осуществлено при измерениях по методике спектральных отношений (см. п. 4 § 1 гл. 16, п. 3 § 2 гл. 20 и § 4 гл. 24). Ослабить влияние изменений влажности пород на результаты НАК можно также путем их нормировки к значениям ННК-т и т. д.

§ 6. Основы теории метода применительно к исследованию скважин и шпуров

1. **Непрерывный каротаж.** Основы теории НАК-т применительно к рассматриваемому вопросу разработаны Ю. П. Булашевичем и С. А. Шулятьевым [25.18, 1.27] с учетом активации изотопов только вдоль стенки скважины. Для линейной плотности n активирующихся под действием медленных нейтронов атомов ими выведены следующие соотношения:

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{\lambda L_s}{v + \lambda L_s} e^{-l/L_s}, \qquad (25\text{-}25)$$

$$\frac{n_2}{n_0} = \frac{\lambda L_s}{v - \lambda L_s}\left[\frac{2v}{v + \lambda L_s} e^{-\lambda l/v} - e^{-l/L_s}\right], \qquad (25\text{-}26)$$

где n_1 и n_2 — соответственно линейные плотности активирующихся атомов перед источником и позади него (по отношению к детектору), излучение от которых достигает детектора; n_0 и λ — то же, что и в формуле (25-3); v — скорость перемещения прибора; L_s — длина замедления нейтронов в породе; l — размер зонда.

Из вышеизложенного известно, что средняя длина пробега первичных гамма-квантов в горных породах меньше или равна длине замедления в них нейтронов применяемых источников ($\lambda_0 \leqslant L_s$). В связи с этим можно считать, что скорость счета гамма-излучения активируемых атомов в породе приближенно пропорциональна линейной плотности активируемых атомов n_1 и n_2.

Зависимость активирующихся атомов алюминия в боксите от размера зонда, полученная при расчетах по формулам (25-25) и (25-26), приведена на рис. 25-6. При увеличении скорости движения глубинного прибора максимум концентрации активируемых атомов уменьшается по абсолютной величине и смещается дальше в сторону, обратную движению прибора. С увеличением скорости движения прибора кривые концентрации активируемых атомов становятся более пологими.

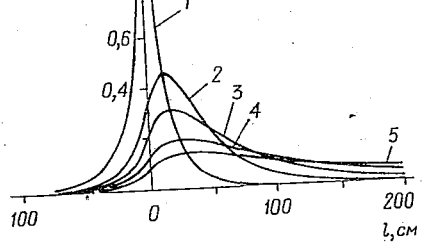


Рис. 25-6. Зависимость относительной плотности активации алюминия в боксите от размера зонда для различных скоростей каротажа, м/ч: *1* — 0; *2* — 5; *3* — 10; *4* — 20; *5* — 30. Глубинный прибор движется справа налево, источник нейтронов расположен в начале координат.

Из анализа выражений (25-25) и (25-24) также ясно, что увеличение периода полураспада активируемого атома эквивалентно увеличению скорости перемещения глубинного прибора.

При исследовании скважин методом НАК при непрерывном движении глубинного прибора необходимо знать оптимальный размер зонда и оптимальную скорость его движения, отвечающие максимальным значениям n_2. Оптимальный размер зонда получается из условия $\frac{\partial n_2}{\partial l} = 0$ при $v = \text{const}$, а оптимальная скорость — из условия $\frac{\partial n}{\partial v} = 0$ при $l = \text{const}$.

В результате этих манипуляций для оптимального размера зонда получим следующее выражение [25.18, 1,27]:

$$l = \frac{vL_s}{v - \lambda L_s} \ln\left(0{,}5 + \frac{v}{2\lambda L_s}\right). \qquad (25\text{-}27)$$

Оптимальная же скорость может быть получена из уравнения

$$\frac{2}{v + \lambda L_s}\left[1 - \frac{2v^2}{v^2 - (\lambda L_s)^2} + \frac{\lambda l}{v}\right] e^{-\lambda l/v} + \frac{e^{-l/L_s}}{v - \lambda L_s} = 0. \qquad (25\text{-}28)$$

В этой формуле величина v сложным образом зависит от всех других величин, входящих в нее. Поэтому для ее решения ограничимся случаем $v \gg \lambda L_s$. При этом решение кубичного уравнения дает следующие корни: $v_1 = \lambda l$; $v_2 = v_3 = 0$. Следовательно, оптимальная скорость зависит как от размера зонда, так и от периода полураспада образующегося изотопа при НАК-т:

$$v = \frac{0{,}693l}{T}. \qquad (25\text{-}29)$$

Увеличение скорости каротажа может быть достигнуто за счет увеличения размера зонда.

Экспериментальная проверка полученных формул показала их хорошее совпадение [25.19].

Зависимость плотности активируемых атомов алюминия в боксите от скорости движения глубинного прибора для размера зонда $l = 150$ см показана на рис. 25-7. Как видно из рисунка, величина оптимальной скорости при активации алюминия равна примерно 25 м/ч. Уменьшение скорости ниже оптимальной ведет к резкому спаду плотности активации, а увеличение скорости выше оптимальной — к плавному убыванию плотности активации. Следовательно, при изучении распределения активирующихся изотопов в рудах исследования скважин методом НАК можно фактически производить и на скоростях, бо́льших оптимальной.

Для неподвижного источника нейтронов эффективная зона активации при НАК-т имеет размеры около $2L_s$. При движении же прибора по скважине эта зона простирается на большую длину вдоль оси скважины, если на исследуемом участке имеются активированные атомы. При условии, что $v \gg \lambda L_s$, эффективная зона простирается на величину v/λ. Следовательно, размер зонда должен определяться из условия $l = v/\lambda$. При скорости, меньшей оптимальной, детектор находится вне эффективной зоны активации. При скоростях больше оптимальной эффективная зона активации возрастает, а количество активируемых атомов в точке детектора уменьшается. Следовательно, в обоих случаях плотность активации оказывается меньшей, чем при оптимальной скорости.

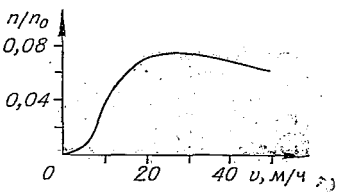


Рис. 25-7. Зависимость относительной плотности активации алюминия от скорости перемещения глубинного прибора.

Наиболее перспективными, с точки зрения применения метода НАК в движении, являются следующие элементы: фтор, алюминий, кремний и некоторые другие. Для изотопов с большими периодами полураспада применение каротажа в движении нецелесообразно. Так, при активации марганца ($T = 2{,}56$ ч) для зонда размером 1,5 м оптимальную скорость следует выбирать равной 0,4 м/ч и т. д.

2. **Точечные замеры.** При точечных исследованиях скважины методом НАК источник нейтронов и детектор поочередно помещаются в одну и ту же точку. Скорость счета, обусловленная гамма-излучением

изотопов, возникающих в породе в сухой скважине, для водородсодержащих пород описывается следующим соотношением:

$$N = \frac{iQf(t_0, t, T)}{8\pi L_f^2} \frac{\lambda_a}{\lambda_a'} \frac{e^{-\left(\tau_0 + \frac{1}{L_f}\right)R_0}}{1 + \tau_0 L_f} \varepsilon V, \qquad (25\text{-}30)$$

где λ_a и λ_a' — соответственно пробеги нейтронов в породе по отношению к захвату и активации ядер (обычно они бывают близки по величине); τ_0 — коэффициент ослабления в породе первичного гамма-излучения активирующихся изотопов; $L_f = L_s/\sqrt{2}$ — параметр замедления нейтронов.

Исходя из этого соотношения, для сферической скважины можно определить глубинность НАК, которая в этом случае определяется в виде толщины сферического слоя по формуле

$$\Delta R_{0,9} = R_{0,9} - R_0 = \frac{2{,}3}{\tau_0 + 1/L_f}.$$

Для песчаника пористостью 4 и 20% глубинность исследования равна соответственно 17 и 13 см. Аналогичные исследования для двухслойной среды рассматриваются в сборнике [20.25].

При активации ядер атомов быстрыми нейтронами глубинность НАК-б становится еще меньше. Например, при активации флюорита и регистрации гамма-квантов с энергией от 4,5 МэВ и выше глубинность оценивается равной 11 г/см². Для пород, не содержащих водорода, глубинность НАК-т увеличивается примерно в 3 раза.

В работе [25.38] для пласта песчаника влажностью 5% глубинность НАК-т при регистрации излучения алюминия-28 оценена в 7 см, а для НАК-б — в 6 см.

Теоретические исследования применительно к активации ядер атомов потоками быстрых нейтронов изучены К. И. Якубсоном [25.63, 25.64], и в частности, глубинность НАК-б и влияние на его результаты изменений химического состава пород и диаметра скважины. На основе расчетных и экспериментальных исследований этим автором установлено, что с ростом диаметра скважины показания НАК-б убывают. Так, если эффект НАК-б в скважине диаметром 90 мм принять за 100%, то в скважинах диаметром 110, 130 и 160 мм он уменьшается соответственно примерно до 70, 50 и 30%.

Расчеты применительно к НАК рассматриваются также в работах [25.22, 25.43].

§ 7. Исследование рудных скважин

При изучении разрезов рудных скважин метод НАК применяется для определения в породах фтора, алюминия, кремния, марганца и меди.

1. **Определение фтора.** Сведения об этом элементе приводятся в п. 2 § 2 гл. 14 и п. 2 § 2 этой главы. Метод НАК применяется для выявления флюоритов (CaF_2), апатитов [$Ca_{10}(PO_4)_6(F, Cl)_2$] и фосфоритов [$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$]. Фосфориты выделяются по наличию корреляционной связи между фосфором и фтором.

В п. 2 § 2 этой главы отмечалось, что при активации фтора образуются два изотопа на быстрых нейтронах: азот-16 и кислород-19 и один изотоп на тепловых нейтронах: фтор-20. Для пород с невысокой влажностью (порядка 2 вес.% H_2O) в 90% случаях происходят реакции на быстрых нейтронах, из которых 77% приходится на излучение азота-16 и 13% — на излучение кислорода-19 [25.13]. Во влажных же породах (15—20% воды по весу) вклад этих реакций уменьшается до 70—75%. При измерении в сухих и заполненных водой скважинах с толщиной

слоя воды 4 см (между породой и прибором) практически не меняется форма регистрируемого спектра гамма-лучей, обусловленных в основном излучением азота-16 и кислорода-19 [25.13, 25.21]. Гамма-излучение с энергией 1,63 МэВ (фтор-20) выделяется лишь при облучении сред с высоким содержанием водорода.

Определению фтора в породах по НАК может мешать изотоп алюминий-28, возникающий при облучении кремния и алюминия (см. п. 3 § 2 этой главы). Однако при регистрации гамма-квантов с энергией свыше 1,79 МэВ можно избавиться от излучения этого изотопа. Этому благоприятствует наличие у изотопа азот-16 жесткого гамма-излучения с энергией 6,13 и 7,11 МэВ. Реакция с образованием азота-16 на кислороде, содержащемся в воде, окружающей глубинный прибор, практически не оказывает влияния на результаты определения фтора в породах. Так, при исследовании скважин диаметром 130 мм прибором НАК диаметром 75 мм эффект от активации кислорода в воде, окружающей прибор, не превышает 0,3% от эффекта активации фтора, содержащегося в породе [25.13].

От влияния излучения естественных радиоактивных изотопов можно избавиться при этом путем регистрации гамма-квантов с энергией свыше 3 МэВ.

Разработкой методики определения фтора по разрезам скважин впервые начал заниматься В. Я. Бардовский [10.14, 25,7—25.9, 25.60]. Скважины исследовались аппаратурой типа РАРК с газоразрядными счетчиками типа МС-9 или ВС-9 и полоний-бериллиевым источником с выходом около $6 \cdot 10^6$ нейтр/с. Размер зонда был выбран равным 1 м.

В связи с тем, что В. Я. Бардовский считал, что активация фтора происходит преимущественно тепловыми нейтронами с образованием фтора-20, скорость перемещения прибора была выбрана равной 240—250 м/ч, т. е. в 1,45 раза ниже необходимой. Исследованием скважин по этой методике занимались также и другие исследователи [17.13, 19.173, 25.35]. Порог чувствительности определения фтора по этой методике оценивается в 5—7,5% [20.21].

Методика НАК на фтор была усовершенствована в дальнейшем И. П. Кошелевым, В. А. Красноперовым и др. [16.66, 16.86, 20.21, 25.81]. Ими на основе анализаторов ААДО-1 создана скважинная аппаратура с двумя запараллельными сцинтилляционными счетчиками (кристаллы йодистого натрия размерами 60×50 мм и ФЭУ-11). Источник с выходом $(1—3) \cdot 10^7$ нейтр/с размещался в борном блоке и крепился на кабеле выше прибора. Для контроля за стабильностью прибора в нем между кристаллами размещался изотоп цинк-65, создававший интенсивность, в 100 раз превосходящую интенсивность от естественных радиоактивных изотопов, содержащихся в породе. Для подавления излучения этих изотопов исследователи считают необходимым устанавливать порог дискриминации на уровне 3,0 МэВ. При исследовании сухих скважин другие параметры прибора рекомендуется выбирать следующими: размер зонда $l=1{,}5—1{,}9$ м, скорость перемещения глубинного прибора $v=520—550$ м/ч, постоянная времени $\tau_в = 4$ с [20.21], а при исследовании скважин, заполненных буровым раствором: $l=1{,}9$ *м*, $v=640$ м/ч, $\tau_в = 2$ с [25.79]. Для выявления маломощных пластов порядка 1 м замеры по НАК рекомендуется вести при $\tau = 1—2$ и 6 с.

В процессе спуска глубинного прибора ведется запись кривой НГК, а при подъеме — суммарной кривой НАК и НГК. Разностная кривая соответствует эффекту НАК. Для заполненных водой скважин эффект от НГК весьма мал и может не учитываться. При измерениях с прибором на газоразрядных или сцинтилляционных счетчиках с порогом дискриминации ниже 2,5 МэВ в случае расположения источника над счетчиком в процессе спуска прибора записывается кривая, обусловленная эффектами ГК и НГК, а при подъеме — кривая, обусловленная эффек-

гами НАК, ГК и НГК. В случае расположения источника ниже счетчика при спуске прибора, наоборот, записывается кривая, вызванная эффектами НАК, ГК и НГК, а при подъеме — эффектами ГК и НГК. Разностная кривая в любом случае соответствует эффекту НАК.

Для диапазона концентраций фтора, встречающихся в природе (0—50%), градуировочные кривые носят линейный характер. Однако на практике, применительно к конкретно изучаемым скважинам с их диаметром и заполнением, необходимо определять величину пересчетного коэффициента (в имп/мин) и, деля на нее измеренную скорость счета, определять содержание фтора в породах. При определении линейных запасов в этом случае, как и при ГК, можно пользоваться формулами (12-17 и (12-18).

Результаты измерений по НАК в сухой и заполненной водой скважине приводятся на рис. 25-8 [20.21]. Измерения по методике В. Я. Бардовского велись с использованием источника с выходом $Q=1{,}1\cdot 10^7$ нейтр/с и счетчика типа МС-11 при $l=1$ м, $v=250$ м/ч, $\tau_в=6$ с, а при измерениях по методике И. П. Кошелева и др.— со сцинтилляционным счетчиком при дискриминации излучения с энергией 2,5 МэВ; $Q=1{,}06\cdot 10^7$ нейтр/с, $l=1{,}6$ м, $v=450$ м/ч, $\tau_в=4$ с. Из рис. 25-8 видно, что при измерениях в сухой скважине по методике В. Я. Бардовского концентрации флюорита до 5% практически не выделяются, а по методике И. П. Кошелева четко фиксируются. Высокие концентрации флюорита в скважине, заполненной водой, по методике В. Я. Бардовского также слабо фиксируются. Порог чувствительности на фтор при измерениях по методике И. П. Кошелева и других оценивается в 0,2%, а абсо-

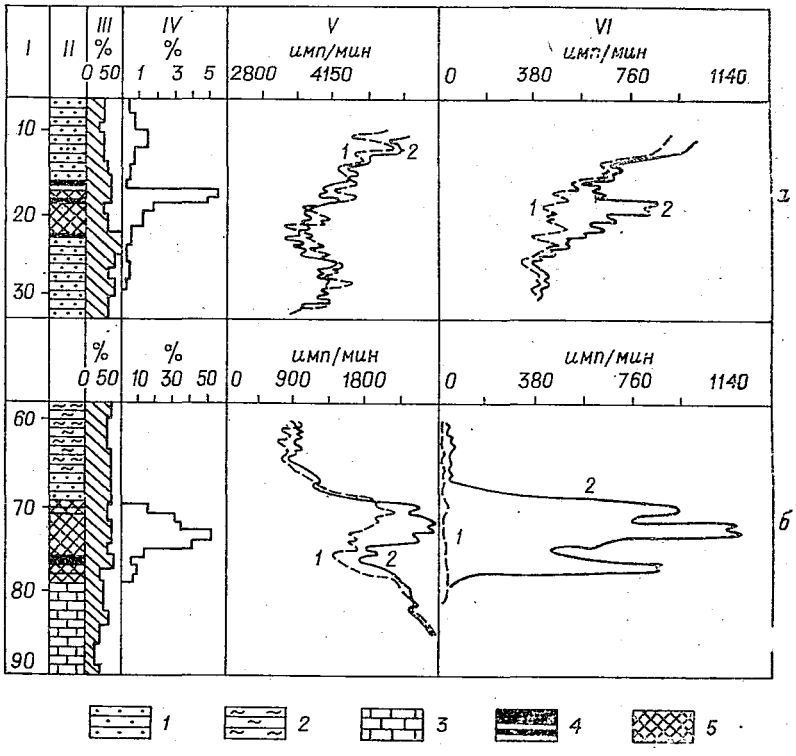


Рис. 25-8. Результаты определения F в породах в сухой скважине (*а*) диаметром 150 мм и скважине, заполненной водой (*б*), диаметром 129 мм.
I — глубины, м; II — геологическая колонка; III — выход керна, IV — содержание флюорита в пробах керна; V — диаграммы НГК (*1*) и НАК с НГК (*2*), измерение по методике В. Я. Бардовского; VI — то же при измерениях по методике И. П. Кошелева и др.; *1* — кварцевые песчаники, *2* — аргиллиты, *3* — известняки, *4* — зона окварцевания, *5* — флюоритовая минерализация.

лютная погрешность измерений — в 0,04—0,07%. При точечных измерениях порог чувствительности НАК к фтору понижается до 0,03% ($Q = 3 \cdot 10^7$ нейтр/с) [16.86]. Внедрение НАК в производство на месторождениях флюорита позволит получить годовую экономию около 175 тыс. руб. [16.86, 25.76].

Содержание фтора в топазах некоторых флюоритовых месторождений мешает непосредственному определению флюорита в минеральном сырье. О содержании флюорита в таком сырье судят по наличию его корреляционной связи с топазом [16.86].

Наличие фтора в решетке некоторых других минералов позволяет по методике НАКF выявить месторождения фосфора, особенно фторапатитов (см. табл. 10-2) и карбонатитов. Так, в сборнике [20.21] показано, что по НАКF можно определять в породах фосфор с порогом чувствительности 2% P_2O_5. Практический интерес обычно представляют породы с содержанием фосфорного ангидрида P_2O_5 от 15% и выше. Средняя погрешность определения таких концентраций фосфорного ангидрида по НАК равна 0,4%, а допустимая ГКЗ — 5%. Это указывает на возможность применения НАКF для подсчета запасов фосфорного ангидрида. С помощью метода НАК в указанных месторождениях фосфора можно определять нерастворимые примеси по активации алюминия, кремния и т. д. [20.21], а также кальций с порогом чувствительности 1—1,5% [25.76, 16.66].

Применение НАК в комплексе с другими методами РК для изучения апатито-нефелиновых руд рассматривается в работе [16.86].

2. **Определение алюминия.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в § 4 гл. 24 и п. 3. § 2 этой главы. Разработкой методики определения алюминия в породах впервые начали заниматься И. Н. Сенько-Булатный (Ин-т геофизики УФ АН СССР), К. И. Якубсон (МИНХ и ГП) и В. А. Волох и др. (ВНИИЯГГ).

Для определения алюминия по разрезам скважин наилучшие результаты получаются при измерениях с полоний-борным источником нейтронов. Активации кремния на быстрых нейтронах практически не происходит, и он не мешает определению алюминия [6.63, 16.86, 19.175, 18.69, 25.37]. Помимо этого, алюминий в породах можно определять по реакции $Al^{27}(n, p)Mg^{27}$. Изотоп магний-27 имеет период полураспада 9,51 мин и испускает гамма-кванты с энергией 1,015 МэВ (42%) и 0,834 МэВ (58%). Однако сечение этой реакции невелико — 0,026 барн ($5{,}6 \cdot 10^{-4}$ см^2/г) для нейтронов с энергией в диапазоне 4—12 МэВ. Поэтому методика НАКMg на практике не применяется.

При выявлении в разрезах скважин бокситов измерения можно вести с полоний-бериллиевым источником с выходом около 10^7 нейтр/с [25.20, 25.55, 25.60, 25.65]. Активация кремния с образованием алюминия-28 наиболее интенсивно происходит в сухих и богатых кремнеземом породах [25.11, 25.30]. В скважинах, заполненных жидкостью, влияние активации кремния убывает.

Для оценки влияния активации кремния быстрыми нейтронами полоний-бериллиевого источника (применительно к определению в бокситах глинозема) в работах [20.25, 25.11] произведены теоретические и экспериментальные исследования. Расчеты выполнены для однородной безграничной среды (без скважины). Эксперименты проводились на модели диаметром 50 см и высотой 100 см. В центре модели была сделана скважина диаметром 10 см. Исследуемой средой служил боксит, который в процессе измерений разубоживался кварцевым песком для получения сред с различным содержанием глинозема и кремнезема. Имелась еще одна модель, аналогичная описанной. Для исключения активации алюминия в изучаемую среду был добавлен кадмий, полностью поглощавший тепловые нейтроны. Перед активацией пород измерялась естественная радиоактивность с помощью счетчика типа МС-4, разме-

щенного в дюралиевой трубе диаметром 3 см. Активация пород велась в течение 30 мин потоком 10^7 нейтр/с. Через 0,5 мин в течение 1 мин измерялась наведенная активность, затем через 0,5 мин брался в течение 1 мин второй отсчет и т. д.— 30 мин.

Реультаты расчетов и экспериментов приведены на рис. 25-9 [20.25]. По оси ординат отложена величина отношения скорости счета, обусловленной активацией кремния N_{Si}, к суммарной скорости, обусловленной кремнием и алюминием N_Σ, а по оси абсцисс — величина кремниевого модуля $K_м$ (отношение содержаний глинозема и кремнезема). Завышение экспериментальных данных для малых значений кремниевого модуля ($K_м<1$) обусловлено недостаточными размерами модели по радиусу. С уменьшением кремниевого модуля уменьшалось содержание в породе связанной воды, и длина замедления нейтронов начинала превосходить толщину слоя породы (20 см). Завышение теоретической кривой над экспериментальной при $K_м>2$ обусловлено уменьшением активации кремния за счет присутствия воды в скважине, не учитываемой в расчете.

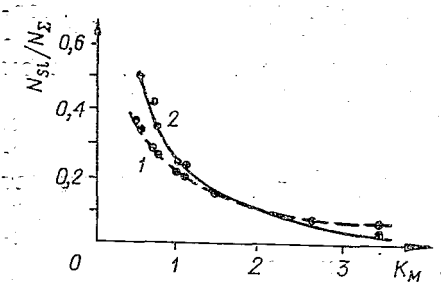


Рис. 25-9. Зависимость относительных скоростей счета гамма-излучения от величины кремниевого модуля.
1 — расчет, *2* — эксперимент.

Из рис. 25-9 видно, что при $K_м\geqslant 2$ влияние вклада реакции на кремнии составляет менее 10%. К. И. Якубсоном [6.46] проводились аналогичные исследования в сухой скважине диаметром 90 мм. При равных концентрациях в породах алюминия и кремния ($K_м\sim 1$) на долю активации кремния приходилось 28,6% от суммарного излучения алюминия-28, при $K_м=1{,}5$ и $K_м=2$—20 и 15% [6.63].

Применительно к исследованию бокситов производилась оценка доли гамма-излучения, обусловленного магнием-27 [20.25]. Для гидраргиллитового и диаспорового бокситов с величиной $K_м=2$ на долю излучения магния падали величины 4 и 7%. Поэтому на практике для выявления бокситов измеряют наведенную активность алюминия-28, причем полоний-бериллиевые источники можно использовать в случае, если вмещающими породами не являются кварцевые песчаники. Если присутствуют кварцевые песчаники, метод НАК необходимо комплексировать с ГК (см § 3 гл. 12).

Ниже рассмотрим методику НАК при изучении скважин с полоний-бериллиевыми источниками. Размер зонда при непрерывных измерениях алюминия выбирается в пределах 1,25—2 м. Этим размерам зондов отвечают оптимальные скорости от 22,5 до 36,0 м/ч. Однако при решении этой задачи скорость движения прибора можно увеличивать в 1,5—2,5 раза [25.56]. В этой работе, в частности, при измерениях на зонде 1,25 м использовались скорости в пределах 32—35 м/ч, а при измерениях на зонде 1,5 — скорости 60—65 м/ч.

Для определения алюминия по разрезам скважин может применяться аппаратура на газоразрядных и сцинтилляционных счетчиках при непрерывных и точечных измерениях. Однако наиболее эффективной считается методика измерений со сцинтилляционной и особенно спектрометрической аппаратурой. При интенсиметрических измерениях рекомендуется дискриминировать мягкое излучение с энергией в интервале от 0,5 до 1 МэВ. Чаще всего при этом подавляется излучение марганца с энергией 0,845 МэВ. При спектрометрических измерениях излучение рекомендуется регистрировать в двух диапазонах: 1,45—1,85 МэВ (излучение алюминия-28) и 0,85—1,3 МэВ (рассеянное гамма-излучение этого изотопа).

Непрерывный каротаж применяется для качественной интерпретации, а точечный — для количественной [25.55].

Точечные измерения обычно ведут с шагом 0,5 м. Производительность каротажа при этом составляет 15—20 м/ч. При измерениях с газоразрядной аппаратурой относительная погрешность измерений равна 5—8% [25.56]. Результаты измерений с газоразрядной и сцинтилляционной аппаратурой показаны на рис. 25-10 [25.20]. Относительная погрешность при спектрометрических измерениях не выходит за пределы 8% [25.56]. Порог чувствительности НАК при определении алюминия оценивается равным 3—7% [25.47].

Применение НАК для изучения бокситов рассматривается также в работах [25.60, 25.73, 25.75].

Полностью влияние кремния исключается, как уже отмечалось, при работе с полоний-борным источником (на долю активации кремния приходится всего лишь 1/2000 от доли его активации нейтронами полоний-бериллиевого источника) [6.63]. При исследованиях скважин полоний-борные источники выбирают с выходом $(2—6)\cdot 10^6$ нейтр/с при точечных измерениях и около $2\cdot 10^7$ нейтр/с при непрерывных. Погрешность измерений и порог чувствительности при этом несколько понижаются.

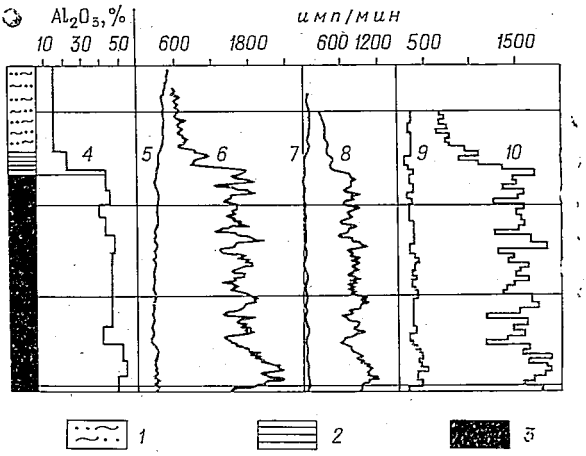


Рис. 25-10. Диаграммы НАК и ГК на месторождениях бокситов.

1 — песчаные глины, *2* — глины, *3* — каменистые бокситы, *4* — данные анализа керна, *5—6* — кривые ГК и НАК с дискриминацией излучения 0,83 МэВ при скорости подъема прибора 40 м/ч (длина зонда 2 м), *7* и *8* — то же, при регистрации излучения в диапазоне энергий 0.83—1,36 МэВ, *9* и *10* — данные ГК и НАК при точечных измерениях с газоразрядными счетчиками.

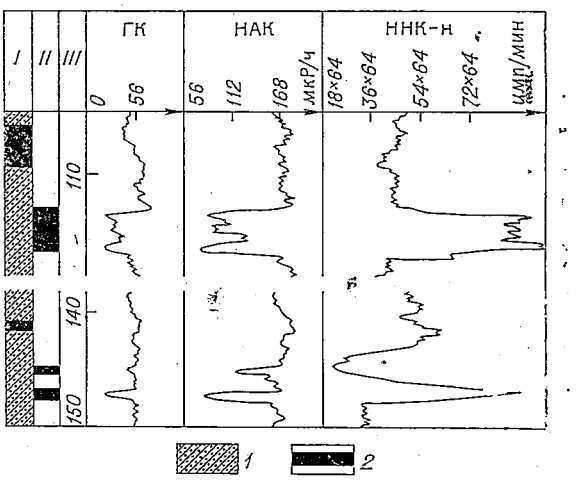


Рис. 25-11. Диаграммы ядерного каротажа на одном из рудных месторождений кварцево-жильного типа.

I — геологическая колонка; II — жилы, выявленные по каротажу; III — шкала глубины, м; *1* — песчаники, *2* — кварцевые жилы.

В работах [15.49, 25.23] показано, что по измерению наведенной радиоактивности алюминия-28 можно определять зольность углей с относительной погрешностью 0,7—18% при работе с источником, имеющим выход $3\cdot 10^6$ нейтр/с, и прибором КРЛ со счетчиком ВС-16. Аналогичные вопросы рассматриваются также в работе [25.74].

3. **Определение кремния.** Некоторые сведения об этом элементе имеются в § 4 гл. 24 и п. 3 § 2 этой главы. Данные о кремнии и алюминии необходимы для изучения литологии горных пород и выявления в разрезе скважин кварцевых жил и зон окварцевания. Раздельное определение в породах кремния и алюминия может быть произведено [16.8, 18.9, 18.69, 19.175, 25.25] при измерениях с полоний-бериллиевым

(N_1) и полоний-борным (N_2) источниками. В первом случае скорость счета связана с концентрациями алюминия (p_{Al}) и кремния (p_{Si}) соотношением

$$N_1 = ap_{Al} + bp_{Si}, \tag{25-32}$$

а во втором — только с концентрацией алюминия:

$$N_2 = a_1 p_{Al}. \tag{25-33}$$

В этих выражениях a и a_1 — удельные скорости счета, соответствующие глинозему (1%), а b — кремнезему (1%).

Поделив одно соотношение на другое, получим:

$$M = \frac{N_1}{N_2} = A + B\alpha_M,$$

где $A = a/a_1$; $B = b/a_1$, $\alpha_M = 1/K_M$ — величина, обратная кремниевому модулю (см. выше). Постоянные A и B необходимо определять применительно к конкретным условиям параметров приборов и скважин. Особенно это касается коэффициента B, оцениваемого по соотношению скоростей счета, обусловленных активацией быстрыми и тепловыми нейтронами. Для раздельного определения кремния и алюминия И. П. Кошелевым и др. [16.8] использовались полоний-бериллиевый источник с выходом $2 \cdot 10^7$ нейтр/с и полоний-борный — с выходом $6 \cdot 10^6$ нейтр/с. При размере зонда 2,5 м скорость каротажа выбиралась равной 50—60 м/ч с постоянной времени 10—20 с. Измерения НАК комплексировались с ГК (см. гл. 12) и ННК-н (см. гл. 22). Метод ГК необходим для учета изменений естественной радиоактивности горных пород, а метод ННК-н — для учета изменений их водородсодержания. В зависимости от водородсодержания пород необходимо пользоваться соответствующими коэффициентами B.

Кварцевые жилы и другие окварцованные породы можно выделять по недостатку глинозема при измерениях с одним только полоний-борным источником. От вмещающих пород, содержащих глинозем, кварцевые породы отличаются резкими минимумами (рис. 25-11) [18.9]. Метод НАК при этом достаточно уверенно выделяет мощные жилы (более 20—25 см).

При сопоставлении точечных и непрерывных измерений установлено, что наилучшие результаты получаются при точечных замерах с полоний-борным источником. Величина α_M для вмещающих пород менялась от 2 до 5 и определялась в основном с погрешностью от 0,1 до 0,5. Средняя относительная погрешность равнялась 11%. Наиболее высокие ошибки получены для неоднородных пород и кварцевых жил. Это, по мнению авторов [16.8], обусловливается, с одной стороны, недостаточностью способов введения поправок за неоднородность, малую мощность кварцевых жил, водонасыщенность, плотность и химсостав пород, а с другой — малой представительностью образцов керна и несовпадением точек отбора керна с точками облучения и измерения.

Для непрерывных исследований авторы [16.8] считают необходимым использовать полоний-борные источники с выходом $2 \cdot 10^7$ нейтр/с.

Порог чувствительности НАК к кремнию оценивается примерно в 10%.

4. **Определение марганца.** Некоторые сведения об этом элементе рассматриваются в п. 3 § 2 гл. 23 и п. 6 § 2 этой главы.

В разрезах скважин марганцевые оруденения выявляются по методике ННК-т (см. п. 3 § 7 гл. 23), а при залегании марганца в неглинистых породах — и по СНГК (см. § 4 гл. 24). Метод НАК применяется для определения количественных его концентраций. Обстоятельные исследования в этом направлении проведены И. И. Фельдманом [6.64,

20.50, 23.49, 23.51]. В связи с тем, что радиоактивный марганец имеет сравнительно высокий период полураспада (2,56 ч), исследования скважин ведутся по точечным замерам. И. И. Фельдманом для решения поставленной задачи применялась стандартная аппаратура РК с газоразрядными счетчиками типа РАРК и КРЛ. Источник нейтронов с выходом $(3{,}6—5{,}4)\cdot 10^6$ нейтр/с устанавливался на расстоянии 2 м от центра счетчиков типа ВС-9. С целью более эффективного замедления нейтронов источник специально размещался в парафиновом цилиндре высотой 100 мм с диаметром, равным внутреннему диаметру трубы-штанги, крепящейся к гильзе глубинного прибора.

Исследуемая точка облучалась в течение 30—60 мин. Пауза выбиралась в пределах 10—20 мин — для исключения влияния наведенной радиоактивности алюминия-28. Спад наведенной активности марганца-56 измерялся 45—60 мин с продолжительностью отдельных замеров по 1—2 мин и перерывом 5—10 мин. Перед активацией в точках, намеченных для исследований, измерялся фон естественной радиоактивности, вычитаемый в дальнейшем из замеров НАК. Перед началом исследований скважин строятся градуировочные кривые $N=f(p_{\text{Mn}}, t)$. В дальнейшем, пользуясь этими кривыми, определяют концентрацию марганца в исследуемой точке.

Наиболее интенсивно активация марганца происходит в заполненных водой скважинах. Поэтому при исследовании скважин необходимо учитывать влияние изменения их диаметров и влагонасыщенности горных пород. На практике ослабить влияние этих факторов можно путем измерений со спектрометрической аппаратурой по методике спектральных отношений или нормировки данных НАК к данным ННК-т и т. д.

При измерениях с газоразрядной аппаратурой порог чувствительности к марганцу оценивается равным 0,2%, а при измерениях со сцинтилляционной аппаратурой — 0,01—0,1% в зависимости от вещественного состава горных пород.

Градуировочные кривые $N_0=f(p_{\text{Mn}})$, как показано в сборнике [6.64], для диапазона концентраций 0—30% носят линейный характер.

Подобные вопросы рассматриваются также в работе [25.60].

5. **Определение меди.** Некоторые сведения об этом элементе содержатся в п. 2 § 1 и § 5 гл. 24, а также в п. 8 § 2 этой главы.

Вопросами разработки методики НАК для определения меди в породах занимались Г. С. Возженников [25.22], И. П. Кошелев, М. М. Шварцман и др. [6.17, 18.9, 19.162, 20.54], Е. М. Лобанов, А. А. Хайдаров и др. [18.69, 25.43, 25.54, 25.60], И. Н. Сенько-Булатный, В. В. Бахтерев и др. [16.62, 20.55, 25.84] и др.

Для определения меди в горных породах по разрезам скважин применяется методика точечных измерений по короткоживущему изотопу медь-66 ($T=5{,}1$ мин) и по долгоживущему изотопу медь-64 ($T=12{,}8$ ч).

В связи с тем, что содержание меди в рудах невелико (0, n—n%), ее определению в породах мешает целый ряд элементов. На измерения короткоживущего изотопа влияет излучение алюминия-28 ($T=2{,}3$ мин) и марганца-56 ($T=2{,}56$ ч), а долгоживущего — марганец-56 и натрий-24 ($T=15$ ч). При небольших содержаниях в рудах алюминия, кремния (в эквивалентах алюминия) и марганца рекомендуется применять методику, основанную на короткоживущем изотопе. При высоких концентрациях этих мешающих элементов следует пользоваться методикой, основанной на долгоживущем изотопе. С целью оценки содержаний алюминия и кремния в разрезе скважин перед определением меди проводят непрерывный НАК на алюминий-28 и в зависимости от его образования выбирают соответствующую методику.

Чтобы исключить влияние кремния на наведенную активность алюминия-28, облучение пород при определении меди лучше всего вести нейтронами полоний-борного источника [20.54]. Значительно понижает-

ся также наведенная активность за счет марганца-56, образующегося в ходе реакции (n, p) на железе.

В работах [20.55, 25.84] для определения меди по короткоживущему изотопу в медноколчеданных рудах предложено измерять суммарное излучение в диапазоне $\Delta E_1 = 0{,}94—1{,}14$ МэВ, а излучение алюминия-28 и марганца-56 — в диапазоне энергий $\Delta E_2 = 1{,}24—1{,}44$ МэВ. Активация руд с помощью источника с выходом $(1{,}0—1{,}5) \cdot 10^7$ нейтр/с производится в случае массивных медных руд в течение 5—10 мин, а вкрапленных — в течение 30 мин. Пауза 1—2 мин, затем в обоих каналах измеряются зависимости $N_i = f(t)$. Время отдельных замеров выбирается равным 1 мин, пауза — 0,5 мин. Общая продолжительность замера зависит от времени облучения. В связи с тем, что периоды полураспада алюминия-28 и марганца-56 сильно различаются, по регистрации излучения во втором канале не представляет труда разделить кривую $N_2 = f(t)$ на две составляющие: $N_{2Al} = f(t)$ и $N_{2Mn} = f(t)$. Полученные зависимости пересчитываются в первый энергетический интервал и вычитаются из суммарной кривой $N_1 = f(t)$. В итоге получается зависимость $N_{1Cu} = f(t)$. Критерием для выделения этой кривой служит период полураспада меди-66. Порог чувствительности определения меди по этой методике в зависимости от типа руд может меняться от 0,5 до 1% [20.55].

В работе [20.54] при измерениях по короткоживущему изотопу первый энергетический интервал рекомендуется выбирать в диапазоне энергий $\Delta E_1 = 0{,}55 — 1{,}15$ МэВ, а второй — при $E_2 > 1{,}15$ МэВ. С целью исключения интенсивной линии марганца-56 ($E_\gamma = 0{,}845$ МэВ) первый диапазон рациональнее все же брать в интервале 0,9—1,15 МэВ.

В зависимости от вещественного состава пород и руд время облучения в работе [20.54] рекомендуется в пределах 10—15 мин, пауза — в пределах 1—2 мин и общее время измерения от 10—15 мин до 30—40 мин. Разделение изотопов осуществляют либо графически, либо аналитически. Порог чувствительности по этой методике при ее опробовании на полиметаллических месторождениях Рудного Алтая оценивается в 0,5% меди.

При измерениях по долгоживущему изотопу медь-64 активацию пород рекомендуется вести в течение 1 ч, пауза — 13 ч, время измерения — 20 мин с выбором первого диапазона в области $\Delta E_1 = 0{,}2 — 0{,}6$ МэВ [20.54]. Выбор такой большой паузы обусловлен необходимостью устранения излучения марганца-56. При измерениях во втором энергетическом интервале регистрируется только излучение натрия-24, а в первом канале — суммарное излучение меди-64 и натрия-24. Разделить их несложно. Порог чувствительности на полиметаллическом месторождении Рудного Алтая при измерениях по этой методике оценен равным 0,2% меди.

Несколько иная методика определения меди по долгоживущему изотопу предлагается в работах [16.62, 25.84]. Наведенную активность в этой работе предлагается измерять спустя примерно 30 мин (после того как распадутся изотопы медь-66 и алюминий-28). Спектр излучения измеряется в трех каналах: в областях излучения меди-64 ($E_1 = 0{,}51$ МэВ), марганца-56 ($E_2 = 0{,}845$ МэВ) и натрия-24 ($E_3 = 1{,}37$ МэВ) за время, достаточное для получения зависимостей $N_i = f(t)$. Составляется система из трех уравнений и путем их решения определяется содержание в руде меди. Порог чувствительности в зависимости от типа месторождения оценивается от 0,25 до 0,8%.

Для ведения количественной интерпретации необходимо точно знать значения пересчетных коэффициентов [25.84]. Величины их зависят от содержания в рудах целого ряда химических элементов. Поэтому для определения пересчетных коэффициентов метод НАК необходимо комплексировать с другими методами РК. Так, для определения пере-

счетных коэффициентов в медноколчеданных рудах с переменными концентрациями железа, меди и цинка привлекается СГГК-с (см. гл. 20), а при переменных содержаниях в рудах свинца, бария и кадмия — ННК-т (см. гл. 22 и 23) и т. д.

В качестве одного из примеров применения НАК в комплексе с ГГК-с, ГГК-п, ННК-т и ННК-н для расчленения полиметаллических руд может служить рис. 25-12 [20.54]. С помощью указанного комплекса, как видно из рисунка, можно выявлять в разрезе скважин медь и свинец. Сопоставление полученных результатов с керновым опробованием показало, что суммарные концентрации свинца по химическому анализу оцениваются в 7,3% ·м, а по ГГК-с — в 8,8% ·м, а концентрации меди по химическому анализу оцениваются в 236,2% ·м, а по НАК — в 238,4% ·м.

Другие примеры применения НАК при определении меди рассматриваются в диссертации [25.84].

В работе [25.36] показано также, что при помощи НАК можно определять содержание в породах ванадия, натрия, магния, кальция и хлора.

§ 8. Исследование нефтяных скважин

При исследовании нефтяных скважин метод НАК применяется для отбивки водонефтяного контакта (ВНК), определения скорости движения пластовых вод и контроля за техническим состоянием скважин.

1. **Отбивка водонефтяного контакта.** Наличие повышенных концентраций хлористого натрия (до 200—300 г/л) в водах ряда нефтяных месторождений позволяет с помощью метода НАК выделять водоносные и нефтеносные пласты и отбивать контакт между ними. Для решения этой задачи, как уже отмечалось в п. 3 § 7 гл. 22, могут применяться методы ННК-т и НГК. Метод НГК для отбивки ВНК особенно эффективен при регистрации жесткого гамма-излучения, обусловленного радиационным захватом на ядрах хлора. Однако методы ННК-т и НГК не всегда удобны при решении этой задачи, особенно при заполнении скважин соленым раствором и т. д.

Вопросу отбивки ВНК методом НАК посвящен целый ряд публикаций [1.14, 1.27, 6.46, 6.63, 6.64, 18.69, 19.73, 25.13, 25.52 и др.], в которых рассматриваются возможности метода при решении этой задачи.

Исследование скважин проводят спустя 15—20 дней после обсадки (время, необходимое для восстановления ВНК и исчезновения зоны проникновения). С целью уменьшения влияния активации колонны и цемента тепловыми нейтронами глубинный прибор в месте положения источника обычно окружается бором или кадмием. Засолонение цемента может снижать эффект отбивки ВНК по НАК максимум на 37,5% [6.64].

При изучении ВНК в пластах песчаника под действием нейтронов в основном возникают изотопы алюминий-28 (T=2,3 мин), хлор-38 (T=38 мин) и натрий-24 (T=15 ч). В карбонатных же породах, если вода минерализована, образуются два последних изотопа. Наличие стальной обсадной колонны приводит к тому, что в ней под действием нейтронов на железе по реакции (n, p) возникает радиоактивный изотоп марганец-56 (T=2,56 ч). Этот изотоп образуется также и по реакции (n, γ) на марганце-55, содержащемся в качестве примеси в колонне. Поэтому наличие наведенной активности марганца приводит к затруднению отбивки ВНК по излучению хлора и натрия. С другой стороны, наличие хлора в пластовых водах вызывает то, что колонна против водоносных пластов активируется в меньшей степени по сравнению с ее участками против нефтяного пласта. Это явление поэтому также может быть использовано для отбивки ВНК.

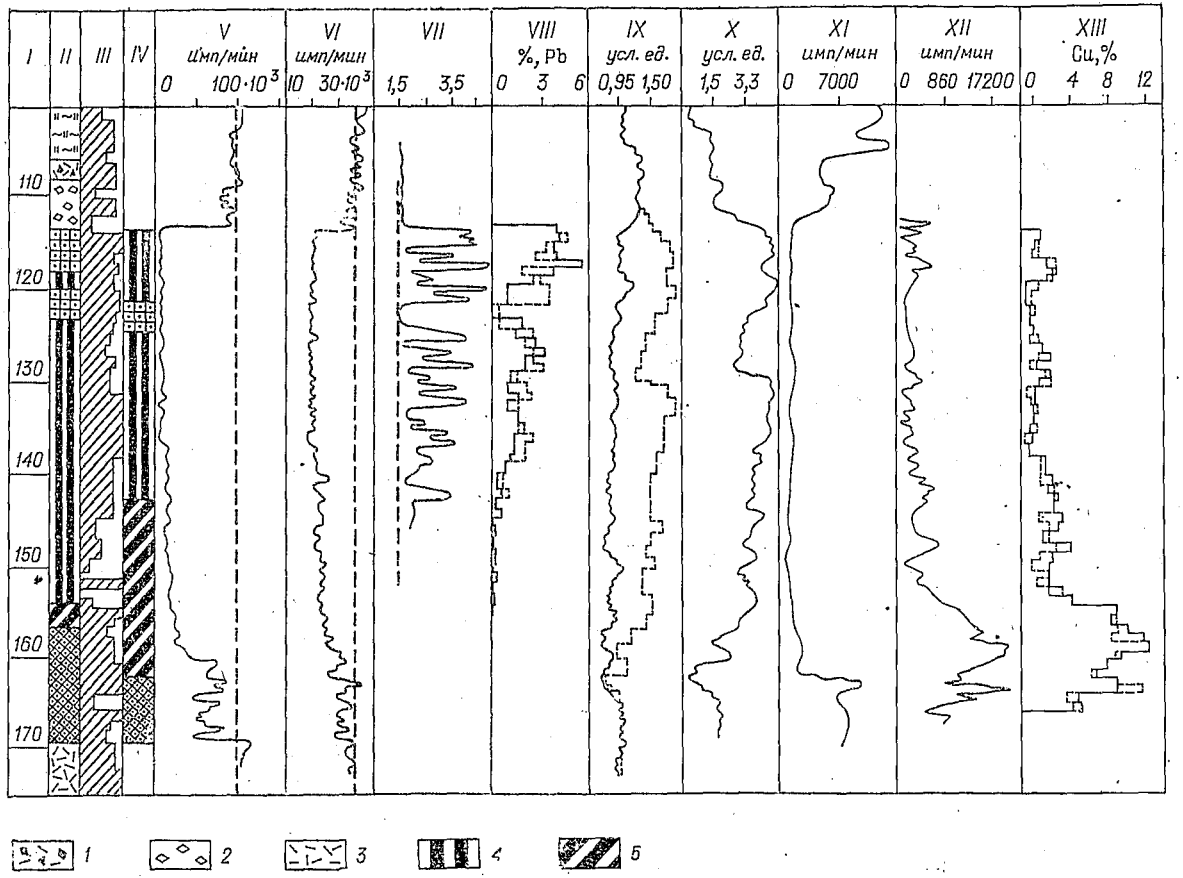


Рис. 25-12. Каротажные диаграммы на одном из полиметаллических месторождений.

I — шкала глубин; II — литологическая колонка; III — выход керна, %; IV — колонка по каротажу; V — ГГК-с (l=15 см, источник селен-75; $E_\gamma > 0{,}5$ МэВ); VI — ГГК-п (l=30 см, источник кобальт-60, $E_\gamma > 0{,}5$ МэВ); VII — M_3=N (150 кэВ) : N (75 кэВ) l=15 см, источник цезий-137; VIII — гистограммы содержания свинца по данным опробования (сплошная кривая) и каротажа (пунктирная кривая), IX — ННК-т, l=27 см (сплошная кривая), излучение фона (пунктир); X — ННК-н, l=37 см; XI — НАК по излучению алюминия-28: XII — то же, по излучению меди-66; XIII — гистограммы содержания меди по данным опробования (сплошная кривая) и каротажа (пунктирная кривая).

1 — лавобрекчия кислых эффузивов, *2* — опализированная порода, *3* — хлоритовая порода, *4* — сплошная полиметаллическая руда, *5* — сплошная пирит-халькопиритовая руда.

В зависимости от того, осуществляется ли отбивка ВНК по измерению активности хлора, натрия или марганца, методика НАК подразделяется на НАКCl, НАКNa и НАКMn. Ниже опишем отдельно каждую из этих методик.

Отбивка ВНК по излучению хлора. При отбивке ВНК по методу НАКCl точка облучается в течение 40 мин. Спустя 20 мин (после распада алюминия-28) измеряется спад активности хлора-38 и марганца-56 в течение 40 мин — 2 ч. Активность образующегося натрия-24 при 40-минутном облучении оказывается существенно меньше активности этих двух изотопов.

В целом общие затраты времени при работе по методу НАКCl составляют в среднем 2—3 ч на одну точку, если расположение точек не позволяет совмещать замер одной точки с облучением другой.

Отбивка ВНК осуществляется по величине относительных скоростей счета:

$$N'_{Cl} = \frac{N_{0Cl}}{N_{0Cl} + N_{0Mn}}, \qquad (25\text{-}35)$$

где N_{0Cl} и N_{0Mn} — соответственно отсчеты регистрируемого гамма-излучения хлора и марганца (за вычетом натурального фона), приведенные к величинам насыщения.

Поскольку значение $N_{0Cl} \ll N_{0Mn}$, формулу (25-35) можно записать в следующем виде:

$$N'_{Cl} = \frac{N_{0Cl}}{N_{0Mn}}. \qquad (25\text{-}36)$$

В результате исследования ряда скважин терригенных разрезов в Татарской АССР установлено [25.13], что величина этого отношения колеблется в следующих пределах: 0,06—0,12 (водоносные песчаники с минерализацией пластовых вод до 260—300 г/л); 0,04—0,06 (песчаники переходной зоны и обводненные песчаники) и 0—0,03 (нефтеносные песчаники). Имеющийся разброс величин связан в основном с непостоянством положения обсадной колонны в скважине и другими причинами.

Примером отбивки ВНК по методу НАКCl в сопоставлении с результатами других методов исследований терригенного разреза могут служить кривые, показанные на рис. 25-13 [6.64], из которых следует, что ВНК по методу НАКCl отбивается более четко по сравнению с методом НГК.

При исследовании карбонатных разрезов методом НАКCl установлено, что, как и при изучении терригенных разрезов, этот метод может применяться для отбивки ВНК в литологически однородных пластах с постоянной (или слабо меняющейся) пористостью. Так, в книге [25.13] показано, что при работе с источником с выходом $(1—3)\cdot 10^7$ нейтр/с и временах облучения и измерения по 40 мин различия в наведенной активности против нефтеносного и водоносного пластов составляли от 30 до 200%.

Отбивка ВНК по излучению натрия. В связи с тем, что при отбивке хлора на показания метода НАК значительное влияние оказывает излучение марганца, в 1954 г. Институт нефти АН СССР предложил применять метод НАКNa [19.73]. При отбивке ВНК методом НАКNa используется интенсиметрическая и спектрометрическая аппаратура.

При отбивке ВНК по методу НАКNa облучение породы производится в течение 4 ч. Затем, как и в методике НАКCl, спустя 20 мин в продолжение 4 ч измеряется наведенная радиоактивность. При такой методике измерения на показания метода НАК в основном будет ока-

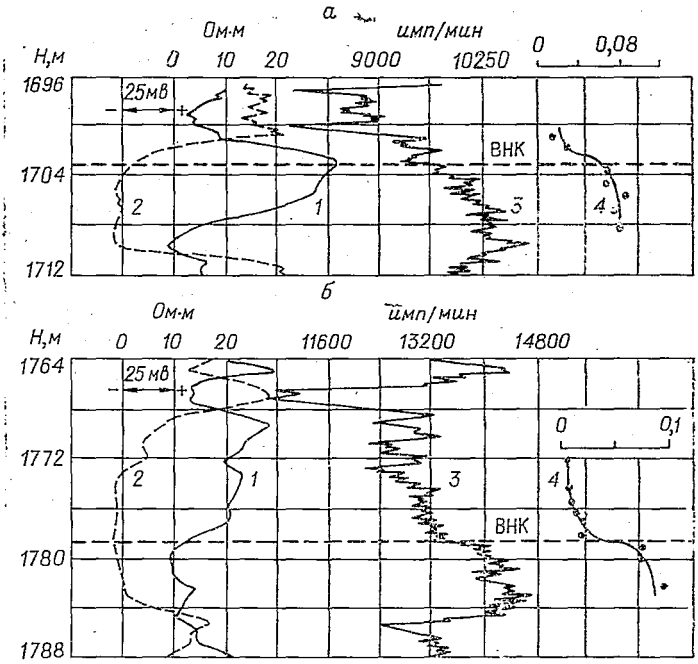


Рис. 25-13. Отбивка ВНК методом НАКСl в сопоставлении с результатами исследований другими методами в двух скважинах (*а* и *б*).

1 — КС; *2* — ПС; *3* — НГК; *4* — НАКСl. Кривые *1* и *2* получены в необсаженной скважине, кривые *3* и *4* — в обсаженной.

зывать действие излучение натрия-24 и марганца-56. Общая продолжительность одного замера составляет в среднем 8 ч на одну точку, если при этом не совмещается измерение в одной точке с облучением другой. Совмещение операций по облучению и замеру на три точки позволяет затрачивать всего лишь 16 ч [25.13].

Замеры при интенсиметрических измерениях обрабатываются также в относительных величинах:

$$N'_{\text{Na}} = \frac{N_{0\text{Na}}}{N_{0\text{Mn}}}, \qquad (25\text{-}37)$$

где $N_{0\text{Na}}$ — отсчет регистрируемого гамма-излучения натрия (за вычетом натурального фона), приведенный к величине насыщения; $N_{0\text{Mn}}$ — то же, что в (25-35).

Величина этого отношения для упомянутых выше терригенных разрезов колеблется в следующих пределах: 0,45—0,60 (водоносные песчаники); 0,30—0,45 (песчаники переходной зоны и обводненные песчаники) и 0—0,26 (нефтеносные песчаники) [25.13]. Имеющийся разброс исследуемой величины обусловлен, помимо непостоянства положения обсадной колонны в скважине, наличием в составе цемента натрия. Различное содержание натрия в цементе колонны приводит к весьма ощутимым искажениям результатов метода НАКNa. Примеры отбивки ВНК по НАКNa в сравнении с другими методами приведены на рис. 25-14 [25.13]. Из анализа результатов видно, что отбивка ВНК методом НАКNa решается значительно лучше методов НАКСl, НГК и ННК-т. По методике ННК-т контакт ВНК практически не отбивается. Для вод с низкой минерализацией (70—120 г/л) эффект методики НАКNa снижается до 30—40% [25.13]. В карбонатных коллекторах из-за значительных вариаций их пористости показания НАКNa также

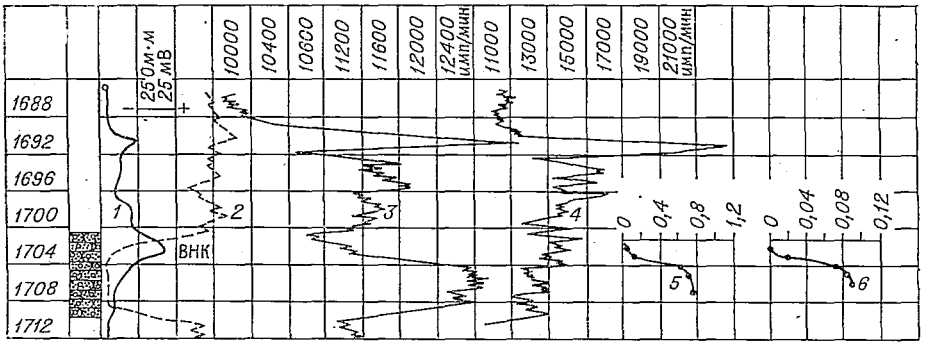


Рис. 25-14. Отбивка ВНК методом НАКNa в сравнении с другими методами.
1 — КС (*B* 7,5 м, *A* 0,75 м); *2* — ПС; *3* — НГК-50 с прибором РКМ-4 (счетчик МС-9, $\tau_в$ =30 с, v=100 м/ч, n=3,7 · 10^6 нейтр/с; *4* — ННК-40 с прибором РК-ЛС-57 (детектор-люминофор с обогащенным бором, $\tau_в$ =18 с, v=40 м/ч, $n \approx 1{,}3 \cdot 10^7$ нейтр/с); *5* — НАКNa $\left(\text{в единицах } N'_{Na}\right)$; *6* — — НАКCl $\left(\text{в единицах } N'_{Cl}\right)$.

снижаются. Так, водоносным пластам соответствуют значения N'_{Na} в пределах 0,12—0,25, а нефтеносным — в пределах 0—0,1 [25.13].

Одним из существенных недостатков метода НАКNa являются большие затраты времени, превосходящие примерно в 4 раза затраты, необходимые для реализации метода НАКCl.

При спектрометрических измерениях необходимо определять излучение с энергией свыше 2,1 МэВ (максимальная энергия гамма-квантов марганца-56).

Отбивка ВНК по излучению марганца. При отбивке ВНК методом НАКMn исследования ведут как с интенсиметрической, так и спектрометрической аппаратурой. Методика НАКMn в отличие от НАКCl и НАКNa является разновидностью ННК, а не НАК [25.13]. Колонну достаточно облучать 10 мин и в последующие 10 мин измерять наведенную активность. При интенсиметрических измерениях на показания детектора наряду с излучением марганца-56 влияет излучение алюминия-28. Однако большое различие в периодах полураспадов этих изотопов позволяет разделять их с достаточной точностью и выявлять излучение каждого из них.

Величину эффекта ВНК обычно оценивают по отношению

$$N' = \frac{N_н - N_в}{N_н}, \qquad (25\text{-}38)$$

где $N_н - N_в$ — соответственно скорости счета излучения против нефтеносного и водоносного пластов в начальный момент измерения.

В качестве примера отбивки ВНК методом НАКMn может служить кривая, показанная на рис. 25-15. Кривая НАКMn повторяет кривую КС и позволяет достаточно точно отбивать ВНК. При высокой минерализации пластовых вод методом НАКMn можно во всех случаях более надежно выявлять ВНК по сравнению с НАКCl и НАКMn. Метод НАКMn обладает также тем существенным преимуществом, что требует значительно меньше времени на проведение замеров. Однако изменение литологического состава горных пород может искажать результаты НАКMn при отбивке ВНК. При спектрометрическом НАК в случае облучения колонны помимо линий 0,845 МэВ (68,75%) четко выделяются линии с энергией 1,8 (18,75%) и 2.15 МэВ (12,5%) [25.40].

2. Решение других задач. Методика НАКNa может применяться также для оценки движения пластовых вод. Если известна величина N'_{Na} в отсутствие движения воды (v=0), то по изменению этой величи-

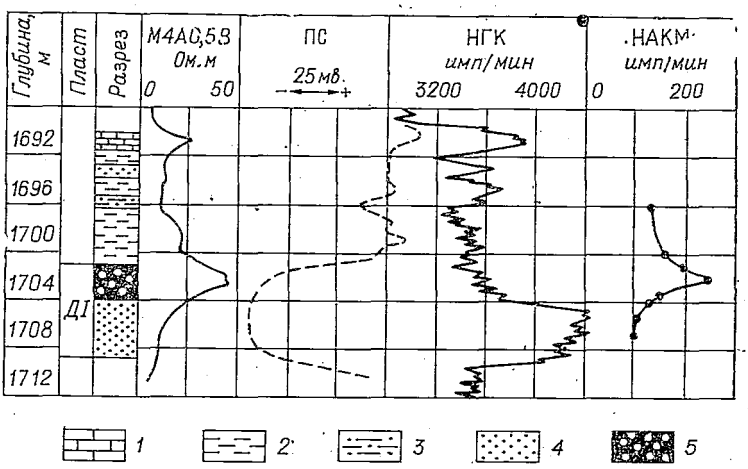


Рис. 25-15. Отбивка ВНК по методу НАКМп в сопоставлении с данными КС, ПС, НГК (по Е. Б. Бланкову и др.).

1 — известняк, *2* — глина, *3* — алевролит, *4* — песчаник водоносный, *5* — песчаник нефтеносный.

ны можно судить о скорости перемещения воды в пластах. Спад наведенной активности натрия при этом соответствует экспоненциальному закону. В случае же движения воды наблюдается отклонение от этого закона, и тем большее, чем больше скорость перемещения воды в пластах. В работе [25.13] показано, что по методике НАКNa при отсутствии мешающего влияния марганца можно обнаруживать скорость движения воды от 1 см/ч и выше, а при его влиянии — от 8 см/ч и выше. Предельной при этих измерениях является скорость 100 см/ч. Такие скорости обнаруживаются при минерализации вод от 20 г/л и выше в отсутствие влияния излучения марганца и от 50 г/л и выше при влиянии излучения марганца.

Методы НАКCl и НАКNa привлекаются для обнаружения обводненных пластов в случае движения пластовых вод [25.13].

Помимо этого метод НАКNa при размещении прибора типа РКМ-4 в наносно-компрессорных трубах привлекается для исследования динамики жидкости в стволе скважины. Используется аппаратура с двумя детекторами, отстоящими на разных расстояниях друг от друга. Если жидкость движется вдоль оси скважины, один детектор регистрирует убывание наведенной активности, а другой — нарастание. Таким образом, можно определять, движется жидкость вверх или вниз. Если она движется в сторону перфорированного пласта (перпендикулярно оси скважины), то спад наведенной активности каждого детектора происходит одинаково.

Более подробно эти вопросы рассматриваются в книге [25.13].

Глава 26

ФОТОНЕЙТРОННЫЙ МЕТОД

Фотонейтронный, или гамма-нейтронный, метод (ГНМ) основан на ядерной реакции (γ, n). Под действием излучения радиоизотопных гамма-препаратов, имеющих энергию не свыше 3 МэВ, эта реакция

может идти только на ядрах двух химических элементов — бериллия и дейтерия с порогами соответственно 1,67 и 2,23 МэВ. К настоящему времени разработаны приборы и методика ГНМ для определения в пробах пород и руд бериллия и в водородсодержащих средах дейтерия. Помимо этого созданы переносные, перевозные и скважинные бериллометры для обнаружения бериллия в коренных выходах горных пород и руд. По аналогии с ИННМ (см. гл. 22) может быть реализован также метод ИГНМ.

§ 1. Лабораторный анализ на бериллий

Природный бериллий состоит из одного стабильного изотопа с массовым числом 9(100%). Другие сведения о бериллии приводятся в приложении 6.

Наиболее распространенным источником бериллиевых руд является минерал берилл $Be_3Al_2Si_6O_{18}$, содержащий 5,03% бериллия. Главнейшие месторождения бериллия приурочиваются к гранитным пегматитам. Промышленными считаются руды с минеральным содержанием его от 0,01 до 0,1% в зависимости от масштаба месторождения и экономических условий его эксплуатации [1.27, 3.20].

В § 2 гл. 14, в частности, показано, что определение бериллия в пробах можно вести по методике АНМ. Однако в связи с тем, что альфа-частицы обладают слабой проникающей способностью, метод АНМ не получил широкого распространения. Так как в основу ГНМ положена более высокая проникающая способность гамма-лучей, этот метод имеет целый ряд преимуществ по сравнению с АНМ: а) не требуется специальной подготовки проб для анализа, б) возможен анализ более низких концентраций бериллия в пробах, в) более высока экспрессность и т. д. Но высокая проникающая способность гамма-квантов требует более действенных мер по технике радиационной безопасности.

Методика анализа руд ГНМ впервые предложена Г. В. Горшковым в 1937 г. [26.8]. К настоящему времени этот метод достаточно широко применяется на практике [6.46, 10.14, 15.24, 16.60, 16.62, 20.19, 20.20, 23.23, 26.1, 26.6, 26.7, 26.9, 26.12, 26.13, 26.16, 26.20—26.22, 26.24, 26.28, 26.31—26.34, 26.36, 26.38, 26.41, 26.43—26.45, 26.48, 26.49 и др.].

Ниже рассмотрим физические основы определения бериллия по ГНМ, лабораторные бериллометры и вопросы методики анализа.

1. **Физические основы анализа.** Общие сведения о фотоядерном эффекте рассматриваются в § 8 гл. 3.

Эффективное сечение реакции (γ, n) на бериллии показано на рис. 26-1 [2.25].

Для определения бериллия в пробах по ГНМ используется гамма-излучение сурьмы-124 (см. табл. 1—3). По сравнению с другими препаратами этот источник обладает тем преимуществом, что в его спектре отсутствуют гамма-кванты, способные вызывать фотоядерную реакцию на дейтерии. Однако изотоп сурьма-124 имеет и один существенный недостаток — малый период полураспада (60 дней). Из долгоживущих изотопов наиболее подходящим является алюминий-26 (см. § 4, гл. 1). Однако выпускаемые к настоящему времени препараты алюминия-26 обладают весьма низкой удельной активностью, что не позволяет использовать их в ГНМ.

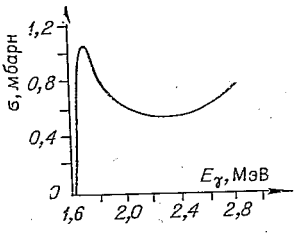


Рис. 26-1. Эффективное сечение фотонейтронной реакции на бериллии.

И. Н. Плаксиным и др. [26.26] исследованы возможности использования тормозного излучения в ГНМ для определения бериллия. Применялся бета-излучатель стронций-90+иттрий-90

(см. табл. 1-2) со свинцовой мишенью. Получающийся спектр тормозного излучения показан на рис. 2-5. В результате экспериментов установлено, что при измерениях с источником 500 мКи и одним счетчиком СНМО-5 для концентраций бериллия 10 и 40% получены скорости счета 5,5 и 16 имп/мин соответственно за вычетом фона (10 имп/мин.). Таким образом, для определения рудных концентраций бериллия в пробах активность источника необходимо повышать примерно на два порядка. Однако в этом случае требуются тормозные излучатели специальной конструкции с целью повышения выхода тормозного излучения.

Источник гамма-квантов в установках, предназначенных для анализа порошковых проб, размещается в центре цилиндрической кассеты с пробой. Если размеры источника принять точечными, высоту кассеты равной h, а внутренний и внешний радиусы соответственно r_1 и r_2, то число нейтронов, образующихся в пробе, может быть представлено в соответствии с работой [26.33] выражением вида:

$$n = Q\rho p \Sigma \left[r_2 \operatorname{arctg} \frac{h}{2r_2} - r_1 \operatorname{arctg} \frac{h}{4} \ln \frac{h^2 + 4r_2^2}{h^2 - 4r_1^2} \right], \qquad (26\text{-}1)$$

где Q — активность источника; p — весовое содержание бериллия в пробе; Σ — массовое макроскопическое сечение фотонейтронной реакции на бериллии.

С учетом поглощения гамма-квантов в пробах аналогичное соотношение запишется так [26.33]:

$$n = \frac{Q\rho p \Sigma}{4\pi} \int\limits_{\varphi} \int\limits_{rz} \int \frac{e^{-\tau \frac{r - r_1}{r}} \sqrt{r^2 + Z^2}}{r^2 + Z^2} \, r dr d\varphi dZ \qquad (26\text{-}2)$$

где r и φ — полярные координаты; Z — апликата; τ — линейный коэффициент ослабления в пробе гамма-излучения.

Этот интеграл вычисляется численно. Однако учет поглощения гамма-квантов существенно не искажает результатов расчета [26.33], поэтому для оценки потока фотонейтронов можно пользоваться формулой (26-1).

Под действием гамма-квантов сурьмяного источника возникают промежуточные нейтроны с энергией в среднем 24 кэВ. Регистрировать эти нейтроны можно — после их замедления и последующего детектирования — борным или литиевыми детекторами. Поэтому в лабораторных бериллометрах пробу с источником гамма-лучей обычно размещают в замедлителе (вода, парафин, плексиглас и т. д.). На некотором расстоянии от пробы по окружности замедлителя располагаются обычно пропорциональные борные счетчики. В зависимости от геометрии применяемой установки, типа замедлителя, числа детекторов, их размеров и эффективности скорость счета может быть представлена следующим соотношением:

$$N = n\varepsilon F, \qquad (26\text{-}3)$$

где ε — эффективность детектора; F — функция, описывающая замедление и диффузию нейтронов в замедлителе. Она зависит от параметров установки и детекторов и не может быть представлена точным аналитическим соотношением, поэтому на практике активность источника выбирается экспериментально.

2. **Устройство бериллометров.** Для анализа рудных проб наиболее совершенной установкой с пропорциональными счетчиками является прибор РОБ-1 (ФНУВ-4-59). Устройство датчика показано на рис. 26-2 [26.28]. Установка рассчитана для измерений с источником сурьма-124

активностью 50 мКи и четырьмя пропорциональными борными счетчиками типа СНМО-5 (см. табл. 5-1). Такое число счетчиков в установках данного типа признано наиболее оптимальным. Внутренний свинцовый экран толщиной 3,5 см, окружающий пробу, предназначен для защиты детекторов от гамма-излучения. Амплитуда импульсов, обусловленных нейтронами, превосходит в 7—10 раз амплитуду импульсов от гамма-лучей. При высокой интенсивности последних происходит наложение амплитуд, устранить влияние которых с помощью обычной системы ди-

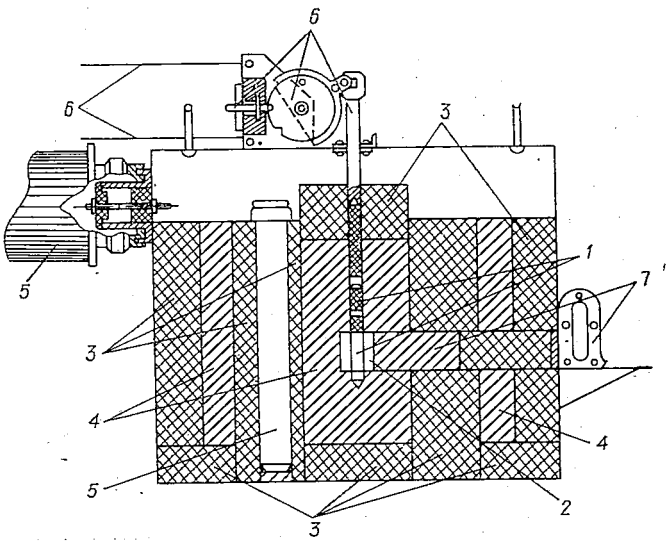


Рис. 26-2. Устройство фотонейтронной установки ВИРГа типа ФНУВ-4-59 (РОБ-1).

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

скриминации невозможно. Поэтому для уменьшения потока гамма-излучения в приборах данного типа и используется свинцовая защита счетчиков. Наружный свинцовый экран предназначен для защиты обслуживающего персонала.

Толщина слоя замедлителя равна 10—11 см, вполне достаточна для замедления возникающих нейтронов до тепловых энергий. Кассета имеет объем 40 см^3 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). Электронная схема установки является стандартной и описана в работе [26.28].

П. П. Клевцовым и Б. И. Поляковым (ВИРГ) для определения в металлометрических и других пробах низких концентраций бериллия (кларковых и ниже) создана специальная высокочувствительная установка «УЛУФОН» (рис. 26-3) [20.20]. Высокая чувствительность установки обеспечивается благодаря применению в ней источника сурьма-124 активностью 200 мКи и двадцати пропорциональных борных счетчиков типа СНМО-5. Для защиты счетчиков от гамма-излучения источника между ними установлен кольцевой слой свинца толщиной 6 см. Для снижения уровня натурального нейтронного фона установка располагается в водяном замедлителе толщиной слоя воды 20 см и кадмиевой облицовкой. Сверху вместо водной защиты использована пара-

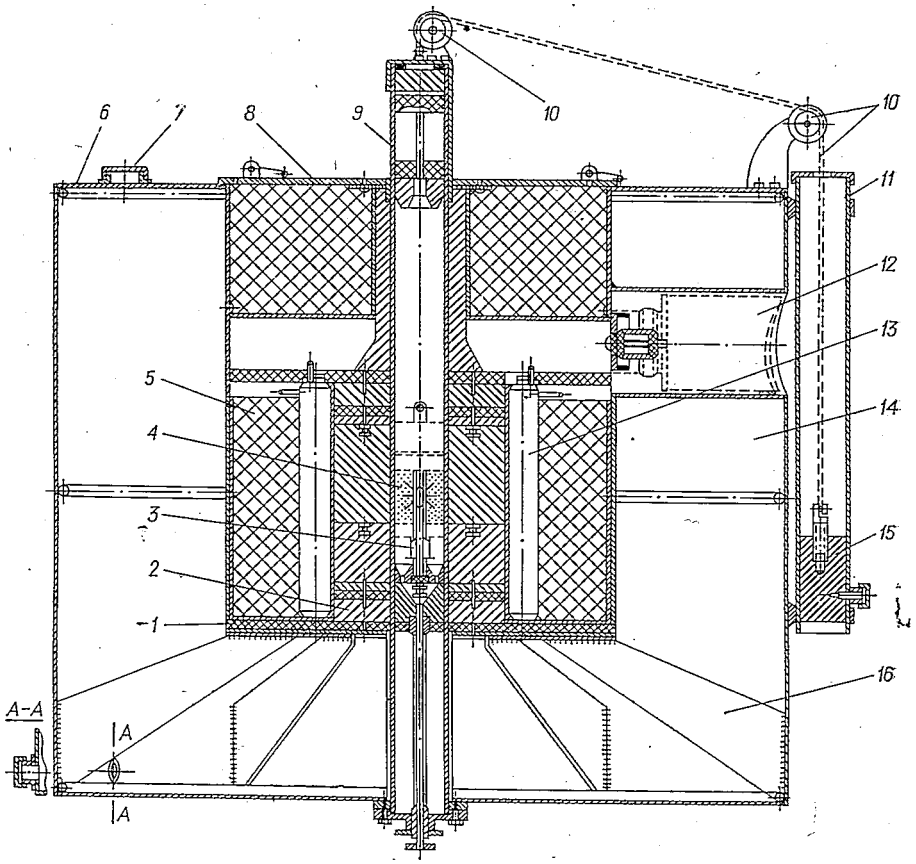


Рис. 26-3. Устройство фотонейтронной установки «УЛУФОН».

1 — плексигласовые прокладки для рассеяния нейтронов, *2* — блоки свинцовой защиты, *3* — гамма-источник в иглообразном держателе, *4* — кассета с пробой в рабочем положении, *5* — парафиновый замедлитель с кадмиевой облицовкой, *6* — бак для заполнения водой, *7* — пробка отверстия для заливки бака водой, *8* — крышка с парафиновым наполнителем, *9* — кассета в поднятом положении, *10* — лифтовая система подачи кассеты, *11* — корпус противовеса, *12* — предусилитель установки СЧ-3, *13* — счетчики СНМО-5 (20 шт.), *14* — кадмиевая защита, *15* — противовес лифтовой системы, *16* — ребра жесткости.

финовая (для придания жесткости установке). Объем кассеты для проб равен 105 см^3. На уровне моря нейтронный фон установки составляет 6 имп/мин, а на высоте 600 м — около 8 имп/мин. В качестве радиометра в приборе используется стандартная установка С4-3.

Устройство датчиков бериллометров «Берилл-2» для анализа штуфных и порошковых проб показано на рис. 26-4 [26.32]. 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 мКи. Навеска порошковых проб составляет 100 г. Вес штуфных проб может меняться от 100 до 1000 г. Сосуд имеет диаметр 25 см и высоту 20—30 см.

3. **Методика анализа порошковых проб.** Методика анализа бериллиевых проб по ГНМ схожа с другими ядерно-геофизическими методами анализа и сводится к измерению натурального нейтронного фона, построению градуировочного графика для данного типа пород и руд и последующему анализу исследуемых проб.

В связи с тем, что градуировочные графики $N = f(p_{Be})$ носят линейный характер, измерения по ГНМ можно вести с одной эталонной пробой. Содержание бериллия в ней выбирается равным средней величине

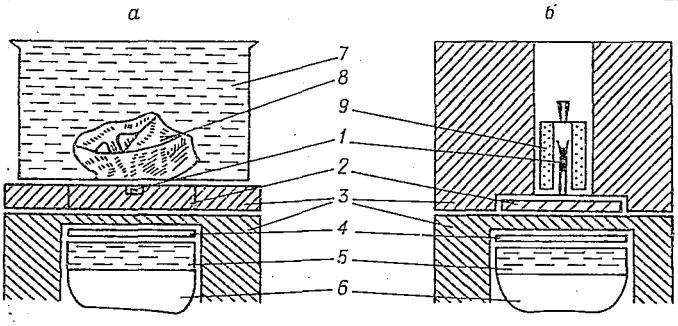


Рис. 26-4. Устройство сцинтилляционного бериллометра для анализа штуфных (*а*) и порошковых (*б*) проб.

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

для изучаемого диапазона концентраций бериллия в пробах. Оценку бериллия в пробах можно осуществлять, пользуясь соотношением (10-2). Если при этом не учитывается навеска пробы и эталона, превышение веса пробы над весом эталона на 30% изменяет скорость счета на 1% [26.28].

Из-за присутствия в пробах переменных концентраций сильно поглощающих элементов (бора, лития, редкоземельных элементов) требуется применение специальных приемов для устранения их влияния.

Фотонейтроны в процессе замедления и диффузии частично возвращаются в пробу и взаимодействуют с перечисленными элементами, что приводит к занижению потока нейтронов в замедлителе и, следовательно, к сожалению искомого содержания бериллия в изучаемых пробах. Содержание бора и лития в бериллиевых пробах может достигать единиц процентов, редкоземельных элементов — сотой доли процента [26.28].

Существует несколько приемов для исключения влияния переменных концентраций сильно поглощающих элементов:

а. Способ использования кассет разной толщины d_1 и d_2 $(d_1 > d_2)$. Если концентрации бериллия, определенные в этих пробах, обозначить соответственно p_1 и p_2, то искомая концентрация будет определяться из соотношения

$$p = p_1 + \frac{(p_2 - p_1)}{d_1 - d_2} d_1.$$

Содержание бериллия при этом может быть установлено и при построении графика $p = f(d)$. Экстраполяция прямой, проведенной по двум точкам и т. п., на ось ординат будет соответствовать искомому значению p (при $d = 0$), в связи с чем в литературе этот прием получил название способа экстраполяции к нулевому слою [26.11, 26.21, 26.22, 26.28].

б. Способ внутреннего стандарта [26.11, 26.28]. Сводится к введению в пробы ампул с известным содержанием чистого бериллия. Для измерений по этому способу применяются специальные кассеты с гнездом для ампулы. Методика измерений сводится к трем замерам: N_1 — замер с пробой, не содержащей бериллия и поглощающих элементов (кварцевый песок и т. д.) при расположении в гнезде ампулы с бериллием; N_2 — то же, но при расположении в кассете изучаемой пробы; N_3 — то же, при расположении в гнезде ампулы, не содержащей бериллия и поглощающих элементов.

Концентрация бериллия оценивается по формуле [26.28]

$$p = \frac{N_1}{N_э} \frac{p_a \cdot 100}{p_п \left(\frac{N_2}{N_э} - 1 \right)},$$

где $p_а$ — вес бериллия в ампуле; $p_п$ — вес пробы; $N_э$ — скорость счета от обычной эталонной пробы.

Существуют также и другие способы внутреннего стандарта: добавка в пробы и эталоны дополнительных количеств бериллия, измерение в обычных и бериллиевых стаканчиках и т. д. Влияние переменных концентраций бора и других элементов может исключаться при измерениях в пробах, экранированных кадмием [26.9, 26.36]. Однако при этом сильно снижается чувствительность ГНМ. Учет сильно поглощающих элементов может производиться при измерениях с нейтронным источником [26.28]. В этом случае вместо сурьмяного источника в центр пробы устанавливается нейтронный источник. Отношение N_0/N_i характеризует смещение градуировочных графиков параллельно самим себе; (N_0 — замер с пробой, не содержащей сильно поглощающих элементов; N_i — то же при измерениях проб, содержащих их). Таким образом, в этом случае метод ГНМ комбинируется с методом ННМ-т. Оценку содержания сильно поглощающих элементов можно производить и на установках ННМ-т (см. § 1, гл. 22).

Таблица 26-1

Сопоставление допустимых ошибок по ГКЗ с даными ГНМ.

Классы содержания BeO, %	Допустимые ошибки по нормам ГКЗ, %	Ошибки ГНМ, %
0,005—0,010	60—40	50—30
0,010—0,100	40—15	30—12
0,100—1,00	15—8	12—5
1,00—15,0	8—3	5—3

Изменение влажности проб на ±8% изменяет регистрируемую скорость счета на 1% [26.28, 26.36]. Поэтому изменение содержания влаги в пробах обычно не учитывают.

Пороги чувствительности установок РОБ-1, УЛУФОН и «Берилл-2» оцениваются соответственно равными $7 \cdot 10^{-4}$; $2 \cdot 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ бериллия, относительные погрешности 20—30%. Более высокие концентрации определяются с более высокой точностью, вполне удовлетворяющей требованиям ГКЗ. Это, в частности, видно из результатов О. Н. Теперина и В. А. Корзуна [16.62], приведенных в табл. 26-1 и на рис. 26-5. Линиями на этом рисунке ограничена область допустимых погрешностей по нормам ГКЗ. Из результатов анализа 500 проб только 12 выходят за пределы этой области. ГНМ значительно точнее спектрального анализа. При анализе низких концентраций бериллия в пробах (ниже 0,01%) на одну пробу затрачивается от 3 до 15 мин в зависимо-

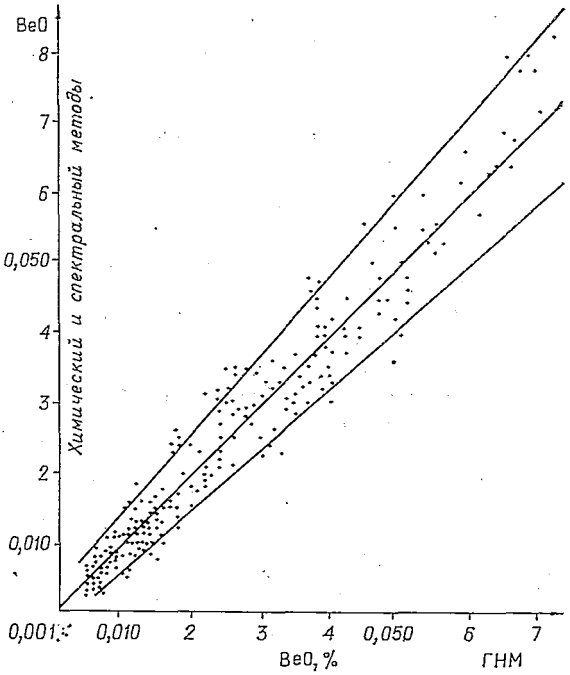


Рис. 26-5. Сопоставление данных ГНМ с данными химического и спектрального анализов.

сти от типа установки, а при анализе высоких концентраций (свыше 0,01%) — около 1 мин. Указанные затраты времени намного ниже затрат химического и спектрального методов. В работе [26.12] показано, что применение ГНМ позволяет повысить производительность анализа на бериллий в 3—5 раз по сравнению со спектральным методом и в 4,5—5,7 раза по сравнению с химическим. Стоимость одного анализа на бериллий по ГНМ оценивается равной 32—83 коп., что в 2—7 раз ниже стоимости спектрального анализа и в 3,3—11 раз — химического [26.12].

Описанная выше методика ГНМ может применяться также для анализа бериллиевых продуктов переработки без их предварительной обработки [26.27, 26.31].

4. **Методика анализа штуфных проб.** Устройство датчика бериллометра для анализа штуфных проб показано на рис. 26-4. Взвешенный образец опускается в сосуд. Объем образца определяется по поднятию уровня воды в сосуде. Перед измерением образцов различного объема необходимо строить график зависимости измеряемого эффекта от объема образцов (см. рис. 26-6 [26.32]). По оси ординат на этом графике отложена величина

$$f(v) = N_{об}/N_{эт} \cdot P \cdot p,$$

где $N_{об}$ — скорость счета фотонейтронов от образца; $N_{эт}$ — скорость счета от эталона; P — вес образца; p — концентрация бериллия в образце (определяется путем измельчения образца и последующего анализа ГНМ и т. п.); v — объем образца.

Таким образом, зная объем образца, по графику рис. 26-6 определяется величина $f(v)$, а по ней — концентрация бериллия в образце с помощью соотношения

$$p = N_i/N_{эт}Pf(v),$$

где N_i — скорость счета определяемого образца.

При измерениях с источником 10 мКи порог чувствительности оценивается равным 0,003% бериллия, относительная ошибка измерений — 15%. Если не учитывать вес образцов (которые незначительно меняются по весу — керны и т. д.), относительная ошибка повышается до 30—40%. Грубую разбраковку образцов на содержание в них бериллия можно также производить, устанавливая образец непосредственно над источником, а не погружая его в сосуд с водой.

На один анализ образца затрачивается время порядка 1—3 мин, что позволяет анализировать до 20—40 проб в 1 ч.

§ 2. Лабораторный анализ на дейтерий

В природных объектах основным источником дейтерия является обыкновеннная вода, в водороде которой его содержится в среднем 0,015%. В нефтях, по мнению некоторых исследователей, дейтерия может быть больше, чем в воде, примерно в 2 раза.

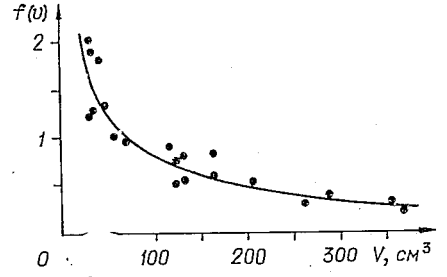


Рис. 26-6. График для определения поправок при изменении объема (или веса) штуфных образцов.

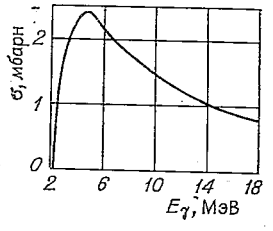


Рис. 26-7. Эффективное сечение фотоядерной реакции на дейтерии.

Первые исследования по определению дейтерия в воде проведены в Англии К. П. Хайгом, опубликовавшим свои работы в 1953 и 1954 гг. [26.46, 26.47]. В СССР над этой проблемой работали сотрудники ГеоХИ АН СССР В. И. Баранов и др. [26.2, 26.3].

Эффективное сечение фотоядерной реакции на дейтерий в зависимости от энергии приведено на рис. 26-7. Начиная с порога 2,23 МэВ с ростом энергии гамма-квантов сечение резко возрастает, достигая максимума примерно при 4,6 МэВ.

В качестве источников гамма-излучения для фоторасщепления дейтерия применяют обычно изотоп натрий-24 (см. табл. 1-3). Однако малый период полураспада этого изотопа (T=15 ч) является его существенным недостатком. Помимо натрия-24 для этих целей может применяться также излучение лантана-140 (T=40,22 *ч*, E=2,523 (5,5%); 3,01 МэВ (0,2%) и др.) и иттрия-88 (T=105 дней, E_γ=2,76 МэВ (0,5%) и др.). Наиболее долгоживущим из этих изотопов, как видно, является иттрий-88. Однако его выпускаемые препараты обладают низкой удельной активностью, что не позволяет в настоящее время использовать их в ГНМ для анализа дейтерия.

В работе [26.26] исследована возможность применения в качестве источников препаратов тормозного излучения на основе рутения-106 (T=366 дней) в равновесии с родием-106 (T=30 с, E_γ=3,55 МэВ). Вид спектра тормозного излучения для этого препарата можно получить, пользуясь табл. 2-2. При измерениях с источником активностью 100 мКи и одним счетчиком СНМО-5 установлено, что можно определить лишь весьма высокие концентрации дейтерия (свыше 10%).

Препараты типа мезотория также непригодны для этих целей из-за их высокого собственного нейтронного фона. В связи с этим на практике исследования по определению дейтерия ведут только с излучателем натрий-24.

1. **Устройство дейтериометров.** К настоящему времени создано три вида дейтериометров [26.2, 26.3, 26.30, 26.47]. По устройству они подобны бериллометрам. С целью защиты детекторов от гамма-лучей источника его располагают также вместе с пробой в свинцовом экране. Детекторы нейтронов устанавливаются либо непосредственно в свинце, либо сразу за ним, чтобы жесткое гамма-излучение источника не выбивало фотонейтроны из замедлителя (вода, парафин и т. д.). Для этого же в некоторых установках в качестве замедлителя и отражателя нейтронов специально используют графит [26.5, 26.30].

Схематическое устройство дейтериометра К. П. Хайга [26.47] показано на рис. 26-8. В качестве источника гамма-квантов в нем используется натрий-24 активностью порядка 1 Ки. Источник устанавливается в свинцовом контейнере с наружным диаметром 22 см и высотой 20 см. Вокруг контейнера располагаются ионизационные камеры с борным покрытием, импульсы напряжения с которых через коаксиальный кабель поступают к регистрирующему прибору. Контейнер и борные камеры устанавливаются в парафиновом цилиндрическом блоке высотой 73 см и наружным диаметром 65 см. Парафиновый блок в свою очередь окружен свинцовой оболочкой толщиной 1,5 см, размещается он в бетонной защите размером 160×160×75 см.

В центре свинцового контейнера крепится труба-держатель, в которой находятся источник гамма-квантов и проба. Источник запрессован в тонкостенную трубку. В процессе измерений он перемещается в центр контейнера с пробой. Объем контейнера пробы выбирается от 10 до 65 мл. Это достигается за счет изменения наружного диаметра контейнера (см. рис. 26-8). Контейнер с пробой устанавливается в положение для измерений с помощью специального дистанционного приспособления. Проба и источник гамма-квантов в трубе-держателе сверху и снизу окружены дополнительными свинцовыми экранами.

Устройство дейтериометра ГеоХИ АН СССР показано на рис. 26-9 [26.2]. Применение в установке двадцати пропорциональных счетчиков с обогащенным бором-10 и проб большого объема (600 мл) позволило активность источника снизить примерно на порядок (в исследованиях использовался источник активностью 126 мКи). Натуральный нейтронный фон этого дейтериометра составляет 12 имп/мин (0,6 имп/мин на один счетчик). Фон с источником без пробы повышался до 16 имп/мин (выбиванием фотонейтронов из парафинового отражателя). Выбранный большой объем пробы позволяет не только получать более высокие выходы из нее фотонейтронов, но и одновременно использовать ее в качестве замедлителя. Такое устройство установки обеспечивает регистрацию 2,5% нейтронов от их общего числа. Повысить эффективность дейтериометров можно путем размещения между пробой и детекторами слоя замедлителя, не содержащего дейтерия. В качестве такого замедлителя может служить очищенная от дейтерия протиевая вода [26.2], а также графит [26.5, 26.30].

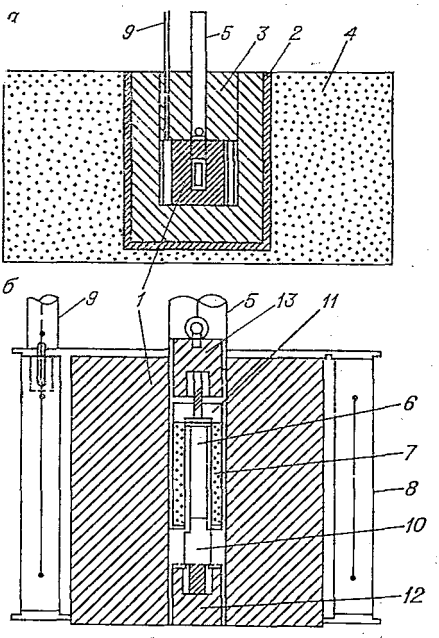


Рис. 26-8. Схема дейтериометра К. П. Хайга.

а — общий вид, *б* — вид свинцового контейнера с источником, пробой и борными камерами.
1 — свинцовый контейнер, *2* — свинцовая защита, *3* — парафин, *4* — бетон, *5* — труба-держатель, *6* — источник гамма-квантов, *7* — проба, *8* — борные камеры, *9* — коаксиальный кабель, соединяющий борные камеры с регистрирующим прибором, *10* — труба для источника, *11* — контейнер для проб, *12* и *13* — свинцовые экраны в трубе *5*.

Установка ВНИИЯГГ [26.5, 26.30] рассчитана на исследование проб объемом 420 см^3. Активность источника 100 мКи, между пробой и восемнадцатью пропорциональными борными счетчиками СНМО-5 располагается свинцовый экран толщиной 80 мм. За счетчиками находится графитовый блок, служащий замедлителем и отражателем нейтронов. Нейтронный фон установки с источником составляет 5—10 имп/мин. В последнее время в аналогичной установке стали использовать пропорциональные счетчики, заполненные гелием-3, и источник кобальт-56 (T=77,3 дня, E_γ=3,25 (12%); 2,99 (2%) и 2,61 (16%) МэВ).

2. **Методика анализа.** Градуировочные графики, как и при определении бериллия, носят линейный характер (рис. 26-10). При массовом анализе проб воды из различных источников или нефтей измерения выгодно сравнивать со стандартом. В качестве такого стандарта может быть взята вода из любого источника. В работе [26.5] таким источником служит вода из московского водопровода с содержанием дейтерия 0,0147±0,0005 ат. %.

К. П. Хайгом при анализе содержаний дейтерия в количестве $4\cdot10^{-3}$ и $4\cdot10^{-4}$% в пробах объемом 25 и 50 мл относительные погрешности равнялись соответственно 2 и 5%. Время анализа на одну пробу при тщательной подготовке составляло 30 мин.

При измерениях на установках ГеоХИ АН СССР и ВНИИЯГГ получены погрешности определения дейтерия 1,5—2,5 и 2—3%.

Результаты анализа дейтерия в водах различных источников рассматриваются в работе [26.5].

Присутствие в пробах воды элементов, сильно поглощающих тепловые нейтроны (бора, кадмия, хлора и др.), приводит к искажению

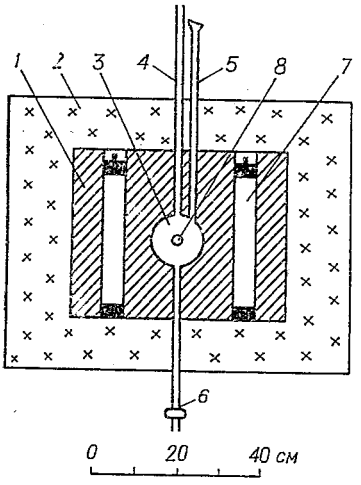


Рис. 26-9. Схема облегченного дейтериометра ГеоХИ АН СССР.

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.

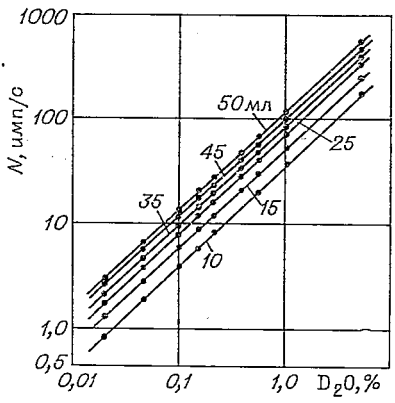


Рис. 26-10. Зависимости скорости счета нейтронов от содержания в пробе тяжелой воды D_2O (об. %) для 1 Ки источника натрий-24. Шифр кривых отвечает емкости контейнера с пробой.

показаний ГНМ. Так, в частности в статье [26.2], показано, что погрешность в 1% при определении тяжелой воды в пробе может быть обусловлена концентрацией в ней 0,24% хлора, или соответственно $3 \cdot 10^{-3}$% бора, или $1{,}1 \cdot 10^{-2}$% кадмия. Для исключения этих погрешностей анализ проб дейтерия следует вести по какой-либо из методик, аналогичных применяющимся для анализа в пробах бериллия.

§ 3. Полевые переносные бериллометры и их применение

Первый переносной полевой бериллометр создан в 1958 г. Г. М. Браунеллом в Канаде [26.4, 26.25, 26,36. 26.40]. В основу работы прибора положен сцинтилляционный способ детектирования фотонейтронов. В 1959 г. аналогичные приборы на пропорциональных борных счетчиках были созданы в СССР и Англии. В СССР этим занимались И. П. Кошелев, О. В. Шишакин и др. (КазИМС) [20.19, 26.37], А. К. Сенько (ВИРГ) [6.46, 26.6], а в Англии Г. Бизби [26.36]. Первый бериллометр на сцинтилляционных счетчиках в СССР в 1960 г. был создан Э. В. Егоровым (ВИРГ) [26.10]. Основы теории ГНМ применительно к рассматриваемым условиям приводятся в [16.66].

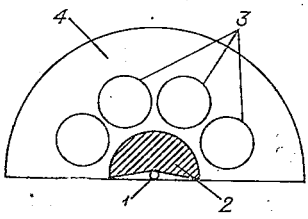


Рис. 26-11. Схема датчика переносного полевого бериллометра.

1 — источник гамма-излучения, *2* — свинцовый экран, *3* — пропорциональные нейтронные счетчики, *4* — замедлитель (парафин и т. д.).

Схематическое устройство бериллометра на пропорциональных нейтронных счетчиках показано на рис. 26-11. Источник гамма-лучей в приборе помещается в центре свинцовой полусферы радиусом около 4 см. Сверху над этим экраном может располагаться от двух [20.19, 26.37] до четырех [15.24, 26.6, 26.36] и шести [6.17] счетчиков. В качестве замедлителя нейтронов чаще всего используется парафин. Для получения максимальных скоростей счета слой парафина в работе [26.37] рекомендуется выбирать равным 6,5—7 см. Однако с целью снижения влияния изменений

влажности горных пород лучше применять слой парафина толщиной 3—3,5 см [26.37]. Г. Бизби [26.37] вместо парафина в своем приборе использовал трансформаторное масло. Активность источника в бериллометрах на пропорциональных нейтронных счетчиках выбирают в пределах 10—15 мКи (см. приложение 4).

Л. Левборгом и др. [10.28] создан прибор весом 20 кг с двумя пропорциональными счетчиками длиной 30 см, заполненными гелием-3. Источники сурьма-124 (31 ампула общей активностью 20 мКи) размещаются между счетчиками вдоль всей длины на образующей свинцового цилиндра. В нерабочем положении этот цилиндр поворотом на 180° возвращается в центр свинцовой защиты.

Устройство сцинтилляционного бериллометра Г. М. Браунелла показано на рис. 26-12, *а*. Источник гамма-квантов в этом приборе также устанавливается снизу свинцового экрана. Фотоумножитель с люминофором диаметром 127 мм находится в замедлителе из парафина.

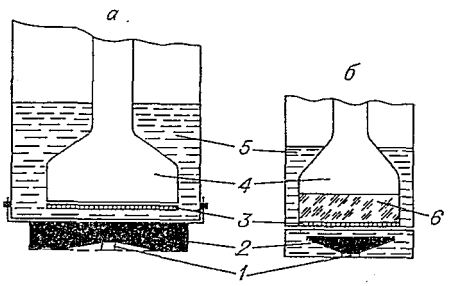


Рис. 26-12. Схема датчика бериллометра Г. М. Браунелла (*а*) и А. Л. Якубовича и др. (*б*).

1 — источник гамма-квантов, *2* — свинцовый экран, *3* — люминофор, *4* — ФЭУ, *5* — парафиновый замедлитель, *6* — светопровод.

Аналогичный бериллометр («Берилл-2») создан А. Л. Якубовичем на основе ФЭУ-49. В этом приборе (см. рис. 26-12, *б*) между свинцовым блоком и люминофором располагается слой парафина толщиной 1,5 см, между люминофором и фотокатодом ФЭУ — светопровод из оргстекла толщиной ~4 см, который одновременно выполняет роль замедлителя нейтронов. Слой замедлителя с боков ФЭУ в некоторых таких приборах отсутствует.

При перевозке или переноске бериллометров к месту исследуемых объектов источник излучения вместе со свинцовым блоком располагается в специальных контейнерах. В приборе Г. М. Браунелла свинцовый экран с источником сделан съемным. Прибор крепится к нему лишь перед началом исследований.

В связи с тем, что в полевых бериллометрах используются источники активностью порядка 10—50 мКи, переноска приборов обычно осуществляется с помощью различных дистанционных устройств (шестов, штанг и т .д.). Так, прибор Г. М. Браунелла переносился с помощью штанги длиной 2,4 м.

ОКБ МГ СССР совместно с ВИРГом разработал портативный бериллометр («Берилл-3»), доставляемый к месту работ на одноосной тележке (рис. 26-13 и рис. 26-14) [6.17, 26.50]. Толщина полусферического свинцового экрана 3 см. Плексигласовый вкладыш в нижней части имеет диаметр 12 см и одновременно выполняет роль замедлителя и светопровода. Люминесцирующее вещество (светосостав Т-1 или Т-2) располагается снаружи плексигласового вкладыша — вблизи корпуса датчика. Для измерения концентраций 0,005% бериллия в течение 3 мин достаточно использовать источник активностью 5 мКи. Датчик переносится с помощью ручки длиной 1,2 м одним оператором, который за 6-часовой рабочий день может получить дозу в 2 раза меньше допустимой. Источник заряжается дистанционным устройством. Для про-

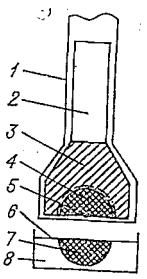


Рис. 26-13. Схема датчика портативного бериллометра.

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.

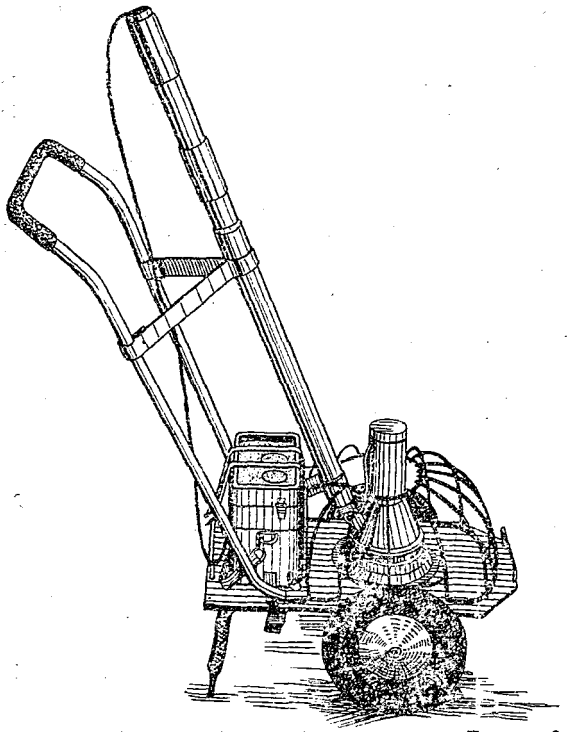


Рис. 26-14. Общий вид бериллометра «Берилл-3».

верки работы бериллометра в его комплекте имеется эталонировочное приспособление из бериллиевой бронзы (см. рис. 26-13), которое размещается на тележке вместе с экраном, содержащим свинцовую полусферу — плексигласовый или парафиновый замедлитель. (По этому вопросу см. также [29.8]).

В. В. Шестаковым (ИГ УФ АН СССР) [16.62] на основе ФЭУ-14 создан датчик бериллометра весом 1,7 кг с источником 15 мКи. С целью безопасности работ датчик смонтирован на конце штанги длиной 2 м.

Для измерений бериллометры устанавливаются на породу. О содержании бериллия в породе судят по щелчкам телефонного индикатора, который вместе с пультом оператор носит с собой. Если индикатором фиксируется повышенный треск, то количественные содержания бериллия в породах определяют по ЭМСу. Для измерения низких концентраций бериллия ($(1—7)\cdot10^{-3}\%$) требуется от 3 до 15 мин в зависимости от активности источника и типа применяемого бериллометра. Более высокие концентрации можно замерить в течение 1—3 мин. Перед началом измерений прибор градуируется на породах с известным содержанием бериллия. Градуировочные кривые имеют линейный характер (рис. 26-15 [6.17]).

При использовании эталонировочных устройств типа, показанного на рис. 26-13, можно обходиться без градуировочных графиков. Для этого необходимо определить один раз, какой фиктивной концентрации бериллия соответствует замер на эталонировочном устройстве за вычетом фона прибора. Изменение вещественного состава руд приводит к изменению углового коэффициента графика. Поэтому на каждом новом месторождении необходимо оценивать величину пересчетного коэффициента хотя бы для одной концентрации бериллия и в соответствии с ней вводить поправку в замер на фиктивном эталоне.

Присутствие в руде бора и лития искажает результаты определения в ней бериллия. Так, при работе с прибором, оборудованным двумя пропорциональными борными счетчиками, окруженными слоем парафина в 15 мм, увеличение в породе бора от 0 до 1,5% приводит к изменению скорости счета на 13%. Дальнейшее повышение содержания бора в породе не увеличивает эту ошибку [22.102]. Изменение влажности пород от 0 до 20% не влияет на регистрируемую скорость счета для указанной конструкции прибора.

Изменение плотности руды от 2,4 до 3 г/см^3 приводит к искажению показаний бериллометра всего лишь на 4—7% [26.37].

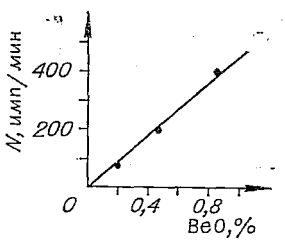


Рис. 26-15. Эталонировочный график бериллометра ВИРГа (А. В. Горев и др.).

Глубинность исследования горных пород для бериллометра с двумя пропорциональными счетчиками О. В. Шишакиным [26.37] оценена следующей: $h_{0,9} = 25$ г/см^3, $h_{1,0} = 55$ г/см^2. Для породы плотностью 2,7 г/см^3 при этом соответственно получают величины 9,3 и 20 см. Для сцинтилляционных бериллометров глубинность равняется порядка 12 г/см^2, т. е. для породы плотностью 27 г/см^3 — около 4 см. Радиус исследуемой поверхности для приборов со сцинтилляционными счетчиками составляет $r+$ +2,5 см (r — радиус рабочей поверхности прибора). Это справедливо для исследования пород плотностью 2,7 г/см^3. С уменьшением плотности породы радиус зоны несколько увеличивается, и наоборот.

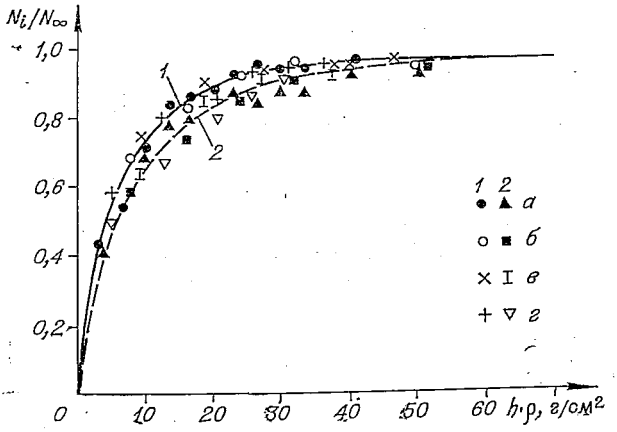


Рис. 26-16. Зависимость амплитуды аномалии в относительных единицах от мощности залежи (пласта) в массовых единицах при расположении прибора счетчиками поперек (*1*) и вдоль пласта (*2*) для сред плотностью (г/см^3): *а* — 1,66; *б* — 2,00; *в* — 2,33 и *г* — 2,60.

Если ширина рудной жилы или диаметр гнезда меньше удвоенной величины этой зоны, прибор дает заниженные концентрации бериллия в породах. Характер зависимости величины аномалии от мощности залежи (пласта) для прибора с двумя пропорциональными счетчиками показан на рис. 26-16 [26.37]. Вид этих кривых зависит от того, как расположены счетчики по отношению к простиранию залежи. Для сцинтилляционных бериллометров, симметричных относительно своей оси, получается одна кривая.

Для определения бериллия в тонких жилах необходимо пользоваться зависимостью вида (рис. 12-4).

Каждый бериллометр имеет определенный фон, который следует учитывать и исключать из результатов измерений.

По результатам определения бериллия в породах строятся профили (рис. 26-17 [6.17]) или карты изолиний для различных концентраций бериллия [16.66]. Из рис. 26-17 видно, что обе кривые по форме идентичны. Вопросы опробования на бериллий подробно рассматриваются в работе [26.8].

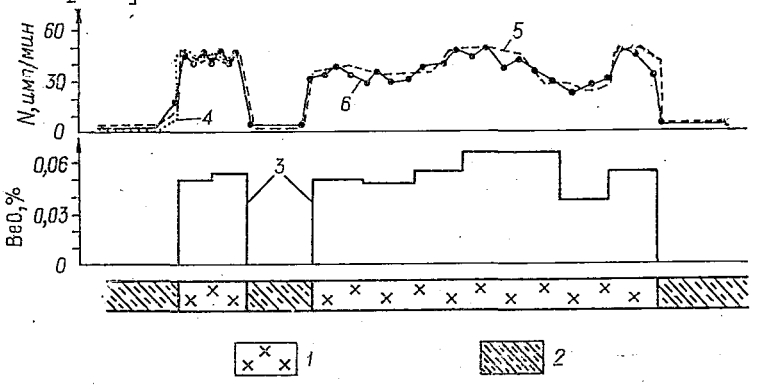


Рис. 26-17. Сопоставление бороздового и гамма-нейтронного опробования.

1 — пегматиты с бериллиевым оруденением, *2* — сланцы, *3* — график содержания окиси бериллия по данным бороздового опробования, *4*, *5* и *6* — графики ГНМ с шагом соответственно 1,0; 0,5 и 0,25 м.

Для обследования стенок горных выработок и отбитой массы используют приборы типа «Берилл-2» и «Берилл-3» с источниками 5—7 мКи [26.13]. Результаты гамма-нейтронного и бороздового опробования коренных выходов обычно согласуются с относительной точностью 5—20% [6.17]. При опробовании отбитой массы получаются более высокие погрешности (до 50%).

Для опробования отбитой массы руды, как показано в работе [26.37], источник выгодно вдавливать в изучаемую среду на 2—3 см, что позволяет на 40—45% повышать скорость счета. Поэтому у приставных приборов, предназначенных для исследования отбитой массы руды, источник целесообразно помещать в специальном штыре, чтобы он мог погружаться на указанную выше глубину.

Неровности изучаемой поверхности значительно искажают показания приставных бериллометров. Углубления при этом сказываются в наибольшей степени, если они размещаются против местоположения источника в приборе [26.37]. Наличие воздушного зазора между прибором и породой также сильно искажает показания бериллометров. Так, воздушная прослойка величиной 5 см над телом, безграничным по простиранию, приводит к уменьшению регистрируемой скорости счета в 3 раза, а над серединой жилы мощностью 4 см — в 5 раз. Наличие слоя наносов с массовой толщиной 4 г/см^2 над рудной залежью снижает регистрируемую скорость счета также в 5 раз [26.37].

Для определения кларковых концентраций бериллия в пробах создан прибор с шестью пропорциональными борными счетчиками и источником активностью 100 мКи [6.17]. Прибор переносится на 3-метровом шесте. Для измерения на одной точке затрачивается 2 мин. С целью уменьшения космического нейтронного фона датчик снаружи покрыт слоем кадмия. Создан прибор под маркой «Берилл-4» со сцинтилляционным счетчиком и источником активности 30 мКи. Порог чувствительности для него равен $5 \cdot 10^{-4}$%. Применение таких приборов для определения бериллия позволяет полностью отказаться от методики геохимического опробования на этот элемент. Однако использование в приборах этого типа источников высокой активности связано с большими трудностями по соблюдению правил техники безопасности.

§ 4. Автомобильный метод определения бериллия в породах

Возможность реализации автомобильного метода поисков бериллия показана в работе [16.31]. В ней применительно к этому случаю выведена следующая формула для расчета скорости счета фотонейтронов:

$$N = \varepsilon \cdot \omega \cdot Q\alpha_F \Sigma/(\mu_\gamma + \mu_n), \qquad (26\text{-}4)$$

где ε — эффективность детектора нейтронов; ω — телесный угол, под которым видна облучаемая площадка; Q — активность источника; α_F — геометрический коэффициент, учитывающий долю потока нейтронов, идущих по направлению к детектору; Σ — массовое макроскопическое сечение на бериллии; μ_γ и μ_n — соответственно массовые коэффициенты ослабления гамма-квантов и промежуточных нейтронов в породе.

Автомобильный метод поисков бериллия реализован сотрудниками ВИРГа (А. В. Горевым, А. Д. Суворовым и др.). Датчик в этом приборе располагается на прицепе к автомашине. Источником гамма-квантов служит изотоп сурьма-124 активностью 0,35—0,5 Ки [26.7]. Фотонейтроны регистрируются с помощью кассеты из 46 пропорциональных борных счетчиков СНМО-5 [16.63]. Датчик наиболее выгодно размещать на полозьях. Источник при этом располагается в полусферическом экране, а вокруг него находятся счетчики с замедлителем.

Принимая активность источника $Q=0{,}5$, Ки$=0{,}5\cdot 0{,}565\cdot 3{,}7\cdot 10^{10}=$ $=1{,}05\cdot 10^{10}$ гамма-квантов/с, а эффективность счетчиков 10% ($\varepsilon=0{,}1$), для такой установки можно рассчитать скорость счета фотонейтронов. Величину телесного угла для нее можно принять равной $2\pi(\omega=1/2)$, такой же величине примерно равен и коэффициент α_F (0,5). Величина массового макроскопического сечения реакции (γ, n) для кларковых концентраций бериллия в породе $5\cdot 10^{-4}$% будет равна $3{,}35\cdot 10^{-10}$. Массовый коэффициент ослабления гамма-лучей в силикатной породе μ_γ составляет 0,045 см^2/г, аналогичный коэффициент для ослабления промежуточных нейтронов μ_n — 0,085 см^2/г.

Подставив указанные значения в формулу (26-4), получим:

$$N=\frac{0{,}1\cdot 0{,}5\cdot 1{,}05\cdot 10^{10}\cdot 0{,}5\cdot 3{,}35\cdot 10^{-10}}{0{,}045+0{,}085}=0{,}68 \text{ имп/с, или } 40 \text{ имп/мин.}$$

На основе экспериментальных исследований [26.7] установлено, что 1% бериллия в породе соответствует скорость счета $6\cdot 10^4$ имп/мин. Для величины $p_{Be}=5\cdot 10^{-4}$% имеем скорость счета $N=30$ имп/мин, т. е. скорость, вполне сопоставимую с расчетной, хотя та является сугубо приближенной, так как не учитывается замедление нейтронов в породе и т. д.

Для защиты детекторов от космических нейтронов замедлитель сверху необходимо окружать кадмиевым экраном.

С помощью автомобильного бериллометра при точечных измерениях можно определять кларковые содержания бериллия в породах, а при скорости движения автомобиля 5—6 км/ч — содержание бериллия в породах начиная с концентраций 0,003 и выше. По результатам этих исследований строятся профили и карты изолиний.

В автомобильном бериллометре используется источник высокой активности. Но из-за того, что он размещается в свинцовом экране на прицепе, определять бериллий можно с полным соблюдением правил по технике безопасности.

§ 5. Определения бериллия по разрезам скважин

Метод определения бериллия по разрезам скважин — гамма-нейтронный каротаж (ГНК) — предложен в 1958 г. и в последующем реализован И. П. Кошелевым, О. В. Шишакиным и др. (КазИМС) [26.17]. Независимо от этих авторов исследованиями на моделях по ГНК занимались А. К. Сенько и др. (ВИРГ) [26.29]. К настоящему времени по этому вопросу имеется много публикаций [1.14, 1.27, 6.17, 6.44, 6.46, 16.62, 19.128, 20.19, 20.34, 20.55, 22.102, 26.14, 26.15, 26.18, 26.19, 26.23, 26.37, 26.39].

Исследование пространственно-энергетического распределения потока нейтронов в горных пробах, пересеченных скважиной, является сложной математической задачей. Поэтому к настоящему времени выведены лишь отдельные приближенные соотношения [1.27, 26.35, 26.6, 26.37, 16.66].

1. **Устройство приборов.** Для измерения потоков нейтронов в скважинах создана аппаратура на пропорциональных борных счетчиках (И. П. Кошелев, О. В. Шишакин и др.) и сцинтилляционных (А. К. Сенько и др.).

И. П. Кошелевым, О. В. Шишакиным и др. на основе стандартных радиометров АСГ-26, КРТ и КРЛМ сконструированы глубинные приборы со счетчиками СНМО-5 диаметрами 57—64 мм с одним и двумя детекторами (расположенными симметрично относительно источника) и диаметром 89 мм с тремя детекторами, находящимися сверху источника. Между источником и детекторами располагается слой свинца

толщиной 1,5—3,5 см. Размер зонда меняется в пределах 18—23 см. Для исследования сухих скважин детектор окружается слоем парафина в 5—10 мм. Фон счетчика оценивается равным 0,7—1,5 имп/мин. При толщине слоя воды и парафина 4 см порог чувствительности для прибора с одним счетчиком составляет 5—6 имп/мин·мКи·%BeO. Для оценки концентраций, интересных с промышленной точки зрения, активность источника рекомендуется выбирать равной 250 мКи/n (n — число счетчиков СНМО-5 в приборе при зонде l=18 см). Радиосхемы перечисленных выше приборов приспособлены для исследований с указанными счетчиками [26.17, 26.18, 26.37]. В двух последних работах подробно описывается устройство глубинных приборов ГНК.

А. К. Сенько и В. Б. Сальцевичем [6.44, 6.46, 20.34] для исследования скважин ГНК создан прибор диаметром 72 мм со сцинтилляционным счетчиком (ФЭУ-29 и люминофор ГОИ — алюминиевый стакан диаметром 40 мм и высотой 50 мм с покрытием внутренних стенок светосоставом Т-2). Эффективность регистрации тепловых нейтронов для этого детектора оценивалась равной около 10%. Активность источника составляла 100—40 мКи. Размер зонда выбирался равным 9 см, толщина свинцового экрана — 4 см. Импульсы от гамма-излучения подавлялись с помощью дискриминатора.

В дальнейшем в ВИРГе [26.15] была создана также аппаратура со сцинтилляционными счетчиками на основе ФЭУ-13. Сравнительные характеристики этого прибора и прибора на пропорциональных счетчиках приведены в табл. 26-2 [26.15]. Длина детектора ГОИ в этом приборе равняется 60—70 мм, оптимальная толщина свинцового экрана — 50—80 мм, а оптимальный размер зонда — 10—12 см.

Аппаратура на сцинтилляционных счетчиках имеет целый ряд преимуществ по сравнению с аппаратурой на пропорциональных счетчиках.

Таблица 26-2

Сравнительные параметры приборов на пропорциональных и сцинтилляционных счетчиках

Параметр	Счетчик	
	пропорциональный	сцинтилляционный
Тип счетчика	СНМО-5 (один)	ФЭУ-13 и люминофор ГОИ с Т-2
Рабочий размер зонда, см	18—20	12
Рабочая активность источника, мКи	300—150	100—40
Чувствительность, имп/мин·100 мКи·0,01% BeO (для заполненной водой скважины диаметром 125 мм)	5	20—25
Натуральный фон прибора, имп/мин	Менее 1	1—2
Характер регистрации	Непрерывная и	точечная
Тип регистрации	СК-100	Фоторегистратор типа ФР-5, ПАСК
Оптимальная скорость подъема прибора, м/ч		
при поисковом каротаже	100	250+300
при детализационном каротаже	20	25—30
Применяемый кабель	Трехжильный типа КТО, КТШ	Одножильный типа КОБД-6
Порог чувствительности для пластов мощностью не менее 1 м, % бериллия		
при поисках	0,025	0,005
при детализации	0,005	0,001
при точечных измерениях	0,0025	0,0005

В связи с этим ВИРГом совместно с ОКБ ГП МГ УССР разработана аппаратура на сцинтилляционных счетчиках типа ГНК-1 диаметром 60 (с ФЭУ-13) и 48 мм для исследования скважин соответственно колонкового и алмазного бурения [26.7]. Выпуск аппаратуры освоен на Уфимском заводе геофизического приборостроения. В дальнейшем создана аналогичная аппаратура диаметром 38 мм (ГНК-2А).

В. В. Шестаковым [20.55] для исследования буровзрывных скважин сконструирован специальный сцинтилляционный прибор с выносным зондовым устройством, показанным на рис. 26-18. Судя по данному рисунку, его диаметр равен 172 мм. Источник активностью 20 мКи размещен в вершине конусообразного экрана. Люминофор имеет большие размеры и создан на основе светосостава Т-2. Размер зонда примерно равен 10 см. По принципу устройства датчик этого прибора близок к датчикам приставных бериллометров.

Для градуировки приборов ГНК создают специальные цилиндрические эталонировочные устройства, заполненные бериллиевой рудой. Однако весьма удобным, по нашему мнению, является создание эталонировочных устройств, аналогичных применяемым в ННК (см. п. 4 § 2 гл. 22). Корпус этого устройства можно сделать из жести. В центре его (между внутренним и внешним цилиндрами) установить цилиндр из бериллиевой бронзы и залить парафином. Между внутренним цилиндром и глубинным прибором, как и в случае ННК, необходимо сделать некоторый зазор. Внешний и внутренний цилиндры в таких эталонировочных устройствах в принципе можно также делать из бериллиевой бронзы. Для получения различных скоростей счета внутрь эталонировочного устройства (в зазор между глубинным прибором и внутренним цилиндром) можно вдвигать на различные расстояния дополнительный цилиндр из бериллиевой бронзы.

В связи с тем, что в приборах ГНК применяются источники гамма-лучей достаточно высокой активности, хвостовая часть прибора вместе с источником располагается в специальном контейнере и сочленяется с глубинным прибором непосредственно у устья скважины. Контейнер перевозится на прицепе. Перед началом каротирования скважины его устанавливают над ее устьем, глубинный прибор сочленяют с хвостовой частью и прямо через контейнер погружают в скважину. Таким образом, удается полностью соблюдать правила техники радиационной безопасности.

2. **Влияние параметров рудных тел и скважины на результаты измерений.** Характер кривых, регистрируемых в скважине, зависит как от параметров рудных тел, так и от параметров скважины и приборов. Ниже рассмотрим влияние этих факторов на результаты ГНК.

Исследование областей выхода фотонейтронов из породы. В. В. Шестаковым [20.55] для решения этой задачи создана модель из блока породы размерами 1,5×1,5×1,2 м и плотностью 2,7 г/см³. В центре блока сделана скважина диаметром 190 мм. Сбоку перпендикулярно к оси скважины пробурен шпур, в который помещается бериллиевый цилиндр диаметром и высотой 40 мм. Его устанавливают на различном расстоянии от стенки скважины с интервалом 2 см. Глубинный прибор при этих исследованиях передвигается снизу вверх с интервалом через 5 см. Результаты измерений показаны на рис. 26-18. Скорости счета выражены в единицах $N\frac{r_i}{r_1}$, где $r_1=12$ см (наименьший радиус кольца), $r_i=14$; 16; 18... см (последующие радиусы колец). За счет параметров прибора и скважины происходит значительное отклонение изолиний от сферической симметрии. Деформация кривых в верхней части связана с экранирующим действием свинцового конуса. Вытянутость изолиний в нижней части обусловлена отсутствием поглотителей

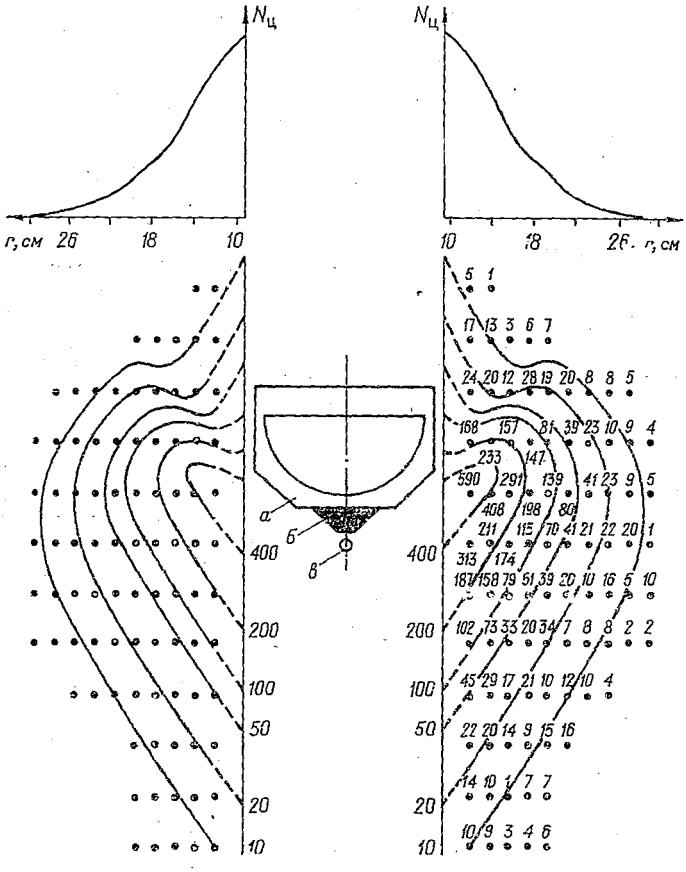


Рис. 26-18. Распределение в сухой скважине потока фотонейтронов, выходящих из породы.

а — детектор нейтронов, *б* — свинцовый экран, *в* — сурьмяный источник гамма-квантов активностью 20 мКи; точки с цифрами — положение бериллиевого цилиндра в породе относительно датчика; шифр изолиний скорости счета (имп/мин); $N_ц$ — суммарная скорость счета от цилиндрических слоев равной толщины.

в стволе скважины. Аналогичные исследования рассматриваются в работе [26.23].

Глубинность исследований. А. К. Сенько и В. Б. Сальцевичем [6.44] для прибора диаметром 72 мм со сцинтилляционным счетчиком и зонда размером около 9 см глубинность оценена в 17 г/см^2 ($\Delta r_{0,9}$) и в 5 г/см^2 ($\Delta r_{0,5}$). В работе [26.23] глубинность ГНК равна 25 г/см^2. (По этому вопросу см. также [16.86].)

Для прибора, показанного на рис. 26-18, глубинность ГНК В. В. Шестаковым путем суммирования значений $N_ц$ по Z оценена для $\Delta r_{0,9}$ в 10 см (27 г/см^2), а для $\Delta r_{0,5}$ — в 4,2 см (11,35 г/см^2). Указанные значения вполне согласуются со значениями глубинности, полученными О. В. Шишакиным для плоской поверхности породы (см. § 3 этой главы).

По данным рис. 26-18 можно определить также объем и вес исследуемой породы. Вес в работе [20.55] составляет 80 кг на 1 пог. м, отсюда объем равен $8 \cdot 10^4$ г/2,7 г/см$^{-3} = 3 \cdot 10^4$ см^3.

Влияние мощности рудных тел. Для приборов с двумя счетчиками, размещенными симметрично с двух сторон источника, против пластов конечной мощности наблюдаются симметричные аномальные кривые относительно центров пластов (рис. 26-19, *а*) [26.37]. Для

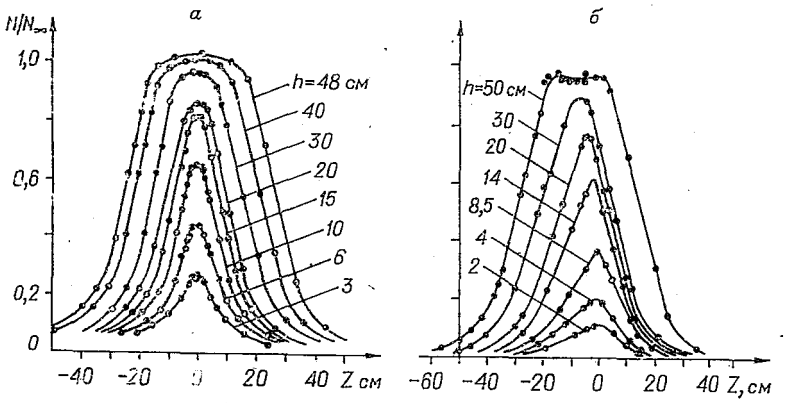


Рис. 26-19. Аномальные кривые над пластами различной мощности при измерениях с пропорциональными счетчиками: *а* — для симметричного зонда с двумя детекторами, расположенными по разные стороны от источника (измерения велись в сухой скважине диаметром 89 мм при насыпной плотности руды 1,8 г/см³); *б* — для асимметричного зонда с одним детектором при измерениях на зонде 33 см в заполненной водой скважине диаметром 108 мм; насыпная плотность руды 1,7 г/см³.

прибора с одним счетчиком получаются асимметричные кривые (см. рис. 26-19, *б*) с пологим подъемом и крутым спадом (при движении прибора вдоль пласта детектором вперед). Аналогичные кривые для прибора со сцинтилляционным счетчиком, построенные по данным рис. 26-18 путем суммирования скоростей счета по радиусу модели, показаны на рис. 26-20 [20.55].

Для больших мощностей пластов наблюдается пологий подъем и крутой спад, а для малых — наоборот, крутой подъем и пологий спад, что обусловливается, по-видимому, конструкцией датчика.

Из графиков рис. 26-19 видно, что нижний контакт рудного тела с вмещающей породой начинает чувствоваться еще до подхода к нему верхнего конца счетчика. Спад кривой также начинается при подходе ко второму контакту верхнего конца счетчика. Величина максимальной скорости счета тепловых нейтронов (N_{max}) возрастает с увеличением мощности пласта. Наибольшая величина скорости счета тепловых нейтронов ($N_{нас}$) отвечает мощности пласта, бо́льшей или равной размеру зонда, точнее, расстоянию от источника до верхнего конца счетчика (l_{max}). Для мощности пластов меньше размера зонда величина $N_{max} < N_{нас}$ (рис. 26-21) [26.17]. Отношение $N_{max}/N_{нас}$ становится равным единице при $h = l_{max}$. Для других параметров приборов и скважины характер

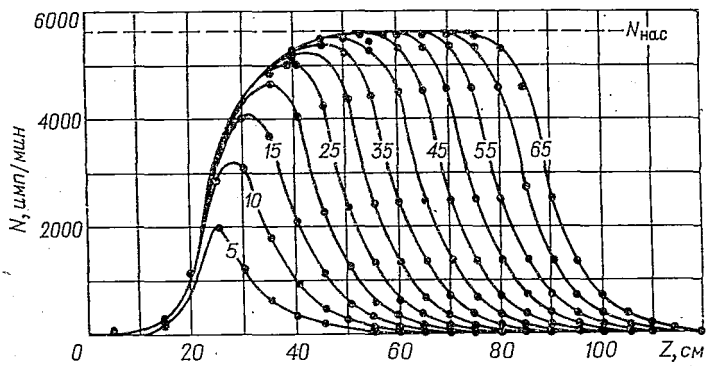


Рис. 26-20. Аномальные кривые, полученные при измерениях в сухой скважине со сцинтилляционным счетчиком. Шифр кривых — размер зонда, см.

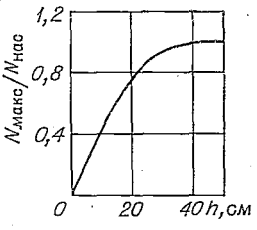


Рис. 26-21. Зависимость скорости счета тепловых нейтронов (в относительных единицах) от мощности рудного тела для зонда размером 33 см.

этой кривой несколько меняется. Изменение плотности пород также несколько влияет на ход этой кривой [26.37].

Для датчика конструкции В. В. Шестакова насыщение наблюдается для пласта мощностью 45 см, т. е. примерно в 2 раза большей размера зонда. Это также зависит исключительно от конструкции примененного датчика.

В результате исследований [26.17] установлено, что площадь S, ограниченная кривой ГНК и осью абсцисс, с величиной $N_{нас}$ через мощность пласта h, как и при ГК (см. гл. 12), связана соотношением

$$\frac{S}{h} = N_{нас}. \qquad (26\text{-}5)$$

С другой стороны, указанные величины, как и при ГК, зависят от содержания в руде бериллия p:

$$p = kN_{нас} = k\frac{S}{h}, \qquad (26\text{-}6)$$

где k — коэффициент пропорциональности, обусловленный параметрами глубинного прибора (активность источника гамма-квантов, тип счетчика, вид экрана, размеры зонда и т. д.), скважины (диаметр, обсадка и заполнение) и горных пород (плотность, содержание влаги и элементов, сильно поглощающих тепловые нейтроны). Этот коэффициент обычно определяется при градуировке прибора на опорных скважинах. О плотности пород в скважине можно судить по методу ГГК-п (см. гл. 19), а об их водородсодержании и присутствии элементов с большими сечениями поглощения нейтронов — по методу ННК (см. гл. 22 и 23).

По поводу влияния изменений влажности горных пород на результаты ГНК можно заметить, что увеличение влаги от 0 до 30% приводит к уменьшению скорости счета на 60% [22.102, 26.37] при измерениях с прибором на пропорциональных нейтронных счетчиках. Увеличение же содержания в породе бора от 0 до 1,5% уменьшает скорость счета на 42%. Дальнейшее увеличение в породе бора не делает меньшими показания ГНК. (Эти вопросы подробно рассматриваются в работе [26.23]). О влиянии изменений плотности руд на результаты ГНК будет сказано ниже.

Для рудных тел мощностью свыше размера зонда величину $N_{нас}$ можно определять непосредственно по кривой ГНК, а затем с помощью формулы (26-5) оценивать мощность рудного тела. Для рудных тел мощностью меньше размера зонда при определении величины $N_{нас}$ необходимо знать мощность рудного тела. Для определения последней авторы [26.17] и другие предлагают пользоваться соотношением

$$h_ф = f(h) = \frac{S}{N_{max}}, \qquad (26\text{-}7)$$

$h_ф$ — фиктивная мощность пласта.

Зависимость этой функции от истинной мощности пласта показана на рис. 26-22. Строя такие кривые для каждого размера зонда, можно по ним оценивать мощность рудного тела, а следовательно, и содержание в руде бериллия. Однако рассмотренный способ в основном годится для определения не слишком малых мощностей пластов (не менее 10—15 см). Малые пласты выявляются с большой ошибкой, поэтому в работе [26.14] источник рекомендуется коллимировать. Кривые $h_ф = f(h)$ на рис. 26-22 приближаются к пунктирной, что свидетельствует о воз-

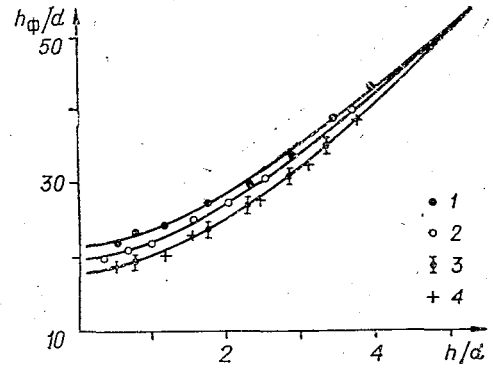


Рис. 26-22. Взаимосвязь фиктивной и истинной мощности рудного тела для зонда размером 33 см. Шифр точек — плотность руды (г/см³): *1* — 1,5; *2* — 2,2; *3* и *4* — 2,45.

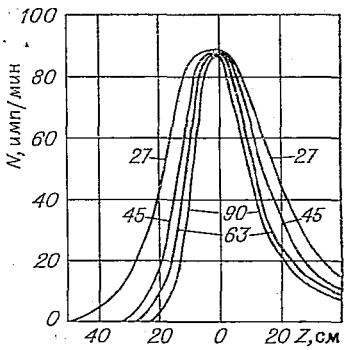


Рис. 26-23. Аномальные кривые ГНК над рудным телом мощностью 5 см в скважине диаметром 11 см при разных углах встречи тела со скважиной. Шифр кривых — углы встречи пласта со скважиной, град.

можности определения маломощных пластов с более высокой точностью. Так, при коллимации пучка гамма-квантов в плоскости нормальной оси прибора, ширине коллиматора 3,5 мм, положении края ампулы источника на расстоянии 20 мм от края коллиматора и измерениях на зонде 12 см в скважине диаметром 90 мм можно уверенно отбивать пласты при $h \geqslant 2$ см.

При записи кривых ГНК в движении, как и в случаях с другими видами ядерного каротажа, аномальные кривые смещаются в сторону движения прибора. По известной скорости перемещения прибора и его постоянной времени всегда можно произвести обратный перерасчет кривых, воспользовавшись, например, формулой (7-20) или соответствующими графиками.

Влияние различных углов наклона рудного тела. При исследовании скважин методом ГНК часто приходится иметь дело с рудными телами, залегающими не горизонтально, а под некоторым углом к оси скважины. Авторами [26.17] проведены исследования на модели пласта, результаты которых показаны на рис. 26-23. Чем меньше угол встречи пласта со скважиной, тем больше площадь S, заключенная между кривой ГНК и осью абсцисс. Величина же максимума кривых N_{max} не зависит от угла встречи пласта.

В. В. Шестаковым [20.55] в результате исследований на описанной выше модели пласта получены данные, отраженные на рис. 26.24. При малых углах встречи кривые сильно выполаживаются, а для пла-

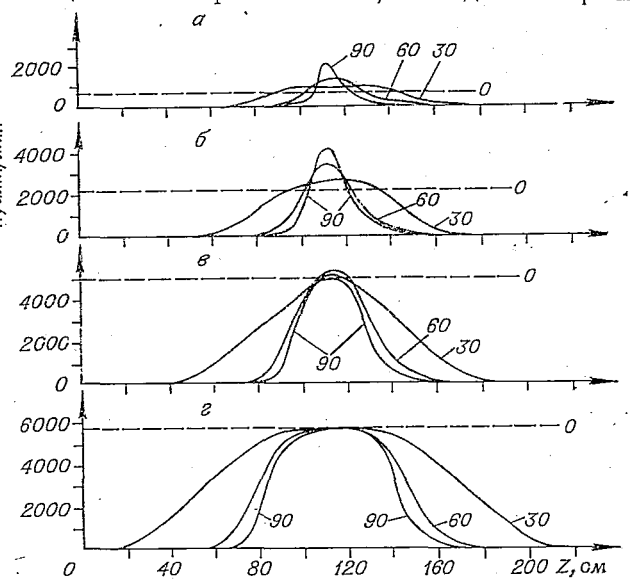


Рис. 26-24. Аномальные кривые над наклонно залегающими пластами различной мощности:

а — 5 см, *б* — 15, *в* — 30, *г* — 60 см. Шифр кривых — углы встречи пласта со скважиной диаметром 19 см.

ста малой мощности (5 см) при $\varphi=30°$ против центра пласта наблюдается даже небольшой минимум. Данный характер кривых связан исключительно с наличием большого диаметра скважины. В частности, такой минимум на аномальной кривой получался и по данным расчетов для линейной залежи [1.27, 26.35].

Скорость в максимуме аномальных кривых также зависит от угла наклона пластов (рис. 26-25) [20.55]. С возрастанием угла встречи аномальные кривые насыщаются быстрее.

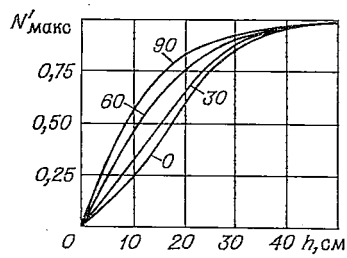


Рис. 26-25. Зависимость максимальной скорости счета в относительных единицах от мощности пласта для различных углов встречи со скважиной. Шифр кривых — углы встречи, град.

В ходе исследований установлено, что истинная мощность пласта $h_{90°}$ (при $h_{90°}>l$) определяется через кажущуюся мощность пласта h_φ таким соотношением [26.17]:

$$h_{90°} = h_\varphi \sin\varphi, \qquad (26\text{-}8)$$

где φ — угол встречи пласта со скважиной.

Аналогичного рода соотношение имеется и для площадей:

$$S_{90°} = S_\varphi \sin\varphi. \qquad (26\text{-}9)$$

Влияние изменений диаметра скважины и ее заполнения. В работе О. В. Шишакина [26.37] показано, что при измерениях на насыпных моделях в сухих скважинах увеличение диаметра от 108 до 250 мм ведет к уменьшению регистрируемой скорости счета тепловых нейтронов на 22% (при измерениях прибором диаметром 89 мм с пропорциональными счетчиками) и на 27% (при измерениях прибором диаметром 57 мм). Расположение приборов в центре или у стенки скважины существенно не сказывается на результатах измерений. Из изложенного видно, что метод ГНК, как и другие ядерные методы, следует комплексировать с кавернометрией.

В. В. Шестаковым [20.55] при измерениях на насыпных моделях с плотностью руды $\rho=1{,}5$ г/см^3 указанным выше прибором в скважинах диаметром от 20 до 40 см установлено, что с изменением радиуса скважины от R_0 до $R_0+\Delta R$ скорость счета меняется по закону

$$N = \frac{a}{(R_0+\Delta R)^2}, \qquad (26\text{-}10)$$

где a — константа.

В соответствии с теорией подобия в средах с другой плотностью (ρ') скорость счета в интервале от R_0' до $R_0'+\Delta R'$ определяется из выражения

$$N = \frac{a}{(R_0'+\Delta R')^2} = \frac{ak_п^2}{(R_0+\Delta R)^2} = Nk_п^2, \qquad (26\text{-}11)$$

где $k_п$ — коэффициент подобия, получаемый с помощью уравнения

$$k_п = \frac{\rho'}{\rho} = \frac{R_0}{R_0'} = \frac{\Delta R}{\Delta R'}. \qquad (26\text{-}12)$$

Пользуясь этим соотношением, по данным измерения на моделях можно оценить интервал изменения диаметра скважины в породах с реальной плотностью. Так, перейдя от среды с плотностью 1,5 г/см^3 к среде с плотностью 2,75 г/см^3, получим зависимость (26-11), которая будет справедлива для интервала изменения диаметра скважины в пределах от 11 до 22 см [20.55] и т. д.

Из соотношений (26-11) и (26-12) можно также оценить и влияние изменений плотности пород на результаты ГНК. Например, в работе [20.55] показано, что изменение плотности пород от 2,2 до 3 г/см³ приводит к изменению скорости счета тепловых нейтронов на 25%.

При бурении скважин на бериллиевых месторождениях стальными трубами обсаживаются обычно лишь верхние части скважин или их устья, не заполненные водой. Обсадка скважин диаметром 150 мм стандартной колонной с толщиной стенок 4,5—5 мм ведет к уменьшению регистрируемой скорости счета на 22—25% [26.37]. Вообще же присутствием трубы в указанной скважине с толщиной стенок от 0 до 10 г/см² обусловлено линейное уменьшение скорости счета от 100 до 42%.

О влиянии заполнения скважины водой можно судить по данным рис. 26-26 [22.102, 26.37]. Увеличение слоя воды вначале ведет к возрастанию скорости счета за счет повышения замедляющих свойств среды.

При слое воды 40 мм наступает максимум скорости счета, а затем она уменьшается из-за ослабления в воде гамма-лучей и нейтронов. Особенно этот эффект проявляется для центрированного прибора. Изменение слоя воды в скважине от 70 до 200 мм практически не искажает показаний прибора, расположенного у стенки. Они меняются всего лишь на ±3% от среднего значения. Изменение слоя воды от 0 до 70 мм очень сильно искажает показания приборов ГНК. Поэтому и при исследовании обсаженных скважин для исключения погрешностей, обусловленных этим явлением, метод ГНК необходимо комплексировать с кавернометрией. (Эти вопросы рассматриваются также в работе [26.23].)

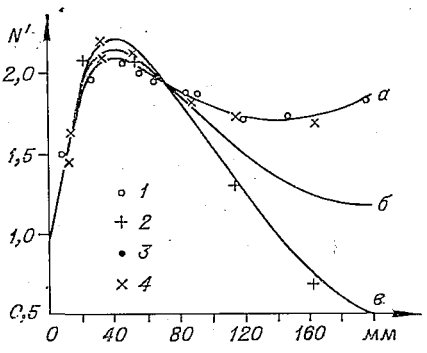


Рис. 26-26. Зависимость отношения скоростей счета во влажной и сухой скважинах от толщины слоя воды при различных положениях прибора в скважине: *а* — прижат к стенке, *б* — на оси скважины, *в* — промежуточный случай; *1* и *3* — приборы диаметром 57 мм; *2* и *4* — 89 мм.

3. **Возможности каротажа.** Применение метода ГНК при исследовании скважин на месторождениях бериллия позволяет выделять в них рудные тела и определять их мощность, углы встречи, а также оценивать содержание в руде искомого элемента, а следовательно, и производить подсчет запасов.

В качестве примера одной из кривых ГНК, полученных при измерениях с пропорциональным счетчиком, может служить рис. 26-27 [26.17], из которого следует, что методом ГНК в разрезе скважины обнаружен ряд бериллиевых рудопроявлений, пропущенных при керновом опробовании, уточнена мощность рудных тел, определены углы их встреч со скважиной и оценено содержание бериллия в руде.

Другие примеры применения приборов ГНК на пропорциональных счетчиках для определения бериллия рассматриваются в работах [19.128, 6.17, 26.17, 26.18, 26.19, 26.37].

Результаты сравнения данных, полученных при измерении со сцинтилляционными и пропорциональными счетчиками, приведены на рис. 26-28 [26.15]. Применение аппаратуры со сцинтилляционными счетчиками более эффективно, чем с пропорциональными. Дифференциация кривых, полученных со сцинтилляционными счетчиками, гораздо выше, чем с пропорциональными. Так, пласт на глубине 282 м вообще не отбивается аппаратурой с пропорциональными счетчиками, но четко фиксируется на кривой, полученной при работе со сцинтилляционными счетчиками.

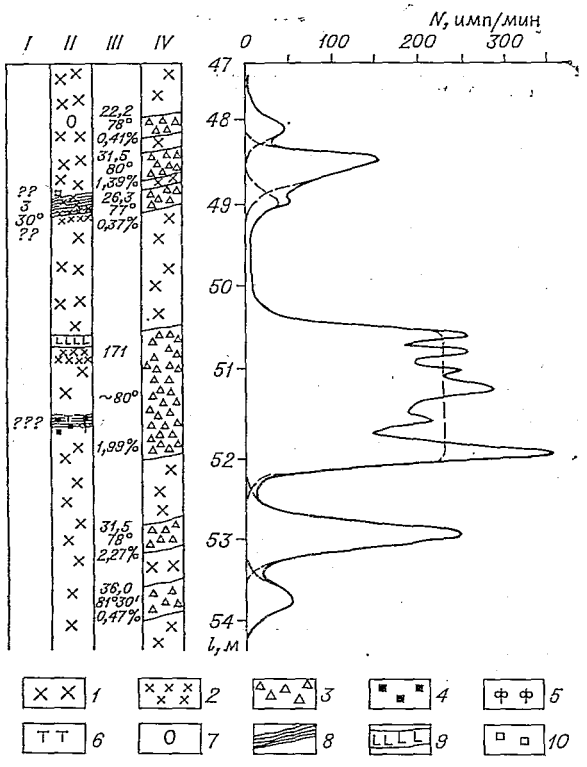


Рис. 26-27. Кривые ГНК в сопоставлении с результатами геологической документации по керну.

I — оценка мощности пласта (см) и угла его наклона по керну; II — колонка, составленная по керну; III — оценка мощности пласта, угла его наклона и концентрации окиси бериллия по ГНК; IV — колонка по ГНК.
1 — среднезернистые граниты, *2* — грейзенизированные граниты, *3* — берилл, *4* — пирит, *5* — флюорит; *6* — топаз, *7* — пегматитовое выделение полевого шпата, *8* — кварцевая или пегматитовая жила, *9* — кварцево-слюдистый грейзен, *10* — слюда.

Сопоставление порогов чувствительности для той и другой аппаратуры приведено в табл. 26-2. Выпускаемая в настоящее время сцинтилляционная аппаратура на сцинтилляционных счетчиках ГНК-1 и ГНК-2А при точечных измерениях позволяет определять бериллий также с кларковых концентраций ($5 \cdot 10^{-4}$%). Бериллиевые прожилки в разрезах скважин можно выявлять, как уже отмечалось, мощностью от 2 см и выше.

Относительные погрешности определения бериллия в диапазоне концентраций 0,003—0,03% по данным ГНК оцениваются равными 1,5—4%, а по данным лабораторного анализа — 1,5—6% [6.17]. Результаты повторного каротажа этого диапазона совпадают с точностью 3% (допустимые 5—13%), для диапазона 0,03—0,3 — с точностью 2,8% (допустимые 2,7—5%) и для концентраций свыше 0,3% — с точностью 2% (допустимые 1—2,7%). Видно, что данные ГНК удовлетворяют требованиям ГКЗ.

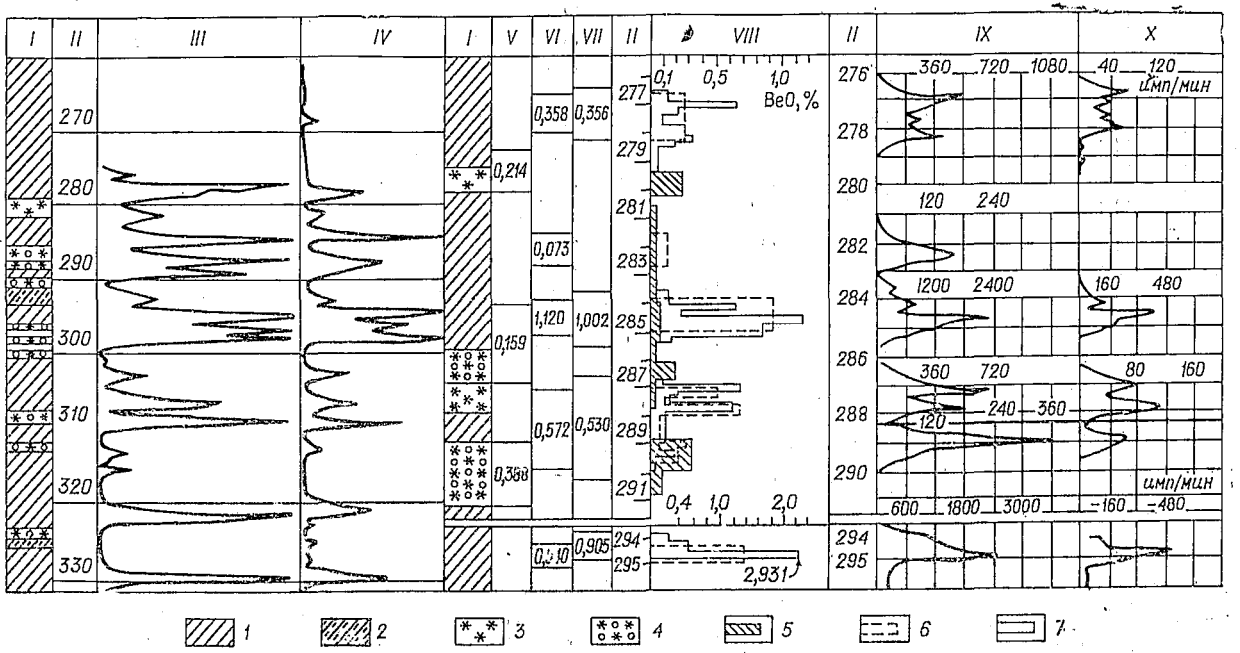
Методом ГНК выявлено большое число месторождений, оказавшихся не выявленными на этот вид минерального сырья геологическими методами опробования [26.17, 26.19, 26.37].

Результаты опробования бериллиевых оруденений (берилла и фенакита) признаны комиссией ГКЗ и в настоящее время широко используются для подсчета запасов этого вида сырья.

Естественно, применение ГНК при решении поисковых и разведочных задач позволило значительно повысить эффективность и производительность геолого-геофизических работ.

Наличие в бериллиевой руде концентраций радиоактивных элементов приводит к появлению естественного фона нейтронов, который необходимо учитывать при определении содержания бериллия в этих рудах. Поэтому метод ГНК необходимо также комплексировать с методикой НК (измерение естественного нейтронного фона, см. § 4 гл. 13) и ГК (см. гл. 12).

Применение прибора ГНК-1 в практике геофизических исследований на бериллий позволяет получать экономический эффект около 35 тыс. руб. в год на один прибор [26.7]. В процессе его эксплуатации при чувствительности 15—20 имп/мин·0,01% BeO рекомендуется [26.23] выбирать следующий режим работы: поиски месторождений бериллия по скважине вести со скоростью 150—180 м/ч при постоянной времени



26-28. Сопоставление данных ГНК, полученных при измерениях с аппаратурой на сцинтилляционных (III, IX) и пропорциональных счетчиках (IV, X) при проведении поискового (III, IV) и детализационного (IX, X) каротажа.

I — колонка по керну; II — глубина, м; III и IV — ГНК; V — линейные запасы бериллия (% BeO/м) по керну; VI — то же, по ГНК (IX); VII — то же, по ГНК (X); VIII — концентрации BeO; IX и X — ГНК.

1 — слюдисто-кварцевые сланцы, *2* — кварц-биотитовые сланцы, *3* — кварцевые жилы, *4* — кварцево-слюдистый грейзен, *5* — результаты опробования керна, *6* — то же, по данным ГНК, *7* — то же, по данным ГНК (IX).

5—7 с, детализацию проводить на скоростях 25—30 м/ч при постоянной времени 8—10 с. В процессе поискового каротажа при этом возможно выделять рудные тела с линейными запасами 0,05 м·% BeO, а при детализационном каротаже обеспечивать запись аномалий с минимальными линейными запасами 0,1 м·% BeO при относительной погрешности 10%.

Для проверки качества полученных результатов ведется сопоставление первичного каротажа ГНК-1 с повторным ГНК-2 и контрольным ГНК-3 [26.23].

ГНК-2 проводится сразу же после окончания детализационного ГНК-1 для оценок качества измерений каждого рудного интервала. Качество замеров проверяется по сопоставлению площадей аномалий ГНК-1 (S_1) и ГНК-2 (S_2), расхождение между которыми оценивается величиной [26.23]:

$$\Delta S_1 = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \cdot 200\,(\%).$$

При хорошем качестве измерений эта величина не должна выходить за пределы ±10%. В противном случае каротирование рудного интервала в скважине проводят заново.

ГНК-3 осуществляется на опорных скважинах не менее одного раза в течение месяца при работе с одним прибором. При замене одного прибора другим или одного функционного блока другим (в одном и том же приборе) контрольные измерения ведут до и после этих изменений. Для измерений выбираются интервалы с линейными запасами не ниже кондиционных. Это позволяет следить за изменениями пересчетных коэффициентов. Величина расхождения проверяется по площадям S_1 и S_3 [26.23]:

$$\Delta S_2 = \frac{S_1/N_1 - S_3/N_3}{S_1/N_1 + S_3/N_3} \cdot 200\,(\%).$$

Здесь N_1 и N_3 — скорости счета первичного и контрольного замеров в контрольно-калибровочном устройстве. Величина ΔS_2 не должна выходить за пределы ±10%.

В работе [26.23] рассматриваются также вопросы оценки достоверности и точности результатов ГНК.

Раздел 6

Методы, основанные на применении ускорителей и других мощных ядерных установок и приборов

Рассматриваются методы ускорительной ядерной геофизики и методы, реализуемые на основе размножителей нейтронов, ядерных реакторов и других мощных установок. Ускорительные и другие мощные ядерные установки в основном применяются в ядерном анализе проб. Для изучения разрезов скважин используются только нейтронные генераторы, на базе которых реализованы импульсные нейтронные методы (ИННК, ИНГК и др.). Помимо этого, нейтронные генераторы начинают применяться и в полевой съемке. В заключение в сжатой форме излагаются изотопные методы и применение ядерных взрывов в геологии и горном деле.

Глава 27

УСТРОЙСТВО УСКОРИТЕЛЕЙ И ДРУГИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

На основе изотопных источников, как показано в предыдущих главах, разработано большое число радиоизотопных методов, многие из которых широко применяются на практике. Однако геологи ставят перед геофизиками все новые задачи: комплексное изучение геологических объектов (одновременное определение нескольких элементов в изучаемой среде), повышение порога чувствительности и точности методов анализа, изучение изотопного состава геологических объектов и т. д. Возможности радиоизотопных методов при решении этих задач ограничены из-за невысокой энергии частиц, малой активности источников и невозможности управления излучением. Так, уже указывалось, что энергия бета-частиц и гамма-квантов естественных и искусственных изотопов не превышает 3 МэВ, альфа-частиц — 4—10 МэВ, нейтронов — в среднем 5—7 МэВ. Интенсивность потоков этих излучений обычно невысока.

Энергетический диапазон указанных излучений и их интенсивность существенно повышаются при использовании разнообразных ускорителей и других мощных ядерных установок. Ускорители эффективны не только для получения мощных пучков электронов, гамма-квантов, альфа-частиц и нейтронов, но и других заряженных частиц (протонов, дейтронов, гелионов — He^3 и т. д.). Для получения мощных пучков нейтронов используются также размножители нейтронов и ядерные реакторы. Перечисленные установки в основном применяются в лабораторной практике.

В последнее время все большее внимание уделяется разработке малогабаритных ускорителей для геофизических исследований. Наибольшие успехи достигнуты при разработке нейтронных генераторов на нейтронных трубках. На их основе созданы скважинные приборы, применяющиеся на практике, и ведется разработка приборов для полевой съемки.

Реакции, используемые для получения различных видов излучения, рассматриваются в § 5 гл. 1, поэтому ниже остановимся лишь на рассмотрении принципиального устройства ускорителей и других установок, привлекающихся для получения мощных потоков ядерного излучения.

Увеличение энергии заряженных частиц в ускорителе происходит в специальном ускоряющем устройстве за счет взаимодействия электромагнитного поля с зарядом частицы. Ускорители по форме траектории заряженных частиц подразделяются на два основных класса: линейные и циклические. В первых траектория частиц близка к прямолинейной, а во вторых — к круговой или спиральной, причем в линейных ускорителях частица проходит ускоряющее устройство один раз, а в циклических — много раз. Кроме того, для циклических ускорителей характерно наличие магнита, обеспечивающего устойчивое циклическое движение частиц в камере ускорителя. По характеру ускоряющего электромагнит-

ного поля каждый из этих типов устройств в свою очередь подразделяется на ускорители с постоянным и переменным полями.

Линейные ускорители по этому принципу делятся на электростатические (с постоянным ускоряющим напряжением) и на импульсные (с переменным ускоряющим полем), циклические — на ускорители с переменным электрическим полем (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, которые и рассмотрим ниже. Описание более мощных ускорителей можно найти в работах [27.13, 27.14, 27.26, 27.41, 27.43, 27.44, 27.50, 27.57, 27.60].

Последний параграф этой главы посвящен нейтронным установкам и, в частности, нейтронным генераторам, которые по сравнению с другими установками ускорительного типа находят более широкие области применения.

§ 1. Линейные ускорители

Линейные ускорители состоят из следующих основных элементов: генератора высокого напряжения или высокочастотной мощности, ускорительной трубки, ионного источника заряженных частиц и мишени. У некоторых из них генератор высокого напряжения и ускорительная трубка совмещены и представляют собой единое целое.

1. **Электростатические ускорители.** Устройства этого типа применяются для ускорения электронов, дейтронов и протонов. Для получения высокого напряжения в них используются электростатические генераторы (ЭСГ) и некоторые другие им подобные. От этого термина пошло и название ускорителей. Из ЭСГ наибольшее распространение получили ленточные генераторы Ван-де-Граафа, каскадные генераторы Кокрофта — Уолтона, роторные генераторы Иоффе и высоковольтные трансформаторы.

На основе этих генераторов преимущественно создаются ускорители непрерывного действия. Однако принципы, положенные в работу некоторых из них, могут быть использованы и для создания импульсных ускорителей, что будет оговорено ниже при рассмотрении соответствующих генераторов.

Генератор Ван-де-Граафа. О принципе устройства этого ЭСГ можно судить по рис. 27-1. В основу его работы положен известный принцип электростатической электрофорной машины (машины трения). Таким образом, в этих устройствах механическая энергия преобразуется в электрическую высокого напряжения за счет перемещения зарядов в электростатическом поле.

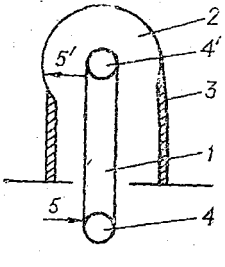


Рис. 27-1. Схема устройства электростатического генератора Ван-де-Граафа.
1 — бесконечная лента, *2* — кондуктор; *3* — изоляционная колонна, *4* и *4′* — вращающиеся валы, *5* и *5′* — щетки.

Первый ЭСГ на этом принципе сконструирован в 1929 г. в США Ван-де-Граафом [27.57]. Этот генератор состоит из следующих основных узлов: источника высокого напряжения (на рисунке опущен); бесконечной ленты (приводного ремня); полого металлического шара (кондуктора) и изоляционной колонны. Источник постоянного высокого напряжения в несколько киловольт необходим для создания заряда на ленточном транспортере. Подаваемый на ленту через коллектор (щетку)

заряд в процессе ее движения переносится к верхнему коллектору и стекает с него на кондуктор-конденсатор, накапливающий заряд. Лента обычно изготовляется из диэлектрика (шелка, резины и т. п.). Для повышения электрической прочности и уменьшения размеров генератора вся система обычно помещается в камеру высокого давления (котел). С кондуктора высокое напряжение подается на ускорительную трубку (см. ниже). С помощью таких ЭСГ можно ускорять заряженные частицы до энергии порядка 10 МэВ с током нагрузки около 10 мкА.

В настоящее время в СССР изготовляются следующие электростатические ускорители описываемого типа [27.63]:

а) электростатический ускоритель типа ЭГ-2,5, имеющий диаметр котла 1,6 м, высоту 4,2 м, давление газа 20 атм; предназначен для ускорения протонов, дейтронов и электронов до энергии 2,5 МэВ при токах ионов (дейтронов и протонов) до 50 мкА и электронов до 250 мкА.

б) электростатический ускоритель типа ЭГ-5 с диаметром котла 2,6 м, высотой 7,7 м, давлением газа 16 атм; предназначен для ускорения протонов и дейтронов до энергии 5 МэВ при токах пучка ускоренных частиц около 20 мкА;

в) электростатический ускоритель с перезарядкой ионов типа ЭГП-10, имеющий диаметр котла 3 м, высоту 11 м, давление газа 16 атм; предназначен для ускорения протонов и дейтронов до энергии 10 МэВ при токах пучка до 3 мкА.

Первый из этих ускорителей может быть использован для целей ядерной геофизики, два других пока применяются в ядерно-физических исследованиях.

Более подробное описание ускорителей, созданных на этом типе генераторов, можно найти в работах [27.5, 27.11, 27.15, 27.37, 27.50, 27.56, 27.57].

Каскадный генератор Кокрофта—Уолтона. Для уяснения принципа работы этого генератора рассмотрим схему удвоения напряжения (рис. 27-2, *а*). При установке ключей K_1 и K_2 в ниж-

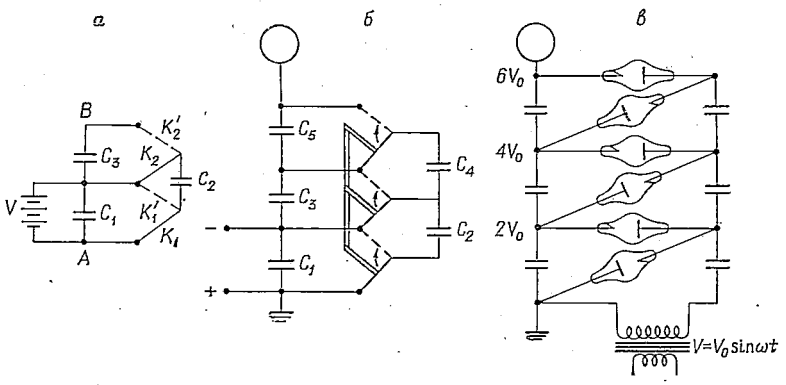


Рис. 27-2. Схемы умножения напряжения.
а — схема удвоения напряжения, *б* — схема утроения напряжения, *в* — кенотронная схема умножения напряжения.

нем положении конденсаторы C_1 и C_2 включаются параллельно и заряжаются до напряжения батареи v. При переброске ключей в верхнее положение K_1^1 и K_2^1 напряжение v делится между емкостью C_2 и C_3, на каждой из которых устанавливается напряжение $v/2$. Разность потенциалов в цепи между точками A и B в этом случае становится равной $\frac{3}{2}v$. Если переброс ключей повторить вниз и вверх, то на емкости C_3 возникает напряжение $\frac{1}{2}\left(v+\frac{1}{2}v\right)=\frac{3}{4}v$. В результате между точ-

ками A и B получается разность потенциалов $v + \frac{3}{4}v = \frac{7}{4}v$. После нескольких переключений она становится равной $2v$. Для нескольких ячеек, последовательно переключаемых из параллельного соединения в последовательное, таким образом можно добиться утроения (см. рис. 27-2, *б*), учетверения напряжения и т. д.

Этот принцип в 1920 г. был рекомендован Грейнахером для ускорения электронов, а в 1930 г. английские физики Кокрофт и Уолтон [27.57] значительно его усовершенствовали и использовали для ускорения протонов до энергии 380 кэВ. В 1932 г. ими было осуществлено, как уже упоминалось, расщепление лития на ускорителе с энергией 800 кэВ.

В современных каскадных генераторах цепи умножения напряжения состоят из конденсаторов и выпрямителей (кенотронов, тиратронов или газотронов). Схематическое устройство такого генератора на кенотронах показано на рис. 27-2, *в*, а схема удвоения напряжения по Грейнахеру — на рис. 27-3. Подача на такие системы переменного напряжения с амплитудой v приводит к получению на выходе постоянного суммарного напряжения, зависящего от числа секций в каскадах.

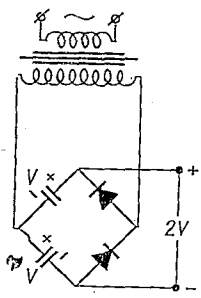


Рис. 27-3. Схема удвоения напряжения с конденсаторами и выпрямителями.

С помощью ускорителей, созданных на основе каскадных генераторов, можно ускорять электроны, протоны и дейтроны до 1—2 МэВ при токах нагрузки в несколько миллиампер. На основе этих генераторов могут быть созданы ускорители непрерывного и импульсного действия.

Интересующихся более подробно умножителями каскадного типа и созданными на их основе ускорителями отсылаем к работам [27.5, 27.15, 27.37, 27.50, 27.57].

В настоящее время промышленностью СССР на основе каскадного генератора выпускается ускоритель ионов типа КГИ-500, предназначенный для ускорения протонов и дейтронов до энергии 500 кэВ при токе пучка протонов до 1 мА [27.63].

Роторный генератор Иоффе. Разработка роторных генераторов впервые была начата в Ленинграде под руководством А. Ф. Иоффе. Первые результаты по этим генераторам были опубликованы в 1939 г. [27.15].

Роторные генераторы подобны генераторам Ван-де-Граафа, только заряд на накопительное устройство в них переносится с помощью не бесконечной ленты, а ротора, приводимого в движение электромотором.

Генераторы этого типа состоят из источника возбуждения, ротора и индуктора, зарядного и разрядного ионизаторов. Ротор — обычно полый цилиндр из изолирующего материала. На поверхности его возникают электрические заряды. Приводится он во вращение электромотором. Зарядный ионизатор, создавая заряд, переносит его на поверхность ротора, а разрядный снимает. Индуктор предназначен для создания электрического поля. Одна из действующих схем электростатического роторного генератора представлена на рис. 27-4. Единственной движущейся частью генератора является цилиндрический ротор, вращающийся между ионизаторами и плохо проводящим или изоляционным цилиндром, окружающим индукторы. Расстояние между ними весьма мало (доли миллиметра). При работе ЭСГ используется вспомогательный возбуждающий генератор для создания разности потенциалов между зарядным ионизатором и индуктором. При этом сильное элект-

рическое поле возникает на конце ионизатора, что вызывает локальную ионизацию.

Под влиянием питающего индуктора электрические заряды (ионы) переносятся на ротор и движутся с ротором в тангенциальном электрическом поле. Заряды, переносимые ротором, снимаются с него разрядным ионизатором и питают цепь нагрузки.

Для повышения электрической прочности генератор работает в сжатом газе. С помощью роторных генераторов можно ускорять частицы до 1—1,5 МэВ при токах до 40 мА [27.60]. В этой работе дан обзор по таким ЭСГ.

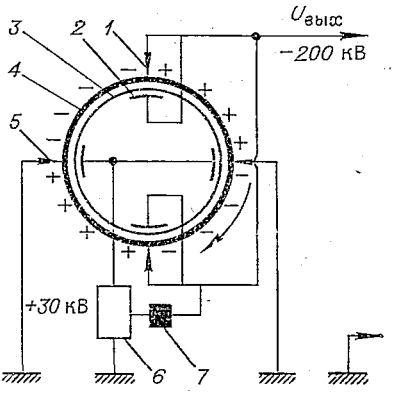


Рис. 27-4. Схема роторного электростатического генератора.

1 — разрядный ионизатор, *2* — металлический индуктор статора, *3* — стеклянный цилиндр статора, *4* — ротор, *5* — зарядный ионизатор, *6* — источник возбуждения, *7* — регулятор высокого напряжения.

К настоящему времени на принципе работы этого генератора разработан и выпускается нейтронный генератор типа ГН-160, ускоряющий дейтроны до энергии 160 кэВ и позволяющий получать непрерывные и импульсные потоки нейтронов до $5 \cdot 10^9$ нейтр/с по реакции (d, t) и до $5 \cdot 10^7$ нейтр/с по реакции (d, d) [6.69, 22.102].

Высоковольтный трансформатор. Высокие напряжения переменного тока до 100—150 кВ достижимы с помощью обычной системы трансформаторов. Для получения постоянного тока это напряжение может быть выпрямлено какой-либо системой выпрямителей. В частности, для этих целей могут применяться выпрямители, созданные по схеме удвоения напряжения (см. рис. 27-3 и др.). Некоторые схемы выпрямителей применительно к использованию в генераторах нейтронов рассматриваются в работе [1.31]. На основе системы трансформаторов и селенового выпрямителя со схемой удвоения напряжения выпускается нейтронный генератор типа НГ-200-III^а, представляющий собой дейтронный ускоритель на энергию 200 кэВ при токе до 1 мА с выходом нейтронов по реакции дейтрон-тритий 10^{10}—10^{11} нейтр/с [27.63].

Сильноточные высоковольтные трансформаторы применяются также в качестве генераторов высокого напряжения для ускорения электронов. Так, в Институте ядерной физики СО АН СССР Е. А. Абрамяном и др. [26.61] на основе высоковольтных трансформаторов со встроенными ускорительными трубками созданы электронные ускорители непрерывного и импульсного действия на энергию 1—3 МэВ.

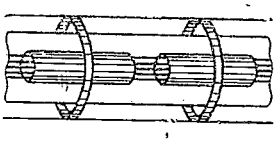


Рис. 27-5. Схема участка ускорительной трубки.

Ускорительная трубка. Ускорение частиц в трубках осуществляется под действием разности потенциалов, прикладываемых к ее электродам от какого-либо одного из описанных выше генераторов высокого напряжения.

Трубка изготовляется обычно из стекла или фарфора. Внутри ускорительной трубки помещают металлические цилиндры (электроды), связанные с металлическими кольцами, охватывающими трубку снаружи. Схематически один из участков трубки показан на рис. 27-5. Общее напряжение, подаваемое на трубку, делится между кольцами. Электрическое поле при таком устройстве ускорителей трубки имеется лишь между цилиндрами. Поэтому и ускорение заряженных частиц происходит лишь в промежутке между цилиндрами. Эти цилиндры также обеспечивают фокусировку пучка частиц. В ускорительных трубках, как уже отмечалось, могут ускоряться как электроны, так и ионы.

В ускорительных трубках в зависимости от их устройства поддерживается высокий вакуум (10^{-5}—10^{-6} мм рт. ст.).

Трубки, предназначенные для ускорения электронов, делают, как правило, запаянными. Трубки же для ускорения ионов всегда снабжаются насосами, поддерживающими в них высокий вакуум.

Источником электронов обычно служат высокоэффективные катоды, эмитирующие электроны при их нагреве. Испущенные при этом электроны под действием электрического поля устремляются в ускорительную трубку и ускоряются в ней. Система, включающая источник электронов и вытягивающая электроды, обычно называется электронной пушкой. Через отверстие, закрытое тонкой алюминиевой или бериллиевой фольгой, электроны могут быть выведены из ускорителя, получается источник электронов. В случае, если на пути пучка устанавливается тормозная мишень, возникает источник гамма-излучения с широким спектром энергии.

Для получения ускоренных ионов в подобных ускорителях обычно используется ионный источник специального типа. Одна из конструкций такого источника представлена на рис. 27-6. Анодом источника служит коническая разрядная камера, а катодом — вольфрамовая спираль. Газ, используемый для образования ионов, помещается в разрядной камере под давлением около 10^{-3} мм рт. ст. Этот газ ионизируется под ударами электронов и через отверстие вытягивается в ускори-

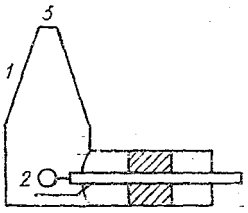


Рис. 27-6. Схема ионного источника.
1 — разрядная камера (анод), *2* — вольфрамовая спираль (катод), *3* — выводное отверстие.

тельную трубку. В зависимости от типа ускоряемых частиц и их энергии, а также типа мишени можно получать интенсивные потоки нейтронов или гамма-лучей.

Более подробно устройство ускорительных трубок и ионных источников излагается в работах [4.18, 27.15].

2. **Импульсные ускорители.** Выше отмечалось, что в качестве импульсных источников высокого напряжения могут быть использованы умножители напряжения Кокрофта — Уолтона и высоковольтных трансформаторов. Первые из них получили наибольшее распространение.

Кроме них для получения импульсных потоков излучения широко применяются линейные резонансные ускорители.

Импульсный генератор. Для уяснения принципа построения таких генераторов рассмотрим схему Маркса [27.57]. Состоит она из источника постоянного напряжения и нескольких конденсаторов, попеременно переключаемых искровым способом из параллельного соединения в последовательное (рис. 27-7). В первом искровом промежутке a расстояние выбирается наименьшим по сравнению с остальными. При зарядке конденсаторов до напряжения пробоя a на втором искровом промежутке a' напряжение удваивается, происходит мгновенный пробой, затем тут же пробой третьего промежутка a'' и т. д. В результате все конденсаторы на небольшой промежуток времени (порядка 10^{-10}—10^{-9} с) оказываются соединенными последовательно и электрод P получает высокий потенциал. В дальнейшем емкость электрод — земля разряжается через сопротивления, высокие потенциалы с которых снимаются на электроды ускорительной трубки. По устройству она особенно не отличается от вышеописанной, но к ее работе снижаются требования, касающиеся изоляции и поддержания вакуума, поскольку она работает в импульсном режиме.

Генераторы импульсных напряжений типа ГИН в настоящее время выпускаются промышленностью. С их помощью можно ускорять частицы до 10 МэВ, при этом токи в импульсе могут достигать 1 А. Однако чаще всего созданные на этом принципе ускорители используются для получения частиц с энергией 2—3 МэВ [27.16].

Резонансные ускорители. Идея ускорения положительных ионов на резонансном принципе впервые была высказана в 1924 г. в Швеции Изингом и более детально разработана в 1929 г. Видероэ в Германии. Первый же линейный ускоритель на этом принципе был построен в 1931 г. в США Слоаном и Лоуренсом.

Внешне резонансный ускоритель сходен с описанной выше ускорительной трубкой (см. рис. 27-5). Различие состоит только в том, что ускоряющее напряжение передается поочередно с одной пары цилиндров (пролетных трубок) на другую (на четные и нечетные). Использование переменного электрического поля позволяет при сравнительно небольшом напряжении — порядка десятка киловольт при многократном действии его на частицы — ускорить их до значительной энергии.

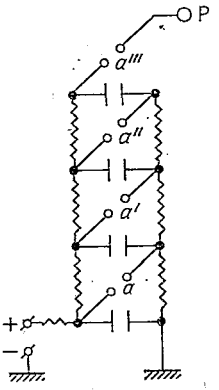


Рис. 27-7. Схема импульсного генератора системы Маркса.

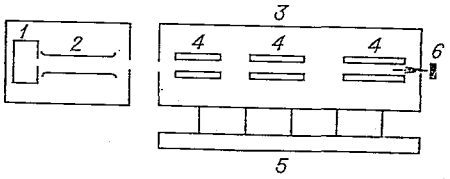


Рис. 27-8. Схема резонансного ускорителя с волноводом.
1 — источник ионов, *2* — электростатический ускоритель протонов, *3* — волновод, *4* — пролетные трубки, *5* — импульсный генератор, *6* — мишень.

В первых резонансных ускорителях питание четных и нечетных трубок осуществлялось от разных клемм генераторов переменного напряжения. При этом для ускорения частиц до больших энергий необходимо было создавать много трубок в одном ускорителе, что было связано с большим увеличением его размеров.

С появлением локационных установок с волноводами внимание физиков было обращено на этот принцип. Первый электронный ускоритель этого типа в годы Второй мировой войны был сконструирован Альварецем (США). Однако на этом принципе в последующем стали создавать не только электронные, но и ионные ускорители [27.24, 27.57].

Схематическое устройство таких ускорителей пояснено на рис. 27-8. Установка состоит из трех основных узлов: электростатического ускорителя (ЭСГ), волновода и импульсного генератора. Электромагнитная волна при распространении в полых металлических трубках волновода обладает некоторыми специфическими особенностями, если ее длина больше диаметра пролетных трубок. В этом случае поле внутрь пролетных трубок не проникает, хотя и имеет направление вдоль них. Ускорение частиц происходит лишь между трубками, как и в обычной ускорительной трубке. При изменении знака поля на обратный частицы уходят из зазора внутрь трубок и выходят из них вновь, когда поле принимает прежний знак. Поэтому размер трубок и зазоры между ними подбираются с таким расчетом, чтобы время пролета частицей расстояния между зазорами равнялось или было кратно периоду изменения ускоряющего напряжения. При постоянном периоде длина трубок растет пропорционально скорости частиц.

Из резонансных ускорителей наиболее доступными для решения геолого-геофизических задач являются электронные ускорители на небольшие энергии (порядка 5—15 МэВ) при среднем токе до 20 мА.

Работа электронных ускорителей с бегущей волной основана на взаимодействии электронов с электрическим полем электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе, нагруженном металлическими дисками с отверстиями. Электроны в таких устройствах ускоряются в положительной полуволне. Если скорость электрона равна скорости распространения положительной полуволны, т. е. ее фазовой скорости, то ускорение его происходит непрерывно. Для уменьшения фазовой скорости электромагнитной волны в волноводах до скорости движения электронов в них устанавливаются различные диафрагмы. Существуют линейные электронные ускорители с постоянной и переменной фазовой скоростью волны [27.16].

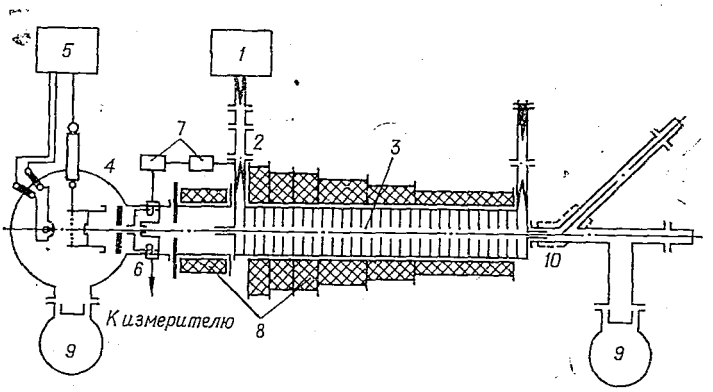


Рис. 27-9. Принципиальная схема линейного электронного ускорителя на 6 МэВ.

1 — высокочастотный генератор, *2* — питающий волновод, *3* — ускоряющая система, *4* — источник электронов, *5* — модулятор питания источника электронов, *6* — группирователь электронов, *7* — линия питания группирователя, *8* — фокусирующие катушки, *9* — вакуумные насосы, *10* — магнитный анализатор.

На рассматриваемом принципе в Физико-техническом институте АН УССР создан ускоритель с переменной фазовой скоростью волны на 6 МэВ с максимальным током в импульсе 0,32 А (рис. 27-9) [27.28]. Длина волновода в этом ускорителе 80 см, а диаметр — 8,4 см. Подробное описание его приводится в работе [27.49], а более обстоятельно устройство ускорителей такого типа рассматривается в работах [27.10, 27.20, 27.25, 27.27, 27.29, 27.37, 27.42, 27.49—27.53, 27.55, 27.57—27.59].

В статье [27.39] приводится сводка по электронным ускорителям на энергии до 15 МэВ, разрабатываемым в СССР различными НИИ.

§ 2. Циклические ускорители

1. **Бетатрон.** Бетатрон является индукционным циклическим ускорителем электронов. Первая установка этого типа создана Керстом в США в 1940 г. [27.57].

По принципу работы бетатрон напонимает 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. 27-10), образующийся в вакуумной камере, выполненной в виде пóлого 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 тем бо́льшую 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 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 (см.

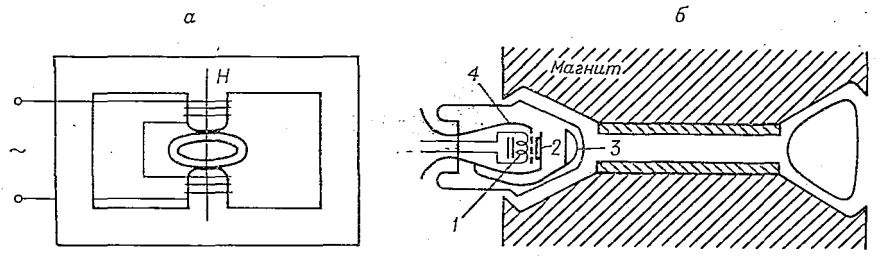


Рис. 27-10. Схема бетатрона (*а*) и вертикальный разрез его внутренней части (*б*).

1 — катод, *2* — анод, *3* — мишень, *4* — сетка.

рис. 27-10, *б*), создающих в центральной части ускоряющее поле, более чем в два раза превосходящее поле на орбите электронов.

Камера, в которой ускоряются электроны, изготовляется из фарфора, плексигласа или стекла. В процессе работы бетатрона в его камере должен поддерживаться вакуум до 10^{-6} мм рт. ст. Электроны в камеру поступают от инжектора, называемого также электронной пушкой, располагающейся внутри или снаружи камеры. Питание электромагнита осуществляется переменным током с частотой в пределах 50—800 Гц.

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. Ананьевым и др. [27.64] созданы переносные малогабаритные бетатроны типа ПМБ, позволяющие ускорять электроны до 3 МэВ со средним током 0,06 мкА (ПМБ-3), до 5 МэВ со средним током 0,012 мкА (ПМБ-5) и до 6 МэВ со средним током 0,037 мкА (ПМБ-6). Полный вес этих установок соответственно равен 66, 69 и 128 кг. Питание установок осуществляется от промышленной сети мощностью от 0,8 до 1,5 кВт. Как видно, эти установки вполне могут быть приспособлены для ядерно-геофизических исследований по ГНМ и ГА (см. § 2 гл. 28).

Более подробное описание бетатронов рассматривается в работах [27.3, 27.13, 27.14, 27.37, 27.48, 27.50, 27.57—27.60, 27.62].

2. **Микротрон** (электронный циклотрон) впервые предложен в СССР в 1944 г. В. И. Векслером. Принципиальная схема микротрона показана на рис. 27-11. Состоит он из трех основных элементов: электромагнита, камеры и резонатора. 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 ре-

зонаторе. Введенные в камеру электроны под действием магнитного поля описывают в ней окружности и, ускоряясь за счет высокочастотного микроволнового (сантиметрового) поля резонатора, с каждым оборотом увеличивают радиус своей орбиты. 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 и выражается формулой

$$E_{\text{ком}} = \Delta E \cdot n,$$

где n — число орбит; ΔE — приращение энергии электрона за один оборот.

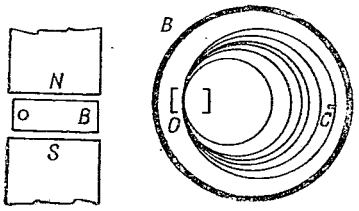


Рис. 27-11. Принципиальная схема микротрона. В — вакуумная камера, О — резонатор, С — мишень, N и S — полюса электромагнита.

С помощью ускорителей этого типа в настоящее время можно ускорять электроны до энергии 50—100 МэВ. Однако наиболее рационально их использовать для ускорения электронов до энергий 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.

Существующие ускорители этого типа работают на длинах волн обычно 10 см. В ИГиГ СО АН СССР к настоящему времени разработан малогабаритный микротрон на энергию до 4 МэВ, работающий на длине волны 3 см. Величина среднего тока для него около 1,5 мкА.

Вес микротронов в основном определяется электромагнитом. Так, микротрон, ускоряющий электроны до 7 МэВ и работающий на волне 10 см, имеет электромагнит весом 1,5 т. В малогабаритном микротроне ИГиГ СО АН СССР вес электромагнита составляет 120 кг [19.63].

Интересующихся более подробно устройством микротронов отсылаем к специальным работам [25.6, 25.7, 27.22, 27.23, 27.33, 27.44, 27.58, 27.61, 36.15].

Все вышеперечисленные электронные ускорители обычно используются в виде источников электронного излучения (при выводе пучка из ускорителя). Однако они могут применяться и для получения мощных потоков гамма-излучения. Доза D (р/м) и мощность дозы P (Р/с·м) на оси пучка в зависимости соответственно от числа Q_e и плотности потока электронов n_e, сбрасываемых на мишень, определяются из соотношений [27.36]:

$$D = 10^{-16} K_0 Q_e E^3, \quad P = 10^{-16} K_0 n_e E^3, \tag{27-1}$$

где $K_0 \leqslant 1$ — коэффициент оптимизации мишени; E — энергия электронов, МэВ.

При сравнении параметров импульсных ускорителей по току со стационарными расчет величины среднего тока (в амперах) следует производить по формуле.

$$i_{\text{ср}} = i_{\text{и}} \cdot \nu \cdot t \tag{27-2}$$

где $i_{\text{и}}$ — ток в импульсе; ν — частота следования импульсов; $t_{\text{и}}$ — длительность импульса.

Величина плотности потока электронов и однозарядных ионов определяется соотношением

$$n_i = \frac{i_{\text{ср}}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 6{,}25 \cdot 10^{18} i_{\text{ср}} = 6{,}25 \cdot 10^{18} i_{\text{и}} \cdot \nu \cdot t \text{ частиц/с.} \tag{27-3}$$

Величина тока при этом должна выражаться в амперах.

3. **Циклотрон** является циклическим резонансным ускорителем нерелятивистских 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.

Подобно микротрону циклотрон состоит из трех основных элементов: электромагнита, резонансного генератора высокой частоты и камеры, в которой ускоряются ионы (рис. 27-12 [27.43, 27.44]). Ионы в камеру вводятся инжектором. Для их ускорения в камере постоянно необходимо поддерживать вакуум порядка 10^{-6} мм рт. ст. С помощью электромагнита в ней создается однородное и постоянное во времени магнитное поле напряженностью до $2 \cdot 10^4$ Э. Под действием этого поля частицы движутся в камере по окружности, радиус которой пропорционален импульсу частиц. Ускорение частиц происходит лишь в пространстве между дуантами за счет разности потенциалов величиной до $0,n$МВ, 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 ним напряжения и движется по спирали в резонансе с высокочастотным полем. Ускорение может происходить до тех пор, пока ионы не достигнут энергии, при которой нельзя пренебречь релятивистскими эффектами.

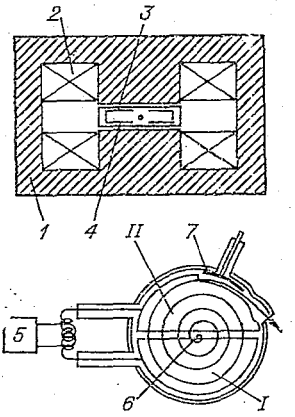


Рис. 27-12. Схема циклотрона.

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

Электромагнит циклотрона в поперечнике достигает 1,5—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 при этом можно ускорять, как уже отмечалось, максимум до 25 МэВ при токах в пучке соответственно 1 и 0,3 мА. Альфа-частицы и трехзарядные ионы азота ускоряются соответственно до энергий 48 и 160 МэВ и т. д.

Интересующихся более подробно устройством этого вида ускорителей отсылаем к работам [27.2, 27.5, 27.12, 27.13, 27.17, 27.26, 27.32, 27.37, 27.42, 27.41—27.44, 27.49, 27.54, 27.57, 27.63].

В циклотроне и других ускорителях можно получать потоки заряженных частиц с выходом до 10^{16} част/с.

§ 3. Нейтронные установки

1. **Генераторы нейтронов.** Для получения мощных потоков нейтронов практически может быть использован каждый из перечисленных ускорителей. Так, в электронных ускорителях нейтроны получают за счет 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 (рис. 27-13 [29.49]). С помощью электронного ускорителя с энергией 3 МэВ и током 1 мА с золотой мишенью толщиной 3 мм можно получать в замедлителях потоки тепловых нейтронов ве-

личиной $5 \cdot 10^7$ нейтр/см^2·с при использовании в качестве мишени блока бериллия в форме куба с ребром 15 см. Средняя энергия быстрых нейтронов, не испытавших замедления в соответствии с формулой (3-30), для этого ускорителя равна 1,18 МэВ.

Для получения мощных потоков нейтронов могут достаточно широко использоваться и ионные ускорители заряженных частиц. Так, из протонных ускорителей применяются устройства, созданные на основе электростатических и каскадных генераторов высокого напряжения, а также линейные резонансные ускорители и циклотроны. Реакции, которые могут быть использованы для получения нейтронов, рассматриваются в § 5 гл. 1. Там, в частности, показано, что для получения мощных потоков нейтронов чаще всего применяется взаимодействие дейтронов с тритием и дейтерием. Поэтому под генераторами нейтронов обычно понимают дейтронные ускорители с тритиевыми и дейтериевыми мишенями. В качестве таких ускорителей чаще всего используют устройства с электростатическими (Ван-де-Граафа и Иоффе) и каскадными (Кокрофта — Уолтона) генераторами, а также трансформаторы с выпрямителями. С помощью таких ускорителей в основном получают потоки быстрых нейтронов с выходом до 10^{10} нейтр/с и реже — до 10^{12} нейтр/с.

По виду ускоряющего напряжения эти устройства подразделяются на генераторы непрерывного и импульсного действия. В свою очередь каждые из них могут быть подразделены на установки с откачиваемой ускорительной камерой и с герметичной камерой (нейтронной трубкой).

Генераторы с откачиваемой системой достаточно широко используются в лабораторной практике для изучения различных геологических объектов, герметичные отпаянные нейтронные трубки — для создания скважинных генераторов нейтронов.

Описанию разнообразных систем генераторов нейтронов в отечественной литературе посвящено большое число публикаций [1.31, 6.63, 27.1, 27.4, 27.13, 27.16, 27.31, 27.34, 27.35, 27.38, 27.40, 27.45, 27.46, 27.47 и др.].

Генераторы нейтронов с вакуумными, непрерывно откачиваемыми трубками обладают большой стабильностью и гибкостью характеристик. Они могут быть непрерывного действия и импульсного, а некоторые — переключаться с одного режима на другой. В ионных источниках этих генераторов поддерживается давление 10^{-2}—10^{-3} мм рт. ст., а в трубках — 10^{-5}—10^{-7} мм рт. ст.

На рассматриваемом принципе устроены выпускаемые отечественной промышленностью нейтронные генераторы НГ-160 и НГ-200-III[а] (см. выше). Описание других генераторов аналогичного типа приводится в работах [27.1, 27.4, 27.18, 27.31, 27.34, 27.35, 27.38, 27.40, 27.45, 27.46, 27.47]. Для размещения всех этих установок требуются специальные помещения.

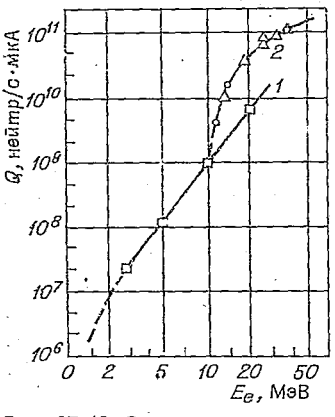


Рис. 27-13. Зависимость выхода быстрых нейтронов от энергии ускоряемых электронов при фотонейтронных реакциях на бериллии (*1*) и уране (*2*).

Для ядерно-геофизических исследований большой интерес представляет использование нейтронных генераторов, созданных на отпаянных нейтронных трубках. К настоящему времени разработано несколько систем таких трубок: вакуумные, газозаполненные и плазменные [1.31, 27.1]. На их основе создаются весьма миниатюрные нейтронные генераторы, позволяющие получать потоки нейтронов с выходом от $5 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^{10}$ нейтр/с. Целый ряд таких трубок

в настоящее время выпускается серийно (табл. 27-1). Трубки УНГ-1 и УНГ-2 являются газонаполненными, остальные — вакуумными. Некоторые из них используются в скважинных генераторах нейтронов (см. § 1 гл. 29).

Во ВНИИ радиационной техники для проведения исследований по нейтронному активационному анализу создан специальный малогабаритный нейтронный генератор НГИ-1 на трубке НТ-8 с выходом не менее $3 \cdot 10^8$ нейтр/с [1.31]. Ускоритель может размещаться в кузове специальной автомашины и транспортироваться к месту исследования образцов [27.19].

Применявшиеся ранее цирконит- и титано-тритиевые мишени были недолговечны. Бомбардируемый дейтронами поверхностный слой мишени обеднялся тритием, и выход нейтронов в таком генераторе быстро снижался. По этой же причине нейтронная трубка сравнительно быстро выходила из строя. Для повышения срока службы мишени ее бомбардируют смешанным потоком дейтронов и тритонов. Подпитка мишени тритием позволяет существенно повысить срок службы мишеней и стабильность выхода пучка нейтронов во времени.

К настоящему времени создана трубка с выходом $2 \cdot 10^{10}$ нейтр/с и сроком службы свыше 1000 ч [19.178].

2. Нейтронный размножитель и другие установки. В СССР для проведения активационного анализа геологических образцов и т. п. Т. А. Лопавком [6.64, 18.43, 27.30] разработан нейтронный размножитель НР-1, кроме того, отечественной промышленностью освоен выпуск нейтронного размножителя типа СО-1 [6.69, 22.102, 27.9, 27.65]. Схематическое устройство этого прибора представлено на рис. 27-14. Активная зона размножителя загружается двуокисью урана, диспергированного в полиэтилене. Эта зона имеет d 240 мм, а h 280 мм и

Таблица 27-1

Краткие технические данные нейтронных трубок, позволяющих получать потоки нейтронов с энергией 14 МэВ

Технические данные	Тип трубок							
	УНГ-1	УНГ-2	НТ-8	НТ-10	НТ-11	НТ-16	НТ-19	НТ-21
Интенсивность нейтронного потока в начале срока службы	$1 \cdot 10^7$ нейтр/с	$1 \cdot 10^8$ нейтр/с	$1 \cdot 10^8$ нейтр/имп	$4 \cdot 10^6$ нейтр/имп	$1{,}5 \cdot 10^7$ нейтр/имп	$1 \cdot 10^7$ нейтр/имп	$2{,}5 \cdot 10^6$ нейтр/имп	$7 \cdot 10^8$ нейтр/с
Срок службы	100 ч	50 ч	10^6 имп	10^6 имп	10^6 имп	$4 \cdot 10^6$ имп	$7 \cdot 10^7$ имп	50 ч
Интенсивность нейтронного потока в конце срока службы	$5 \cdot 10^6$ нейтр/с	$1 \cdot 10^7$ нейтр/с	$1 \cdot 10^7$ нейтр/имп	$1 \cdot 10^6$ нейтр/имп	$3 \cdot 10^6$ нейтр/имп	$2 \cdot 10^3$ нейтр/имп	$7{,}5 \cdot 10^5$ нейтр/имп	$2 \cdot 10^8$ нейтр/с
Частота следования импульсов, Гц	50—400	50—350	До 10	До 20	До 30	до 20	До 40	30
Рабочий диапазон температур, °С	До 120	До 80	60—80	60—100	60—250	—40—250	(—40)—(+150)	(—40)—(+150)
Механическая прочность, g	3	5	4	4	4	4	4	10
Габариты, мм								
длина	187	351	210	160	210	161	155	175
диаметр	35	34	76	35	42	25	20	46

Примечание. Трубка УНГ-2 может работать в импульсном и непрерывном режимах.

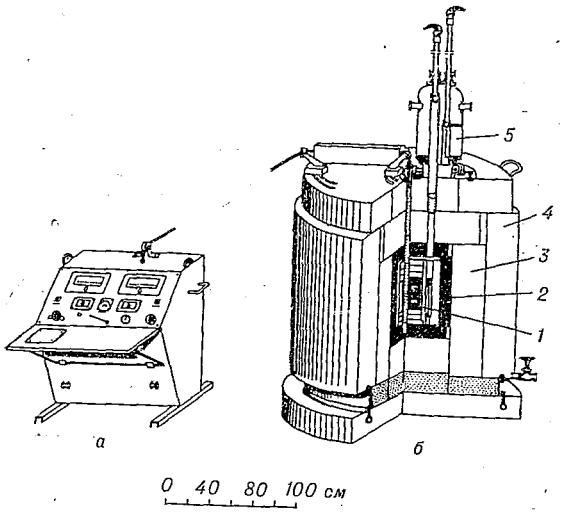


Рис. 27-14. Схема размножителя типа СО-1 (*б*) с пультом управления (*а*).

1 — активная зона с ампульным источником, расположенным в ее центре, *2* — свинцовая защита, *3* — парафиновая защита и карбид бора, *4* — водяная защита, *5* — устройство перегрузки образцов при работающем размножителе.

окружена слоем отражателя нейтронов (парафин и графит) и биологической защитой (свинец, парафин, вода). Цепная реакция деления может происходить только под действием внешнего полоний-бериллиевого нейтронного источника активностью 65 Ки ($1 \cdot 10^8$ нейтр/с). Под действием этих нейтронов начинается деление ядер урана и происходит размножение нейтронов, определяющееся величиной

$$\varphi = (1 - K_{эф})^{-1}, \qquad (27\text{-}4)$$

где $K_{эф}$ — эффективный коэффициент размножения нейтронов.

В размножителе нейтронов, являющемся подкритической системой, величина этого коэффициента ниже единицы. При внесении источника в центр установки величина $K_{эф}$ значительно приближается к единице, но никогда не становится равной ей. В этом случае знаменатель в формуле (27-4) делается малой величиной и φ резко возрастает. В центре активной зоны создаются потоки тепловых и быстрых нейтронов соответственно в $2{,}5 \cdot 10^7$ и $7 \cdot 10^7$ нейтр/см^2. В размножителе имеются три вертикальных канала диаметром 52 мм и один горизонтальный диаметром 52 мм с пневмопочтой.

Биологическая защита состоит из слоя свинца толщиной 188 мм и слоя парафина толщиной 288 мм. Для повышения защитных свойств парафина к нему добавлен карбид бора в количестве 5%. Снаружи в процессе работы размножителя заливается вода толщиной слоя 288 мм. Образцы в вертикальные каналы загружаются с помощью специального перегружателя.

Размножитель СО-1 можно устанавливать в любом отапливаемом помещении. Имеющаяся у него биологическая защита вполне обеспечивает радиационную безопасность обслуживающего персонала. Размножитель допускает возможность транспортировки его на автомашине. Вода из бака при перевозке может удаляться через специальный кран и заливаться вновь по прибытии на место работ.

Аналогичного рода передвижная установка создана в Канаде [10.28]. Нейтроны в ней получаются по реакции $Be^9(\gamma, n)Be^8$. Для получения потока тепловых нейтронов $2 \cdot 10^8$ нейтр/см$^2 \cdot$с в ней используется источник сурьма-124 активностью 6000 Ки, который находится в бериллиевом блоке. Вся система размещается в центре водяного бака. Вода выполняет роль отражателя и замедлителя нейтронов. Для защиты от гамма-лучей и нейтронов вся система вместе с водяным баком помещается в специальном блоке толщиной стенок 43 см. Установка оборудована двумя каналами, размещенными в бериллиевом блоке и обслуживаемыми пневмопочтой. Для измерения наведенной активности образцов в регистрирующем блоке имеется германиево-литиевый детектор объемом 35 см^3 и кристалл йодистого натрия размером 10×10 см, включенные в схему совпадений для вычитания комптоновского распределения импульсов. Аналогичного рода установка с

источником кюрия-242 активностью 4000 Ки создана в США [25.75] (см. п. 1 § 2 гл. 25).

3. Ядерный реактор. Как уже отмечалось, первый ядерный (атомный) реактор был разработан в США под руководством Э. Ферми в 1942 г. В СССР аналогичные исследования велись независимо и параллельно группой ученых под руководством И. В. Курчатова. Первый ядерный реактор в нашей стране был запущен в 1946 г. К настоящему времени созданы реакторы самых разнообразных типов. Ядерные реакторы являются критическими системами ($K_{эф}=1$). Во время работы в них протекает самоподдерживающаяся управляемая цепная реакция. Попутно заметим, что системы с $K_{эф}>1$ — надкритические. На этом явлении основываются ядерные (атомные) взрывы (см. гл. 30).

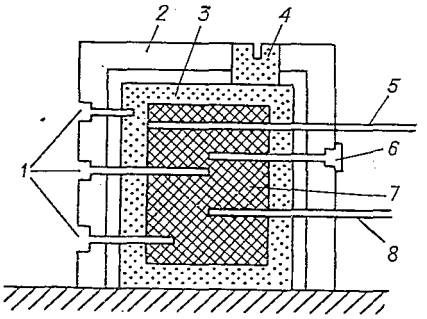


Рис. 27-15. Схема разреза урано-графитового реактора.

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

Схематическое устройство простейшего урано-графитового реактора приводится на рис. 27-15. 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 работы с пучками нейтронов). Для облучения образцов в нем имеются специальные каналы, расположенные внутри активной зоны. Канал с пневмопочтой предназначен для проведения 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/см^2·с, а в наиболее мощных — до 10^{14}—10^{15} нейтр/см^2·с. Спектр быстрых нейтронов, образующихся в размножителях и реакторах, показан на рис. 1-12.

Для активационного анализа геологических образцов в СССР разработан специальный ядерный реактор РГ-1 [6.69, 22.102, 27.8] на двуокиси урана, обогащенного на 10% ураном-235. Реактор имеет 11 каналов, два из них оснащены пневмопочтой. Один из этих двух каналов имеет кадмиевый экран и обеспечивает возможность активации надтепловыми нейтронами. Пневмопочта позволяет со скоростью 10 м/с транспортировать образцы весом до 50 г. В тепловых каналах обеспечиваются потоки от $2\cdot10^{10}$ до $9{,}3\cdot10^{10}$ нейтр/см^2·с.

Для размещения ядерного реактора спроектировано специальное помещение [27.8].

Весьма интенсивные потоки нейтронов можно получать в импульсных нейтронных реакторах. Так, созданный в нашей стране импульсный реактор ИГР позволяет получать поток величиной $1\cdot10^{18}$ нейтр/см^2·с [28.28]. Большой интерес представляют также созданные в нашей стране ядерные реакторы типа ИИН, разработанные в Институте атомной энергии АН СССР им. И. В. Курчатова под руководством В. М. Талызина [28.57]. В них в течение импульса (1,4—2 мкс) можно получать потоки до $8\cdot10^{14}$ нейтр/см^2. Активной зоной в них является большой сосуд с жидкостью (уранилом нитрата). При извлечении из активной зоны регулирующих стержней жидкость как бы вскипает и через отверстия уходит за пределы рабочей зоны. Затем вновь стекает в нее. Импульсы в таких реакторах могут повторяться через 0,5—1 ч. Применение таких реакторов особенно выгодно при активации короткоживущих изотопов. Так, при активации на реакторе ИГР изотопов с периодом полураспада 1 с их активность повышается в 35 раз по сравнению с облучением в реакторе с постоянным потоком.

Глава 28

МЕТОДЫ ЯДЕРНОГО АНАЛИЗА

Для анализа геологических объектов в настоящее время применяются методы, основанные на использовании потоков ускоряемых заряженных частиц, потоков гамма-излучения и нейтронов. Арсенал заряженных частиц весьма широк, на их основе разрабатывается большое число ядерных методов анализа. Однако для изучения геологических объектов они начали применяться недавно. Поэтому остановимся на них весьма кратко. На основе использования потоков мощного гамма-излучения в основном реализованы два метода: гамма-нейтронный (ГНМ) и гамма-активационный (ГА), которые рассмотрим раздельно. Наибольшее число методов основано на нейтронном излучении. К ним следует отнести импульсный нейтрон-нейтронный метод (ИННМ) и нейтронные методы, базирующиеся на неупругом рассеянии (НГМ′) и радиационном захвате (НГМ) соответственно быстрых и тепловых нейтронов. Однако наибольшее применение в геологических исследованиях находит метод нейтронного активационного анализа (НА).

При активационном анализе проб геологических объектов некоторые изотопы под действием первичного излучения (нейтронов и т. д.) могут вообще не активироваться (либо иметь малые сечения активации), другие же могут образовывать продукты с неблагоприятными для измерений параметрами (период полураспада или энергия возникающих ядерных излучений). При анализе таких элементов бывает выгодно для активации использовать вторичные частицы, которые способны возникать в самой исследуемой пробе под действием некоторых ядерных реакций или ядер отдачи (протонов, дейтронов и т. д.). При этом должно быть точно известно содержание в пробе ядер элементов, вступающих в данную реакцию или образующих ядра отдачи. Иногда для этих целей в пробу вводят специальные радиаторы — вещества, приводящие к образованию заряженных частиц. Так, для получения протонов отдачи в пробу вводят, например, водородсодержащие вещества (полистирол и др.).

Реализуются также методы, основывающиеся на образовании в анализируемых пробах заряженных частиц. Известно, что имеются определенные трудности непосредственной регистрации этих частиц. Для избежания их в практике ядерного анализа прибегают к такому простому приему. Под действием заряженных частиц могут возникать вторичные изотопы. Исследователь сам может выбирать благоприятные изотопы для введения их в пробу или пользоваться имеющимися в пробе изотопами в известных концентрациях. Методы, созданные на этом принципе, рассматриваются в конце главы.

Все методы, реализуемые на основе излучения мощных ядерных установок, сведены автором для удобства в приложения 2 и 3.

Прежде чем перейти к рассмотрению их, заметим, что при активационных методах анализа в пробах может возникать большое число радиоактивных изотопов, испускающих гамма-кванты различной энергии. При идентификации этих изотопов удобно пользоваться справочниками [25.62, 28.107], в которых излучатели расположены в порядке возрастания энергии и периодов полураспада.

Весьма полезно при проведении ядерных анализов НА и других пользоваться справочниками Р. К. Коха [2.14], В. Кунца и И. Шинтлмейстера [2.15], А. И. Алиева и др. [25.62], Н. Г. Гусева и др. [1.8], Б. С. Джелепова и др. [1.9, 1.10] и сборником [3.20].

§ 1. Анализ на заряженных частицах

Из заряженных частиц для анализа геологических объектов привлекаются электроны, протоны, дейтроны, тритоны, гелионы (He^3), альфа-частицы и другие более тяжелые ионы. Все виды анализа, реализуемые на основе тяжелых заряженных частиц, являются дорогостоящими по сравнению с теми, которые реализуются на основе радиоизотопных источников. Поэтому методы, основанные на заряженных частицах, выгодны лишь тогда, когда другие ядерные методы не дают нужного порога чувствительности, нужной точности и т. д.

При реализации на практике методов, основанных на использовании ускоряемых заряженных частиц, очень часто приходится сталкиваться с разогревом мишеней (анализируемых проб). Это может приводить к разрушению мишеней или частичной потере вещества. Поэтому для отвода тепла от пробы анализируемое вещество весьма часто приходится наносить на металлические подложки с принудительным охлаждением проточной водой и т. д. Тугоплавкие образцы можно анализировать без охлаждения.

1. **Анализ на тяжелых ионах.** Ускорение тяжелых ионов осуществляется обычно в циклотронах (см. п. 3 § 2 гл. 27). Для анализа вещества при этом могут быть использованы методы, основанные на рассеянии ионов от облучаемой поверхности образца (ион-ионные методы ИИМ), на регистрации вторичных атомных частиц с меньшими атомными номерами, гамма-квантов и т. д., возникающих в различных ядерных реакциях (ионный альфа-метод ИАМ и др.), и методы ионного активационного анализа — ИА.

Ионы взаимодействуют с самым поверхностным слоем облучаемого вещества толщиной в несколько слоев атомов или микрон. В работе [28.24] приводятся соответствующие соотношения для расчета глубин проникновения ионов в вещество. В связи с малой глубинностью этих методов ведение анализа на циклотронах и т. п. связано с целым рядом особенностей. Изучаемые пробы требуют особой подготовки. Проба должна наноситься на специальную мишень, которая в последующем должна вводиться внутрь ускорителя (в специальную камеру) под пучок бомбардируемых ионов [28.77].

Возможности ионных методов проиллюстрируем на некоторых примерах.

Методика, основанная на рассеянии ионов. Исследованиями по разработке этих методик занимались сотрудники лаборатории ядерных реакций ОИЯИ [28.23, 28.77].

Разрешение и чувствительность ИИМ зависят от заряда и массы бомбардирующей частицы и ядра рассеивателя, чувствительность анализа — еще и от энергии бомбардирующих частиц, интенсивности их потока и разрешения по массе анализируемых ядер вещества.

Рассеяние частиц на атомах вещества подчиняется закону (14-1), (14-2). Применительно к рассматриваемой задаче необходимо вместо массы альфа-частицы $m_\alpha=4$ взять массу иона m, т. е. величины 4 и 16 в формулах (14-1) и (14-2) заменить на m и m^2.

Наилучшее разрешение по массе изучаемого вещества A приходится на диапазон $0{,}1<m'<0{,}6$, где $m'=m/A$ [28.77].

Разрешающая способность ИИМ зависит от разрешения пучка ионов по энергии ∂E_n и от разрешения детектора ∂E_g

$$\partial E_\Sigma = [(\delta E_n)^2+(\delta E_g)^2]^{1/2}.$$

Здесь ∂E_Σ — суммарная разрешающая способность метода.

Разрешающая способность детектора зависит от его типа и определяется, как отмечалось, отношением ширины спектральной линии на ее полувысоте к энергии этой линии. На практике эта величина оценивается

экспериментально. Разрешающая способность пучка ионов определяется из соотношения [28.23]

$$\partial E_n = 4m/(A^2 - m^2).$$

Эта формула определяет изменение величины энергии, соответствующее изменению массы ядра рассеивателя на единицу. Зависимости этой величины и величины E/E_0 от атомного номера рассеивателя для некоторых ионов показаны на рис. 28-1 [28.23]. При измерениях по ИИМ наиболее перспективно использовать тяжелые ионы. При этом можно вести не только элементный, но и изотопный анализ состава вещества, поскольку по ИИМ можно разрешать ядра, отличающиеся по массе на единицу.

Современная ядерная техника обеспечивает возможность разрешения с точностью $\delta E_\Sigma = 0{,}5-1\%$ [28.23].

Экспериментальные исследования проводились на циклотроне У-150 с ионами углерода-12, кислорода-16 и хлора-35. Ионы углерода-12 ускорялись до 35 МэВ с разрешением $\delta E_n \approx 3{,}5\%$ при токе 0,1 мкА, кислорода-16 — до 15 МэВ при $\delta E_n = 2\%$ и токе 0,05 мкА и хлора-35 — до 27 МэВ при $\delta E_n = 2{,}5\%$ и токе 0,05 мкА [28.77]. Регистрация рассеянных ионов осуществлялась при помощи полупроводникового поверхностно-барьерного кремниевого счетчика с рабочей площадью 1,0 см^2 и энергетическим разрешением $\Delta E_g = 30$ кэВ.

Спектр рассеянных ионов кислорода-16 на мишени из пробы полиметаллической руды показан на рис. 28-2 [28.77]. Четко выделяются ионы, рассеянные на целом ряде элементов. В работе [28.77] показано, что порог чувствительности ИИМ для элементов средины и конца периодической системы оценивается примерно в 0,01%, относительная погрешность — 10—15%, время анализа 5—10 мин. Достоинством ИИМ является возможность полного анализа многокомпонентных сред.

Тяжелые элементы ($A \simeq 200$) в легкой вмещающей среде (кремнезем и т. п.) при бомбардировке ионами углерода-12 можно определять с порогом чувствительности 10^{-1}—10^{-3}% при токе 1 мкА и времени измерения 5 мин [28.23].

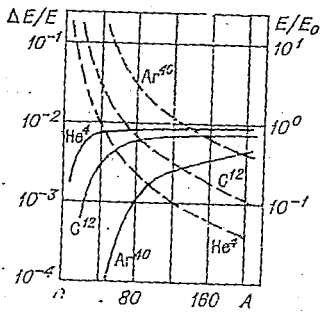


Рис. 28-1. Зависимость энергии ионов, рассеянных на угол 180°, E/E_0 (сплошные кривые) и зависимость разрешения пучка ионов (пунктирные кривые) от атомного номера рассеивателя.

Методика ионного активационного анализа. Физические основы рассматриваемого и других методов, базирующихся на заряженных частицах, описаны в работе [28.27], а общие вопросы всех активационных методов — в гл. 25.

В работе [28.77] показаны возможности ИА на примере определения свинца в пробах. Исследования велись на описанном выше циклотроне при облучении проб потоком четырехзарядных ионов углерода-12, ускоряемых до энергии 80 МэВ. Под действием этих ионов в результате реакции на свинце образовывался радон-212 ($T = 23$ мин, $E_\alpha = 6{,}26$ МэВ). Для регистрации наведенной альфа-активности применялся полупроводниковый альфа-спектрометр с разрешением около 30 кэВ для альфа-линии тория-С (см. рис. 1-5).

Результаты определения свинца в пробах полиметаллических руд показаны на рис. 28-3 [28.77]. Как видим, эта зависимость является линейной для всего изучаемого диапазона.

Под действием ионов ускоряемых частиц углерода-12 радиоактивные альфа-изотопы могут возникать на ядрах и других химических элементов с атомными номерами свыше 72. Однако образующиеся

при этом альфа-изотопы имеют свой определенный период полураспада и свойственные им энергии излучения, что позволяет выявлять их раздельно в совместных пробах. При облучении ионами углерода-12 порог чувствительности к свинцу оценивается равным 10^{-4}% при относительной точности 5—10%. При токе ионов 1—2 мкА время анализа одной пробы составляет $\sim$ 1,5 ч.

2. Анализ на альфа-частицах. На основе ускоряемых ядер гелия-4 (альфа-частицах) можно осуществлять те же методы, которые реализуются на основе ампульных альфа-источников (см. гл. 14). Ускоряются

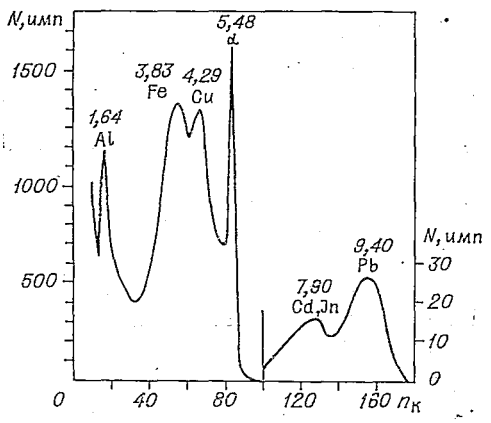


Рис. 28-2. Спектр рассеянных ионов кислорода-16 на мишени, изготовленной из пробы полиметаллической руды.

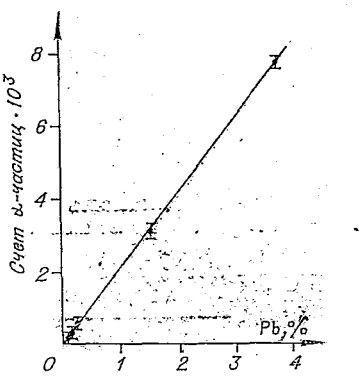


Рис. 28-3. Зависимость регистрируемой скорости счета альфа-частиц от содержания в пробах свинца.

альфа-частицы с помощью установок Ван-де-Граафа, циклотронов и т. п. Ниже рассмотрим методы, реализуемые на основе использования мощных пучков альфа-излучения.

Альфа-альфа-метод. Физические основы этого метода рассмотрены в § 1 гл. 14.

Разработкой ААМ с помощью ускоряемых альфа-частиц занимались М. Пейсах и Д. Пуль [28.100]. Альфа-частицы ускорялись до 5,5 МэВ с помощью генератора Ван-де-Граафа (см. п. 1 § 1 гл. 27). Спектр рассеянных альфа-частиц изучался с помощью полупроводниковых детекторов, имеющих энергетическое разрешение от 30 до 50 кэВ.

Зависимость энергии рассеянных альфа-частиц от атомного номера рассеивателей показана на рис. 28-4 [28.100]. Точки с разбросом отвечают экспериментальным данным, а сплошная кривая — расчету. Из рисунка видно, что с помощью ААМ гораздо легче разрешать легкие элементы, чем тяжелые.

С целью выяснения возможностей ААМ анализу были подвергнуты следующие образцы: кварц, флюорит, барит и галенит. Результаты измерений показаны на рис. 28-5. Для каждого элемента в соединении характерно наличие ступеней (см. также § 1 гл. 14). Высота ступеней соответствует содержанию элемента. Элементы с близкими атомными номерами, такие как медь и цинк, на графике не различаются — с помощью ААМ можно определять лишь их суммарную концентрацию в галените. Химическим анализом эти примеси в галените зафиксированы не были.

Реакция (α, n) в принципе может быть использована для реализации альфа-нейтронного метода (АНМ), который особенно эффективен для определения бериллия и бора по реакциям

$$Be^9(\alpha, n\gamma)C^{12} \text{ и } B^{10}(\alpha, n)\ N^{13}.$$

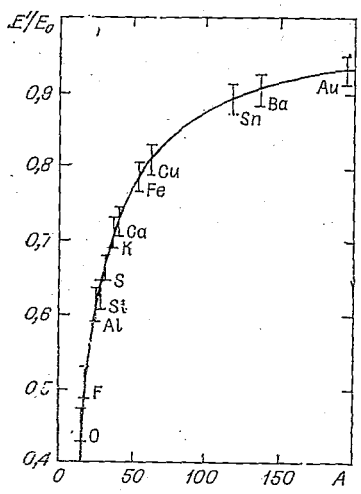


Рис. 28-4. Зависимость энергии альфа-частиц (E' — в относительных единицах, E_0=2,5 МэВ), рассеянных на угол 135°, от атомного веса облучаемой среды.

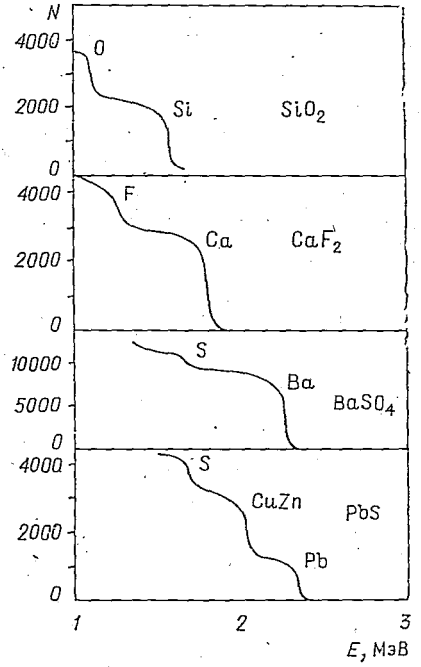


Рис. 28-5. Зависимость регистрируемой скорости счета от энергии рассеянных альфа-частиц (E_0=2,5 МэВ).

Альфа-гамма-метод. Гамма-кванты под действием альфа-частиц могут возникать в целом ряде процессов (см. § 3 гл. 14). АГМ на ускоренных альфа-частицах применялся для определения бериллия и кислорода-18. При облучении ядер этих элементов гамма-кванты образуются в реакции $(\alpha, n\gamma)$. Гамма-кванты, возникающие при этом, имеют соответственно энергию 4,3 и 0,35 МэВ.

Для определения бериллия (см. п. 2 § 2 гл. 14 и § 1 гл. 26) использовались альфа-частицы, ускоренные до 2 МэВ при помощи генератора Ван-де-Граафа (см. п. 1 § 1 гл. 27). Спектр гамма-излучения измерялся при помощи сцинтилляционного счетчика с кристаллом йодистого натрия размерами 50×50 мм. При токе ускоряемых альфа-частиц 20 мкА был получен порог чувствительности 0,01% бериллия [14.3]. Более высокие пороги чувствительности получаются при измерениях по ГНМ с помощью ампульных источников (см. § 1 гл. 26).

Для определения кислорода-18 (сведения о нем приводятся ниже) использовались альфа-частицы, ускоренные до 4,6 МэВ на циклотроне (см. п. 3 § 2 гл. 27). При токе 0,01 мкА и времени измерения 5—10 мин на анализаторе со сцинтилляционным счетчиком был получен порог чувствительности $4 \cdot 10^{-3}$% в навесках 50 мкг [28.33].

Альфа-активационный анализ. Под действием альфа-частиц радиоактивные изотопы могут возникать в реакциях (α, n), (α, p), (α, γ) и др. Каждая ядерная реакция имеет определенный порог (табл. 28-1). Поэтому, варьируя энергией ускоренных частиц, можно определять те или иные химические элементы и их изотопы в исследуемых средах.

К настоящему времени исследования по АА проведены лишь на некоторых химических элементах и их изотопах: боре, углероде, кислороде, меди.

Некоторые сведения о *боре* рассматриваются в п. 2 § 2 гл. 14. Для определения бора на ускоренных альфа-частицах по АА использовалась реакция $B^{10}(\alpha, n)\ N^{13}$ (см. табл. 28-1). Активация проб проводилась альфа-частицами, ускоренными до 2 МэВ с помощью генератора Ван-

Таблица 28-1

Характеристика продуктов некоторых ядерных реакций, возникающих под действием альфа-частиц

Реакция	Порог реакции, МэВ	Период полураспада образующегося изотопа T	Энергия	
			бета-частиц и позитронов (+), МэВ	гамма-квантов, МэВ
$Be^9(\alpha, 2n)\ C^{11}$	20	20,74 мин	0,968(+)	0,51
$B^{10}(\alpha, n)N^{13}$	Экзотермич.	9,965 мин	1,185(+)	0,51
$C^{12}(\alpha, \alpha n)C^{11}$	24,9	20,74 мин	0,968(+)	0,51
$N^{14}(\alpha, \gamma)F^{18}$	Экзотермич.	1,87 мин	0,644(+)	0,51
$O^{16}(\alpha, d)F^{18}$	20,4	1,87 ч	0,644(+)	0,51
$O^{16}(\alpha, pn)F^{18}$	23,3	1,87 ч	0,644(+)	0,51
$O^{16}(\alpha, 2n)Ne^{18}$	29,4	1,6 с	3,2(+)	0,51
$F^{19}(\alpha, dn)F^{18}$		1,87 ч	0,644(+)	0,51
$Na^{23}(\alpha, n)Al^{26}$	3,4	6,68 с	3,21(+)	0,51
$Mg^{25}(\alpha, p)\ Al^{28}$	1,39	2,31 мин	2,865	1,79
$Al^{27}(\alpha, n)\ P^{30}$	3,36	2,56 мин	3,24(+)	0,51
$K^{39}(\alpha, \gamma)Sc^{43}$		3,8 ч	1,2(+, 70%);	0,51
			0,83(+, 18%)	0,51
$K^{41}(\alpha, n)\ Sc^{44}$		3,9 ч	1,47(+)	0,51(186%);
$Cu^{63}(\alpha, n)Ca^{64}$		9,45 ч	4,14(+, 57,5%)	1,16(100%);
				2,75(21,6%);
				1,04(30%);
				0,83(22%);
				0,51(128%)
				и др.

де-Граафа (см п. 1 § 1 гл. 27). При токе альфа-частиц 0,1 мА был достигнут порог чувствительности 0,1% бора [14.3]. Более высокий порог чувствительности получается при анализе проб по ННМ-т (см. § 1 гл. 23). Однако присутствие в пробах других поглощающих элементов мешает определению бора по ННМ-т. При измерениях по АА элементы, сильно поглощающие тепловые нейтроны, при этом не мешают определению бора.

Среднее содержание *углерода* (кларк) в горных породах по весу равно 0,1%. Природный углерод состоит из двух изотопов с массовыми числами 12(98,892%) и 13 (1,108%). Помимо этих стабильных изотопов в природе встречается также радиоактивный изотоп углерод-C^{14} (см. табл. 1-3). Для определения углерода-12 может быть использована реакция $(\alpha, \alpha n)$ (см. табл. 28-1). В работе [14.3] показано, что для определения углерода-12 использовались альфа-частицы, ускоренные до 44 МэВ на циклотроне (см. п. 3 § 2 гл. 27). При токе альфа-частиц 10 мкА/см^2 достижим порог чувствительности 10^{-6}—10^{-7}% (при анализе полупроводниковых материалов). Мешающими при этом могут быть реакции на бериллии и фторе (см. табл. 28-1). Устранить их влияние можно путем варьирования энергии ускоряемых альфа-частиц.

Среднее содержание *кислорода* в горных породах земной коры по весу равно 47,2%, а вообще может варьировать примерно от 1 до 53%. Природный кислород состоит из трех стабильных изотопов с массовыми числами 16 (99,759%); 17 (0,037%) и 18 (0,204%).

Под действием альфа-частиц на ядрах кислорода-16 может происходить ряд реакций (см. табл. 28-1). Используя их [14.3] и ускоряя альфа-частицы в циклотроне до 40—44 МэВ при токах 5 и 10 мкА, содержание кислорода в некоторых материалах можно определять с порогом чувст-

вительности 10^{-6}—10^{-7}%. Мешающее влияние на результаты определения кислорода могут оказывать реакции, происходящие на ядрах азота и фтора (см. табл. 28-1). Оно может быть устранено за счет изменения энергии альфа-частиц.

Сведения о *меди* см. в п. 2 § 1, п. 1 § 4 гл. 24 и п. 8 § 2 гл. 25. Определение меди в серебре по АА велось еще в 1938 г. при ускорении альфа-частиц до 16 МэВ по реакции (α, n) (см. табл. 28-1). При использовании химического разделения в то время был достигнут порог чувствительности 0,01% [14.3]. Применяя современные ускорители и полупроводниковые детекторы, этот порог можно существенно понизить.

В работах [28.111, 28.112] показано, что с помощью АА велось также определение изотопов свинец-204 и 208 в метеоритах.

3. **Анализ на гелионах (He^3).** Для ускорения гелионов используются циклотроны (см. п. 3 § 2 гл. 27) и линейные ускорители (п. 2 § 1 гл. 27). На основе использования излучения этих частиц к настоящему времени разработана пока лишь методика гелионного активационного анализа (He^3А). Активируемые ядра атомов более интенсивно возбуждаются под действием гелионов, чем альфа-частиц. Значительное число реакций при этом протекает при более низких энергиях, чем при активации альфа-частицами. Так, для активации элементов легче кальция достаточно ускорять гелионы до 8 МэВ. Заметим, что аналогичные реакции на этих элементах под действием альфа-частиц идут при энергии не менее 20 МэВ.

Под действием гелионов могут возникать следующие реакции: (He^3, n); (He^3, p); $(He^3, 2n)$; $(He^3, 2\alpha)$, (He^3, α); (He^3, t) и др. Варьируя энергией гелионов, можно возбуждать те или иные ядра атомов, содержащихся в пробе.

О методе He^3А см. работы [14.3, 28.96, 28.104, 28.111].

4. **Анализ на тритонах.** Тритонное излучение для ядерного анализа только что начинает использоваться. К настоящему времени для получения тритонов осуществлялась лишь реакция $Li^6(n, \alpha)H^3$, которую применительно к данному случаю удобнее записать в несколько ином виде — $Li^6(n, t)He^4$. В связи с этим для ведения анализа на тритонах использовались смеси литийсодержащих веществ (радиаторов) с анализируемой пробой. Такой препарат помещали в ядерный реактор, где под действием тритонов происходила соответствующая реакция в пробе. Таким путем, в частности, определяли кислород в некоторых веществах. Под действием тритонов при этом происходит следующая реакция: $O^{16}(t, n)F^{18}$ [14.3]. Изотоп фтора-18 имеет период полураспада 1,87 ч и является позитронным излучателем ($\varepsilon_{\beta+}$=0,644 МэВ). Порог чувствительности тритонного активационного анализа (ТА) зависит от потока нейтронов в реакторе, содержания лития-6 в препарате и ядерных свойств анализируемого элемента.

Кислород может определяться также по реакции $O^{18}(t, \alpha)N^{17}$. Азот-17 распадается с испусканием нейтронов (см. п. 4 следующего параграфа). Разновидность ТА, основанную на этой реакции, следует назвать тритонным активационным анализом на запаздывающих нейтронах (ТАн).

Тритонные методы могут быть также реализованы при ускорении частиц в ускорителях.

5. **Анализ на дейтронах.** Под действием дейтронов могут протекать реакции (d, p), (d, n), (d, α), $(d, 2n)$, (d, t) и др. Эти реакции экзоэнергетичны и происходят при сравнительно низких энергиях дейтронов.

Методы с регистрацией вторичных частиц. К настоящему времени реализованы лишь методы, основанные на реакциях (d, p) и (d, n). Реакция (d, p) обладает наиболее низким порогом из всех вышеприведенных. При бомбардировке атомов внутрь ядра проникает

лишь нейтрон, а протон срывается и отталкивается ядерными силами ядра, захватившего нейтрон.

Дейтрон-протонный метод (ДПМ), основанный на реакции (d, p), использовался для определения углерода, кислорода и азота по реакциям $C^{12}(d, p)\ C^{13}$, $O^{16}(d, p)\ O^{17}$ и $N^{14}(d, p)\ N^{15}$ [14.3]. Дейтроны ускорялись до 1,4 МэВ. Протоны регистрировались сцинтилляционным счетчиком с кристаллом йодистого натрия толщиной 1,25 мм. Рассеянные дейтроны поглощались алюминиевой фольгой.

Кислород-17, возникающий в реакции $O^{16}(d, p)O^{17}$, находится в возбужденном состоянии и, переходя в стабильное, испускает гамма-кванты с энергией 0,875 МэВ. Следовательно, помимо ДПМ для определения кислорода можно использовать и дейтронный гамма-метод (ДГМ).

На основе реакции (d, n) реализован дейтрон-нейтронный метод (ДНМ). В частности, И. П. Бутлером [28.102] он использовался для определения дейтерия по реакции $H^2(d, n)He^3$. Дейтроны при этом ускорялись до 0,2—1,8 МэВ, ток пучка дейтронов составлял 0,5—3 мкА. При регистрации нейтронов с помощью пропорционального борного счетчика, окруженного замедлителем (плексиглас $\sim$5 см и т. д.), в течение нескольких минут достигнут порог чувствительности $5 \cdot 10^{-4}$% дейтерия.

Реакция $Be^9(d, n)\ B^{10}$ может быть использована для определения бериллия.

Дейтронный активационный анализ. Сравнительно большое применение дейтроны получили в ДА. Под их действием могут происходить реакции на целом ряде легких элементов (табл. 28-2). Р. Ф. Сиппелом и Д. Е. Гловером [28.106, 14.3] они использовались для определения некоторых из перечисленных в таблице элементов в осадочных горных породах. Дейтроны ускорялись до 2 МэВ с помощью генератора Ван-де-Граафа (см. п. 1 § 1 гл. 27) с током пучка 0,1 мА ($6{,}3 \cdot 10^{14}$ ион/с). Исследуемые образцы измельчались до 0,044 мм, смешивались с нейтральным связующим материалом и прессовались в таблетки диаметром 15 мм и высотой 1,8 мм. Наведенная активность

Таблица 28-2

Ядерные реакции, протекающие под действием дейтронов с энергией 2 МэВ

Реакция	Период полураспада T	Энергия, МэВ	
		бета-частиц или позитронов(+)	гамма-квантов
$B^{10}(d, n)C^{11}$	20,74 мин	0,968(+)	0,51
$C^{12}(d, n)N^{13}$	10,08 мин	1,185(+)	0,51
$N^{14}(d, n)O^{15}$	2,02 мин	1,733(+)	0,51
$O^{16}(d, n)F^{17}$	66 с	1,750(+)	0,51
$Na^{23}(d, p)Na^{24}$	15,0 ч	1,4	2,76(100%); 1,57(100%)
$Mg^{26}(d, p)Mg^{27}$	9,51 мин	1,75(58%); 1,59(42%)	1,015(42%); 0,834(58%)
$Al^{27}(d, n)Al^{28}$	2,31 мин	2,865	1,79
$Si^{29}(d, n)P^{30}$	2,56 мин	3,24(+)	0,51
$Si^{30}(d, p)Si^{31}$	2,62 ч	1,48	
$P^{31}(d, p)P^{32}$	14,5 дн.	1,711	
$Ca^{40}(d, \alpha)K^{38}$	7,7 мин	2,68(+)	2,16(100%); 0,51(200%)
$Ca^{48}(d, p)Ca^{49}$	8,75 мин	2,05(90%) 1,0(10%)	4,05(10%); 3,1(90%)

регистрировалась с помощью либо торцовых бета-счетчиков, либо сцинтилляционных.

Для определения углерода дейтроны ускорялись до 1,75 МэВ. При токе пучка 4 мкА и времени измерения 1 мин был достигнут порог чувствительности 0,005%. Измерение аннигиляционного гамма-излучения осуществлялось с помощью двух кристаллов йодистого натрия размерами 6,25×6,25 см с фотоумножителями, включенными в схему отбора совпадений.

Для определения натрия использовался интегральный дискриминатор с порогом дискриминации 1,5 МэВ при измерении в основном гамма-квантов с энергией 2,76 МэВ. От излучения алюминия избавлялись соответствующей выдержкой образцов. При длительности измерений 5 мин был достигнут порог чувствительности 0,05%.

Таблица 28-3

Сопоставление дейтронного активационного анализа с химическим

Элемент	Глинистый известняк		Доломит	
	химанализ, %	ДА, %	химанализ, %	ДА, %
Углерод	12,79	12,77	9,76	9,64
Натрий	0,29	0,30	0,060	0,062
Магний	1,31	1,22	12,89	12,46
Алюминий	2,24	2,26	0,036	0,059
Фосфор	0,065	0,063	0,0013	—

Раздельное определение алюминия и натрия осуществлялось при измерении в два этапа — сразу же после облучения и спустя некоторое время после распада алюминия. При токе пучка 25 мкА и длительности измерения алюминия 30 с был достигнут порог чувствительности 0,02%.

Для определения фосфора образцы выдерживались в течение 7—10 дней после облучения. При этом практически все мешающие изотопы распадались (кроме серы-35, имевшей $T=87{,}1$ дня, $E_\beta=0{,}167$ МэВ). Для исключения влияния этого излучения окно торцового счетчика защищалось алюминиевой фольгой толщиной 68,3 мг/см^2. При измерениях наведенной активности в течение 5 мин был достигнут порог чувствительности около 0,01%.

Результаты сопоставления метода ДА с химическим показаны в табл. 28-3 [28.106].

В работе [14.3] показано также, что ДА использовался для определения бора. При радиохимическом выделении углерода-11 был достигнут порог чувствительности $n\cdot10^{-4}$% бора.

Ю. М. Столбовым [28.63] рассматриваемый метод анализа использовался для определения соотношения изотопов кальция в горных породах. У кальция, как известно, имеется шесть стабильных изотопов с массой 40(96,97%); 42(0,64%); 43(0,145%); 44(2,06%); 46(0,0033%) и 48(0,185%).

Под действием дейтронов, ускоряемых с помощью циклотрона (см. п. 3 § 2 гл. 27) до 10—13 МэВ, устойчивые радиоактивные изотопы возникают на изотопах кальций-40 и 48 (см. табл. 28-2). Изотопная константа этих изотопов

$$A' = \frac{A(\mathrm{Ca}^{48})}{A(\mathrm{Ca}^{40})} = 1{,}20.$$

Масс-спектрометрическим методом эту величину можно измерять с точностью ±0,8%. С помощью ДА изотопное соотношение удалось определить с точностью до ±0,38% при однократных измерениях и ±0,19 — при четырехкратных. Нестабильность гамма-спектрометра устранялась с помощью специальной механической установки [28.48]. Точность анализа при этом удалось повысить до ±0,03 [28.63].

Исследования велись по методике относительных сопоставлений. За стандарт было принято отношение активностей указанных изотопов

кальция во флюорите (CaF_2) — p_{01}. При облучении исследуемых образцов и стандарта оценивалась величина

$$m_p = \left(\frac{p_{0i}}{p_{01}} - 1\right) 100\%.$$

В работе [28.63] показано, что величина m_p для магматических и гидротермальных пород меняется в пределах от +0,53 до +1,3%. Это соответствует повышенному содержанию в этих породах кальция-48 по сравнению со стандартом. Для пород осадочно-органического происхождения величина m_p меняется в весьма широких пределах: от —0,56 до +1,13%.

6. **Анализ на протонах.** Под действием протонов возникают ядерные реакции следующих типов: (p, γ), (p, n), $(p, 2n)$, (p, d), (p, α) и др. Помимо этого, протоны, как и другие заряженные частицы, могут испытывать упругие и неупругие рассеяния. На основе этих реакций могут быть реализованы и методы, базирующиеся на регистрации вторичных ядерных частиц (протонный гамма-метод — ПГМ, протон-нейтронный метод — ПНМ и др.), и протон-активационный метод (ПА). При регистрации рассеянных протонов может быть также реализован протон-протонный метод (ППМ).

Протон-протонный метод. При облучении проб потоком протонов часть из них может испытывать упругое и неупругое рассеяние (см. § 1 гл. 2). Каждому типу атомов свойственны величины энергий рассеянных протонов. Регистрируя их, можно определять содержание в пробе некоторых химических элементов. Применение ППМ для анализа вещества предложено в работе [28.15]. В частности, в ней определялось содержание в алюминии примесей некоторых элементов. Протоны ускорялись в циклотроне (см. п. 3 § 2 гл. 27) до 6,6 МэВ. Спектр рассеянных протонов измерялся сцинтилляционным счетчиком. В качестве люминофора в этом счетчике использовался тонкий кристалл йодистого цезия, активированного таллием. Толщина пробы выбиралась в несколько миллиграмм на 1 см^2.

В процессе проведения анализа были обнаружены в алюминии примеси следующих элементов: кремния, натрия, марганца и кальция. Причем в [28.15] отмечается, что содержание в алюминии 1% кремния весьма легко определялось. Естественно, рассматриваемый метод вполне может найти применение в ядерно-геофизических исследованиях, в частности, для определения в пробах породообразующих и других элементов. Для измерения спектра рассеянных протонов весьма перспективно использовать полупроводниковые счетчики (см. § 3 гл. 5).

Протон-нейтронный метод. Р. Ф. Сиппелом и Д. Е. Гловером [28.106] для реализации метода ПНМ были использованы протоны, ускоряемые с помощью генератора Ван-де-Граафа (см. п. 1 § 1 гл. 27) до 2 МэВ.

ПНМ применялся для определения лития. На этом элементе под действием протонов идет реакция $Li^7(p, n)Be^7$. Эта реакция может быть использована для определения не только лития, но и его изотопа — лития-7. Порог этой реакции 1,83 МэВ. Определению лития по ней могут мешать изотопы — хлор-37 (24,6%), калий-41 (6,91%), кальций-48 (0,185%) и марганец-55 (100%), имеющие более низкий порог реакции (p, n). Однако в связи с малым сечением этой реакции на указанных изотопах выходом нейтронов из них можно пренебречь. Об этом, в частности, можно судить по данным, приведенным в табл. 28-4 [28.106].

Регистрация нейтронов осуществлялась с помощью пропорционального борного счетчика, расположенного в замедлителе из люцита толщиной 5 см. Градуировочный график для диапазона концентраций лития 0,02—0,9% носил линейный характер. Скорость счета менялась примерно в 25 раз.

Протонный гамма-метод. Разработкой ПГМ занимались Р. Ф. Сиппел и Д. Е. Гловер [28.106] на протонах с энергией 2 МэВ, Л. П. Старчик и др. [28.60, 28.16, 28.17] на протонах с энергией 1,2 МэВ, а также С. С. Васильев и др. [28.15].

Гамма-кванты, возникающие в реакциях на протонах, регистрировались сцинтилляционными счетчиками с кристаллами йодистого натрия размерами 50×50 мм [28.106] и 80×80 мм [28.60].

ПГМ указанными авторами был применен для определения элементов, приведенных в табл. 28-5. При содержании в пробе нескольких элементов взаимодействия протонов с их ядрами могут приводить к образованию разнообразных гамма-квантов. Элементы при этом могут разделяться путем облучения проб потоками протонов разной энергии. При построении функции $N=f(E_p)$ на графиках получаются характерные ступеньки, которые можно использовать при анализе сложных проб. Эта методика измерений предложена Л. П. Старчиком и подробно описана в работе [28.60]. Ниже рассмотрим возможности ПГМ при анализе элементов в пробах (см. табл. 28-5).

Некоторые сведения о *литии* и его анализе приводятся в п. 2 § 3 гл. 14, § 2 гл. 21, § 2 гл. 23 и выше.

При измерениях по ПГМ в пробах, не содержащих бора, и измерении гамма-квантов в диапазоне 14,0—20,0 МэВ достигнут порог чувстви-

Таблица 28-4

Выход числа нейтронов на 1% содержания элемента для протонов с энергией 2 МэВ при токе 100 мкА

Элемент	Литий	Натрий	Хлор	Кальций	Марганец
Выход нейтронов на 1% элемента, имп	27940	100	100	2	64
Число нейтронов, %	100	0,36	0,36	0,007	0,23

тельности $1\cdot10^{-4}$% при токе пучка протонов ~1 мкА и энергии 990 кэВ. Присутствие бора в пробах вызывает жесткое излучение с энергией 16,1 МэВ. Для исключения его влияния гамма-излучения, возникающие при радиационном захвате протонов, необходимо регистрировать в более узком диапазоне — 16,6—20,0 МэВ. Порог чувствительности при этом уменьшается до $3\cdot10^{-4}$%, а в случае присутствия в пробе высоких концентраций бора — до 0,05% [28.60]. Исключить влияние бора можно также путем регистрации совпадения гамма-квантов с энергией 14,74 и 2,9 МэВ или антисовпадения гамма-квантов с энергией 17,64 и 14,74 МэВ [28.60].

Относительная точность анализа не превышала 10%.

Некоторые сведения о *бериллии* и его анализе рассматриваются в п. 2 § 2 гл. 14, п. 3 § 3 гл. 14, § 1 гл. 26, а также п. 2 этого параграфа.

Определению бериллия по ПГМ мешают литий, бор, фтор и алюминий, имеющие жесткое излучение. При рассеянии это излучение снижает свою энергию и попадает в область энергий 7,5 МэВ. В связи с этим для определения бериллия необходимо использовать многоканальный анализатор и измерять спектр в диапазоне следующих энергий: 7,5 МэВ (бериллий), 11 МэВ (алюминий), 12 МэВ (фтор и бор), 16 МэВ (бор) и 17,64 МэВ (литий). Раздельное определение этих элементов можно осуществить, решив соответствующую систему уравнений.

При отсутствии мешающих элементов в работе [28.60] достигнут порог чувствительности в пределах $(6—7,5)\cdot10^{-3}$%. Протоны при этом ускорялись до 1,1 МэВ.

Для определения *бора* в пробах на заряженных частицах, как уже отмечалось, может применяться метод АА (см. п. 2 этого параграфа).

При измерениях бора по ПГМ протоны достаточно ускорять до первого резонанса (163 кэВ, см. табл. 28-5). Из других элементов при этом мешающее излучение высвечиваться не будет. Однако выход гамма-квантов из пробы в этом случае невысок. Наибольший выход гамма-квантов наблюдается при энергии протонов в интервале $1{,}0 \leqslant E_p \leqslant 1{,}2$ МэВ. При энергии протонов около 1 МэВ, их токе 1 мкА и регистрации гамма-квантов в интервале энергий 3—5 МэВ и 12—17 МэВ достигнуты пороги чувствительности 0,065 и 0,015% соответственно, а при регистрации гамма-квантов в диапазонах 10,0—12,7 МэВ и 14,3—17,0 МэВ — 0,0033 и 0,01% соответственно [28.60]. В случае присутствия в пробах значительных количеств лития гамма-излучение необходимо измерять в двух диапазонах: 12 МэВ (первичное излучение углерода-12 и рассеянное излучение бериллия-8) и 17,6 МэВ (первичное излучение бериллия-8). Содержания бора и лития при этом можно определять из системы двух уравнений. Помимо этого, содержание бора в сложных пробах может быть определено по счету совпадений гамма-квантов с энергией 12,14 и 4,43 МэВ [28.60].

По поводу определения *углерода* другими методами см. п. 2 этого параграфа.

Таблица 28-5

Некоторые сведения о ядерных взаимодействиях

Ядерные реакции	Энергия резонанса, кэВ	Выход реакции на 1 протон (или сечение, см²/г)	Энергия гамма-квантов, МэВ
$Li^7(p, \gamma)Be^8$	441	$\sim 1{,}9 \cdot 10^{-8}$	17,64(67%); 14,74(33%);
	850	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$	2,9(33%)
	1030		
$Be^9(p, \gamma)B^{10}$	330	$(1{,}23 \cdot 10^{-5})$	7,5
	991		7,5
	1084		7,5
$B^{11}(p, \gamma)C^{12}$	163	$(8{,}6 \cdot 10^{-6})$	16,1; 12,1; 4,43
	675	$(3{,}3 \cdot 10^{-6})$	
$C^{12}(p, \gamma)N^{13}$	457	$(6{,}52 \cdot 10^{-6})$	2,37
$C^{13}(p, \gamma)N^{14}$	554	$(6{,}66 \cdot 10^{-5})$	2,31
	1160	$(2{,}59 \cdot 10^{-5})$	
	1250	$(2{,}87 \cdot 10^{-6})$	
$F^{19}(p, \alpha\gamma)O^{16}$	—	—	12,0; 8,87; 7,12; 6,92; 6,13; 1,63
$Na^{23}(p, \alpha\gamma)Ne^{20}$	1008	—	1,63
	1089	—	
	1161		
$Na^{23}(p, \gamma)Mg^{24}$	0,375	—	11—13
$Mg^{24}(p, p\gamma)Mg^{24}$	—	—	1,37
$Mg^{25}(p, \gamma)Al^{26}$	0,310	—	7,95 и ниже
$Mg^{26}(p, \gamma)Al^{27}$	0,314	—	11,07 и ниже
$Al^{27}(p, \gamma)Si^{28}$	0,225	—	12,3; 11; 1,78
$S^{32}(p, \gamma)Cl^{33}$	579,8 587,4	—	
$S^{33}(p, \gamma)Cl^{34}$	—	—	5,8
$S^{34}(p, \gamma)Cl^{35}$	—	—	

Для определения углерода ПГМ в несложных средах (графит и т. д.) энергию протонов рационально выбирать в интервале 700—1050 кэВ и регистрировать гамма-кванты в интервале энергий 1,9—2,6 МэВ. Порог чувствительности при этом оценивается равным 0,05% [28.60]. Анализ сложных сред целесообразно вести по методике ПА (см. ниже).

Некоторые сведения о *фторе* приводятся в п. 2 § 2 гл. 14, п. 3 § 3 гл. 14 и п. 2 § 2. гл. 25.

При определении фтора по ПГМ оптимальную энергию протонов необходимо выбирать в диапазоне 1,05—1,08 МэВ. Для протонов с энергией 0,55 МэВ (ток 1,0 мкА) и 1,05 МэВ (ток 0,1 мкА) и регистрации гамма-квантов в диапазоне 5,0—7,5 МэВ получены соответственно пороги чувствительности $4 \cdot 10^{-4}$ и $9 \cdot 10^{-5}$% [28.60]. При регистрации гамма-квантов в диапазоне энергий 10,5—12,5 МэВ и энергии протонов 1,05 МэВ (ток 0,1 мкА) порог чувствительности понижался до $3 \cdot 10^{-3}$%.

При наличии в пробах лития, бора, натрия и алюминия спектр гамма-излучения следует измерять по меньшей мере в пяти каналах и определять фтор и другие элементы из соответствующей системы уравнений.

Некоторые сведения о *натрии* рассматриваются в п. 4 § 2 гл. 25.

При определении натрия в пробах, представленных галитом (NaCl) и кремнеземом (SiO_2), а также галитом и сильвином (KCl), были достигнуты пороги чувствительности соответственно 0,02% ($\Delta E_\gamma = 1{,}45$ — — 1,80 МэВ) и 0,075% ($\Delta E_\gamma = 1{,}40$—1,85 МэВ) [28.60]. При наличии в пробах мешающих элементов (литий, бор, фтор и алюминий) для определения натрия лучше использовать жесткое излучение в диапазоне 11—13 МэВ. Так, при регистрации гамма-квантов в диапазоне 10,5—14,0 МэВ для системы галит — кремнезем, когда мешающие элементы отсутствовали, достигнут порог чувствительности 0,03%, а для системы галит — сильвин — 0,1% в случае регистрации гамма-квантов в диапазоне 11,5—14,0 МэВ. Ток пучка протонов во всех случаях выбирался равным 1 мкА, а энергия — 1,07—1,10 МэВ.

Природный *магний* состоит из трех стабильных изотопов с массовыми числами 24 (78,60%); 25 (10,11%) и 26 (11,29%). Среднее содержание магния в земной коре по весу равно 2,10%. Основным источником его являются калиевые соли: карналлит $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ с содержанием магния 8,75%, каинит $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$ с содержанием магния 9,77% и др.

Для искусственной смеси $MgO + Fe_2O_3$ в работе [28.60] пороговая чувствительность определения магния оценена в 0,2%. Протоны ускорялись до 1,05 МэВ при токе пучка 3—5 мкА. Гамма-излучение регистрировалось в диапазоне 6,0—8,5 МэВ. В случае присутствия в пробе мешающих элементов, создающих гамма-кванты с энергией свыше 7 МэВ, анализ усложняется.

При регистрации гамма-квантов в области энергии 1,37 МэВ мешает натрий, создающий гамма-кванты с энергией 1,63 МэВ.

По вопросу анализа магния другими методами см. § 1 гл. 14.

Некоторые сведения об *алюминии* и методах его определения рассматриваются в § 1 и § 4 гл. 14, § 1 гл. 24 и п. 3 § 2 гл. 25.

При определении алюминия в кремнеземе по гамма-квантам с энергией 1,78 МэВ ($\Delta E_\gamma = 1{,}4$—2,0 МэВ) порог чувствительности оценен 0,01%, а по гамма-квантам с энергией 11 МэВ ($\Delta E_\gamma = 9{,}0$—12,0 МэВ) — — 0,09%. Относительная ошибка измерений при этом равна 12% [28.60]. Протоны ускорялись до 1,1 МэВ.

В случае содержания в пробе мешающих элементов — лития, бора, фтора и натрия — анализ необходимо вести при измерении спектра не менее чем в пяти каналах или по методике гамма-совпадений.

Некоторые данные о *сере* и методах ее определения см. § 1 гл. 14 и п. 2 § 1 гл. 24.

Таблица 28-6

Перечень некоторых реакций на протонах

Реакция	Порог, МэВ	Период полураспада образующегося изотопа T	Энергия, МэВ	
			бета-частиц или позитронов (+)	гамма-квантов
$B^{11}(p, n)C^{11}$	3,015	20,74 мин	0,968(+)	0,51
$C^{12}(p, \gamma)N^{13}$	Экзотермич.	10,08 мин	1,185(+)	0,51
$C^{13}(p, n)N^{13}$	3,2	10,08 мин	1,185(+)	0,51
$N^{14}(p, \alpha)C^{11}$	4,2	20,74 мин	0,968(+)	0,51
$N^{14}(p, pn)N^{13}$	—	10,08 »	1,185(+)	0,51
$O^{16}(p, \alpha)N^{13}$	6	10,08 »	1,185(+)	0,51
$O^{18}(p, n)F^{18}$	2,59	1,87 ч	0,644(+)	0,51
$F^{19}(p, pn)F^{18}$	9	1,87 ч	0,644(+)	0,51
$Si^{29}(p, \gamma)P^{30}$	5,2	2,56 мин	3,24 (+)	0,51
$Cu^{65}(p, n)Zn^{65}$	—	245 дн.	0,325(+)	1,11(44%) 0,51(3,4%)
$Sr^{88}(p, n)Y^{88}$	—	105 дн.	0,58 (+)	1,85(99%) 0,95(99%)
$Nb^{93}(p, n)Mo^{93m}$	—	6,95 ч	Нет	1,51(100%) 0,69(100%) 0,26(100%)

При измерениях по ПГМ гамма-квантов с энергией 5,8 МэВ (ΔE_γ=4,8—6,5 МэВ) достигнут порог чувствительности 0,06% серы в случае ускорения протонов до 1,0 МэВ при токе 5 мкА.

Протонный активационный анализ. Из вышеперечисленных реакций для ПА используются следующие: (p, γ), (p, n) и (p, α) [28.28]. Сечение реакции (p, γ) обычно мало. Радиоактивные ядра в результате нее образуются сравнительно редко. Реакция (p, n) имеет высокие сечения, а образующийся изотоп, как правило, бывает радиоактивным. Реакция (p, α) имеет высокие сечения для легких элементов и уменьшается для тяжелых, радиоактивные ядра в ней возникают сравнительно редко. Перечень некоторых реакций, проходящих на протонах, приведен в табл. 28-6.

В работе [28.28] для определения бора в кремнии образец облучали протонами с энергией 20 МэВ. При радиохимическом выделении изотопа углерод-11 в виде CO_2 был достигнут порог чувствительности порядка 10^{-7}% бора. Однако для того, чтобы избежать влияния мешающих изотопов, облучение пород, содержащих бор, лучше производить протонами с энергией, незначительно превышающей пороговую (3 МэВ).

Л. П. Старчиком [28.60] для определения углерода в пробах пород использовались протоны с энергией 1,075 МэВ с током 3 мкА. Пробы облучались в течение 30—40 мин. Пауза выбиралась равной 2 мин при анализе проб, не содержащих кремния, и 12 мин при анализе проб, содержащих кремний. Время измерений выбиралось равным 10 мин. При регистрации позитронов в пробах разного состава получен порог чувствительности в пределах 0,02—0,07%, а при измерении аннигиляционного гамма-излучения — в пределах 0,05—0,08%. Средняя величина относительной ошибки равна 8,5%.

В работе [14.3] показано, что для определения кислорода по реакциям, приведенным в табл. 28-6, использовались протоны с энергией 9 и 19 МэВ с потоком 10 мкА/см^2. При энергии протонов 9 МэВ наве-

денная активность от азота-13 превосходила в 4 раза наведенную активность от фтора-18. Для протонов с энергией 19 МэВ это соотношение активностей возрастало в 11,75 раза. При облучении проб в течение 20 мин были достигнуты следующие пороги чувствительности: $1 \cdot 10^{-6}$% (при измерении наведенной активности от фтора-18, полученного под действием протонов с энергией 9 МэВ) и $2 \cdot 10^{-8}$% (при облучении протонами с энергией 19 МэВ).

Протоны с энергией 14,5 МэВ при токе 10 мкА использовались для определения ниобия в тантале. Время облучения выбиралось равным 10 мин. Химическое разделение и измерение наведенной активности с помощью сцинтилляционного счетчика позволили достигнуть порога чувствительности 10^{-5}% [28.18].

Вопросы изучения гамма-спектра наведенной активности различных элементов под действием протонов с помощью сцинтилляционного счетчика рассматриваются также в работе [28.84].

Для реализации ПА могут также использоваться протоны отдачи радиатора. Так, в работе [28.31] в качестве радиатора для получения протонов отдачи использовался полистирол, который растворяли в бензоле и смешивали с материалом исследуемой пробы. Затем бензол тщательно выпаривали и такую комбинированную пробу помещали в кварцевую ампулу, оборачивали кадмием и помещали в ядерный реактор для облучения быстрыми нейтронами. Таким образом осуществляли определение меди и стронция (см. табл. 28-6) в пробах. Перед измерениями облученные пробы проходили радиохимическую обработку.

При облучении в потоке быстрых нейтронов 10^{13} нейтр/см$^2 \cdot$с при этой методике измерений были получены довольно заметные активности проб. Однако оценка порогов чувствительности не производилась.

Аналогичная методика ПА, без введения в пробу радиатора, использовалась для определения кислорода-18 в пробах воды по измерению наведенной активности фтора-18 (см. табл. 28-6). Аннигиляционное излучение этого изотопа регистрировалось при помощи схемы совпадений с кристаллом йодистого натрия размерами 75×75 мм. При облучении в течение 2 ч в реакторе потоком быстрых нейтронов $6{,}7 \cdot 10^{11}$ нейтр/см$^2 \cdot$с (с $E_n > 0{,}1$ МэВ) получен порог чувствительности к кислороду-18 $1{,}1 \cdot 10^{-2}$% для проб воды весом 1 г [14.3].

§ 2. Гамма-методы анализа

Как уже отмечалось, на основе мощных потоков гамма-излучения реализовано два метода: ГНМ и ГА (в двух разновидностях). Помимо ГНМ [28.52], может быть реализована и его разновидность БГНМ (бета-гамма-нейтронный метод), или, сокращенно, просто БНМ (бета-нейтронный метод). Суть БНМ сводится к облучению исследуемой среды непосредственно потоком электронов (бета-частиц). Торможение электронов в этой среде приводит к образованию в ней тормозного излучения, под действием которого могут рождаться нейтроны за счет реакции (γ, n). Теоретическое обоснование БНМ в сравнении с ГНМ приведено в работе [28.52]. В ней же приводятся и соответствующие формулы, пригодные для расчета выхода фотонейтронов из образцов с толщиной, достаточной для полного поглощения в них гамма-квантов и электронов. Из сопоставления возможностей БНМ и ГНМ следует, что при одних и тех же условиях облучения выход фотонейтронов из исследуемой среды при ГНМ значительно выше, чем при БНМ. Однако, если учесть коэффициент трансформации потока электронов в фотоны жесткого излучения α, мы получим примерно равные выходы при БНМ и ГНМ. Так, для ускорителя с максимальной энергией 3 МэВ $\alpha = 7{,}73 \cdot 10^{-3}$ фотона на электрон. Для кларковых концентраций бериллия ($5 \cdot 10^{-4}$%), содер-

жащихся в кремнеземе, получим в случае БНМ выход $6{,}25 \cdot 10^{-11}$ нейтр/электр, а в случае ГНМ — $6{,}3 \cdot 10^{-11}$ нейтр/электр.

Однако в связи с имеющимися трудностями по выводу пучка электронов из ускорителя БНМ не получил применения на практике, и мы его не рассматриваем. Между тем в работах [27.58, 28.52] показано, что БНМ имеет некоторые преимущества перед ГНМ. Так, при БНМ исследуемый образец одновременно можно использовать не только для определения в нем искомого элемента, но и в качестве монитора излучения, не чувствительного к изменению энергии.

Таблица 28-7

Изотопы с низкими фотоядерными порогами

Элемент (изотоп)	Распространенность, %	Порог фотонейтронной реакции, МэВ	Энергия налетающего гамма-кванта, МэВ	Средняя энергия вылетающих нейтронов, МэВ
Бериллий-9	100	1,67	2,0	0,200
Дейтерий	0,015	2,23	4,1	0,935
Кислород-17	0,037	4,14	4,9	0,715
Углерод-13	1,108	4,95	5,8	0,324
Литий-6	7,52	5,35	5,9	0,459
Литий-7	92,5	6,9	7,5	0,514
Уран-238	92,28	5,6(5,97)	6,0	0,400
Торий-232	100	5,9	6,0	0,100
Вольфрам-183	14,4	6,0	7,2	1,193
Ртуть-201	13,32	6,1	7,2	1,095

1. **Гамма-нейтронный метод.** Физические основы ГНМ рассмотрены в п. 1 § 1 гл. 26. Помимо этого, аналитические соотношения применительно к исследованию возможностей ГНМ на основе электронных ускорителей приводятся в работах [28.21, 28.52]. В гл. 26 рассмотрены возможности применения ГНМ для определения в пробах бериллия и дейтерия путем облучения их потоками гамма-квантов от изотопных излучателей. Помимо этих элементов под действием жесткого излучения могут быть определены практически все элементы, вступающие в реакцию (γ, n). Однако особенно выгодно ГН использовать для анализа на элементы (изотопы) с наиболее низкими фотонейтронными порогами (табл. 28-7).

С помощью ГНМ можно определять в природных объектах содержание не только какого-либо одного изотопа (из приведенных в табл. 28-7), но и всех их. Раздельный анализ этих изотопов может вестись путем вариации энергии ускорителя и решения системы уравнений [16.63, 28.52] с обработкой на ЭВМ.

Некоторые сведения о *бериллии* и методах его анализа рассматриваются в п. 2 § 2 гл. 14, § 1 гл. 26 и § 1 этой главы.

Применение ускорителя для анализа бериллия по ГНМ впервые было осуществлено А. М. Гаудином и др. [28.88]. Ими использовался генератор Ван-де-Граафа с энергией ускоряемых электронов 2,1 МэВ при токе 0,11 мА. Аналогичный ускоритель применялся также К. А. Левине и Сюрлесом [28.94]. Схема используемой ими установки для анализа бериллия показана на рис. 28-6. Пучок гамма-квантов, выходящий из вольфрамовой мишени, бомбардирует пробу. Нейтроны, возникающие в реакции (γ, n) на бериллии, замедляются в полиэтилене и активируют фольгу-детектор из серебра (подробно об этом виде детекторов см. в § 4 гл. 5). После облучения фольга поворотом столика переносится к торцовому счетчику, и по ее наведенной активности судят о содержании в пробе бериллия. В процессе облучения важно осуществлять

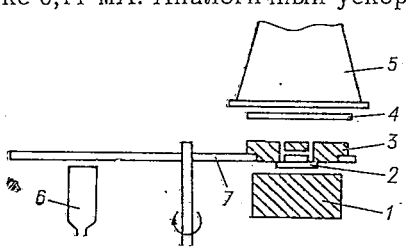


Рис. 28-6. Схема устройства измерительной системы с ускорителем для анализа бериллия.

1 — полиэтиленовый замедлитель, *2* — фольга-детектор из серебра (диск), *3* — контейнер с пробой, *4* — вольфрамовая мишень ускорителя, *5* — электронный ускоритель, *6* — торцовый бета-счетчик, *7* — поворотный столик.

контроль за режимом работы ускорителя. В противном случае возникают значительные ошибки результатов анализа. Облучение пробы и фольги-детектора производилось в течение 80 с, а наведенную активность измеряли 30 с (напомним, что период полураспада серебра-110 равен 24 с). При высоких потоках гамма-квантов в серебре может возникать мешающее излучение по реакции (γ, γ') с периодами 44 и 41 с (см. табл. 28-9). Для исключения влияния этой наведенной активности лучше измерять излучение долгоживущего изотопа серебра-108 ($T=$ $=2{,}42$ мин.). Для этого фольгу-детектор следует выдерживать в течение некоторого времени (около 3 мин) после облучения для исключения влияния излучения возбужденных ядер серебра ($T=44$ и 41 с).

Для проб весом 20 г при длительности замера 4 мин достигнут порог чувствительности 0,002%. Более высокий порог чувствительности может быть получен при увеличении либо тока пучка электронов, либо времени активации и времени измерения, а также числа циклов измерений.

Л. П. Старчиком [28.60] для анализа бериллия использовался электронный ускоритель с энергией 5 МэВ и средним током 50 мкА с платиновой мишенью толщиной 0,95 мм. Детектором нейтронов служил диспрозий, нанесенный в виде окиси на внутреннюю поверхность из оргстекла. Под действием нейтронов в диспрозии возникал изотоп диспрозий-165 (массовое макроскопическое сечение его образования равно 7,35 см^2/г, $T=1{,}3$ мин, $E_\gamma=109$ кэВ). Под действием гамма-излучения ускорителя в диспрозии наведенная активность не возникала. Проба весом 100—400 г, засыпанная в кассету из оргстекла, помещалась внутрь диспрозиевого детектора, окруженного снаружи парафиновым замедлителем. После облучения детектор переносился к измерительной установке и надевался на кристалл йодистого натрия, активированного таллием, размерами 80×40 мм. Наведенная активность измерялась в течение 6 мин. Градуировочный график для интервала концентраций бериллия от 0 до 0,15% носил линейный характер.

Мониторирование потока гамма-квантов ускорителя осуществлялось с помощью кадмиевого активационного детектора, который устанавливался около тормозной мишени. По реакции (γ, γ') возникал изомер кадмий-111 ($T=48$ мин, $E_\gamma=247$ кэВ). Наведенную активность этого детектора можно измерять либо на той же установке, на которой измерялась наведенная активность диспрозия-165 во втором цикле измерений, либо на другой параллельно с измерением наведенной активности диспрозия.

При указанной методике измерений достигнут порог чувствительности $1\cdot10^{-4}$%.

А. К. Берзиным [28.10] для анализа бериллия использовался ускоритель с энергией 5 МэВ со средним током 80 мкА. Нейтроны детектировались при помощи блока пропорциональных нейтронных счетчиков типа СНМ-20а (6 шт.), расположенных в парафиновом замедлителе диаметром 25 см и высотой 30 см. Толщина слоя замедлителя между образцом и счетчиками составляла 5 см. Общая эффективность этой фотонейтронной установки равнялась 11%.

При облучении проб потоком гамма-излучения с энергией выше 2,23 МэВ регистрирующая система снаружи окружалась защитой из меди, кадмия и плит парафина с примесью окиси бора. Во всех случаях при облучении «пустых» проб необходимо оценивать фон такой регистрирующей системы и исключать его из результатов последующих измерений.

В процессе импульсов тока в регистрирующей системе возникают большие наводки. В связи с этим регистрация фотонейтронов осуществлялась между импульсами тока ускорителя спустя 40 мкс после импульса длительностью 20 мкс. Таким образом, измерения сводились к импульсной методике ГНМ, т. е. был реализован импульсный гамма-

нейтронный метод (ИГНМ). Порог чувствительности к анализу бериллия при работе с гелиевыми счетчиками СНМ-17 оценен в $\sim 4 \cdot 10^{-6}\%$.

Аналогичные возможности анализа с ускорителем теоретически обоснованы в работах [28.21, 28.52]. Так, если исходить из детектирующей системы с эффективностью $\varepsilon = 10\%$, то, как показано в статье [28.52], при работе с ускорителем на 2,5 МэВ и токе 0,1 мА получается скорость счета 1560 имп/мин при концентрации в породе $1 \cdot 10^{-5}\%$ бериллия. При времени измерений 3 мин относительная погрешность в измерении скорости счета равна 1,5 и 50% при определении концентраций Be.

В ИГиГ СО АН СССР при работе на малогабаритном трехсантиметровом микротроне ($E_{\gamma\,max} \approx 4$ МэВ, $i_{ср} = 1$ мкА) со сцинтилляционным детектором ЛДНМ (30×60 мм, $\varepsilon \approx 0{,}1\%$) получен порог чувствительности $\sim 1 \cdot 10^{-4}\%$ [36.15], который можно понизить до $n \cdot 10^{-6}\%$, применяя более эффективные детекторы и методы дискриминации фона [28.22].

При облучении образцов потоком гамма-квантов с энергией свыше порога реакции на дейтерии (2,23 МэВ) важно учитывать влияние дейтерия на результаты определения бериллия. А. К. Берзиным [28.10] показано, что влияние дейтерия начинает сказываться при энергии гамма-квантов с 3,5 МэВ при концентрации дейтерия $1{,}67 \cdot 10^{-4}\%$, соответствующей содержанию 10% воды в породе. В связи с тем, что содержание воды в пробах бывает менее 10%, при определении в породах бериллия энергию ($E_{\gamma\,max}$) можно выбирать равной около 5 МэВ при анализе низких концентраций бериллия (от $5 \cdot 10^{-3}\%$ и ниже) и порядка 2,23 МэВ — при анализе более высоких концентраций бериллия. При более высоких энергиях, с 5,35 МэВ и выше, начинает оказывать влияние литий. Влиянием кислорода и углерода при этом, как будет показано ниже, можно пренебречь.

В работе [28.10], в частности, показано, что при энергии электронов 4,95 МэВ, весе образца 200 г, длительности замера 30 мин и относительной ошибке измерений концентраций бериллия 30% в зависимости от тока ускорителя и содержания в пробе дейтерия могут быть получены пороги чувствительности, приведенные в табл. 28-8. Перерасчет мощностей доз в величину тока осуществлялся в соответствии с формулой (27-1). При $K_0 = 1$ величина тока равна

$$i = 2{,}67 \cdot 10^{-5}\, P/E^3 \qquad (\text{А}),$$

где P — в Р/мин·м, а E — в МэВ.

Некоторые сведения о дейтерии рассматриваются в § 2 гл. 26.

Согласно данным [16.62], нормальной концентрации дейтерия в воде ($1{,}67 \cdot 10^{-3}\%$), соответствующей содержанию 0,015% дейтерия в водороде, отвечает $1{,}11 \cdot 10^5$ нейтр/с для электронов с энергией 4,5 МэВ при токе 0,1 мА. Из этого видно, что ГНМ вполне приемлем для определения дейтерия в воде и нефтях. С помощью ГНМ содержание дейтерия можно определять и в горных породах. Так, при содержании в породе 1% воды ($1{,}67 \cdot 10^{-5}\%$ дейтерия) и детектирующей системе с $\varepsilon = 10\%$ получаются скорости счета, равные $6{,}66 \cdot 10^3$ имп/мин (при прочих равных условиях) с относительной погрешностью 12,6%.

Л. П. Старчиком [28.60] при измерениях с ускорителем электронов на 5 МэВ с током 50 мкА и диспрозиевым детектором (см. выше) получен порог чувствительности определения дейтерия $4 \cdot 10^{-4}\%$, т. е. в 4 раза ниже нормальной концентрации дейтерия в воде.

Таблица 28-8

Порог чувствительности определения бериллия на ускорителе с энергией 5 МэВ

Мощность дозы ускорителя, Р/мин·м	Ток соответствующий мощности дозы, мА	Концентрация дейтерия, %	
		$1{,}67 \cdot 10^{-4}$ (10 % H_2O)	$1{,}67 \cdot 10^{-5}$ (1% H_2O)
1	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	$7{,}3 \cdot 10^{-3}$	$6{,}8 \cdot 10^{-2}$
10	$2{,}2 \cdot 10^{-3}$	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	$7{,}7 \cdot 10^{-4}$
100	$2{,}2 \cdot 10^{-2}$	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$

При определении в горных породах дейтерия необходимо учитывать влияние бериллия. Так, кларковые концентрации бериллия в породе ($5 \cdot 10^{-4}$%) создают скорости счета, соответствующие $1{,}08 \cdot 10^{-3}$% дейтерия. Это говорит о том, что при содержании в породах $5 \cdot 10^{-4}$% бериллия концентрации дейтерия ниже $1 \cdot 10^{-3}$% определять затруднительно.

Определение *кислорода и углерода* с помощью ГНМ по изотопам кислород-17 и углерод-13 практически невозможно из-за малости сечений фотоядерной реакции [29.78] и малых содержаний в природе этих изотопов. Среднее содержание углерода в горных породах по весу равно 0,1%. Следовательно, содержание в них углерода-13 составляет 0,001%. Для электронов с энергией 5 МэВ при токе 30 мкА получается выход величиной 20 нейтр/с [16.62], а от кларковых содержаний бериллия — $2{,}4 \cdot 10^4$ нейтр/с. Кроме того, фотонейтроны рождаются и от дейтерия. Например, при содержании в породе 1% воды ($1{,}67 \cdot 10^{-5}$% дейтерия) образуется $1{,}11 \cdot 10^3$ нейтр/с на дейтерии. Из этого видно, что даже в карбонатах с содержанием 10% углерода (0,1% углерода-13) получается от углерода-13 выход $2 \cdot 10^3$ нейтр/с, т. е. на порядок ниже, чем от $5 \cdot 10^{-4}$% бериллия.

С увеличением энергии фотонов выход нейтронов от углерода-13 резко возрастает, однако он все-таки остается невысоким. Так, при энергии электронов 6 МэВ с током 30 мкА он становится равным 450 нейтр/с при содержании в пробе 0,001% углерода-13, а выход от бериллия ($5 \cdot 10^{-4}$%) — $3{,}5 \cdot 10^4$ нейтр/с. Кроме того, фотонейтроны при этом возникают еще за счет дейтерия, лития, урана и тория.

В работе [28.52] показано, что при измерениях на электронном ускорителе с энергией 6 МэВ и током 0,1 мА кларковые концентрации *лития* в пробах ($6{,}5 \cdot 10^{-3}$%) дают выход $3{,}78 \cdot 10^3$ нейтр/с. При измерениях с детектирующей системой ($\varepsilon = 10$%) в этом случае получаются скорости счета $2{,}32 \cdot 10^4$ имп/мин. Относительная ошибка измерений лития при этом составляет 7,5%. Концентрации лития $6{,}5 \cdot 10^{-4}$% можно измерять с точностью 23%.

Все сказанное справедливо при условии отсутствия в пробах мешающих элементов — бериллия, дейтерия и углерода. Так, литий в природе часто встречается совместно с бериллием. Для ускорителя с энергией 5,9 МэВ от кларковых концентраций бериллия ($5 \cdot 10^{-4}$%) в соответствии с работой [28.52] получаются такие же скорости счета, как и от концентраций лития 0,0125%. Более низкие концентрации лития можно определять при более высоких энергиях излучения ускорителя. Однако определению лития могут мешать уран и торий. Так, при кларковых содержаниях бериллия ($5 \cdot 10^{-4}$%), урана ($4 \cdot 10^{-4}$%) и тория ($1{,}6 \cdot 10^{-3}$%) в силикатной породе получаются скорости счета, соответствующие 0,0148 лития, для карбонатной породы с содержанием $5 \cdot 10^{-4}$% бериллия, $1{,}4 \cdot 10^{-4}$% урана и $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ тория — скорости счета, соответствующие $5 \cdot 10^{-3}$% лития.

В работе [28.10] показано также, что при облучении проб весом 500 г потоком гамма-квантов с максимальной энергией 6 МэВ в карбонатных породах, содержащих $5 \cdot 10^{-4}$% бериллия и 10% воды ($1{,}67 \cdot 10^{-4}$% дейтерия), при времени измерений 30 мин и относительной ошибке 30% могут быть получены следующие пороги чувствительности к литию: $8 \cdot 10^{-3}$% при токе 1,24 мкА; $3{,}3 \cdot 10^{-3}$% при токе 12,4 мкА и $7{,}5 \cdot 10^{-4}$% при токе 124 мкА. Влиянием урана при этом можно пренебречь.

При анализе лития ГНМ выгодно всегда одновременно использовать и на бериллий, поскольку он почти всегда встречается совместно с литием.

О распространенности *урана* в природных объектах сообщается в гл. 9, а об анализе его по регистрации естественной радиоактивности — в гл. 10. Порог фотоядерной реакции урана-238, по данным одних авторов,

оценивается равным 5,6 МэВ, по данным других — 5,97 МэВ. Помимо этого, нейтроны под действием гамма-квантов могут рождаться за счет фотоделения (γ, О) урана-238. Порог этой реакции оценивается в 5,1 МэВ. Однако сечения фотоделения урана при энергии гамма-квантов 7,5 МэВ в 8 раз меньше сечения фотонейтронной реакции при этой энергии [28.52]. Поэтому влиянием нейтронов от реакции фотоделения можно пренебречь.

На основе расчетных и экспериментальных исследований показано, что при определении в пробах урана энергию ускоряемых электронов свыше 6,35 МэВ выбирать нерационально [10.23]. В этом случае мешающее влияние оказывает только бериллий. При более высоких энергиях необходимо учитывать влияние других элементов с низкими фотоядерными порогами.

При кларковых концентрациях бериллия без его учета в породах по ГНМ можно определять рудные концентрации урана от 0,01—0,003% и выше. При определении концентраций урана, на порядок более низких, необходимо учитывать влияние бериллия.

О некоторых вопросах, связанных с *торием*, см. в гл. 9 и 10.

Нейтроны при облучении тория могут возникать в реакциях (γ, n) и (γ, О). Порог последней реакции равен 5,4 МэВ [28.52]. Однако сечение ее примерно в 8 раз ниже сечения реакции (γ, n). Поэтому рождением нейтронов в реакции (γ, О) по сравнению с рождением в реакции (γ, п) можно пренебречь. Исходя из работ [10.23, 28.52], можно сделать следующие выводы.

В связи с тем, что сечение реакции (γ, n) тория ниже сечения реакции по ГНМ при $E_{\gamma\,max}=6{,}24$ МэВ без учета влияния кларковых концентраций бериллия, можно определять рудные концентрации тория начиная примерно с 0,1%. При определении концентрации 0,01% тория необходимо учитывать влияние бериллия. При $E_{\gamma\,max}=6{,}4$ МэВ можно обнаруживать в три раза более низкие концентрации тория при прочих равных условиях.

Некоторые сведения о *вольфраме* и его определении другими методами приводятся в п. 2 § 3 гл. 15, п. 2 и 3 § 4 гл. 16 и п. 12 § 2 гл 25.

Во ВНИИЯГГе [28.64] для определения вольфрама в пробах использовалось излучение бетатрона с максимальной энергией гамма-квантов 7,2 МэВ и током 8,6 мкА. Порог чувствительности определения вольфрама оценен в $3\cdot10^{-4}$%, т. е. примерно соответствует его кларковому содержанию ($2\cdot10^{-4}$%).

Некоторые сведения о *ртути* и ее анализе другими методами рассматриваются в п. 2 § 3 гл. 15, § 6 гл. 16, § 2 гл. 23.

Для определения ртути применялся тот же ускоритель, что и для анализа вольфрама. Порог чувствительности ртути по ГНМ равен $8\cdot10^{-4}$% [28.64]. Определение более низких концентраций возможно вести лишь при кларковом содержании в пробах гафния, вольфрама, урана и редкоземельных элементов [28.10].

В заключение следует заметить, что ГНМ всегда целесообразно использовать для одновременного определения в пробах нескольких химических элементов и по возможности комплексировать его с рассматриваемыми ниже методами ГА′, ГА и НА.

2. **Гамма-активационный анализ, основанный на фотовозбуждении изомерных уровней.** Облучение веществ мощными потоками низкоэнергетического гамма-излучения (с энергией, меньшей фотоядерных порогов (см. рис. 3-3), приводит к фотовозбуждению ядер некоторых химических элементов, т. е. к реакции (γ, γ'). Эта реакция обусловливается резонансным неупругим рассеянием гамма-квантов. Возбуждение метастабильных изотопов может происходить под действием как гамма-излучения ускорителей, так и радиоизотопных источников высокой активности (кобальт-60). Под действием гамма-излучения ядра возбуждаются до

некоторого уровня активации, превышающего изомерные. Затем за время $\tau < 10^{-10}$ с возбужденные ядра переходят на метастабильные уровни. Распад изомеров происходит путем испускания гамма-квантов с энергией в диапазоне 0,1—1 МэВ. За счет передачи части энергии гамма-квантов электронам конверсии гамма-излучения изомеров сопровождаются характеристическим рентгеновским излучением.

В дальнейшем метод, основанный на реакции (γ, γ'), будем сокращенно обозначать ГА′ в отличие от ГА, основанном на фотоядерных реакциях.

Под действием мощных потоков гамма-излучения, хотя и возбуждается большое число изомеров, метод ГА′ пригоден для определения лишь небольшого числа элементов. Так, в ходе излучения электронного ускорителя на 3 МэВ с током 1 мА практически возбуждались все элементы с атомными номерами свыше четырех (за исключением инертных газов) [14.3]. Однако заметную активность с периодом полураспада более 1 с обнаруживают 36 изотопов 24 химических элементов [28.28].

Энергию возбуждающего излучения в работе [28.60] рекомендуется выбирать заведомо ниже порогов фотоядерных реакций — для исключения мешающего влияния других активирующихся ядер. С этой целью облучение проб при ГА′ рекомендуется вести излучением с энергией не свыше 3,5—7 МэВ [28.60]. Сечение резонансного рассеяния весьма мало — порядка 0,01 мбарн (см. рис. 3-3), а для некоторых элементов и того меньше. Так, для индия-115 и кадмия-111 оно равно соответственно 0,083 и 0,014 мкбарн [28.28]. В связи с этим для проведения ГА′ необходимо использовать пучки гамма-излучения весьма высокой интенсивности.

Использование излучения в указанном диапазоне позволяет полностью исключать мешающее влияние элементов с $Z < 34$, т. е. в том числе и породообразующих. В первую очередь метод ГА′ применим для анализа элементов, приведенных в табл. 28-9 [2.19, 14.3, 28.2, 28.3, 28.10, 28.20, 28.60—28.62, 28.64]. Облучение анализируемых проб производилось в течение 3—5 периодов полураспада, иногда с повторением нескольких циклов облучения и измерения. Для долгоживущих изомеров время облучения равнялось 1 ч. Измерение наведенной активности осуществлялось с помощью сцинтилляционной гамма-спектрометрической аппаратуры с колодезными счетчиками.

Из табл. 28-9 видно, что с помощью ГА′ можно определять иногда довольно низкие концентрации элементов, приближающиеся к кларковым.

3. **Гамма-активационный анализ, основанный на возбуждении изотопов в фотоядерных реакциях.** В практике ядерно-геофизического анализа метод ГА находит значительно большие области применения по сравнению с ГНМ и ГА′.

Под действием высокоэнергетического гамма-излучения могут происходить различные фотоядерные реакции (γ, n), (γ, p), (γ, pn), (γ, α, n), (γ, t) и др. Они имеют различные фотоядерные пороги на разных элементах. Поэтому, варьируя энергией гамма-излучения, можно селективно активировать те или иные ядра атомов химических элементов и вести их анализ по ГА.

При невысоких энергиях гамма-квантов (порядка 10 МэВ) наиболее вероятной является реакция (γ, n). Увеличение энергии гамма-квантов ведет к повышению вероятности возникновения реакций с образованием заряженных частиц. На легких ядрах ($Z \approx 10$) вероятности реакций (γ, n) и (γ, p) становятся примерно равными. Сечение этих реакций при некоторых энергиях имеет довольно выраженный максимум, получивший название гигантского резонанса (см. рис. 3-3).

Разработкой методики ГА применительно к ядерно-геофизическому анализу проб пород и руд занимаются в ВНИИЯГГе [14.4, 16.62, 22.101,

Таблица 28-9

Применение ГА′ для анализа некоторых химических элементов

Элемент (кларк, %)	Массовое число изотопа, вступающего в реакцию (γ,γ') (и его распространенность, %)	Период полураспада образующегося изомера T	Энергия гамма-квантов, кэВ	Порог чувствительности, %	Источник излучения	Исследуемая среда
1	2	3	4	5	6	7
Селен ($6\cdot10^{-5}$)	77(7,58)	17,5 с	162	$5\cdot10^{-3}$	ЛУЭ — 4,2 МэВ 30 мкА	Руды
Бром ($1{,}6\cdot10^{-4}$)	79(50,52)	4,78 с	208	0,5	Индий-116 m — 10^{12} квантов $см^2\cdot с$	
Стронций (0,04)	87(7,02)	2,8 ч	388	—	Кобальт-60 — 256 кг · экв Ra	Руды
				$6\cdot10^{-3}$	ЛУЭ—4,2 МэВ, 30 мкА	
Иттрий ($2{,}8\cdot10^{-3}$)	89(100)	16 с	915	0,1	То же	»
				$1\cdot10^{-4}$	Микротрон — 6 МэВ; 70 мкА	»
Родий ($1\cdot10^{-7}$)	103(100)	57 мин	40	0,07	ЛУЭ — 42 МэВ; 30 мкА	»
Серебро ($1\cdot10^{-5}$)	107(51, 35)	44 с	94	$2{,}7\cdot10^{-3}$	То же	»
	109(48,65)	41,25 с	87,5	$7{,}5\cdot10^{-5}$	Микротрон — 6,65 МэВ; 70 мкА	При содержании в рудах Au, Br, Hf, Hg менее 10^{-3}% и при клярковых содержаниях Ba, Y
Кадмий ($5\cdot10^{-5}$)	111(12,75)	48,7 мин	247; 150	$1\cdot10^{-3}$	ЛУЭ—4,2 МэВ, 30 мкА	Руды
Индий ($1\cdot10^{-5}$)	113(4,28)	1,7 ч	330150	$7\cdot10^{-4}$	ЭСГ — 3 МэВ;	—
	115(95,72)	4,5 ч	335	$5\cdot10^{-4}$	ЛУЭ—4,2 МэВ: 30 мкА	Руды
				$5\cdot10^{-5}$	Микротрон — 6 МэВ, 70 мкА	При клярковых содержаниях Ba, Hg
				$0{,}0n$	Кобальт-60 — 256 кг·экв Ra	Руды
Олово ($4\cdot10^{-3}$)	117(7,61)	14 дн.	160	1,0	ЛУЭ—4,2 МэВ: 30 мкА	»
Барий (0,05)	135(6,59)	28,7 ч	269	0,15	То же	»
	137(11,32)	2,57 мин	661	$6{,}5\cdot10^{-5}$	Микротрон — 6,3 МэВ; 70 мкА	Породы и руды
				0,45	ЛУЭ—4,2 МэВ: 30 мкА	То же
Эрбий ($4\cdot10^{-4}$)	167(22,94)	2,5 с	786; 179; 100	0,033	ЭСГ — 3МэВ; 1 мА	Породы и руды
Лютеций	176(2,59)	3,71 ч	89	0,02	То же	
				0,02	ЛУЭ—4,2 МэВ: 30 мкА	Руды
Гафний ($3{,}2\cdot10^{-4}$)	178(27,14)	4,8 с	220;65	$3{,}7\cdot10^{-4}$	ЭСГ — 3 МэВ; 1 мА	—
	179(13,75)	19 с	217; 160	$1{,}9\cdot10^{-3}$	ЛУЭ — 4,2 МэВ; 30 мкА	Руды
				$6{,}7\cdot10^{-4}$	Микротрон — 6 МэВ, 40 мкА	При содержании в пробах Au $<$ $<1\cdot10^{-5}$% и клярковых содержаниях Ba, Y и Br.

Окончание табл. 28-9

1	2	3	4	5	6	7
Иридий ($1\cdot10^{-7}$)	191 (37,3)	4,53	130	$4{,}3\cdot10^{-3}$	ЭСГ — 4 МэВ; 1 мА	При содержании в пробах Au $<1\cdot10^{-5}$% и кларковых содержаниях Ba, Y и Br
Платина ($5\cdot10^{-7}$)	195 (33,8)	4,08 дн.	130; 69	0,21	То же	
				0,04	ЛУЭ—4,2 МэВ; 30 мкА	Руды
Золото ($5\cdot10^{-7}$)	197 (100)	7,4 с	277; 130	$2{,}4\cdot10^{-3}$ $8{,}3\cdot10^{-3}$	То же ЭСГ—3 МэВ; 1 мА	»
				$1\cdot10^{-4}$	Микротрон — 6 МэВ; 70 мкА	При кларковых содержаниях Ba и Y
Ртуть ($7\cdot10^{-6}$)	199 (16,84)	42 мин	368; 159	$7\cdot10^{-3}$ 0,12	ЛУЭ — 4,2 МэВ; 30 мкА ЭСГ — 3 МэВ; 1 мА	Руды —

22.102, 28.10, 28.64, 28.70, 28.76, 28.98, 28.102, 32.9], ИЯФе АН УзбССР [19.175, 28.4]. Большая часть этих исследований была проведена с применением бетатронов. Излучение этих ускорителей обладает значительной нестабильностью как по току, так и по энергии. Например, при отсутствии специальных систем стабилизации энергия может меняться на ±30%. Некоторой нестабильностью обладают и другие виды ускорителей (микротрон, линейный ускоритель электронов и др.), используемых при ГА. В связи с этим при проведении исследований облучение проб производят совместно с мониторами или эталонами, в которых наводится активность, равная или близкая величине активности изучаемого изотопа.

Результаты анализа проб пород и руд на некоторые элементы приведены в табл. 28-10. Все исследования проведены с бетатронами. На первом этапе измерения велись при помощи торцовых бета-счетчиков. Пороговая чувствительность при этом была значительно ниже значений, приведенных в табл. 28-10. Так, углерод и кислород при $E_{\gamma\,max}=24$ МэВ определяли с порогом чувствительности 0,2 и 0,5% соответственно, а медь — с порогом 0,02%. При $E_{\gamma\,max}=13{,}5$ МэВ медь и цинк определяли с порогом чувствительности 0,1 и 0,2% соответственно [22.101].

Указанные в табл. 28-10 пороги чувствительности в основном получены со сцинтилляционными счетчиками, работающими в спектрометрическом и интенсиметрическом режимах. Часть измерений проводилась с кристаллами йодистого натрия, оборудованными колодцами.

Ведение анализа по ГА наиболее перспективно при изучении комплекса элементов или их изотопов в породах и рудах. Так, метод ГА был применен для определения углерода и кислорода в углях (см. табл. 28-10). Пробы весом 300 г облучали в течение 30 мин. Пауза выбиралась равной 1 мин — время, необходимое на перенос проб от места облучения к месту измерения. После паузы в течение 30 с и 10 мин измерялась наведенная активность проб в интервале энергий 0,33—0,90 и 1,0—2,6 МэВ. Определению кислорода при этом в основном мешает излучение реакции $Si^{29}(\gamma, p)Al^{28}$ и реакции $P^{31}(\gamma, n)P^{30}$ (см. табл. 28-10). Влияние изотопов алюминий-28 и фосфор-30 на результаты определения кислорода учитывалось при облучении проб потоком гамма-излучения с энергией ниже порога реакции на кислороде (15,6 МэВ). Средняя абсолютная погрешность определения углерода по данным [22.102] может быть оценена равной 0,36% для углерода и 0,31% для кислорода. В работе [28.4] показано также, что с помощью бетатрона с максимальной энергией

Параметры некоторых изотопов и результаты анализа элементов по ГА на бетатроне

Элемент и ядерная реакция	Распространенность исходного изотопа и кларк элемента этого изотопа, %	Энергия, МэВ		Массовое макросечение, см²/г	Период полураспада возникающего изотопа T	Энергия излучения, МэВ	Порог чувствительности, %	Исследуемая среда	Энергия излучения, МэВ, ток, мкА
		порога	резонанса						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Углерод $C^{12}(\gamma, n)C^{11}$	98,892 (0,1)	18,6	22,8	$5,21\cdot10^{-4}$	20,74 мин.	$0,968\beta^+$; $0,51\gamma$	0,02 0,01 0,001	Ископаемые угли Нерастворимые остатки осадочных пород Ископаемые угли, осадочные породы	24 (0,03) 25 (0,05) 28
Кислород $O^{15}(\gamma, n)O^{15}$	99,759 (47,20)	15,6	21,9	$5,26\cdot10^{-4}$	2,02 мин.	$1,733\beta^+$; $0,51\gamma$	0,5 0,005	Ископаемые угли Осадочные породы	23 (0,03) 23 (0,03)
Фтор $F^{19}(\gamma, n)F^{18}$	100 (0,027)	10,4	22,2	$1,11\cdot10^{-4}$	1,87 ч.	$0,044\beta^+$; $0,51\gamma$	0,01—0,1 0,02 0,002 0,5	Фосфориты и апатиты Полиметаллические руды То же Нерастворимые остатки осадочных пород	15,6 (0,14) 25 (0,05) 12,8 (~10) 25 (0,05)
Магний $Mg^{24}(\gamma, n)Mg^{23}$	78,60 (2,10)	16,5	19,4	$2,46\cdot10^{-4}$	12,1 с	$3,55\beta^+$; $0,51\gamma$	0,3	Горные породы и руды	25 (0,05)
Кремний $Si^{28}(\gamma, n)Si^{27}$	92,27 (27,6)	17,14	20,9	$4,52\cdot10^{-4}$	4,33 с	$3,76\beta^+$; $0,51\gamma$ $2,865\beta^+$	0,1 0,05	Полиметаллические руды Ископаемые угли	25 (0,07) 23 (0,044)
$Si^{29}(\gamma, p)Al^{28}$	4,68	12,8	19,6	$6,45\cdot10^{-4}$	2,31 мин	$1,79\gamma$	0,015 1	осадочные породы угли, руды и породы	19 (0,04) 17,5 (0,05)
Фосфор $P^{31}(\gamma, n)P^{32}$	100 (0,08)	12,35	19,0	$3,63\cdot10^{-4}$	2,56 мин	$3,24\beta^+$; $0,51\gamma$	0,01	Фосфатные руды	15,6 (0,14)
Сера $S^{32}(\gamma, n)S^{31}$	95,018 (0,05)	14,7	20,1	$2,82\cdot10^{-4}$	2,61 с	$4,5\beta^+$; $0,51\gamma$	1	Полиметаллические руды	17 (0,1)
Калий $K^{39}(\gamma, n)K^{38}$	93,08 (2,60)	14,5	19,3	$1,73\cdot10^{-5}$	7,66 мин	$2,68\beta^+$; 2,16; $0,51\gamma$	0,01 0,03 0,1	Ископаемые угли Осадочные породы Ископаемые угли, осадочные породы и руды	23 (0,044) 19 (0,04) 17,5 (0,05)

Окончание табл. 29-10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Титан $Ti^{46}(\gamma, n)Ti^{45}$	7,95 (0,6)	13,1	20,5	$4,19\cdot10^{-4}$	3,06 ч	$1,02\beta^+$, $0,51\gamma$	0,7 0,013	Титано-цирконневые руды Породы и руды	15,6(0,14) 18(0,9)
Железо $Fe^{54}(\gamma, n)Fe^{53}$	5,84 (5,10)	13,8	17,7	$7,47\cdot10^{-4}$	8,5 мин	2,7; $2,4\beta^+$ 0,51; $0,37\gamma$	0,05 0,4 1	Осадочные породы Руды железа Полиметаллические руды	19(0,04) 18(0,09) 17(0,05)
Медь $Cu^{63}(\gamma, n)Cu^{62}$	6,91 (0,01)	10,8	17,5	$1,05\cdot10^{-3}$	9,76 мин	$2,91\beta^+$, $0,51\gamma$	0,005 0,015 0,001	Медные руды Полиметаллические руды Породы	25(0,07) 13,6(0,053) 12,8(~1)
Цинк $Zn^{64}(\gamma, n)Zn^{63}$	48,89 (0.005)	11,6	18,7	$1,13\cdot10^{-3}$	38,4 мин	3,32 и др. β^+ 0,96(8%) 0,51 (180) и др.γ	0,07—0,3 0,02—0,1 0,001	Свинцово-цинковые руды Полиметаллические руды То же и породы	13,6(0,074) 18 17,5(1,0)
Германий $Ge^{76}(\gamma, n)Ge^{75}$	7,67 (0,0007)	—	—	—	82 мин	1,19 (87%)0,92 (11,4%)β, 0,068— —0,628γ	0,0003	Ископаемые угли	7,8(4,5)
Селен $Se^{78}(\gamma, n)Se^{77m}$	23,62 $(6\cdot10^{-5})$	~9,8	—	—	17,5 с	0,162γ		Сульфидные полиметаллические руды	14,5—20 10,06—0,05
$Se^{80}(\gamma, n)Se^{79m}$	49,82				3,9 мин	0,096γ		То же	То же
Стронций $Sr^{86}(\gamma, n)Sr^{85m}$	9,86 (0,04)	9,5	—	—	70 мин	0,225γ	0,05	Нерастворимые остатки осадочных пород	25(0,05)
Цирконий $Zr^{90}(\gamma, n)Zr^{89m}$	51,46 (0,02)	12,37	18,0	$1,8\cdot10^{-3}$	4,18 мин	0,588γ	0,0025— 0,030	Цирконневые руды и концентраты	13,6(0,016—0,2)
$Zr^{90}(\gamma, n)Zr^{89}$	(0,02)	12,37	18,0	$1,8\cdot10^{-3}$	79,3 ч	$0,901\beta^+$ 0,91; 0,51γ	0,0012	Титано-цирконневые руды и породы	20(1,67)
Молибден $Mo^{92}(\gamma, n)Mo^{91}$	15,86 $(3\cdot10^{-4})$	13,28	18,7	$9,5\cdot10^{-4}$	15,5 мин	$3,34\beta^+$	0,05	Различные руды	15,6(0,14)

Серебро $Ag^{107}(\gamma, n)Ag^{106}$	51,35 ($1\cdot10^{-5}$)	9,5	16,5	$1,52\cdot10^{-3}$	24 мин	11,96β+, 0,51γ	0,01 0,005	Полиметаллические руды »	13,6(0,1) 15,6(0,14)
Кадмий $Cd^{106}(\gamma, n)Cd^{105}$	1,24 ($5\cdot10^{-5}$)	—	—	—	54,7 мин	1,69	0,1	Различные руды	15,6(0,14)
Сурьма $Sb^{121}(\gamma, n)Sb^{120}$	57,25 ($4\cdot10^{-5}$)	8,3	14,8	$1,042\cdot10^{-3}$	16,4 мин	1,7β+ 1,18; 0,51γ	0,005	То же	15,6(0,14)
Барий $Ba^{138}(\gamma, n)Ba^{137}$	71,66 (0,005)	8,51	—	—	2,57 мин	0,661γ	0,1 0,008	Полиметаллические руды То же	13,6(0,05) 12,8(~1)
Празеодим $Pr^{141}(\gamma, n)Pr^{140}$	100 ($7\cdot10^{-4}$)	9,35	14,9	$1,38\cdot10^{-3}$	3,4 мин	2,374 и др. β+ 2,5; 1,6; 0,9γ	0,00 *n* г	Смеси редкоземельных элементов	24(0,0075)
Неодим $Nd^{142}(\gamma, n)Nd^{141}$	27,11 (0,0025)	9,81	—	—	2,42 ч	0,78β+; 1,3; 1,15; 0,88; 0,42; 0,145γ	0,00 *n* г	»	24(0,0075)
Эрбий $Er^{162}(\gamma, n)Er^{161}$	0,136 ($4\cdot10^{-4}$)	—	—	—	3,8 ч	1,23+; 1,82— —0,211γ	0,00 *n* г	»	24(0,0075)
Гафний $Hf^{180}(\gamma, n)Hf^{179m}$	35,24 ($3,2\cdot10^{-4}$)	—	—	—	19 с	0,217; 0,160γ	0,001— —0,05	Титано-циркониевые руды	15(0,08—0,12)
Свинец $Pb^{208}(\gamma, n)Pb^{207m}$	52,4 (0,0016)	10,8	14,0	$8,75\cdot10^{-5}$	0,797 с	1,06; 0,566γ	1 0,1	Полиметаллические руды »	13,8(0,05) 14,8(0,04)

25 МэВ и током 3 мкА содержание углерода в углях в количестве 59% можно определять с относительной погрешностью 1—2%.

Для определения в породах углерода, кислорода, кремния и калия в пробах весом 250 г привлекался бетатрон с максимальной энергией 23 МэВ и током 0,044 мкА [16.62]. Пробы облучались в течение 5—10 мин. Измерение наведенной активности проб велось с помощью сцинтилляционного счетчика диаметром 80 мм и высотой 50 мм. В процессе исследований были достигнуты следующие пороги чувствительности: 0,05% — для углерода и кремния; 0,005% — для кислорода и 0,01% — для калия. Относительная погрешность измерений равнялась 5—10%.

Помимо этого, бетатрон с максимальной энергией 19 МэВ и током 0,04 мкА применялся для определения кислорода с порогом чувствительности 0,1%; кремния — 0,015%; калия — 0,03% и железа — 0,05% при прочих равных условиях [16.62].

ГА использовался также для определения в фосфатном сырье фосфора и фтора [28.70]. Пробы весом 250 г облучались 20 мин. Пауза выбиралась равной 1—301 мин. Наведенная активность в последующем измерялась в течение 5 мин сцинтилляционным счетчиком с кристаллом йодистого натрия диаметром 80 мм и высотой 50 мм и ФЭУ-24. Спектр наведенной активности изучался с помощью АИ-100-1 в интервале 0,3—2,4 МэВ. На кривых спада активности четко выявлялся фтор с $T=112$ мин, железо, калий и другие с $T=8$—10 мин и фосфор с $T=2{,}56$ мин. При облучении проб пород излучением с максимальной энергией 15,6 МэВ и током 0,05 мкА (10 Р/мин·м) были получены следующие пороги: для фосфора — 0,1%, для фтора — 0,025% [28.70].

В полиметаллических рудах при помощи ГА был определен целый комплекс элементов со следующими порогами чувствительности: свинец — 0,1%; медь — 0,002%; цинк — 0,004%; барий — 0,01%; железо — 1%; кремний — 1%; калий — 0,1%; фтор — 0,01%. Пробы весом 150 г периодически облучались в течение 10 мин излучением с максимальной энергией 12,0; 13,6 и 17,0 МэВ (ток 0,15—0,05 мкА). Паузы выбирались соответственно равными 50; 1,11 и 21 мин. Наведенная активность каждый раз измерялась с кристаллом йодистого натрия диаметром и высотой 70 мм. Относительная погрешность измерений не выходила на пределы 2—11% [28.64].

Второй тип проб из полиметаллических месторождений использовался для определения цинка с порогом чувствительности 0,01%, меди — 0,015% и бария — 0,1% с относительной точностью 5—10% [16.62]. Максимальная энергия тормозного излучения равнялась 13,6 МэВ, ток — 0,6 мкА. Остальные условия были теми же, что и при анализе проб первого типа.

В третьем типе проб из полиметаллических месторождений велось определение другой группы химических элементов: меди, бария и фтора. Порог чувствительности при облучении проб весом 100 г гамма-квантами с энергией 12,8 МэВ и током 1,0 мкА достигнут 10^{-3}% для меди; $3\cdot10^{-3}$% для бария и $5\cdot10^{-3}$% для фтора. Пробы облучались также в течение 10 мин, пауза выбиралась равной 2 и 110 мин. Время измерения в обоих случаях составляло 5 мин. Кристалл йодистого натрия имел размеры 100×80 мм.

Помимо определения указанных элементов бетатрон использовался также для определения по НА в пробах алюминия с порогом чувствительности 0,06% и марганца с порогом 0,05%. Тепловые нейтроны при этом получались в бериллиевом блоке с замедлителем. В остальном методика измерений была такой же, как и при ГА.

Помимо этого, метод ГА применялся для определения в цирконievотитановых рудах циркония, титана и гафния [28.10]. Исследования велись с бетатроном при токе 12—40 мкА. Наведенная активность измеря-

лась кристаллом йодистого натрия диаметром и высотой 70 мм, ФЭУ-52А и анализатором АИ-100-1. Облучение гафния производилось излучением с максимальной энергией 8,4 МэВ в течение 3 мин, пауза составляла 0,5 мин, время измерения равнялось 2 мин. При определении циркония образцы с содержанием его менее 10^{-3}% облучались гамма-квантами с максимальной энергией 13,1 МэВ, а при определении более высоких концентраций — с энергией 13,8 МэВ. Время облучения, пауза и время измерения выбирались равными соответственно 15; 1,0 и 13 мин. В случае определения титана максимальная энергия гамма-квантов увеличивалась до 15,6 МэВ. Время облучения, пауза и время измерения составляли соответственно 15; 44 и 10 мин.

При этой методике анализа достигнуты пороги чувствительности: $(4—9)\cdot10^{-5}$% для циркония, $(4—6)\cdot10^{-3}$% для титана и $(3—4)\cdot10^{-3}$% для гафния. Относительная ошибка измерения таких концентраций составляла 30%. Помимо этого, бетатрон с максимальной энергией 16,6 МэВ и током 0,07 мкА применялся для одновременного определения в пробах циркония с порогом чувствительности 0,003%, титана — 0,2%, железа и кремния — 2% [16.62].

Возможности ГА при анализе других объектов рассматриваются в работах [2.19, 10.28, 14.3, 28.64, 28.70, 28.82].

4. **Гамма-активационный метод на запаздывающих нейтронах.** Под действием гамма-квантов в отдельных случаях могут образовываться радиоактивные изотопы, испускающие нейтроны. Регистрация нейтронов при этом позволяет осуществить новую модификацию ГА, так называемый гамма-активационный анализ на запаздывающих нейтронах ГАн. Под действием жесткого гамма-излучения может протекать фотоядерная реакция $O^{18}(\gamma, p)N^{17}$ [2.15].

Ядро изотопа азот-17 с периодом полураспада 4,14 с распадается с испусканием бета-частицы с энергией 3,7 МэВ (100%) и нейтронов с энергией 0,9 МэВ (100%). Порог этой реакции 16,35 МэВ, а массовое макроскопическое сечение с увеличением энергии гамма-квантов меняется следующим образом. При $E_\gamma=17$ МэВ оно равно $1{,}68\cdot10^{-4}$ см^2/г, при $E_\gamma=18$ МэВ — $2{,}34\cdot10^{-4}$ см^2/г, при $E_\gamma=20$ МэВ — $3{,}4\cdot10^{-4}$ см^2/г, при $E_\gamma=22$ МэВ — $6{,}8\cdot10^{-4}$ см^2/г, при $E_\gamma=24$ МэВ — $1{,}225\cdot10^{-3}$ см^2/г, при $E_\gamma=26$ МэВ — $1{,}46\cdot10^{-3}$ см^2/г.

Таким образом, облучая пробы потоком гамма-квантов с энергией выше порога реакции (γ, p) на кислороде-18 по ГАн, можно определять содержание этого изотопа в породах и т. п. В связи с тем, что период полураспада образующегося изотопа азот-17 невелик, транспортировку облученных образцов к месту измерения нейтронов следует осуществлять при помощи автоматической системы.

Под действием жесткого гамма-излучения, как уже отмечалось выше (см. п. 1 § 2 этой главы), может происходить фотоделение ядер урана и тория с появлением мгновенных и запаздывающих нейтронов, последние появляются при распаде осколков деления. Таким образом, облучая пробы потоком жесткого гамма-излучения с энергией свыше порога реакции (γ, O) на уране ($E_t=5{,}1$ МэВ) и тории ($E_t=5{,}4$ МэВ) и перенося пробы от ускорителя к детектору, можно по ГАн определять содержание в пробах урана и тория. Характеристики этих изотопов приводятся в табл. 28-11 [28.50]. Возникающие нейтроны имеют энергию в пределах 0,25—0,45 МэВ. В работе [28.50] в качестве источника жесткого излучения использовался бетатрон с энергией 10—15 МэВ. Перенос образцов весом 0,1—6,0 г от бетатрона к детектирующему блоку осуществлялся с помощью пневмопочты за время 0,1 с после конца облучения. Запаздывающие нейтроны регистрировались с помощью блока пропорциональных счетчиков, размещенных в замедлителе из парафина [28.53]. Изменение во времени потока нейтронов осуществлялось временным анализатором (см. п. 3 § 1 гл. 6). Ширина временного канала анализа-

Таблица 28-11

Запаздывающие нейтроны при фотоделении ($E_{\gamma\ max}$=15 МэВ)

Изотопы, предшествующие образованию нейтронов, и их период полураспада	Группы нейтронов	Период полураспада T, с	Абсолютный выход, нейтр/100 дел.	Относительный выход, %
		УРАН-238		
Br^{87}(56 с)	1	56,2±0,8	0,061±0,010	1,98±0,08
J^{137}(24,4 с), Br^{88}(15 с)	2	21,3±0,3	0,489±0,070	15,7±0,5
J^{138}(6,3 с), Br^{89}(4,5 с)	3	5,50±0,20	0,545±0,070	17,5±0,7
J^{139}(2 с), Br^{90}(1,6 с)	4	2,15±0,10	0,970±0,150	31,1±0,8
—	5	0,70±0,06	0,552±0,080	17,7±0,9
—	6	0,19±0,02	0,502±0,160	16,1±3,5
			3,1±0,4	
		ТОРИЙ-232		
Br^{87}(56 с)	1	55,6±1,5	0,17±0,03	4,40±0,20
J^{137}(24,4 с), Br^{88}(15 с)	2	20,3±0,8	0,62±0,10	16,3±1,0
J^{138}(6,3 с), Br^{89}(4,5 с)	3	5,45±0,50	0,60±0,10	15,9±1,5
J^{139}(2 с), Br^{90}(1,6 с)	4	1,98±0,20	1,43±0,30	37,5±3,0
—	5	0,43±0,10	0,66±0,10	17,2±2,0
—	6	0,18±0,03	0,33±0,15	8,7±3,0
			3,8±0,6	

тора менялась от 0,05 до 8,0 с. Полное время регистрации запаздывающих нейтронов составляло 280 с.

Из табл. 28-11 видно, что по периодам полураспада с регистрацией запаздывающих нейтронов элементы уран и торий разделить невозможно. Поэтому при совместном нахождении в пробах урана и тория метод ГАн необходимо комплексировать с методом ГМ (см. §3 гл. 10). При этом по реперному гамма-излучению можно определять содержание в пробах тория, а по регистрации запаздывающих нейтронов — урана и тория. Зная концентрацию в пробах тория, оценить содержание в пробах урана нетрудно. Чтобы определению урана и тория по этой методике не мешали запаздывающие нейтроны реакции (γ, p) на кислороде-18, облучение проб следует проводить гамма-квантами с энергией ниже 16,35 МэВ (порог деления кислорода-18). При этом определению урана и тория по ГАн не будет мешать ни один другой элемент, содержащийся в пробе.

При анализе кислорода всегда необходимо учитывать влияние урана и тория, которое выявляется облучением проб потоком гамма-квантов с энергией ниже порога фотоядерной реакции на кислороде-18.

§ 3. Нейтронные методы анализа

Для определения в пробах пород и руд, как отмечалось во введении к этой главе, применяются различные методы: ИННМ, НПМ, НГМ', НГМ, НОМ и НА. Из них наибольшее применение находит НА. Этому вопросу в отечественной литературе посвящено большое число работ [25.3, 25.4, 25.13, 25.54, 25.58, 25.61, 25.62, 28.14, 28.28, 28.66, 28.78, 28.120—28.122 и др.]. В связи с этим в настоящем параграфе на этом методе остановимся весьма кратко (особенно на вопросах применения ядерных реакторов для реализации этого метода).

1. **Импульсный нейтрон-нейтронный метод и другие.** При измерениях с импульсным генератором нейтронов может быть реализован импульсный нейтрон-нейтронный метод (ИННМ), сводящийся к изме-

рению во времени потока замедлившихся нейтронов, проходящих через исследуемый образец. Выбирая различные замедлители и их размеры, а также размеры образцов, можно определять содержание в них различных поглощающих элементов. В этом случае могут быть реализованы модификации ИННМ, основанные на регистрации тепловых (ИННМ-т), надтепловых (ИННМ-н) и резонансных (ИННМ-р) нейтронов.

Т. И. Тейлором и В. В. Хавенсом [28.110] еще в 1949 г. произведены исследования по ИННМ-р с пучками нейтронов, получаемых в циклотроне. Измерение спектра нейтронов осуществлялось с помощью пролетного спектрометра. В качестве анализируемых проб использовались вещества, содержащие элементы с высокими резонансными сечениями. В итоге строились графики зависимости измеряемой скорости счета от энергии регистрируемого излучения $N=f(E)$. В области энергий резонанса исследуемых элементов наблюдался провал в скоростях счета. Измеряемая площадь кривой в провале служила мерой содержания в пробе анализируемого элемента. Градуировка спектрометра велась по пробам с известным содержанием определяемых элементов.

При определении содержания марганца (см. табл. 5-8) в железе было установлено, что провал в кривой $N=f(E)$ можно измерять с точностью $\pm 0{,}01$ (в относительных единицах), что соответствует определению в пробах марганца с точностью $\pm 4\%$.

Были проведены исследования по определению содержания индия (см. табл. 5-8) в пробах олова. По данным ИННМ-р, в одной из проб оно составило 0,022% с точностью 0,01%, по данным спектрального анализа — 0,03% с такой же точностью. Следовательно, величину 0,02% для взятой пробы индия можно принять за порог чувствительности при его определении. В качестве минимально определяемой величины в работе [28.110] оценено содержание в пробе 1,5 мг/см^2 индия. Увеличивая толщину проб, можно увеличивать порог чувствительности ИННМ-р, естественно, лишь в каких-то определенных пределах. При этом следует учитывать самопоглощение образцов.

Для золота такой минимальной величиной следует считать массовую толщину в 2,74 мг/см^2, а для гафния, содержащегося в цирконии,— 3 мг/см^2. В исследовании [28.110] отмечается, что для определения 0,1% гафния в цирконии толщину образца необходимо выбирать равной 3 г/см^2. В этой работе показано, что 1% тантала в колумбите можно определять с точностью $\pm 0{,}2\%$.

Методика ИННМ-т в практике геофизических исследований начинает применяться для определения параметров диффузии тепловых нейтронов в образцах горных пород. В связи с тем, что эти данные необходимы для интерпретации результатов ИННК, методику ИННМ уместно рассмотреть в следующей главе.

А. Г. Иващенко и др. [21.4, 21.6] показано, что излучение нейтронного генератора может быть использовано для определения водорода или влажности проб по регистрации протонов отдачи (НПМ, см § 1 гл. 21). Порог чувствительности к водороду при работе с пучком $5\cdot 10^9$ нейтр/с и времени измерения 10 с оценен в 0,006%.

2. **Нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния нейтронов.** Физические основы НГМ′ рассматриваются в п. 1 § 1 гл. 24. Там же показано, что возможности этого метода при использовании ампульных источников нейтронов сильно ограничиваются (НГМ′ применялся лишь для определения в пробах железа). Значительно возможности НГМ расширяются при использовании в качестве источника быстрых нейтронов генераторов, позволяющих получать потоки нейтронов с энергией 14 МэВ.

Измерение гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов можно вести по методике, основанной на облучении образцов большого объема с кольцевой геометрией (рис. 28-7), и по методике, основанной на применении малых образцов (рис. 28-8). Защитный конус может быть изготов-

лен из вольфрама, свинца или полиэтилена. Вес и размеры образцов выбираются, исходя из потока нейтронов, параметра детектора, а также концентрации в пробе исследуемого и мешающего элементов. Толщина кольцевого слоя образца обычно составляет несколько сантиметров, общий вес — несколько сотен граммов. Вес малых образцов обычно выбирается от нескольких до десятков граммов.

Все устройство в процессе измерений, как уже отмечалось в п. 1 § 1 гл. 24, должно располагаться вдали от стен и других предметов. Держатели конуса, детектора, образца и т. д. должны быть по возможности легче. Эти требования обусловливаются необходимостью сведения к минимуму фона от всех посторонних предметов, которые могут создавать помехи при проведении анализа по НГМ′.

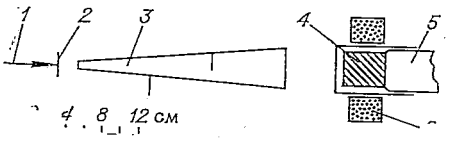


Рис. 28-7. Схематическое устройство для измерения гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов при облучении образцов кольцевой геометрии.

1 — пучок заряженных частиц, *2* — тритиевая мишень, *3* — защитный конус, *4* — люминофор, *5* — фотоумножитель, *6* — образец.

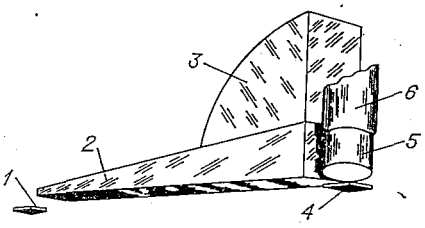


Рис. 28-8. Схематическое устройство для измерения гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов при облучении малых образцов, устанавливаемых на расстоянии 25 см от источника нейтронов.

1 — источник нейтронов, *2* — вольфрам, *3* — свинец, *4* — проба, *5* — люминофор, *6* — фотоумножитель.

НГМ′ с генератором нейтронов Т. К. Мартином и др. [4.19, 14.3] применялся для определения содержания углерода и кислорода (см. табл. 24-1) в углях. Для этих целей использовались пробы весом 200—300 г. Анализ углерода и кислорода велся путем сравнения результатов измерения гамма-спектров с эталонными. Точность определения С при этом была достигнута равной ± 1, а О — $\pm 3\%$.

Р. Л. Колдуэллом и др. [28.86, 19.71] методика НГМ′ с кольцевой геометрией облучаемых сред (осадочных пород) применялась для определения не только углерода и кислорода, но и магния, алюминия, кремния, фосфора, серы, кальция и железа (см. табл. 24-1). Расстояние между мишенью генератора и центром кристалла йодистого натрия (5×5 см) составляло 40 см. Кристалл от прямого нейтронного излучения защищался вольфрамовым конусом длиной 14 см и свинцовым блоком толщиной 10 см. Генератор излучал поток $1{,}6 \cdot 10^{10}$ нейтр/с. Спектр гамма-излучения изучался с помощью 100-канального анализатора. Концентрации магния, алюминия и железа в количестве 5% определялись с относительной ошибкой менее 10%. С такой же ошибкой оценивалось отношение кремния к кислороду. Порог чувствительности к железу 0,09%.

3. **Нейтронный гамма-метод радиационного захвата медленных нейтронов.** К настоящему времени разрабатываются две модификации этого метода: ИНГМ-р — импульсный нейтронный гамма-метод, основанный на регистрации гамма-квантов радиационного захвата резонансных нейтронов между импульсами быстрых нейтронов генератора, и НГМ — стационарная методика, основанная на регистрации гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов, выходящих из реактора.

Разработкой ИНГМ-р занимаются во ВНИИ радиационной техники Р. Г. Гамбарян и др. [23.19, 28.18]. Импульсный поток быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ вводится внутрь блока тяжелого замедлителя (свинец). Проба помещается в специальный канал этого замедлителя. Гамма-излучение радиационного захвата измеряется между импульсами нейтронов с помощью спектрометрического счетчика и временного анализатора в узкие интервалы времени. На кривых $N_\gamma = f(t)$ при этом об-

разуются максимумы скорости счета, соответствующие гамма-квантам резонансного захвата медленных нейтронов. Настраивая гамма-спектрометр на энергию, характерную для реакции (n, γ) определяемого элемента, и выбирая определенные времена задержки и диапазоны временного окна, можно выявить присутствие в пробах элементов с высокими резонансными сечениями: родия, палладия, серебра, иридия, платины, золота, кадмия, индия, урана и др.

Перейдем к рассмотрению НГМ. Возможности его с применением ампульных источников рассматриваются в п. 2 § 1 гл. 24.

Схема исследований по НГМ с пучком тепловых нейтронов, выведенных из реактора, показана на рис. 28-9. Пучок тепловых нейтронов, коллимированных борным и свинцовым фильтрами, бомбардирует мишень. Гамма-излучение радиационного захвата, возникающее при этом в пробе, попадает в кристалл и регистрируется. Для защиты кристалла от нейтронов, рассеиваемых мишенью, вход к нему закрыт борным поглотителем. Для предохранения от рассеянного гамма-излучения кристалл и фотоумножитель помещают в специальную свинцовую защиту. Ослабление характеристического рентгеновского излучения свинца, возникающего при возбуждении его атомов под действием гамма-излучения пробы, осуществляется при помощи слоистой защиты, изготовляемой обычно из тантала (0,5 мм), олова (0,5 мм), меди (0,2 мм) и т. д. Более основательно этот вопрос рассматривается в работах А. А. Хайдарова [25.60] и Г. А. Арипова, В. Р. Бурмистрова и др. [25.61].

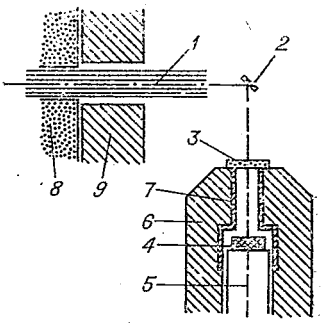


Рис. 28-9. Схема исследования по нейтронному гамма-методу в пучке тепловых нейтронов реактора.

1 — поток тепловых нейтронов, *2* — проба, *3* — поглотитель из бора, *4* — кристалл, *5* — фотоумножитель, *6* — защита из свинца, *7* — сложный поглотитель, *8* — борный коллиматор, *9* — свинцовый коллиматор.

Иногда для регистрации гамма-излучения радиационного захвата используют не один, а два сцинтилляционных счетчика, располагающихся по обе стороны нейтронного пучка. Коллимация нейтронного пучка при проведении НГМ дополнительно осуществляется с помощью различных диафрагм. Такие системы регистрации весьма удобны при счете совпадений каскадных гамма-квантов [25.61].

Применение НГМ, как ГА и НА, выгодно при проведении многокомпонентного анализа горных пород и руд.

Т. Л. Эйзенхауэром и Г. Г. Моррисоном проведено сравнение порогов чувствительности методов НГМ и НА применительно к анализу большого числа элементов. Авторы высказываются в пользу НГМ. Результаты этих сопоставлений приводятся в работе [4.19].

Вопросы применения НГМ для анализа геологических объектов рассматриваются в работах [4.19, 14.3, 18.69, 25.4, 25.54, 25.60, 25.61, 28.6, 28.38, 28.117].

Р. К. Гринвудом и др. [14.3] НГМ применялся для определения в образцах метеоритов и некоторых горных пород водорода, натрия, магния, алюминия, кремния, серы, калия, железа, кобальта и никеля. Облучение проб весом 2—5 г проводилось в потоке $3 \cdot 10^6$ тепловых нейтр/см$^2 \cdot$ с. Спектр гамма-излучения радиационного захвата нейтронов измерялся при помощи кристалла йодистого натрия размерами 75×75 мм.

Гамма-спектр одного из образцов пород приведен на рис. 28-10. Как видно, в спектре гамма-излучения проявляются линии многих химических элементов. В области жесткого излучения наблюдается взаимное наложение пиков железа и алюминия для энергий 7,125 и 7,612 МэВ.

Порог чувствительности к водороду при этих измерениях равен 0,1%.

Рис. 28-1в. Сцинтилляционный гамма-спектр кварцитовых гнейсов.

НГМ применялся также для определения хрома [18.69, 25.61, 25.54, 28.8, 28.39], никеля [25.60] и ртути [25.54, 25.60] в рудных пробах при облучении в потоке нейтронов около 10^8 нейтр/см^2·с.

Необходимые данные о хроме применительно к НГМ рассматриваются в п. 2 § 1 гл. 24. При измерениях хрома в пучке ядерного реактора отдавалось предпочтение регистрации гамма-квантов с энергией выше 9,1 МэВ. С целью выяснения влияния других элементов на результаты определения хрома в пробах были проведены расчеты по оценке выхода гамма-квантов в соответствии с формулой [25.61]:

$$n(E_\gamma) = f\Sigma p\eta \frac{i_\gamma}{100}, \qquad (28\text{-}1)$$

где f — величина потока тепловых нейтронов; Σ — макроскопическое массовое сечение реакции (n, γ); p — вес образца, η — распространенность изотопа; i_γ — выход гамма-квантов на 100 нейтронов.

Результаты расчета приводятся в табл. 28-12. Из таблицы видно, что определению хрома может мешать селен. Однако его содержание в пробах бывает ничтожно малым, поэтому влиянием его можно пренебречь.

В работах [25.54, 28.38] показано также, что определение хрома в пробах можно вести по регистрации гамма-квантов с энергией свыше 8,3 МэВ. Железо, содержавшееся в пробе, не мешало определению хрома. Зависимость регистрируемой скорости счета от содержания в пробах хрома носила линейный характер для диапазона концентраций 10—100% [25.54].

При радиационном захвате хромом-54 тепловых нейтронов каскадно испускаются гамма-кванты с энергией 0,84 и 8,88 МэВ. Осуществляя регистрацию этих гамма-квантов с помощью спектрометра совпадений, можно вести определение концентраций хрома в пробах [25.61].

Сведения о никеле применительно к НГМ рассматриваются в п. 2 § 1 гл. 24. Для определения никеля с использованием излучения реактора в работе [25.60] измерение гамма-излучения велось в области 8 МэВ (8,998—1,02 МэВ). Порог чувствительности равнялся 0,45%.

Необходимые применительно к НГМ сведения о ртути приводятся в § 4 гл. 24. При измерениях по НГМ в потоке нейтронов из ядерного реактора в работах [25.54, 28.60] использовались пробы весом 15 г. Порог чувствительности был равен 0,1%.

В работах [25.60, 28.6] показана также принципиальная возможность применения НГМ для определения в пробах серы по гамма-квантам с энергией 5,44 МэВ; 5,44—0,51=4,93 МэВ и 5,44—1,02=4,42 МэВ,

Таблица 28-12

Выход гамма-квантов с энергией выше 9 МэВ из различных ядер атомов элементов, вступающих в реакцию (n, γ)

Элемент	Энергия гамма-квантов $E\gamma$, МэВ	Количество гамма-квантов в секунду $n\ (E\gamma)$	Элемент	Энергия гамма-квантов E_γ, МэВ	Количество гамма-квантов в секунду $n(E\gamma)$
Кремний . . .	10,59	1	Селен	10,483	$2{,}4\cdot10^3$
		1		9,882	$3\cdot10^1$
Титан	10,64	17		9,172	$2{,}1\cdot10^1$
	9,376	222	Стронций . . .	9,22	716
Хром	9,189	$1{,}2\cdot10^3$		9,06	1193
	9,72		Молибден . . .	9,15	613
Железо . . .	9,296	$2{,}2\cdot10^1$	Кадмий . . .	9,04	$5{,}1\cdot10^3$
			Барий	9,23	369

железа по гамма-квантам с энергией 7,64 МэВ; 7,64—0,51=7,13 МэВ и 7,64—1,02=6,62 МэВ и вольфрама по гамма-квантам в диапазоне 5—6,5 МэВ. Железо и сера определялись с относительной ошибкой 1—9%.

В работе [14.3] показана возможность определения в редких землях гадолиния в количествах от $5\cdot10^{-5}$ до 0,5% и самария — от $1\cdot10^{-3}$ до 0,1% по регистрации гамма-квантов с энергией соответственно 6,74 и 7,22 МэВ. Помимо этого, велось также определение в рудах самария, гадолиния, диспрозия и эрбия [28.117]. Относительная ошибка оценивалась в 1%. Порог чувствительности при определении самария может быть равен 0,002%, гадолиния — 0,004%, диспрозия — 0,1% и эрбия — 0,3%.

Возможности НГМ′ и НГМ существенно расширяются при измерении спектра излучения при помощи полупроводниковых детекторов [28.118].

4. **Нейтронно-осколочный метод.** Потоки нейтронов, выходящие из реакторов, используются также для реализации нейтронно-осколочного метода (НОМ). В основу его положены реакции деления ядер некоторых тяжелых элементов на осколки (n, O). Из распространенных в природе элементов этой реакции подвержены лишь изотопы урана и тория (см. гл. 1 и 9). Из изотопов урана уран-238 способен делиться под действием быстрых нейтронов, а уран-235 — под действием тепловых и быстрых нейтронов. Эффективное сечение деления урана-235 под действием быстрых нейтронов с энергией 1—3 МэВ равно 1,3 барн. С уменьшением энергии нейтронов эффективное сечение возрастает и для тепловых нейтронов достигает 580 барн.

Порог деления урана-238 равен 1,4 МэВ, эффективное сечение для нейтронов с энергией 2—3 МэВ равно 0,55 барн. Хотя реакция деления урана-238 является и пороговой, однако с уменьшением энергии нейтронов от 1,4 МэВ и ниже уран-238 продолжает делиться со значительно меньшей вероятностью, чем на быстрых нейтронах. Так, эффективное сечение деления урана-238 на тепловых нейтронах меньше величины $5\cdot10^{-4}$ барн.

Под действием быстрых нейтронов способен также делиться и торий-232. Порог его реакции деления равен 1,3 МэВ. Эффективное сечение деления для нейтронов с энергией 1,6—6,0 МэВ равно 0,16 барн, для нейтронов с энергией 14,6 МэВ — 0,37 барн. Для тепловых нейтронов эффективное сечение деления равно $2\cdot10^{-4}$ барн.

Пробег осколков деления в газах при нормальных атмосферных условиях достаточно велик. Например, в водороде и дейтерии он равен 90—110 мм, в аргоне — 20—27 мм и т. д. [28.49]. В твердых же телах величины пробегов весьма малы. Так, в алюминии они равны 0,014 мм. Следовательно, пробы должны быть очень тонкими. Для этого уран из-

влекается из пробы и в виде тонкого слоя электролитически наносится на тонкую подложку, изготовленную из алюминия, нержавеющей стали, платины и т. д.

Осколки деления обычно регистрируются при помощи импульсных камер деления, заполненных газом (см. п. 1 § 5 гл. 5). Для устранения влияния флуктуаций нейтронного потока измерения лучше всего вести при помощи двух секционных ионизационных камер, обеспечивающих одновременное измерение осколков деления пробы и эталона [28.44]. Определение исследуемых изотопов в пробе ведется всегда путем сравнения с замерами эталонных проб.

Если обозначить число ядер урана-235 в исследуемой пробе через n (235), а в эталоне — через n' (235), то отношение числа ядер этих изотопов в измеряемой и эталонной пробах будет равно отношению скоростей счета осколков этих проб $N'_т$ и $N_т$:

$$K_т = \frac{n'(235)}{n(235)} = \frac{N'_т}{N_т}.$$

При облучении проб потоками быстрых нейтронов аналогичный коэффициент определяется из соотношения

$$K_б = \frac{n'(238)\,\sigma(238) + n'(235)\,\sigma(235)}{n(238)\,\sigma(238) + n(235)\,\sigma(235)} = \frac{N'_б}{N_б},$$

где $n(238)$ и $\sigma(235)$ — эффективные сечения ядер урана-238 и урана-235; $N'_б$ и $N_б$ — скорости счета осколков при облучении проб потоками быстрых нейтронов.

При использовании навесок 0,05 г порог чувствительности НОМ к урану и торию оценен соответственно равным $2 \cdot 10^{-4}$ и $4 \cdot 10^{-3}$% [28.65].

Отношение концентраций урана-235 к урану-238 по рассматриваемой методике может определяться с абсолютной точностью 0,10—0,15, отношение $K = K_т/K_б$ — с абсолютной точностью 0,02—0,06.

Другие сведения по НОМ приводятся в работах [14.3, 28.43, 28.44, 28.73].

Разновидностью НОМ является также и метод нейтронно-осколочной радиографии (НОР). Суть его сводится к облучению в реакторе полированных пластинок пород, аншлифов и т. д. с плотно прилегающими покрытиями из некоторых материалов (лавсан и т. д.). Под действием осколков деления в этих материалах наблюдаются области радиационного разрушения (треки), которые путем травления с помощью кислот можно делать видимыми. По плотности таких треков можно судить, например, о содержании в образцах урана с порогом чувствительности менее 10^{-11}% или определять возраст пород — по первичным трекам в самих породах [28.28, 28.119]. Однако метод НОР является в большей степени геохимическим, чем геофизическим, поэтому рассматривать его подробно не будем.

5. **Нейтронный активационный анализ на быстрых нейтронах.** Для реализации нейтронного активационного анализа на быстрых нейтронах НА-б в основном применяются нейтронные генераторы. Под действием быстрых нейтронов, как уже неоднократно отмечалось, происходят реакции (n, p), (n, α), $(n, 2n)$, причем на легких элементах обычно превалируют реакции (n, p) и (n, α), а на тяжелых ($Z > 50$) — реакция $(n, 2n)$.

В статье [28.89] произведена оценка порогов чувствительности для целого ряда элементов. Эти данные приводятся также в работе [14.3]. Аналогичные расчеты содержатся и в исследовании [28.101]. Перечень некоторых изотопов, образующихся под действием нейтронов с энергией 14 МэВ, приведен в табл. 28-13 (преимущественно для элементов, анализ которых велся применительно к ядерно-геофизическим целям). Полный перечень изотопов, образующихся под действием нейтронов с энергией 14 МэВ, см. в сборнике [25.61].

Наиболее значительные исследования в этом направлении проведены под руководством Д. И. Лейпунской (ВНИИЯГГ) [25.41, 28.7] — с генератором $5 \cdot 10^9$ нейтр/с ($\sim 10^8$ нейтр/см$^2 \cdot$с) и Л. П. Старчиком (ИГИ) [28.60] — с генератором 10^{10} нейтр/с ($\sim 2 \cdot 10^8$ нейтр/см$^2 \cdot$с).

Облучение проб при анализе изотопов с малыми периодами полураспада производилось в течение $4T$, а изотопов с периодами полураспада 1 ч и более — в течение 1 ч. Пробы от места облучения к месту измерения лучше всего транспортировать с помощью пневмопочты (особенно при анализе короткоживущих изотопов).

Реакция (n, p) использовалась для определения кислорода в породах с содержанием свыше 0,1% [16.60]. Определению кислорода может мешать реакция $F^{19}(n, \alpha)N^{16}$ при содержании в породах фтора свыше 0,1% [25.13]. Пробы облучались потоком $7 \cdot 10^8$ быстрых нейтр/см$^2 \cdot$с. Гамма-кванты регистрировались с помощью кристалла йодистого натрия диаметром и высотой 125 мм с колодцем. Определение кислорода велось с относительной ошибкой 0,39% и производительностью 80 анализов в день. Порог чувствительности оценен равным 0,025% [14.3]. В статье [25.41] достигнута на порядок более высокая чувствительность ($\sim 0{,}5\%$). Определение кислорода в породах рассматривается также в работе [28.114].

Анализ фтора в пробах с содержанием кислорода ведется по реакции $F^{19}(n, p)O^{19}$. Помимо этого, для определения фтора могут использоваться и другие реакции, в частности, $F^{19}(n, \alpha)N^{16}$. В присутствии кислорода пробы следует облучать нейтронами с энергией ниже 9,6 МэВ. Для этих целей могут быть применены электронные ускорители тормозного излучения с максимальной энергией 3,36 МэВ и выше с бериллиевой мишенью. Помимо этого, для получения нейтронов с энергией 6 МэВ могут быть использованы дейтронные ускорители на 2 МэВ, нейтроны в которых возникают в реакции $Be^9(d, n)B^{10}$ (см. § 5 гл. 1). Г. Р. Шредером и др. для этих целей использовался дейтронный ускоритель с током 35 мкА. Наведенная активность измерялась с помощью кристалла йодистого натрия диаметром и высотой 75 мм. При 10 циклах облучения и измерения был достигнут порог чувствительности 0,01% [25.13]. В работе [25.41] порог составил $\sim 0{,}5\%$.

Определение натрия в силикатных породах можно вести с порогом чувствительности 0,5% и относительной точностью 3—5% [25.41].

Определение магния ведется по реакции $Mg^{24}(n, p)Na^{24}$. По другим реакциям определению магния мешают изотопы, возникающие при активации кремния. Пробы облучаются 4 ч, пауза — 15 ч, время измерения — 20 мин, порог дискриминации детектора — 2,3 МэВ. Определению магния при этом мешает алюминий, вступающий в реакцию $Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$. Учесть влияние этой реакции можно лишь при облучении проб в потоке тепловых нейтронов [14.3]. Порог чувствительности определения магния в карбонатных породах равен $\sim 0{,}5\%$ [25.41].

Указанная реакция использовалась для определения в пробах алюминия. Облучение проб велось потоком $2 \cdot 10^8$ нейтр/см$^2 \cdot$с в течение 1,5 ч, а измерение — в течение 2,5 мин с кристаллом йодистого натрия размерами 125×125 мм. Порог чувствительности равен 0,1%, а относительная ошибка измерений — 4% [25.13].

Эти же устройства использовались и для определения в пробах кремния по реакции $Si^{28}(n, p)Al^{23}$. Время облучения проб выбиралось равным 1 мин, пауза — также 1 мин (для исключения влияния реакции на кислороде), время измерения — 30 с при пороге дискриминации 1,4 МэВ.

Концентрации кремния в 0,1% измерялись с относительной погрешностью 2%. Определению кремния по этой реакции может мешать фосфор, на котором в реакции (n, α) также образуется изотоп алюминий-28. При анализе песчаников вклад от этой и других реакций не превосходит 1%. В случае определения кремния в известняках и доломитах ошибка

Активация изотопов нейтронами с $E_n = 14$ МэВ

Z	Реакция	Порог реакции, МэВ	Массовое макроскопическое сечение, см²/г	Период полураспада образующихся изотопов	Энергия бета-частиц или позитронов (+), МэВ, и их выход, %	Энергия гамма-квантов, МэВ, и их выход на распад, %
1	2	3	4	5	6	7
5	$B^{11}(n, \alpha)Li^{8}$	7,2	$1,86 \cdot 10^{-3}$	0,847 с	13(90); 6(5); 3(5)	Нет
	$B^{11}(n, p)Be^{11}$	—	$1,45 \cdot 10^{-4}$	14 с	—	6,8
7	$N^{14}(n, 2n)N^{13}$	10,9	$2,15 \cdot 10^{-4}$	9,965 мин	1,2(100), +	Нет
8	$O^{16}(n, p)N^{16}$	9,6	$3,39 \cdot 10^{-3}$	7,352 с	10,44(26); 4,27(68); 3,3(4,9)	7,12(4,9); 6,13(68)
9	$F^{19}(n, \alpha)N^{16}$	1,5	$1,58 \cdot 10^{-3}$	7,352 с	10,44(26); 4,27(68); 3,3(4,9)	7,12(4,9); 6,13(68)
	$F^{19}(n, p)O^{19}$	4,0	$4,27 \cdot 10^{-3}$	29,1 с	4,6(41); 3,25(59)	1,45(3,3); 1,36(55,2) 0,198(96,7); 0,110(3,3)
	$F^{19}(n, 2n)F^{18}$	10,9	$1,935 \cdot 10^{-3}$	109, 87 мин	0,649(100), +	Нет
11	$Na^{23}(n, p)Ne^{23}$	3,5	$8,8 \cdot 10^{-4}$	37,5 с	4,39(67); 3,96(32);	1,625(1); 0,44(32)
12	$Mg^{24}(n, p)Na^{24}$	4,9	$4,76 \cdot 10^{-3}$	15 ч	1,394(100);	2,75(100); 1,37(100); 1,61(6,5); 0,98(14,5)
	$Mg^{25}(n, p)Na^{25}$	4,1	$1,082 \cdot 10^{-2}$	60 с	4,0(65); 3,15(30)	0,58(14); 0,40(14,3)
	$Mg^{26}(n, \alpha)Ne^{23}$	—	—	37,5	4,39(67); 3,96(32)	1,625(1); 0,44(32)
13	$Al^{27}(n, p)Mg^{27}$	1,96	$1,56 \cdot 10^{-3}$	10 мин	1,754(58); 1,592(42)	1,015(42); 0,834(58)
	$Al^{27}(n, \alpha)Na^{24}$	2,44	$2,45 \cdot 10^{-3}$	15 ч	1,394(100)	2,75(100); 1,37(100)
14	$Si^{28}(n, p)Al^{28}$	4,0	$4,73 \cdot 10^{-3}$	2,31 мин	2,87(100)	1,78(100)
	$Si^{29}(n, p)Al^{29}$	3,3	$2,08 \cdot 10^{-3}$	6,56 мин	2,5(94); 1,5(6)	2,43(6); 1,28(94)
	$Si^{30}(n, \alpha)Mg^{27}$	—	$1,6 \cdot 10^{-3}$	10 мин	1,754(58); 1,592(42)	1,015(42); 0,834(58)
15	$P^{31}(n, p)Si^{31}$	0,97	$1,5 \cdot 10^{-3}$	2,64 ч	1,48(99,93)	1,26(0,07)
	$P^{31}(n, \alpha)Al^{28}$	0,91	$2,92 \cdot 10^{-3}$	2,31 мин	2,87(100)	1,78(100)
	$P^{31}(n, 2n)P^{30}$	11,8	$2,14 \cdot 10^{-4}$	2,5 мин	3,25(99,5), +	2,24(0,05); 0,51(199)
16	$S^{34}(n, p)P^{34}$	—	$1,5 \cdot 10^{-3}$	12,4 с	5,1(75); 3,2(25)	2,1(25)

	$S^{34}(n, \alpha)S^{31}$	0,9	$2{,}48\cdot10^{-3}$	2,64 ч	1,48(99,93)	1,26(0,07)
17	$Cl^{35}(n, 2n)Cl^{34}$	—	$6{,}89\cdot10^{-5}$	32,4 мин	4,46(46); 2,48(27); 1,33(27), +	0,145(46)
	$Cl^{37}(n, p)S^{37}$	3,5	$4{,}56\cdot10^{-4}$	5,07 мин	4,7(10); 1,6(90)	3,09(90)
	$Cl^{37}(n, \alpha)P^{34}$	—	$3{,}09\cdot10^{-3}$	12,4 с	5,1(75); 3,2(25)	2,1(25)
19	$K^{39}(n, 2n)K^{38}$	13,5	$1{,}54\cdot10^{-4}$	7,67 мин	2,815(99), +	2,16(99); 0,51(189)
	$K^{41}(n, p)Ar^{41}$	—	$1{,}23\cdot10^{-3}$	1,827 ч	1,12(99,1)	1,283(99,1)
	$K^{41}(n, \alpha)Cl^{38}$	—	$7{,}71\cdot10^{-4}$	37,12 мин	4,81(53); 2,77(16); 1,11(31)	2,15(47); 1,6(31)
24	$Cr^{52}(n, p)V^{52}$	—	$1{,}02\cdot10^{-3}$	3,77 мин	2,47(99,3)	1,43(99,3)
25	$Mn^{55}(n, \alpha)V^{52}$	—	$3{,}28\cdot10^{-4}$	3,77 мин	2,47(99,3)	1,43(99,3)
26	$Fe^{56}(n, p)Mn^{56}$	2,95	$1{,}18\cdot10^{-3}$	2,58 ч	2,84(47); 1,03(25,5); 0,72(18)	2,12(14,5); 1,81(25,5); 0,845(98,8)
27	$Co^{59}(n, \alpha)Mn^{56}$	5,3	$3{,}17\cdot10^{-3}$	2,58 ч	2,84(47); 1,03(25,5); 0,72(18)	2,12(14,5); 1,81(25,5); 0,845(98,8)
28	$Ni^{61}(n, p)Co^{61}$	—	$1{,}78\cdot10^{-3}$	1,645 ч	1,22(100)	0,0674(100)
29	$Cu^{63}(n, 2n)Cu^{62}$	11,2	$4{,}78\cdot10^{-3}$	9,76 мин	2,92(97,5)	0,51(195)
	$Cu^{65}(n, 2n)Cu^{64}$	10,1	$9{,}27\cdot10^{-3}$	12,88 ч	0,656(19), +; 0,573(38)	1,34(0,5; 0,51(38)
30	$Zn^{64}(n, p)Cu^{64}$	—	$3{,}67\cdot10^{-3}$	12,88 ч	0,656(19, +; 0,573(38)	1,34(0,5); 0,51(38)
	$Zn^{64}(n, 2n)Zn^{63}$	12,5	$5{,}96\cdot10^{-4}$	38,4 мин	2,33(80); 1,71(7,4); 1,4(5,1),+	0,996(6,7); 0,67(9); 0,51(200)
	$Zn^{66}(n, p)Cu^{66}$	3,5	$9{,}9\cdot10^{-4}$	5,1 мин	2,63(91); 1,64(9)	1,04(9)
31	$Ga^{69}(n, 2n)Ga^{68}$	10,2	$6{,}26\cdot10^{-3}$	67,7 мин	1,894(87,4); 0,88(1,3),+	1,077(1,3); 0,51(175)
	$Ga^{71}(n, 2n)Ga^{70}$	9,2	$7{,}71\cdot10^{-3}$	21,37 мин	1,65(99,2)	1,042 (0,76); 0,173(0,4)
32	$Ge^{70}(n, 2n)Ge^{69}$	—	$6{,}02\cdot10^{-3}$	38,8 ч	1,21(88); 0,62(10); 0,3(2),+	1,61(5,5); 1,12(93,5); 0,58(5,5); 0,51(66)
	$Ge^{76}(n, 2n)Ge^{75m}$	—	$1{,}43\cdot10^{-2}$	49 с	Нет	0,139(100)
34	$Se^{77}(n, n')Se^{77}$	~0,8		17,5 с	Нет	0,160(10)
	$Se^{78}(n, 2n)\ Se^{77m}$	9,92	$7{,}12\cdot10^{-3}$	17,5 с	Нет	0,160(10)
	$Se^{78}(n, 2n)Se^{77m}$	9,92	$7{,}12\cdot10^{-3}$	»	»	»

Окончание табл. 28-13

1	2	3	4	5	6	7
	$Se^{80}(n, 2n)Se^{79m}$	9,92	$7{,}62 \cdot 10^{-3}$	3,91 мин	Нет	0,095 (100)
35	$Br^{79}(n, n')Br^{79m}$	~0,8	$1{,}61 \cdot 10^{-3}$	4,78 с	»	0,208 (100)
	$Br^{81}(n, 2n)Br^{80}$	10,3	$6{,}16 \cdot 10^{-3}$	17,55 мин	0,87 (26), +2,0 (85); 1,38 (6,3)	0,62 (13); 0,51 (6)
38	$Sr^{87}(n, n')Sr^{87m}$	8,5	—	2,8 ч	Нет	0,388 (100)
39	$Y^{89}(n, n')Y^{89m}$	0,9	$5{,}9 \cdot 10^{-3}$	16,1 с	»	0,913 (100)
50	$Sn^{116}(n, p)In^{116m}$	—	$8 \cdot 10^{-6}$	2,2 с	»	0,16 (100)
52	$Te^{130}(n, 2n)Te^{129}$	—	$2{,}78 \cdot 10^{-3}$	7,4 мин	1,45 (70,5); 0,99 (15,4); 0,69 (3,7); 0,29 (10,4)	1,09 (10); 0,74 (4); 0,46 (15); 0,09 (96);
53	$Ce^{140}(n, 2n)Ce^{139m}$	9,1	$4{,}56 \cdot 10^{-3}$	60 с	Нет	0,74 (100);
59	$Pr^{141}(n, 2n)Pr^{140m}$	9,4	$8{,}8 \cdot 10^{-3}$	3,4 мин	2,37 (51) и др.,+	2,5; 1,9; 1,6; 0,9; 0,51;
60	$Nd^{142}(n, 2n)Nd^{141m}$	9,9	$6{,}2 \cdot 10^{-4}$	63,9 с	Нет	0,76 (100)
62	$Sm^{144}(n, 2n)Sm^{143}$	10,52	$4{,}81 \cdot 10^{-5}$	2,3 мин	»	0,68 (100);
65	$Tb^{159}(n, 2n)Tb^{158m}$	8,22	$6{,}07 \cdot 10^{-4}$	11 с	»	0,11 (11);
68	$Er^{168}(n, 2n)Er^{167m}$	—	$1{,}85 \cdot 10^{-4}$	2,3 с	»	0,208 (100);
72	$Hf^{180}(n, 2n)Hf^{179m}$	—	$6{,}78 \cdot 10^{-4}$	19 с	»	0,217 (100); 0,160;
74	$W^{184}(n, 2n)W^{183m}$	7,13	$7{,}93 \cdot 10^{-4}$	5,1 с	»	0,155; 0,105; 0,06
80	$Hg^{200}(n, 2n)Hg^{199}$	—	—	4,2 с	»	0,368 (40); 0,159 (60)

может возрастать до 14% за счет влияния реакций на магнии [14.3]. При анализе алюмосиликатных пород порог чувствительности к кремнию равен 0,05% [25.41, 28.7].

Рассматриваемая выше аппаратура иногда одновременно используется для определения кремния и кислорода. Разделение изотопов осуществляется либо по периодам полураспада, либо по энергии регистрируемых гамма-квантов.

Реакция $P^{31}(n, \alpha)Al^{28}$ может быть использована для определения фосфора, однако этому мешает реакция $Si^{28}(n, p)Al^{28}$. Содержание в пробе 1% фосфора эквивалентно 0,65% кремния. Порог чувствительности при анализе фосфоритов и апатитов к фосфору оценен равным нескольким процентам [25.41].

При анализе натриевых и калиевых солей велось определение в них хлора и калия [25.41]. Пороги чувствительности определения этих элементов также оценены равными нескольким процентам при относительных ошибках 3—5%.

Аналогичные пороги чувствительности и ошибки получены при анализе хрома и марганца в рудах [25.41].

При анализе в рудах железа в пуч-

ке 10^8 нейтр/см^2·с облучение проб велось в течение 1 мин [28.61]. Паузу для устранения влияния породообразующих элементов рекомендуется выбирать равной 30 мин, время измерения гамма-квантов в области 0,845 МэВ — 10 мин. Порог чувствительности оценен в 0,1%. Относительная статистическая ошибка не выходила за пределы 0,5%. Измерения велись с кристаллом йодистого натрия диаметром 90 мм и высотой 70 мм с колодцем.

Ю. С. Алпатьевым и др. [15.25] изучена возможность одновременного определения пяти породообразующих элементов с помощью генератора нейтронов, созданного на нейтронной трубке с выходом 10^9 нейтр/с ($2 \cdot 10^7$ нейтр/см^2·с). Порог чувствительности по расчетам оценивается равным 0,05% — для магния; $1 \cdot 10^{-3}$% — для алюминия; $4 \cdot 10^{-4}$ — для кремния; $2 \cdot 10^{-3}$% — для марганца; 0,02% — для железа. Абсолютная ошибка измерений при этом меняется в пределах 0,05—0,7%.

Реакция Cu^{63} (n, $2n$) Cu^{62} использовалась для определения меди в рудных пробах. Облучение проб велось потоком 10^7 нейтр/см^2·с. Аннигиляционное гамма-излучение измерялось с помощью схемы совпадений. Мешающее излучение от других позитронных излучателей не выходило за пределы 3% при содержании в пробах 2% меди. При времени измерения 5 мин достигнут порог чувствительности 0,05% [14.3].

Е. М. Лобановым, А. И. Чанышевым и др. [25.61, 28.72] в пробах медных руд велось одновременное определение меди, алюминия и кремния. Пробы весом 2 г активировались в течение 5 мин. Пауза равнялась 1 мин. Регистрация излучения магния-27 и алюминия-28 осуществлялась с помощью гамма-спектрометра, а аннигиляционного излучения меди-62 — спектрометра совпадений. Каждый замер занимал 4 мин. На анализ одного образца затрачивалось 25 мин, а анализ в образце только меди и кремния — 15 мин. Порог чувствительности на медь составлял 0,05%, на кремний — 0,5%, на алюминий — 1%. Относительная ошибка измерений — 10%. Вклад мешающего излучения при анализе на медь, алюминий и кремний не выходил за пределы 4; 5 и 3%.

Ниже рассмотрим результаты исследований, выполненных в ИГИ с генератором нейтронов, дающим поток $\sim 2 \cdot 10^8$ нейтр/см^2·с [28.51, 28.60, 28.67, 28.68, 28.79]. Наведенная активность регистрировалась спектрометром комптоновских антисовпадений [28.54, 28.60, 28.67], созданным на основе кристалла йодистого натрия диаметром 90 мм и высотой 70 мм (с колодцем) с ФЭУ-13, расположенным в пластмассовом сцинтилляторе с ФЭУ-49.

Эта методика применялась для определения в пробах целого ряда элементов. Так, в продуктах алюминиевого сырья велось определение таллия. Достигнут порог чувствительности $5 \cdot 10^{-4}$%. Германий определялся в концентратах и золе каменных углей. Порог чувствительности — $6 \cdot 10^{-4}$%. Селен и теллур определяли в шламах руд соответственно с порогом чувствительности $5 \cdot 10^{-4}$% и 0,1%. При определении всех этих элементов время облучения $t_{об}$ выбиралось 5—10 мин, время транспортировки образца от места облучения к месту измерения — 5 с, пауза $t_п$ — 5—30 с и более, время измерения $t_{изм}$ — 1 мин.

Произведена также оценка порогов чувствительности брома и стронция, которые оказались равными 0,06% (по излучению брома-79 m) и $8 \cdot 10^{-3}$% (по излучению брома-80) для брома и 0,04% для стронция. Временной режим выбирался следующим: $t_{об} = 1$ мин; $t_п = 7$ и 30 с; $t_{изм} = 0{,}5$ и 10 мин.

В концентратах редкоземельных элементов определялись иттрий, церий, празеодим, неодим, самарий, тербий и эрбий, пороги чувствительности для которых оказались следующими: $1{,}04 \cdot 10^{-2}$; $8{,}5 \cdot 10^{-4}$; $3{,}5 \cdot 10^{-4}$; $2{,}6 \cdot 10^{-3}$; $2{,}6 \cdot 10^{-2}$; $2{,}6 \cdot 10^{-3}$ и $7 \cdot 10^{-3}$%.

В циркониевых концентратах определялся гафний с порогом чувствительности $1 \cdot 10^{-3}$%.

В продуктах обогащения руд велось определение олова с порогом чувствительности 0,165% ($t_{об}$ — 7 с, $t_{изм}$ — 5 с), вольфрама — 0,09% ($t_{об}$ — 15 с, $t_{изм}$ — 10 с) и ртути — 0,065% ($t_{об}$ — 15 мин, $t_{изм}$ — 5 мин). Относительные ошибки в среднем не выходили за пределы нескольких процентов. Обработка результатов измерений в целом ряде случаев велась с помощью ЭВМ.

Рассматриваемая методика начинает находить применение в горнорудной промышленности [28.22, 28.99]. Применение нейтронных генераторов в НА-б в других сопредельных областях рассматривается в работах [14.3, 28.30, 28.69].

Для реализации НА-б может использоваться излучение размножителей нейтронов и ядерных реакторов. Однако эти установки чаще всего применяются для анализа на тепловых нейтронах НА-т. Так, размножитель нейтронов по методике НА-б используется для анализа кремния по реакции $Si^{28}(n, p)Al^{28}$ с порогом чувствительности 2%. Ядерный реактор может применяться в анализе по НА-б для определения большого числа элементов с порогом чувствительности в 100—1000 раз более высоким, чем при измерениях с генератором нейтронов. Это обусловлено тем, что в ядерных реакторах получаются более низкие потоки быстрых нейтронов с энергией в пределах от 8 до 20 МэВ [28.28]. Но если при работе с генератором нейтронов пробы в основном облучаются моноэнергическими нейтронами, то в размножителях и реакторах — смешанными потоками нейтронов. Тепловые нейтроны при этом отфильтровываются с помощью кадмиевых или борных экранов. Так, излучение размножителей, и особенно ядерных реакторов, при этом выгодно использовать для определения легких элементов (кислорода, фтора, азота, неона и бора).

При этом излучение ядерных реакторов эффективно для определения в пробах низких концентраций кислорода по реакции $O^{16}(n, p)N^{16}$ (см. табл. 28-13). Пробы к детектору при этом необходимо транспортировать пневмопочтой. В связи с тем, что в пробах в этом случае находится много других радиоактивных изотопов и пробы имеют высокую активность, Г. Р. Лукенс и И. Е. Лаш [28.28] для измерения наведенной активности азота-16 по жесткому бета-излучению предложили использовать счетчики Черенкова. По устройству эти счетчики аналогичны сцинтилляционным. Только вместо обычного люминесцирующего вещества в них используется вода, в которой вызывается свечение. Колба с плоским дном устанавливалась на торец фотоумножителя. При облучении проб весом 1 г нейтронами с энергией свыше 9,6 МэВ с плотностью потока 10^9 нейтр/см^2·с (общий выход составлял $3{,}5 \cdot 10^{12}$ нейтр/с) был достигнут порог чувствительности к кислороду $(2—3) \cdot 10^{-3}$%. Активность проб спустя 3 мин после облучения иногда составляла 0,1 Р/ч. Из-за такой высокой активности сцинтилляционные счетчики для определения кислорода применять было невозможно.

При измерении жесткого гамма-излучения наведенной активности высокоактивных проб целесообразно в ряде случаев использовать пороговые детекторы с бериллием или дейтерием (см. п. 2 § 5 гл. 5).

6. **Нейтронный активационный анализ на резонансных нейтронах.** Как указывалось в § 1 гл. 4, в диапазоне энергий нейтронов примерно 1—100 эВ многие изотопы способны в некоторых узких областях энергий избирательно поглощать медленные нейтроны в реакции (n, γ). Это позволяет создать методику НА-р для избирательного определения в пробах некоторых элементов. Тепловые и надтепловые нейтроны в каналах реакторов и т. п. подавляются с помощью фильтров из кадмия и бора. В работе [28.28] показано, что при такой методике активации активность марганца по отношению к натрию и хлору возрастает соответственно в 7 и 14 раз по сравнению с методикой НА-т. Аналогично активность молибдена по отношению к железу также повышается в 14 раз. Е. М. Лобановым и др. [25.3] показано также, что активность золота по

отношению к активности натрия возрастает в 15 раз, а активность молибдена — в 25 раз. При этом облучение образцов в кадмиевом экране позволяет существенно уменьшить влияние породообразующих элементов на результаты определения в пробах элементов с высокими резонансными сечениями (золото, вольфрам, молибден, рений, мышьяк, сурьма).

Рассматриваемую методику НА-р в работе [25.3] применяли для анализа молибдена в концентратах. Выяснилось, что при этом выгодно регистрировать гамма-кванты с энергией 142 кэВ, возникающие при распаде технеция-99^m. Этот изотоп является продуктом реакции $Mo^{98}(n, \gamma)Mo^{99}(T=66\text{ ч}) - \beta = Te^{99m}(T=6{,}04\text{ ч})$. Излучение с энергией 142 кэВ в спектре наведенной активности проб при измерениях по НА-т наблюдается спустя 4—5 дней, а при измерениях по НА-р — через 12 ч.

Аналогичным образом происходит улучшение дифференциации спектра гамма-излучения изотопа мышьяк-76, возникающего в реакции $As^{75}(n, \gamma)As^{76}$, в случае регистрации гамма-квантов с энергией 0,55 МэВ.

При определении золота по методике НА-р фон долгоживущих изотопов удается понизить в 8 раз. В результате порог чувствительности можно повысить в 2 раза по сравнению с методикой НА-т.

Вопросы, связанные с ролью резонансной активации серебра, рассматриваются в работе [28.95].

В методике НА-р пробы облучаются довольно широким спектром нейтронов. С целью воздействия на пробы нейтронами в области резонанса определяемого элемента их необходимо облучать дважды. Первый раз с кадмиевым или борным фильтром, а второй — еще дополнительно с фильтром из определяемого элемента (см. § 6 гл. 1). Разностный отсчет в скоростях счета соответствует активации пробы резонансными нейтронами определяемого элемента. Таким образом, облучение проб при измерениях по НА-р следует производить так же, как и при ННМ-р (см. § 3 гл. 23). (Методика НА-р рассматривалась нами уже в § 2 гл. 25).

7. Нейтронный активационный анализ на тепловых нейтронах. Для анализа элементов по тепловым нейтронам (НА-т) используются ускорители, размножители нейтронов и ядерные реакторы. Активация элементов под действием тепловых нейтронов происходит за счет реакции (n, γ). Однако в связи с тем, что в каналы тепловых нейтронов могут проникать быстрые нейтроны, часть элементов активируется под действием этих нейтронов в реакциях (n, p), (n, α) и $(n, 2n)$. Поэтому для устранения влияния изотопов, активирующихся в этих реакциях, пробы приходится специально активировать в каналах быстрых нейтронов и вводить поправки в результаты измерений НА-т.

Ниже рассмотрим возможности НА-т, реализуемого с применением различных ядерных устройств.

Ускоритель. При измерениях по НА-т 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 располагалась внутри этого замедлителя. В случае работы с пучком быстрых нейтронов платформа должна обеспечивать быструю откатку блока от ускорителя на необходимое расстояние.

Замедлитель изготовляется обычно в виде куба с ребром около 1 м. Для размещения образцов с целью активации между мишенью и пробой должен быть достаточный слой замедлителя. Подача образцов под облучение и измерение чаще всего осуществляются с помощью пневмопочты.

В каналах тепловых нейтронов получается поток примерно от $6 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^8$ нейтр/см$^2 \cdot$с в зависимости от первичного потока быстрых нейтронов. Эти потоки примерно в 600—$2 \cdot 10^4$ раз (см. п. 1 § 2 гл. 25) превосхо-

Таблица 28-14

Пороги чувствительности 27 элементов

Элемент	Радиоактивный изотоп	Период полураспада T	Пороги чувствительности, %	
			теоретический	экспериментальный
Натрий	Натрий-24	15 ч	$2{,}08 \cdot 10^{-2}$	$2{,}56 \cdot 10^{-2}$
Магний	Магний-27	10 мин	0,32	0,328
Алюминий	Алюминий-28	2,31 мин	$5{,}2 \cdot 10^{-3}$	$9{,}6 \cdot 10^{-3}$
Хлор	Хлор-38	37,12 мин	$2{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}72 \cdot 10^{-2}$
Калий	Калий-42	12,36 ч	0,88	0,6
Кальций	Кальций-49	8,75 мин	0,88	1,08
Титан	Титан-51	5,8 мин	0,288	0,16
Ванадий	Ванадий-52	3,77 мин	$4{,}8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Хром	Хром-51	27,8 дн.	13,2	5,2
Марганец	Марганец-56	2,58 ч	$4{,}4 \cdot 10^{-4}$	$4{,}8 \cdot 10^{-4}$
Кобальт	Кобальт-60 *m*	10,47 мин	$1{,}44 \cdot 10^{-4}$	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
Никель	Никель-65	2,55 ч	0,72	1,28
Медь	Медь-64	12,88 ч	$2{,}8 \cdot 10^{-2}$	$1{,}6 \cdot 10^{-2}$
	Медь-66	5,1 мин		
Цинк	Цинк-69 *m*	13,9 ч	1,84	1,48
Мышьяк	Мышьяк-76	26,8 ч	$3{,}04 \cdot 10^{-2}$	$2{,}08 \cdot 10^{-2}$
Бром	Бром-80	17,55 мин	$1{,}36 \cdot 10^{-2}$	$5{,}6 \cdot 10^{-3}$
	Бром-82	35,34 ч		
Молибден	Молибден-101	14,61 мин	0,112	$5{,}6 \cdot 10^{-2}$
	Теллур-101	14 мин		
Рутений	Рутений-105	4.5 ч	0,128	0,152
	Родий-105	36,5 ч		$4{,}8 \cdot 10^{-3}$
Серебро	Серебро-108	2,42 мин	$1{,}52 \cdot 10^{-2}$	$3{,}24 \cdot 10^{-4}$
Индий	Индий-116^m	54 мин	$4{,}8 \cdot 10^{-5}$	0,16
Олово	Олово-123	40 мин	0,24	
	Олово-125	9,4 мин		
Сурьма	Сурьма-122 *m*	3,3 мин	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	$3{,}56 \cdot 10^{-2}$
Йод	Йод-128	25 мин	$1{,}32 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Вольфрам	Вольфрам-187	24 ч	$2{,}04 \cdot 10^{-2}$	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$
Рений	Рений-188 *m*	19 мин	$1{,}76 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	Рений-188	16,74 ч		
Платина	Платина-199	30 мин	0,32	$6{,}81 \cdot 10^{-2}$
	Золото-198	3,14 дн.		
Золото	Золото-199	2,7 дн.	$4{,}4 \cdot 10^{-3}$	$5{,}2 \cdot 10^{-3}$

дят потоки в замедлителях с обычными ампульными источниками. Следовательно, при проведении НА-т с ускорителями можно значительно повысить, с одной стороны, производительность анализа, а с другой — точность и пороги чувствительности. Так, И. В. Отвосом и др. [2.19, 14.3] показано, что при потоке 10^8 тепловых нейтр/см^2·с могут быть получены пороги чувствительности, приведенные в табл. 28-14.

Р. Л. Колдуэллом и В. Р. Миллсом [14.3] дейтронный генератор Ван-де-Граафа (E_n=6 МэВ) был использован для определения алюминия в осадочных породах. Замедлителем служит бак с водой диаметром 61 см и высотой 122 см. При дейтронном токе 20 мкА в зоне активации создавался поток $5{,}5 \cdot 10^6$ нейтр/см^2·с. Между мишенью ускорителя и образцом слой воды выбирался равным 12,5 см.

Активация проб производилась в течение 1 мин, пауза длилась 1 мин, а время измерения — 30 с. Наведенная активность измерялась сцинтилляционным счетчиком при дискриминации излучения с энергией 1,4 МэВ.

Таблица 28-15

Пороги чувствительности при анализе некоторых элементов в нейтронном размножителе НР-1

Элемент	Радиоактивный изотоп	Период полураспада T	Пороги чувствительности, %
Фтор	Фтор-20	10,7 с	3
Натрий	Натрий-24	15 ч	$3 \cdot 10^{-3}$
Магний	Магний-27	10 мин	0,5
Алюминий	Алюминий-28	2,31 мин	$7 \cdot 10^{-3}$
Кремний*	»	»	2
Хлор	Хлор-38	37,12 мин	0,05
Калий	Калий-42	12,36 ч	0,03
Кальций	Кальций-49	8,75 мин	5
Ванадий	Ванадий-52	3,77 мин	$5 \cdot 10^{-4}$
Марганец	Марганец-56	2,58 ч	$1 \cdot 10^{-4}$
Железо*	»	»	2÷3
Кобальт	Кобальт-60 *m*	10,47 мин	$3 \cdot 10^{-3}$
Медь	Медь-66	5,1 мин	0,02
Цинк	Цинк-69	57 мин	0,5
Мышьяк	Мышьяк-76	26,8 ч	$3 \cdot 10^{-4}$
Рубидий	Рубидий-88	17,5 мин	0,1
Родий	Родий-104	4,3 мин 44 с	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Серебро	Серебро-108	2,42 мин	$6 \cdot 10^{-4}$
Индий	Индий-116 *m*	54 мин	$1 \cdot 10^{-4}$
Йод	Йод-128	27 мин	0,04
Барий	Барий-139	85 мин	0,02
Европий	Европий-152	9,2 ч	$5 \cdot 10^{-5}$
Диспрозий	Диспрозий-169	2,4 ч	$2 \cdot 10^{-5}$
Вольфрам	Вольфрам-187	24 ч	10^{-3}
Золото	Золото-198	2,7 дн.	$5 \cdot 10^{-4}$

* Кремний и железо определялись по НА-б.

Определению алюминия по НА-т мешал в основном только кремний, при активации которого под действием быстрых нейтронов также возникал изотоп алюминий-28 (см. табл. 28-13). Вклад его при анализе песчаников составлял 5,7%, при анализе сланцев, известняков и доломитов уменьшался соответственно до 1,3; 2,2 и 2,2%. Относительная ошибка при этом не выходила за пределы 0,5—2,8%.

Т. Н. Бланковой и др. [28.12] метод НА-т с генератором нейтронов на отпаянной трубке с выходом 10^8 нейтр/см$^2 \cdot$с использовался для определения в пробах нефтей ванадия. Пробы в парафиновом блоке активировались в течение 10 мин, пауза равнялась 1 мин 45 с, а время измерения — 9 мин. Наведенная бета-активность тонкослойной пробы измерялась с помощью кассеты из двух рядов счетчиков типа СТС-6. Измерительные счетчики снаружи окружались охранными счетчиками, включенными по схеме антисовпадений. Для исключения влияния бета-излучения пробы на охранные счетчики между ними и измерительными счетчиками размещался слой свинца толщиной 15 мм. Все измерения проводились в свинцовом домике с толщиной стенок 10 см.

При определении ванадия по этой методике получен порог чувствительности $5 \cdot 10^{-4}$%, относительная погрешность — 10%, время одного анализа — 25—30 мин.

Нейтронные размножители. Для активационного анализа применялись два типа размножителей: НР-1 (экспериментальная модель) и СО-1 (серийная). Описание этих установок приводится в п. 2 § 3 гл. 27.

Размножитель НР-1 использовался для определения в пробах геологических объектов различных химических элементов, приведенных в табл. 28-15 [25.41, 28.19]. Порог чувствительности установлен для проб весом 100 г. Аналогичные данные, полученные на размножителе СО-1 при

Таблица 28-16

Порог чувствительности при анализе некоторых элементов на нейтронном размножителе СО-1

Элемент	Период полураспада T	Порог чувствительности, %	Объект исследований
Фтор	10,7 с	1—2	Флюориты
Алюминий, Кремний	2,31 мин	0,1—1,0	Почвы, глины, бокситы, нефелиновые сиениты, каолины, известняки
Натрий	15 ч	0,005	Алюмосиликат. породы
Калий	12,36 ч	0,05	» »
Ванадий	3,77 мин	10^{-4}	Железные руды
Марганец	2,58 ч	10^{-4}	Почвы, осадочн. породы
Медь	5,1 мин	0,01—0,3	Медные руды

экспрессном анализе, сведены в табл. 28-16 [22.102]. Элементы алюминий и кремний, а также натрий и калий определялись одновременно. В алюмосиликатах одновременно также оценивались марганец, натрий и калий с порогом чувствительности соответственно 10^{-3}; 0,05 и 0,1%.

Относительная ошибка измерений во всех случаях не превышала 5—10%, а время на один анализ при массовых измерениях — 5—30 мин.

Ядерные реакторы. 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 большими периодами полураспада (уран и торий) с помощью НА-т устанавливаются 74). Этот метод неблагоприятен для 10 самых легких элементов: водорода, гелия, лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода, фтора и неона [28.28]. Восемь из них обладают весьма низкими сечениями захвата тепловых нейтронов (менее 1 мбарн), кроме бора и лития. Часть же из них имеет очень короткие (кислород, фтор, азот, неон, бор), а часть очень большие (литий, водород, гелий, углерод, бериллий) периоды полураспада возникающих радиоактивных изотопов.

Сказанное по поводу элементов, образующих короткоживущие изотопы, справедливо при условии, если определительские лаборатории расположены вдали от реакторов. Если же они находятся вблизи реактора и сообщены с ним при помощи пневмопочты, то кислород, фтор, азот, неон и бор можно анализировать по НА-б. В этом случае реакторы могут применяться для анализа 78 элементов.

Метод НА-т мало пригоден также для определения серы, циркония, кальция, железа и свинца из-за их малых сечений активации и больших периодов полураспада. Их выгодно определять лишь при активации в больших потоках ($\sim 10^{14}$ нейтр/см^2·с). Порог чувствительности при этом может быть равен 10^{-7} г [28.28].

Остальные 69 элементов, активирующиеся под действием тепловых нейтронов, достаточно легко определяются при активации в реакторах со средними потоками (10^{11}—10^{13} нейтр/см^2·с). Так, реактор РГ-1 (см. п. 3 § 3 гл. 27) может быть использован для определения в пробах и рудах 44 химических элементов [25.41].

Определению химических элементов в геологических объектах посвящено большое число работ [10.28, 14.3, 16.60, 25.3, 25.4, 25.13, 25.41, 25,54, 25.58, 25.61, 28.1, 28.5, 28.9, 28.14, 28.20, 28.25, 28.28, 28.29, 28.32, 28.34, 28.36, 28.37, 28.39—28.42, 28.44—28.47, 28.56—28.59, 28.65, 28.66, 28.71,

28.74, 28.75, 28.78, 28.80, 28.81, 28.83, 28.85, 28.87. 28.92, 28.93, 28.96, 28.97, 28.102, 28.103, 28.105, 28.108, 28.109, 28.113, 28.115, 28.116 и др.].

По данным [25.13], при активации образцов в реакторах определяются 57 химических элементов (табл. 28-17), причем большинство из них — инструментальным способом без химического разрушения проб пород (так называемым недеструктивным способом). Однако наиболее высокие пороги чувствительности достигаются при активационном анализе с радиохимическим разделением. Оценка порогов чувствительности рассматривается также в работах [28.34, 28.35].

Таблица 28-17

Пороги чувствительности при анализе некоторых элементов при активации в ядерных реакторах

Элементы	Пороги чувствительности, %
Натрий, алюминий, кремний фосфор, хлор, аргон, ванадий, хром, марганец, медь, германий, мышьяк, стронций, олово, барий, гафний, висмут, уран	10^{-3}—10^{-4}
Скандий, кобальт, никель, цинк, бром, рубидий, цирконий, родий, палладий, серебро, кадмий, теллур, цезий, церий, празеодим, неодим, гадолиний, тербий, диспрозий, эрбий, тулий, иттербий, торий . . .	10^{-5}—10^{-6}
Железо, селен, рутений, индий, лантан, самарий, европий, гольмий, лютеций, тантал, вольфрам, рений, осмий, золото, ртуть, таллий . .	10^{-7}—10^{-8} и ниже

Более точные данные (по сравнению с табл. 28-17) о порогах чувствительности НА-т приводятся в приложении 6. На первый взгляд, они противоречивы. Так, при определении в пробах марганца по НА-т на размножителе нейтронов достигнут порог чувствительности $1 \cdot 10^{-4}\%$, а при измерениях на ядерном реакторе — всего лишь $5 \cdot 10^{-4}\%$. Это объясняется исключительно различиями в условиях измерений. Подобные расхождения присущи и другим ядерным методам.

Большой интерес для измерений по НА-т представляют растворные импульсные реакторы типа ИИН (см. п. 3 § 3 гл. 27) с потоками 10^{14} нейтр/см^2·имп. К настоящему времени произведены первые предварительные исследования по оценке порога чувствительности на некоторые элементы, определенные в геологических объектах (табл. 28-18). Здесь порог чувствительности дается в граммах на пробу ($p_г$). Для приведения его к весовым процентам p_0 необходимо провести перерасчет по формуле

$$p_0 = p_г \cdot 100\% / P,$$

где P — вес пробы, г.

В НА для определения отдельных химических элементов в пробах может регистрироваться излучение не только первичных радиоактивных изотопов, но и вторичных. Особенно это приемлемо при определении тяжелых элементов. Например, определение висмута можно вести по альфа-излучению полония-210 [28.45, 28.46], возникающего в итоге следующей реакции:

$$Bi^{209}(n, \gamma)Bi^{210}(T = 5 \text{ дней}) \xrightarrow{-\beta} Po^{210} \ (T = 138{,}4 \text{ дня}).$$

Достигнут порог чувствительности 0,005% висмута.

Аналогичным образом излучение нептуния-239 используется для определения в пробах урана.

Таблица 28-18

Порог чувствительности при анализе некоторых элементов при облучении в реакторе ИИН проб весом 0,3÷10 г.

Элементы	Порог чувствительности, %
Кремний, калий, хром, железо, кобальт, цинк	$n \cdot 10^{-4}$
Скандий, титан, никель . . .	$n \cdot 10^{-5}$
Натрий, магний, хлор, медь, германий	$n \cdot 10^{-6}$
Ванадий, марганец, мышьяк, индий, рений, золото	$n \cdot 10^{-8}$

Нептуний образуется в результате такой реакции:

$$U^{238}(n, \gamma)U^{239}\ (T=23{,}3\text{ мин}) \xrightarrow{-\beta} Np^{239}\ (T=2{,}35\text{ дня}).$$

Наведенная активность при этом измеряется по регистрации гамма-лучей с энергией 106 кэВ. Определению урана по этой методике нередко мешают торий, палладий и натрий, влияние которых может быть учтено при измерениях кадмиевого отношения. Порог чувствительности при анализе урана оценивается в 10^{-2}—10^{-3}%.

Возможности активационного анализа НА и других существенно расширяются при измерении гамма-спектра наведенной активности с помощью полупроводниковых детекторов, обладающих высокой разрешающей способностью [28.14, 28.28, 28.55] автоматизированных систем [15.24, 28.28, 28.115] и ЭВМ [3.30].

Большой интерес представляет использование методики НА при активации образцов в ядерных реакторах для изучения изотопного состава некоторых элементов, содержащихся в геологических объектах. Для оценки возможностей НА при решении этой задачи можно воспользоваться данными, приведенными в работе [25.13].

Метод НА-т применялся для определения кальция-48 (0,185%) ко всему кальцию по реакции

$$Ca^{48}(n, \gamma)Ca^{49}(T=8{,}75\text{ мин}) \xrightarrow{-\beta} Sc^{49}(T=57\text{ мин}).$$

После радиохимических процедур и удаления мешающих активностей определение кальция-48 велось по бета-активности скандия-49 при помощи пропорциональных бета-счетчиков. Пробы активировались в потоке 10^{13} нейтр/см^2·с в течение $4T$. Пауза выбиралась равной 2 ч, время замера — 48 ч. Общий кальций определялся с точностью 0,5% неядерными методами. Кальций-48 оценен по НА-т с точностью ±1%. Колебания кальция-48 в пробах достигали 2%.

Аналогичным способом велось определение соотношения изотопов цинк-68 и цинк-64. При сравнении со стандартом было установлено, что величина измеряемого отношения не выходила за пределы погрешностей измерений.

Велось также определение соотношения долгоживущего изотопа торий-232 ($T=1{,}4\cdot10^{10}$ лет) и торий-230 ($T=8\cdot10^4$ лет) в урановых минералах. Для исключения влияния урана на результаты измерений торий из проб предварительно выделялся химически. Определение тория-230 в пробах велось по его альфа-излучению, определение тория-232 по НА-т — по реакции $Th^{232}(n, \gamma)Th^{233}$ (T=12,12 мин) с регистрацией бета-излучения. Подавление мешающего бета-излучения тория-231 и тория-234 осуществлялось с помощью алюминиевого фильтра. Величина отношения тория-232 к торию-230 равна 1,42.

С целью изучения возраста метеоритов и земных объектов велось определение по НА-т в пробах целого ряда других элементов [25.13].

8. **Нейтронный активационный анализ на запаздывающих нейтронах.** Этот метод аналогичен ГАн (см. п. 4 предыдущего параграфа), поэтому разновидность НА будем обозначать НАн. Предложен он С. Амиелом и М. Пейсахом [28.6].

Метод НАн может применяться для определения кислорода, урана и тория в пробах. Под действием быстрых нейтронов на изотопах кислорода могут идти следующие ядерные реакции: $O^{17}(n, p)N^{17}$ и $O^{18}(n, d)N^{17}$. Данные об азоте-17 рассматриваются в п. 4 § 2 этой главы. Содержание кислорода-17 и кислорода-18 в природном кислороде равно по весу соответственно 0,037 и 0,204%. Пороги же указанных реакций 9,5 и 15,5 МэВ. Из-за малого содержания рассматриваемых изотопов кислорода в природных объектах, а также низкого сечения реакций и небольшого числа нейтронов с необходимой энергией в спектре деления реактора для определения кислорода требуется использовать высокие потоки —

10^{13} нейтр/см^2·с. При облучении в таком потоке до насыщения выход запаздывающих нейтронов на 1 мг кислорода составляет 80 нейтр.

Определение урана в пробах лучше вести при облучении тепловыми нейтронами. Реакция (n, О) в этом случае имеет сечение 1,5 см^2/г. На один акт деления при этом выделяется 0,016 нейтр от продуктов реакции, приведенных в табл. 28-11. Там же даны и периоды полураспада, соответствующие определенным группам нейтронов. При облучении в потоке тепловых нейтронов 10^{13} нейтр/см^2·с в течение 60 с, паузе 20 с и времени измерения 60 с проба весом 1 мкг дает $1{,}17 \cdot 10^4$ нейтр [28.28]. Регистрация нейтронов в установке с 10%-ной эффективностью позволяет по НАн-т 10 мкг урана определять с точностью 1%. В пробах весом 10 г содержание урана по НАн можно установить с порогом чувствительности 10^{-5}%, а в пробах весом 250 г — с порогом $2{,}5 \cdot 10^{-8}$% урана или $2{,}14 \cdot 10^{-10}$% урана-235. Аналогичные исследования рассматриваются также в работе [28.91].

Уран-238 способен делиться под действием быстрых нейтронов с образованием тех же групп нейтронов, которые приведены в табл. 28-11. Однако для нейтронов деления реактора с $E_n \geqslant 1$ МэВ сечение деления урана-238 примерно на 2 порядка ниже сечения деления урана-235. Тем не менее более высокое содержание в пробах урана-238 по сравнению с ураном-235 позволяет метод НАн-б использовать и для определения урана-238. По комбинации методик НАн-т и НАн-б можно с точностью 0,5—1% определять соотношение обоих изотопов.

Деление тория-232 под действием быстрых нейтронов приводит к образованию продуктов деления, приведенных в табл. 28-11. Однако сечение реакции Th^{238}(n, О) значительно ниже, чем у урана, что позволяет определять торий с более низким порогом по сравнению с ураном. При облучении в потоке 10^{13} нейтр/см^2·с 1 мкг естественного тория дает всего лишь 412 нейтр. Присутствие урана в пробах создает трудности в определении тория в пробах по НАн-б. Поэтому при раздельном определении урана и тория приходится прибегать к комбинации методов НАн-б и НАн-т.

9. **Нейтронные методы на заряженных частицах.** Под действием нейтронов, как уже неоднократно отмечалось, могут возникать различные реакции с образованием заряженных частиц или ядра отдачи. При исследованиях с ампульными источниками на этом принципе реализованы нейтрон-протонный (НПМ) и нейтронный альфа-методы (НАМ) (см. гл. 21). Однако известно, что заряженные ядерные частицы обладают слабой проницающей способностью, что затрудняет их регистрацию. Поэтому стали использовать активационные свойства этих частиц. Так, возникающие в пробе заряженные частицы могут свободно активировать некоторые изотопы в пробе, активация которых приводит к образованию изотопов с параметрами, вполне пригодными для измерения их наведенной активности. Помимо этого, для реализации рассматриваемых здесь методов в пробу можно вводить некоторые вещества, содержащие необходимые изотопы для активации их под действием заряженных частиц.

Так, под действием нейтронов могут происходить реакции (n, α), (n, t), (n, d), (n, p) и др. С помощью их или ядер отдачи в пробах могут активироваться некоторые детекторные (индикаторные) изотопы. По наведенной активности этих детекторных изотопов можно судить о содержании в пробе химических элементов, ядра атомов которых вступают в ядерные взаимодействия с нейтронами.

В соответствии с принятой в книге системой классификации рассматриваемые ядерные методы обозначим следующим образом: метод, основанный на реакции (n, α),— нейтронный альфа-метод с измерением наведенной активности детектирующего изотопа — НАМа, метод, основанный на реакции (n, t),— НТМа, а методы, основанные на реакциях (n, d), (n, p) или дейтронах и протонах отдачи,— НДМа и НПМа.

Для анализа вещества в настоящее время использовались лишь методы НТМа, НДМа и НПМа.

Так, для определения в пробах лития использовалась реакция $Li^6(n, t)He^4$. В качестве детектирующего изотопа применяется кислород, на котором под действием тритонов происходит реакция $O^{16}(t, n)F^{18}$.

Выше (см. п. 4 § 1 этой главы) рассматривалось сочетание этих двух реакций для реализации метода ТА. В данном же случае они используются для реализации метода НТМа. Отличия между ТА и НТМа сводятся к следующему. При измерениях по ТА в пробу вводится литиевый радиатор для получения тритонов, которые используются для определения в пробе кислорода по его наведенной активности. Метод же НТМа применяется, наоборот, для определения неизвестных содержаний лития в пробе по известным концентрациям в ней кислорода.

Метод НТМа в работе [28.11] использовался для определения изотопного состава лития. Природные минералы лития в своем составе, как правило, содержат кислород, что и позволяет анализировать их по методике НТМа без добавления детектирующего изотопа.

Содержание лития-6 в работе [28.11] определялось в карбонатах лития. Пробы этого вещества спрессовывались в виде таблеток диаметром 7 мм и весом 40 мг и активировались в потоке тепловых нейтронов $4 \cdot 10^{11}$ нейтр/см$^2 \cdot$с в течение 5 мин. Пауза длилась 4 ч. Позитронное излучение фтора-18 регистрировалось торцовым счетчиком. Одновременно с позитронным излучением регистрировалось и аннигиляционное гамма-излучение кристаллом йодистого натрия со спектрометрией. Порог чувствительности оценивался равным $2{,}5 \cdot 10^{-3}$—$2{,}5 \cdot 10^{-4}$% лития-6, относительная ошибка составляла 3—4%. Пробы с высоким содержанием лития-6 (свыше 1,5 мг) при такой методике следует специально разбавлять.

Метод НДМа применялся для определения дейтерия в пробах воды [14.3]. Дейтроны при этом возникают за счет передачи им энергии быстрых нейтронов. Например, для быстрых нейтронов реактора с энергией от 1 до 8 МэВ сечение этого взаимодействия меняется от 3,0 до 1,3 барн. Под действием дейтронов на кислороде используется реакция $O^{16}(d, n)F^{17}$. По наведенной активности фтора-17 ($T = 66$ с, $E_\beta = 1{,}75$ МэВ и $E_\gamma = 0{,}51$ МэВ) можно судить о содержании в пробах тяжелой воды от 15 до 100% с ошибкой 0,5% при облучении потоком быстрых нейтронов $(1{,}4$—$6{,}7) \cdot 10^{11}$ нейтр/см$^2 \cdot$с.

Определению дейтерия по НДМа может мешать реакция $O^{16}(n, \gamma)F^{17}$, происходящая под действием протонов отдачи. Однако в работе [14.3] показано, что сечение этой реакции в 60 раз меньше сечения реакции (d, n) на кислороде. Поэтому активацией изотопов под действием протонов отдачи на результаты НДМа можно пренебречь.

При анализе водорода в протиевых водородсодержателях можно использовать метод НПМа с активацией также кислорода-16. Присутствие малых концентраций в них дейтерия практически не мешает определению водорода по этой методике.

Глава 29

МЕТОДЫ ЯДЕРНОГО КАРОТАЖА, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ УСКОРИТЕЛЕЙ

§ 1. Особенности импульсных методов

В конце 50-х годов в практике геофизических исследований начали применять нейтронные методы каротажа, реализуемые на основе скважинных генераторов нейтронов [29.50]. На первом этапе этих исследований генераторы нейтронов пытались использовать лишь в качестве более мощных управляемых источников нейтронов по сравнению с неуправляемыми ампульными. Однако использование стационарного режима работы генераторов нейтронов не позволило существенно повысить эффективность нейтронных методов. Это объясняется целым рядом недостатков, присущих стационарным нейтронным методам. В реальных условиях скважины прибор отделен от породы буровым раствором, глинистой коркой, а в обсаженных скважинах — стальной колонной и цементным кольцом. Вся эта ближняя среда оказывает очень сильное влияние на поле вторичного излучения (тепловые нейтроны и гамма-кванты), несущего информацию об изучаемой горной породе. Существенно снизить влияние ближней зоны удалось лишь за счет временных распределений потоков замедлившихся нейтронов и гамма-лучей радиационного захвата. Может наступить такой момент, когда нейтроны в скважине станут поглощаться быстрее, чем в горной породе. Поэтому, начиная с какого-то времени, на показания прибора в наибольшей степени влияют нейтроны или гамма-лучи, несущие информацию о породе. Методы, основывающиеся на временном распределении вторичного излучения, получили название импульсных в отличие от обычных. Их идея была высказана впервые в 1956 г. Г. Н. Флеровым [29.50]. К числу нейтронных импульсных методов, реализуемых на основе импульсных нейтронных генераторов, в настоящее время относятся импульсный нейтрон-нейтронный каротаж (ИННК), импульсный нейтронный гамма-каротаж радиационного захвата нейтронов (ИНГК) и импульсный нейтронный гамма-каротаж неупругого рассеяния быстрых нейтронов (ИНГК′). Помимо них на основе скважинных генераторов нейтронов импульсного и непрерывного действия реализуются также методы нейтронного активационного каротажа (ИНАК и НАК). В настоящее время все они достаточно широко применяются в нефтепромысловой геофизике и начинают использоваться в рудной геофизике.

Скважинные генераторы непрерывного действия впервые стали разрабатываться в США. В СССР такие приборы начали разрабатываться во ВНИИГеофизике, а затем и во ВНИИЯГГе под руководством В. М. Запорожца [29.15, 29.41].

Первые исследования по импульсным нейтронным методам проводились в ИГиРГИ с 1957 г. под руководством Г. Н. Флерова, Ф. А. Алексеева, Б. Г. Ерозолимского, Ю. С. Шимелевича и др. [29.57]. Первый скважинный генератор нейтронов импульсного действия был создан сотрудниками ИГиРГИ, затем ВНИИЯГГа (Д. Ф. Беспаловым, Ю. С. Шимелевичем и др.) и ИЯФ СО АН СССР (Б. Г. Ерозолимским и др.). Исследования по методике ИННК проводятся с 1959 г., а по методике ИНГК с 1960 г. Теоретически эти методы изучались С. А. Кантором и С. А. Денисиком с сотрудниками. Руководство интерпретацией осуществлялось Д. М. Сребродольским и др. С 1962 г. метод ИННК начал внедряться в производство (в нефтепромысловую геофизику). Этой проблемой занимаются в СССР и другие НИИ и производствен-

ные организации. Вслед за СССР исследования в этом направлении начали вестись в США и некоторых других странах.

Первые генераторы нейтронов для ИННК созданы на основе специальных нейтронных трубок. Так, по разработке ВНИИЯГГа Киевским заводом геофизического приборостроения была выпущена первая партия генераторов с такой трубкой (СНИГ-2 [17.13, 29.30]). В последующем для этих целей стали привлекаться стандартные нейтронные трубки (см. табл. 27-1). Например, создан генератор нейтронов ИГН-1 на трубке УНГ-1 [14.4, 29.29].

Имеются два варианта таких приборов: с диаметром 102 мм (ИГН-1), способный работать при температуре до +60° С, и с диаметром 90 мм (ИГН-1м или ИГН-90) для измерений в высокотемпературных скважинах (до +95°С) [5.8, 14.4, 17.13, 29.10, 29.29, 29.45, 29.67]. В последующем прибор ИГН-1м был еще раз модернизирован для исследования скважин с температурой до +120°С. Он выпускается под маркой ИГН-4 [29.14]. Все генераторы системы ИГН имеют выход $(2—5)\cdot 10^7$ нейтр/с с продолжительностью импульса 200 мкс и оборудованы группой пропорциональных борных счетчиков типа СНМ-20А длиной 24 см, обогащенных бором-10 до 98%. Таким образом, они рассчитаны на работу по методике ИННК. Для изучения временного распределения потоков нейтронов прибор оборудован простейшим временным анализатором с тремя временными каналами шириной 200 мкс и одним интегральным каналом общего счета.

В настоящее время разработкой скважинных нейтронных генераторов помимо ВНИИЯГГа занимаются ВНИИРТ [29.28], ОКБ МГ СССР [29.11], трест «Татнефтегеофизика».

Так, ОКБ МГ СССР (Ленинград) на основе трубки НТ-10 (см. табл. 27-1) создан генератор НГС-1 диаметром 73 мм, предназначенный для исследования скважин с температурой до +50° С. В приставке У-1 к этому генератору используется трубка УНГ-3 [29.45] со сроком службы 200 ч.

В приборе имеется сцинтилляционный счетчик с ФЭУ-15 или ФЭУ-16. Для реализации ИННК в нем используются нейтронные люминофоры T_1(ЛДНМ), а для реализации ИНГК — кристалл йодистого натрия, активированного таллием. Для подавления мягкого гамма-излучения в приборе имеется пороговая дискриминация. Некоторые вопросы, связанные с применением сцинтилляционных счетчиков в скважинных приборах с генераторами нейтронов, обсуждаются в статье Ю. П. Любавина и др. (1969 г.) [29.10, 29.45].

На основе трубок НТ-16 (см. табл. 27-1) в ряде организаций создаются скважинные генераторы нейтронов диаметром порядка 45 мм (ИГН-42 [29.45]) и др. Для реализации различных ядерных методов эти приборы оборудуются различными детекторами.

В США для ИНГК и ИННК применяются приборы с генераторами Ван-де-Граафа [26.64, 29.74, 29.78]. Все рассмотренные генераторы работают на трубках с тритиевыми мишенями и испускают нейтроны с энергией 14 МэВ. Для решения некоторых задач важно иметь генераторы нейтронов с меньшими энергиями. Выше неоднократно отмечалось, что при работе с дейтериевыми мишенями можно получать нейтроны с энергией 2,5 МэВ. Для удобства ведения измерений скважин желательны секционные мишени с тритием и дейтерием. При автоматическом изменении положения этой мишени можно по очереди получать нейтроны с энергией 14 и 2,5 МэВ. Выход нейтронов с энергией 2,5 МэВ при этом примерно на два порядка ниже выхода нейтронов с энергией 14 МэВ.

В связи с тем, что в генераторах нейтронов наблюдается нестабильность пучка выходящих нейтронов, в глубинных приборах необходимо устанавливать специальные детекторы (мониторы) либо вести

исследования по специальной методике. В качестве мониторов можно использовать любые детекторы, регистрирующие выход быстрых нейтронов. Во ВНИИЯГГе [22.102] для этих целей использовался активационный монитор, состоящий из 6 счетчиков СТС-6, окруженных активирующимся веществом — кварцем (SiO_2). Под действием быстрых нейтронов активируется как кислород, так и кремний (см. табл. 28-13). Помимо этого, для мониторирования потоков быстрых нейтронов удобны сцинтилляционные счетчики с водородсодержащими люминофорами. Нейтроны в них регистрируются по протонам отдачи. Подробно эти вопросы разбираются в [29.10].

В печати обсуждается также целесообразность создания скважинных генераторов гамма-лучей. В этом направлении сейчас ведутся специальные исследования. Методы, которые могут быть при этом реализованы, рассматриваются в последнем параграфе этой главы.

Прежде чем переходить к методам ИННК, ИНГК и ИНГК′, необходимо остановиться на импульсном методе вообще, положенном в их основу. Заметим, что импульсные методы достаточно широко применяются в ядерной физике для решения разнообразных задач (см., например, [29.22]).

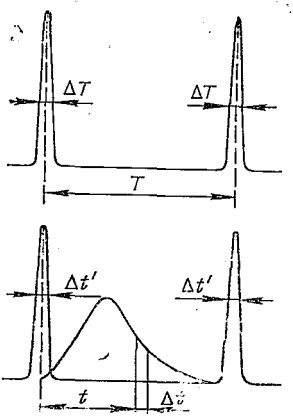


Рис. 29-1. Схема облучений и измерений при импульсных нейтронных методах.

ΔT — длительность импульсов на их 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.

Схема облучения пород и измерения вторичных излучений импульсными нейтронными методами показана на рис. 29-1. Длительность нейтронных импульсов у разных трубок находится в пределах от нескольких микросекунд до нескольких сотен микросекунд [29.23]. Гамма-излучение неупругого рассеяния нейтронов продолжается в течение 1—10 нс, поэтому его необходимо измерять практически во время импульса. Длительность импульса ΔT следует выбирать такой, чтобы гамма-излучение радиационного захвата не мешало измерению гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов. Следовательно, при измерениях по ИНГК′ импульс должен быть по возможности короче. В идеальном случае его длительность должна соответствовать величине порядка 1—10 нс. Частота следования импульсов выбирается такой, чтобы к моменту регистрации следующего потока гамма-излучения неупругого рассеяния захватное гамма-излучение, обусловленное предыдущим импульсом, уже исчезло.

У реальных трубок эта частота меняется от нескольких до 400 Гц (см. табл. 27-1). Эти величины отвечают соответственно временному интервалу между импульсами T от долей секунды до 2,5 мс. Упомянутые выше генераторы Ван-де-Граафа работают на частоте 1000 Гц.

Тепловые нейтроны из быстрых образуются, как уже указывалось, примерно за время от нескольких микросекунд до 1 мс. Гамма-излучение радиационного захвата нейтронов в породе распространяется за время от долей до нескольких наносекунд. Из этого видно, что интервал между импульсами вполне достаточен для затухания гамма-излучения радиационного захвата нейтронов.

Поток тепловых нейтронов после импульса быстрых нейтронов со временем нарастает и, достигнув максимума, спадает. Аналогичным образом ведет себя и поток захватного гамма-излучения. Регистрируются эти виды излучения обычно спустя некоторое время t после импульса, называемое временем задержки в течение времени Δt, назы-

ваемого временным «окном» прибора. А. Л. Поляченко [29.23] величину этого окна рекомендует выбирать равным (3—4) τ (τ — среднее время жизни тепловых нейтронов в породе).

§ 2. Импульсный нейтрон-нейтронный каротаж

Методика ИННК применяется в основном в модификации, основанной на регистрации тепловых нейтронов (ИННК-т). Для решения некоторых задач удобны также методики, реализуемые на измерении надтепловых (ИННК-н) и резонансных (ИННК-р) нейтронов. Помимо этого, методику ИННК иногда подразделяют на дифференциальную (при малых Δt, см. рис. 29-1) и интегральную (при больших Δt).

1. **Основы теории.** Разработкой основ теории ИННК занимались С. А. Кантор и др. [1.27, 17.13, 19.175, 22.101, 29.16, 29.23, 29.24, 29.43—29.45, 29.59]. А. Л. Поляченко и др. [22.101, 22.102, 29.22, 29.44—29.49, 29.59], И. Г. Дядькин и др. [6.44, 22.101, 29.13], В. Ф. Захарченко [29.17, 29.19], Д. А. Кожевников [29.30], А. Е. Глауберман и И. И. Тальянский [22.101, 29.55], Р. А. Резванов, С. А. Денисик, В. Е. Лебедев и др. [14.4, 19.175, 22.101, 22.102, 29.38, 29.41, 29.43—29.45, 29.50, 29.51, 29.52, 29.76] и др. [29.60, 29.61].

К настоящему времени проведено два цикла исследований: применительно к однородным средам и средам, пересеченным цилиндрической поверхностью (скважинной).

Данные по изучению распределения потоков нейтронов в однородных средах необходимы для выяснения основных закономерностей метода ИННК и сравнения их с данными, полученными теоретически и экспериментально в реальных условиях.

Величина плотности тепловых нейтронов от их точечного источника в однородной безграничной среде описывается соотношением следующего вида [29.16, 29.50]:

$$\Phi(l, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-\frac{t}{\tau} - \frac{l^2}{4Dt}} \left(\frac{\text{нейтр}}{\text{см}^3}\right), \qquad (29\text{-}1)$$

где Q — число нейтронов, испущенных источником; D — коэффициент диффузии тепловых нейтронов; t — время задержки; τ — среднее время жизни тепловых нейтронов; l — расстояние, на котором исследуется поток нейтронов.

Для источника быстрых нейтронов в среде, не содержащей водорода, выражение, аналогичное (29-1), в соответствии с возрастной теорией приобретает вид:

$$\Phi(l, t) = \frac{Q}{[4\pi(Dt + L_s^2)]^{3/2}} e^{-\frac{t}{\tau} - \frac{l^2}{4(Dt+L_s^2)}}, \qquad (29\text{-}2)$$

где L_s — длина замедления нейтронов.

Это соотношение может быть применено и для расчета в средах, содержащих водород, при $L < L_s^2/\lambda_0$ (λ_0 — средняя длина первого пробега быстрых нейтронов).

Для водородсодержащих пород при $l \geqslant L_s^2/\lambda_0$ выражение, подобное (29-2), записывается так:

$$\Phi(l, t) = \frac{Q\sqrt{Dt}}{2\sqrt{2}lL_s^3} e^{-\frac{t}{\tau} + \frac{2Dt}{L_s^2}} \left\{ e^{\frac{\sqrt{2}l}{L_s} y_+} \operatorname{erfc} y_+ - e^{\frac{\sqrt{2}l}{L_s} y_-} \operatorname{erfc} y_- \right\}, \qquad (29\text{-}3)$$

$y_\pm = \frac{\sqrt{2Dt}}{L_s} \pm \frac{l}{2\sqrt{Dt}}$, $\operatorname{erfc} y = 1 - \operatorname{erf} y$ — то же, что и в формуле (22-6).

Для воды аналогичное соотношение при $l > L_s^2/\lambda_0$ имеет вид:

$$\Phi(l, t) = \frac{Q}{8\pi r L_s^2} e^{-\frac{t}{\tau} + \frac{Dt}{L_s^2}} \left\{ e^{-l/L_s} \operatorname{erfc} x_- - e^{l/L_s} \operatorname{erfc} x_+ \right\}, \qquad (29\text{-}4)$$

$$x_\pm = \frac{\sqrt{Dt}}{L_s} \pm l/2\sqrt{Dt}.$$

При достаточно больших значениях t, т. е. когда

$$\frac{\sqrt{Dt}}{L_s} - \frac{l}{2\sqrt{Dt}} \gg \frac{1}{2}, \qquad (29\text{-}5)$$

выражения (29-2)—(29-4) принимают вид (29-1). Это указывает на то, что при больших временах t распределение нейтронов в породе определяется процессами диффузии и не зависит от замедляющих свойств среды. Поэтому при больших t можно пользоваться соотношением (29-1).

Для слабо поглощающих сред ($\Sigma_a \ll \Sigma_s$) соотношения, аналогичные (29-2), имеют следующий вид [29.19]:

$$\Phi(l, t) = \frac{\Phi t - e^{-l^2/[4D(t - t_s) + 4L_s^2]}}{8\pi^{3/2} [4D(t - t_s) + L_s^2]^{3/2}}, \qquad (29\text{-}6)$$

где $\Phi(t) = \dfrac{ve^{-t/\tau}}{(1 - \lambda\gamma/v\xi\tau)^{2/\gamma}} \dfrac{\Gamma\left(\frac{2}{\gamma}, \frac{\xi v t}{\lambda\gamma} - \frac{t}{\tau}\right)}{\Gamma(2/\gamma)}$.

Остальные обозначения те же, что и в § 2 гл. 4.

Для сред со значительным поглощением и малыми временами задержки t аналогичное соотношение записывается так [29.19]:

$$\Phi(l, t) = \Phi_н e^{-t/\tau} \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\gamma}, \frac{\xi v t}{\lambda\gamma}\right)}{\Gamma(2/\gamma)}, \qquad (29\text{-}7)$$

где $\Phi_н$ — плотность надтепловых нейтронов в стационарном случае $\Phi = J/v$ (23-9) и (29-4).

В соотношениях (29-6) и (29-7) введены следующие обозначения: $\Gamma(x, y) = \int_0^y e^{-t} \cdot t^{x-1} dt$ — неполная гамма-функция, а $\Gamma(x) = \Gamma(x, \infty)$. При $t \gg t_s$ и $Dt \gg L_s^2$ соотношения (29-6) и (29-7) сводятся к формуле (29-1).

Таким образом, при $L_s^2 \ll Dt$ для выявления некоторых качественных закономерностей вполне можно пользоваться выражением (29-1).

При больших временах задержки

$$\Phi(t) \sim e^{-t/\tau}, \qquad (29\text{-}8)$$

т. е. поток нейтронов зависит лишь от среднего времени жизни тепловых нейтронов τ. Величину времени задержки следует выбирать в соответствии со значениями l, τ и D.

Сомножитель $e^{-l^2/4Dt}$ в вышеупомянутых соотношениях определяет подток нейтронов к данной точке пространства [29.44]. При больших временах задержек поток нейтронов, как уже отмечалось, зависит лишь от поглощающих свойств среды, обусловливающихся τ. Для пород с различными временами жизни тепловых нейтронов τ_1 и τ_2 и равными коэффициентами диффузии $D_1 = D_2$ потоки нейтронов определяются

соотношениями (29-1). Отношение потоков нейтронов при этом имеет следующий вид [29.50]:

$$\frac{\Phi_2(t)}{\Phi_1(t)} = e^{t\left(\frac{1}{\tau_1}-\frac{1}{\tau_2}\right)}. \tag{29-9}$$

При $t \to \infty$ $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \to \infty$ в случае $\tau_1 < \tau_2$ и $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \to 0$ в случае $\tau_1 > \tau_2$

Это свидетельствует о том, что показания ИННК в пластах с различными поглощающими свойствами могут значительно расходиться. Для стационарного же ННК это различие ограничивается пределами $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \lessapprox \frac{\tau_2}{\tau_1}$.

Если $D_1 \neq D_2$, то соотношение, аналогичное (29-9), приобретает такой вид:

$$\frac{\Phi_2(t)}{\Phi_1(t)} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{3/2} e^{t\left(\frac{1}{\tau_1}-\frac{1}{\tau_2}\right) - \frac{l^2}{4t}\left(\frac{1}{D_2}-\frac{1}{D_1}\right)}. \tag{29-10}$$

При выполнении условия (29-5)

$$\frac{\Phi_2(t)}{\Phi_1(t)} \approx \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{3/2} e^{t\left(\frac{1}{\tau_1}-\frac{1}{\tau_2}\right)}. \tag{29.11}$$

В случае $\tau_1 \gg \tau_2$ и $D_1 \neq D_2$ выражение (29-10) можно переписать:

$$\frac{\Phi_2(t)}{\Phi_1(t)} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{3/2} e^{-\frac{t}{\tau_2} - \frac{l^2}{4t}\left(\frac{1}{D_2}-\frac{1}{D_1}\right)}. \tag{29-12}$$

Соотношения (29-2)—(29-4) начинают совпадать еще до перехода в выражение (29-1) и принимают вид (29-2) при некоторых средних временах. Поэтому дальнейшие более детальные исследования по ИННК удобно проводить исходя из соотношения (29-2). Относительная простота этого выражения позволяет определять параметры диффузии τ и D.

Величина $\sigma^2(t) = \Theta_c = L_s^2 + Dt$ называется симво́лическим или обобщенным возрастом нейтронов и может быть определена из соотношения (29-2) при замерах на двух зондах l_1 и l_2:

$$\Theta_c = \frac{l_2^2 - l_1^2}{4} \Big/ \ln \frac{\Phi(l_1, t)}{\Phi(l_2, t)}. \tag{29-13}$$

Зная величину L_s (из расчетов или экспериментов) и пользуясь формулой (29-13), нетрудно оценить коэффициент диффузии тепловых нейтронов. Однако коэффициент диффузии D можно определять по экспериментальным данным графическим способом, что будет показано ниже. Величины L_s и D связаны с водородсодержанием пород и могут быть использованы для определения их пористости.

При измерениях на одном зонде и двух временах задержки t_1 и t_2 в соответствии с формулой (29-2) можно определять время жизни тепловых нейтронов:

$$\tau = (t_2 - t_1) \Big/ \left\{ \ln \frac{\Phi(l, t_1)}{\Phi(l, t_2)} - \frac{3}{2} \ln \frac{\Theta(t_2)}{\Theta(t_1)} + \frac{l^2 [\Theta(t_2) - \Theta(t_1)]}{4\Theta(t_1) \cdot \Theta(t_2)} \right\}, \tag{29-14}$$

где $\Theta(t_1) = L_s^2 + Dt_1$, $\Theta(t_2) = L_s^2 + Dt_2$. Величина D при этом берется из предыдущих замеров.

При измерениях на больших задержках $t \gg L_s^2/D$ последним членом в знаменателе (29-14) можно пренебречь, эта формула приобретает более простой вид:

$$\tau = (t_2 - t_1) \Big/ \left\{ \left[\ln \frac{\Phi(l, t_1)}{\Phi(l, t_2)} \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{3/2} \right] + \frac{l^2 (t_2 - t_1)}{4Dt_1 t_2} \right\}. \tag{29-15}$$

Аналогичное соотношение следует и из (29-1).

В выражении (29-15) вторым членом в знаменателе по сравнению с первым можно пренебречь. В этом случае получаем

$$\tau = (t_2 - t_1) \ln \left[\frac{\Phi(l, t_1)}{\Phi(l, t_2)} \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{3/2} \right]^{-1}. \qquad (29\text{-}16)$$

Расчет средних времен жизни тепловых нейтронов в слоистых средах рассматривается в работе [29.23].

Для удобства пользования выражениями (29-14)—(29-16) связь между средним временем жизни тепловых нейтронов и логарифмом отношения потоков нейтронов иногда представляют в виде

$$\frac{1}{\tau} \sim \ln \frac{\Phi(l, t_1)}{\Phi(l, t_2)}.$$

При определении этой величины с относительной ошибкой 10% измерения по ИННК в водонасыщенных песчаниках рекомендуют вести на зондах 58—66 см при $t > 2$ мс, а при измерениях с относительной точностью 5% — на зондах 50—75 см при $t = 2$ мс, и на зондах 50—63 см при $t = 1$ мс [29.23].

По данным τ и D, определенным по ИННК, практически однозначно можно оценивать водородсодержание горных пород, которое, как уже отмечалось, тесно связано с их пористостью, водо- и нефтенасыщенностью и т. п. (подробно об этом см. в [32.9]). Величина τ хотя и связана с поглощающими свойствами горных пород, но без ее оценки невозможно точно определить свойства пластов и их пористость.

Помимо рассмотренных приемов для определения параметров L_s, τ и D могут применяться и другие [29.59].

При определении в породе элементов, сильно поглощающих тепловые нейтроны, важно исключить осложняющие факторы, обусловленные замедлением и переносом нейтронов в породе и нестабильностью источника. Это может быть осуществлено по методике интегральных отношений [29.19]:

$$M(\Delta t, \tau) = \frac{\int_{t_1}^{\infty} \Phi(l, t)\, dt}{\int_{t_2}^{\infty} \Phi(l, t)\, dt}, \qquad (29\text{-}17)$$

где t_1 и t_2 — время задержки.

При t_1 и t_2, больших t_s хотя бы на величину дисперсии,

$$\overline{\Delta t^2} = \overline{(t - t_s)^2} = t_s^2 \frac{\gamma}{2}, \qquad (29\text{-}18)$$

величина M будет определяться соотношением

$$M(\Delta t, \tau) = e^{-t_1/\tau + t_2/\tau} = e^{-\Delta t/\tau}, \qquad (29\text{-}19)$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$.

Относительная величина аномалии в зависимости от содержания в породе определяемого элемента находится из выражения [29.19]:

$$\frac{M(\Delta t, \tau_1) - M(\Delta t, \tau_2)}{M(\Delta t, \tau_1)} = 1 - e^{-\Delta t \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right)} = 1 - e^{-\Delta t v \Delta \Sigma_a}, \qquad (29\text{-}20)$$

где $\Delta\Sigma_a = \Sigma_{a1} - \Sigma_{a2}$ — изменение макроскопического сечения при переходе из пласта с τ_2 в пласт с τ_1.

Приведенные формулы справедливы исключительно для однородных сред. Помимо этого проводились исследования для сред, содержащих пропласток породы с другими нейтронными параметрами для тепловых нейтронов [29.59]. Результаты расчетов для однородных сред по методу Монте-Карло рассматриваются в работах [22.101, 22.102, 27.65, 29.42, 29.49, 29.51].

С целью оценки глубинности ИННК С. А. Кантором [22.101, 29.44] сделаны приближенные расчеты для однородных сред в виде цилиндров (безграничной длины и с переменным радиусом R), граничащих с вакуумом. Полученная им формула имеет следующий вид:

$$R_{0,9} = 2{,}06 \sqrt{\Theta_c'} - a_s, \qquad (29\text{-}21)$$

где $\Theta_c' = \Theta_c + D(t - t_s)$; t_s — время замедления нейтронов, a_s — экстраполированная длина свободного пробега нейтронов. Указанные здесь параметры для песка различной влажности и воды приведены в табл. 29-1, а результаты расчета по формуле (29-21) — в табл. 29-2. Видно,

Таблица 29-1

Нейтронные параметры

Среда	t_s, мкс	L_s^2, см² для E_n		$D \cdot 10^{-4}$ см²/с	a_s, см	τ, мкс
		14 МэВ	5 МэВ			
Сухой песок (1,65 г/см³)	600	3000	2000	41	7	2200
Влажный песок						
$m_п = 0{,}1$	60	650	400	19	5	1060
$m_п = 0{,}2$	35	370	200	14	4	750
$m_п = 0{,}4$	16	200	100	6,4	3,5	440
Вода ($m_п = 1$)	6	150	57	3,5	3,5	207

что увеличение энергии быстрых нейтронов ведет к увеличению глубинности ИННК, глубинность ННК-н несколько меньше глубинности ННК-т, с увеличением времени задержки глубинность исследования пород методом ИННК возрастает. Причем относительное приращение величины $R_{0,9}$ тем больше, чем выше содержание водорода в породе.

Аналогичного рода расчеты проведены С. А. Кантором и др. [29.23] для оценки краевых эффектов при моделировании задач ИННК.

Таблица 29-2

Радиус зоны исследования $R_{0,9}$

Среда	ННК-т $E_n = 5$ МэВ	ННК-п $E_n = 14$ МэВ	ННК-т $E_n = 14{,}1$ МэВ	ИННК-т для разных t, мкс		
				1000	2500	4000
Сухой песок	103	108	124	111	122	133
Влажный песок						
$m_п = 0{,}1$	45	49	56,5	56	65	74
$m_п = 0{,}2$	33	36	42	44	52	58
$m_п = 0{,}4$	21,5	26	28,5	31	36	42
Вода ($m_п = 1$)	13	22	23	25	28	32

При исследовании по ИННК приходится сталкиваться с сухими и заполненными жидкостью скважинами. Сухие скважины чаще всего встречаются при изучении некоторых рудных месторождений. Для скважин малого диаметра, близкого к диаметру глубинного прибора, можно руководствоваться положениями, вытекающими из исследования однородных сред.

Гораздо чаще на практике приходится сталкиваться со скважинами, заполненными жидкостью. При этом скважина с ее заполнением оказывает искажающее влияние на результаты определения параметров породы или содержания в ней поглощающих элементов. Поэтому как при ИННК, так и при ИНГК важно включать детектор излучения

через такое время t, когда нейтроны и порождаемые ими в скважине гамма-кванты «вымрут» и в нее начнут поступать нейтроны, несущие информацию о породе. Это условие может соблюдаться лишь в том случае, если время жизни тепловых нейтронов в скважине $\tau_с$ значительно меньше соответствующей величины в породе $\tau_п$ ($\tau_с < \tau_п$). На практике это условие выполняется применительно к исследованиям нефтяных и газовых скважин. Для сред, заполняющих скважину (вода, цемент), величина $\tau_с < 300$ мкс, а для нефтеносных пластов $\geqslant 300$ мкс [29.57].

При ННК и НГК нейтроны и гамма-лучи обеих групп регистрируются одновременно. Этим, собственно говоря, и объясняется их низкая информативность о породе.

Таким образом, для ИННК наиболее благоприятны условия, когда $\tau_с < \tau_п$ и $D_с < D_п$. По данным ИННК, при этом без особого труда можно определить параметры $\tau_п$ и $D_п$. Однако на практике могут быть и другие случаи, в частности, когда $\tau_с > \tau_п$, т. е. когда нейтроны в породе поглощаются быстрее, чем в скважине. Так, эта задача может иметь место при определении в породах высоких концентраций бора и т. д. Для определения свойств породы в этом случае авторы [29.44] предлагают искусственно понижать время жизни тепловых нейтронов в скважине, засоляя буровой раствор или располагая в глубинных приборах специальные поглотители около детекторов. Для выяснения этого вопроса необходимы специальные исследования.

А. Л. Поляченко [22.102, 29.43, 29.45, 29.49] применительно к исследованию скважин выведены приближенные аналитические соотношения на основе следующих предпосылок: радиус скважин $R_0 \geqslant 4$ см, время жизни тепловых нейтронов (в скважине $\tau_с$ и породе $\tau_п$) $\tau_i \geqslant 100$ мкс, время задержки $t \geqslant 200$ мкс, пористость пород $m_п = m_н \geqslant 5\%$ при любых значениях коэффициентов диффузии в скважине $D_с$ и породе $D_п$.

Для случая слабого поглощения нейтронов в породе по сравнению со скважиной ($\tau_п < \tau_с$ или $\Sigma'_{aп} < \Sigma'_{ac}$, здесь $\Sigma'_{aп}$ и Σ'_{ac} — соответственно макроскопические сечения поглощения в породе и скважине тепловых нейтронов, см. гл. 4) получено следующее соотношение:

$$\Phi = q \frac{\exp\left[-\frac{t}{\tau_п} - \frac{l^2}{4(D_п t + \Theta_{эф})}\right]}{[4\pi(D_п t + \Theta_{эф})]^{3/2}} I_0(x). \qquad (29\text{-}22)$$

В работе А. Л. Поляченко [22.102] выведена аналогичная формула для более широкого диапазона времен задержки для условия $D_п \geqslant D_с$. При выделении радиальной и осевой компонент $\Theta_{эф}$ это выражение несколько усложняется [32.9, 29.45].

Для случая сильного поглощения нейтронов в породе по сравнению со скважиной ($\Sigma'_{aп} > \Sigma'_{ac}$ или $\tau_п < \tau_с$) получено соотношение:

$$\Phi' = q' \frac{\exp\left[-\frac{t}{\tau_{эф}} - \frac{l^2}{4(D_{эф} t + \Theta'_{эф})}\right]}{\left[4\pi(D_{эф} t + \Theta'_{эф})\right]^{1/2}} J_0(y). \qquad (29\text{-}23)$$

В этих соотношениях приняты следующие обозначения: q и q' — некоторые константы, зависящие от выхода нейтронов из мишени генератора и свойств ближней зоны (в явном виде они не даются):

$$x = \frac{r}{\sqrt{D_с}} \sqrt{\frac{\tau_п - \tau_с}{\tau_п \tau_с}}; \quad y = \frac{r}{\sqrt{D_с}} \sqrt{\frac{\tau_п - \tau_{эф}}{\tau_п \tau_{эф}}},$$

где r — текущая координата в скважине по радиусу. При регистрации тепловых нейтронов на оси скважины ($r = 0$) функции Бесселя от

действительного $J_0(y)$ и мнимого $J_0(x)$ аргументов равны единице и расчет по формулам (29-22) и (29-23) упрощается.

Величины эффективных возрастов нейтронов $\Theta_{эф}$ и $\Theta'_{эф}$ сложным образом зависят от радиуса скважин и длин замедления нейтронов в скважине L_{sc} и породе $L_{sп}$. На практике эти величины возраста нейтронов обычно определяются из условия эксперимента, что будет показано ниже.

Эффективные коэффициенты $\tau_{эф}$ и $D_{эф}$ являются промежуточными значениями ($\tau_п < \tau_{эф} < \tau_c$ и $D_c < D_{эф} < D_п$ или $D_c > D_{эф} > D_п$) и зависят от радиуса скважины. Аналитические выражения для этих коэффициентов имеют сложный вид, поэтому не будем их приводить. Интересующихся отсылаем к работам [22.101, 22.102]. В работе [22.102] приводятся также графики этих функций для некоторых сред. Заметим, что чем ближе значения $\tau_{эф}$ к $\tau_п$ и $D_{эф}$ к $D_п$, тем бо́льшую информацию несет об исследуемых породах регистрируемый поток нейтронов.

В случае слабого поглощения ($\tau_п > \tau_c$) распределение потока нейтронов в зависимости от l и t такое же, как и в однородной среде с параметрами $D_п$ и $\tau_п$. Это говорит о том, что при больших временах задержки к детектору в основном приходят нейтроны из породы. Таким образом, влияние нейтронов, диффундирующих по скважине, практически не оказывает воздействия на детектор. При измерениях на двух зондах в этом случае также можно определять величину символического возраста нейтронов $\Theta' = \Theta_{эф} + D_п t$ из формулы, аналогичной (29-13), а при измерениях на двух задержках t_1 и t_2 — время жизни тепловых нейтронов в породе $\tau_п$.

Зависимость символического возраста нейтронов от времени при этом имеет вид, показанный на рис. 29-2 [29.44]. Расчетные данные вполне согласуются с экспериментальными. Отрезок по оси ординат (при $t=0$) соответствует эффективному возрасту нейтронов $\Theta_{эф}$. В однородной среде отрезок непосредственно соответствует величине L_s^2, а величина тангенса угла наклона прямой к оси абсцисс — коэффициенту диффузии нейтронов в породе ($D_п = \operatorname{tg}\alpha$).

Наличие обсадной колонны не меняет наклона прямой, показанной на рис. 29-2, а лишь смещает ее вдоль оси ординат [29.59].

Это говорит о том, что даже при исследовании обсаженных скважин по методике ИННК можно определять коэффициент диффузии горных пород. Эффективный же возраст нейтронов зависит не только от параметров породы, но и от скважины с ее обсадкой.

Соотношение (29-23) применительно к задачам нефтепромысловой геофизики исследовано в работе А. Л. Поляченко и С. А. Кантора [22.101]. В сборнике [29.23] показано, что в случае $\tau_п < \tau_c$ при построении графиков $\Theta = f(t)$ невозможно определять коэффициент диффузии тепловых нейтронов, а по кривой $\Phi(t)$ — величину $\tau_п$. Это подтверждено также экспериментальными исследованиями [17.13]. Величины параметров $\tau_п$ и $D_п$ А. Л. Поляченко рекомендует оценивать по измерению потока нейтронов вдоль радиуса скважины [29.78].

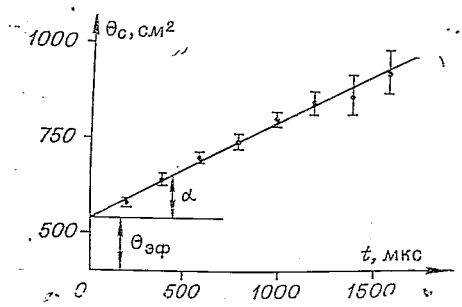


Рис. 29-2. Зависимость символического возраста нейтронов от времени ($\Theta_c = \Theta_{эф} + D_п t$), полученная путем расчетов (сплошная кривая) и измерений на модели песчаника (точки с разбросом) пористостью 0,09 для нейтронов с начальной энергией 14,1 МэВ; $\Theta_{эф} = 540$ см², $\operatorname{tg}\alpha = D_п = 2{,}5 \cdot 10^5$ см²/с.

Р. Л. Колдуэлом, Л. С. Алленом, В. Р. Милсом [14.4, 19.178, 29.60] расчетным путем показано, что водонефтяной контакт можно выявлять с помощью ИННК в случае, если зона проникновения пресной

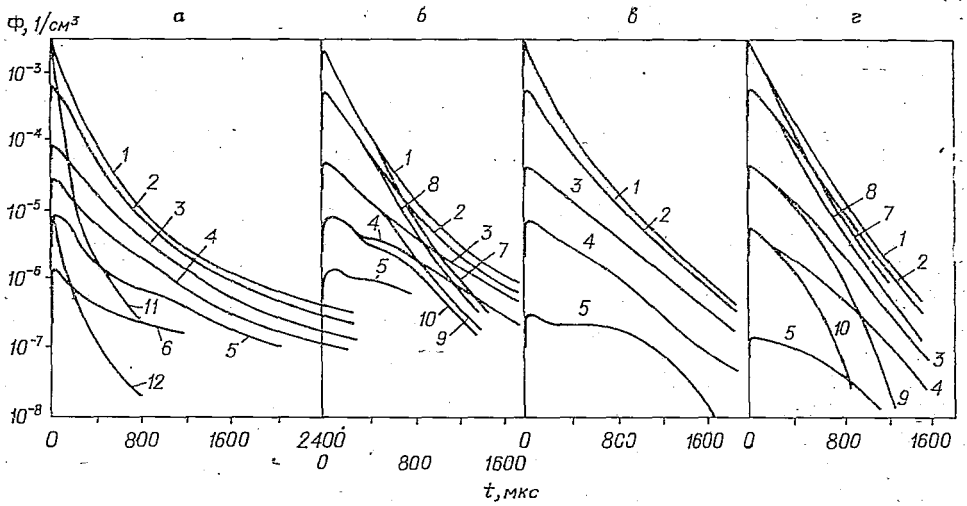


Рис. 29-3. Временное распределение нейтронов в скважине диаметром 16 см, пересекающей пласт песчаника с пористостью 0 (*а*), 20 (*б*); 40 (*в*) и 100% (*г* — вода) в случае расположения источника на оси скважины. Кривые рассчитаны для зондов следующих размеров (см):

1, 7 и *11* — 0—4; *2* и *8* — 8—12; *3* и *9* — 16—24; *4* и *10* — 24—32; *5* и *12* — 32—48; *7* и *10* — минерализованная вода с содержанием 200 г/л хлористого натрия. Остальные кривые соответствуют заполнению пор пресной водой (нефтью); *11* и *12* — скважина заполнена минерализованной водой (200 г/л), в остальных случаях — пресной.

воды в минерализованный водоносный пласт или соленой воды в нефтяной не превосходит по радиусу 35 см. Эти данные подтверждены также экспериментально [29.2, 29.3, 29.6 и др.].

Далее перейдем к рассмотрению результатов, полученных с помощью расчетов на ЭВМ по методу Монте-Карло [14.4, 29.52]. Временное распределение тепловых нейтронов от источника с начальной энергией 2,45 МэВ приводится на рис. 29-3—29-5. Слабому поглощению ($\tau_п > \tau_с$) соответствуют песчаники с пористостью 0—40%, если они заполнены пресной водой или нефтью, а скважина — водой. Одинаковому поглощению $\tau_п \approx \tau_с$ соответствует песчаник с пористостью 20%, когда он заполнен минерализованной водой, а скважина — пресной.

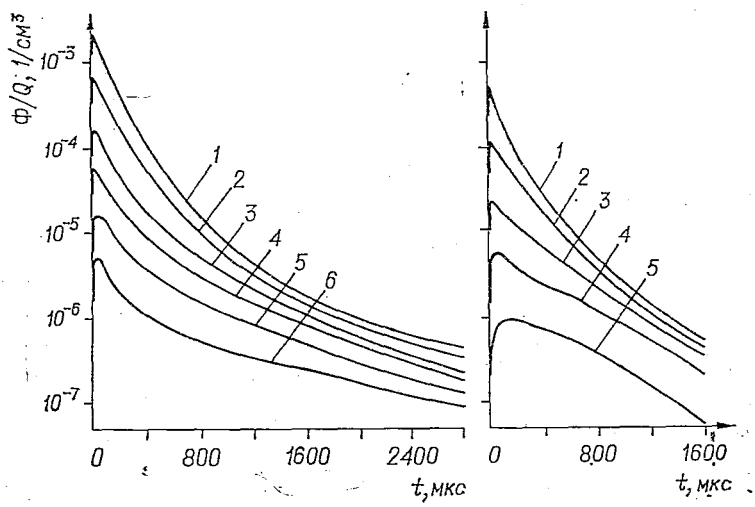


Рис. 29-4. Временное распределение нейтронов в скважине диаметром 16 см при расположении источника на расстоянии 2 см от стенки скважины для песчаника пористостью 0 (*а*) и 20% (*б*). Шифр кривых *1—6* — то же, что и на рис. 29-3.

И, наконец, сильному поглощению $\tau_п < \tau_с$ соответствует условная среда, когда пласт нацело заполнен минерализованной водой, а скважина — пресной.

Из рис. 29-3—29-5 видно, что с увеличением времени задержки происходит резкое возрастание плотности нейтронов. По достижении максимума она начинает спадать. Причем если скважина заполнена пресной водой, этот спад более пологий, чем если бы она была заполнена минерализованной водой. Аналогичная закономерность отражается и кривыми, отвечающими случаю заполнения пласта пресной и минерализованной водой. Расхождение кривых для одного и того же зонда в случае условного пласта (нефть и минерализованная вода, см. рис. 29-3, *г*) начинается при временах 100—200 мкс, а для песчаника с пористостью 20% (см. рис. 29-3, *б*) — при временах 300—500 мкс. Со временем все эти кривые расходятся тем сильнее, чем больше размер зонда. Однако спад этих кривых при малых зондах происходит гораздо быстрее, чем при больших. Форма же кривых для больших размеров зондов гораздо сложнее, чем для кривых с малыми размерами. Для больших размеров зондов в отдельных случаях наблюдаются пологие участки для средних времен задержки (кривая на рис. 29-3, *в* и другие). В случае нейтронов с $E_п = 14$ МэВ пологие участки для рассмотренных размеров зондов не наблюдаются [19.175].

Кривые для эксцентрично расположенного источника по сравнению с осевым (см. рис. 29-4) имеют следующие особенности [29.52]: при малых зондах приближаются быстрее к асимптоте $e^{-t/\tau_п}$; начиная со средних значений l и t плотность нейтронов соответственно выше; при средних и больших зондах вид кривой становится ближе к кривой для однородной среды.

Из сопоставления данных, полученных для однородной среды и этой же среды, пройденной скважиной (см. рис. 29-5), видно, что при измерениях на малых зондах в скважине при малых временах получаются более высокие плотности тепловых нейтронов, чем в однородной среде. Причем спад плотности тепловых нейтронов со временем в скважине происходит значительно быстрее, а выход на асимптоту $e^{-t/\tau_п}$ значительно позднее по сравнению с однородной средой. Для больших размеров зонда, наоборот, более высокие значения плотности нейтронов достигаются в однородной среде. Для малых зондов выход кривой $Ф = f(t)$ в скважине на асимптоту происходит при $t \approx 1{,}3$ мс, а для больших зондов — при более высоких значениях времени задержки.

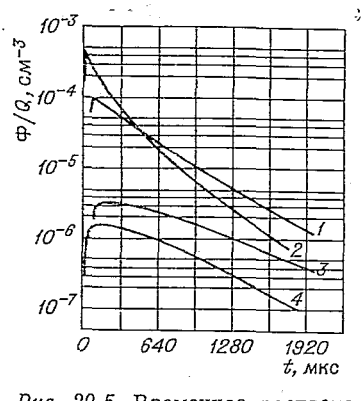


Рис. 29-5. Временное распределение нейтронов в однородном нефтеносном песчанике пористостью 20% (*1* и *3*) и в том же песчанике, пройденном скважиной диаметром 16 см при заполнении ее пресной водой и расположении источника на расстоянии 2 см от стенки (*2* и *4*). Кривые соответствуют таким размерам зондов (см): *1* и *2*—*8* — 12; *3* и *4* — 32—48.

В заключение авторы [29.52] отмечают, что при малых зондах проявляются следующие закономерности. Если времена задержки малы, распределение потока тепловых нейтронов в скважине близко к стационарному их распределению применительно к ННК-н. После процесса замедления нейтроны начинают переходить из скважины в пласт. Параллельно идет процесс диффузии вдоль ствола скважин. В результате спад кривых $Ф = f(t)$ в скважине происходит быстрее, чем в воде. Со временем при переходе нейтронов из скважины в пласт ($\tau_п > \tau_с$) их плотность в скважине становится меньше, чем в породе, и начинается обратный процесс — нейтроны из породы поступают в сква-

жину. При больших временах плотность нейтронов в скважине в основном обусловливается нейтронами, выходящими из пласта, и их распределение подчиняется закону $e^{-t/\tau_п}$. Если $\tau_п < \tau_с$, плотность тепловых нейтронов в скважине остается всегда больше плотности нейтронов в пласте (этот случай неблагоприятен для ИННК). При этом ни при каких временах кривая $\Phi = f(t)$ не выходит на асимптоту $e^{-t/\tau_п}$.

Рассмотрим закономерности, имеющие место при больших размерах зондов [29.52]. Максимум плотности замедления нейтронов образуется вблизи стенки скважины. Поэтому после окончания процесса замедления в течение примерно 100 мкс начинается переток нейтронов как в пласт, так и к центру скважины. Однако для случая $\tau_п > \tau_с$ из-за сильного поглощения нейтронов в скважине их количество в ней резко уменьшается и начинается приток нейтронов из породы в скважину. За счет этого и диффузии нейтронов по стволу скважины наблюдается выполаживание кривых для средних времен задержек. В последующее время плотность нейтронов в скважине в основном обусловливается их притоком из пласта.

При измерениях с генератором, основанным на реакции $(d—d)$, оптимальным зондом следует считать величину, равную 25 см (для рассмотренного диаметра скважины и пластов). При измерениях с генератором, основанным на реакции $(d—t)$, оптимальный зонд, по мнению авторов [29.52], равен 45 см.

В. Е. Лебедевым [29.38] на основе расчетов по методу Монте-Карло для скважины диаметром 20 см и нейтронов с начальной энергией 14 МэВ для определения среднего времени жизни пород оптимальный зонд рекомендуется выбирать равным 70 см, а для определения коэффициента диффузии —20 и 70 см (при замерах на двух зондах).

В. Я. Гомерштадтом и др. [19.175] исследована зона проникновения для нейтронов с начальной энергией 14 МэВ. Диаметр скважины принят равным 16 см, скважина заполнена пресной водой. В качестве породы взят песчаник пористостью 20% с пресной и минерализованной водой (200 г/л хлористого натрия). Источник располагался на оси скважины. При сравнении потоков нейтронов в скважине в интервале 0—4 и 4—8 см (по радиусу скважины) установлено, что потоки нейтронов отличаются не более чем на 10%.

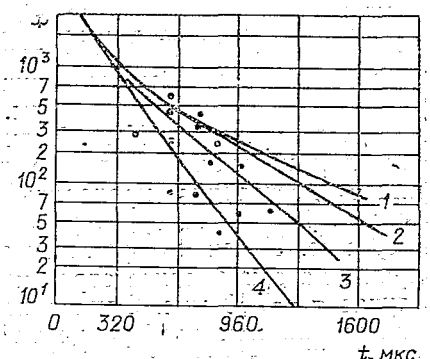


Рис. 29-6. Временное распределение плотности нейтронов в скважине для зонда размером 36 см и зоны проникновения: *1* — ∞ (пласт заполнен пресной водой), *2* — 17 см; *3* — 7 см; *4* — 0 (пласт полностью заполнен минерализованной водой).

Временное распределение нейтронов приведено на рис. 29-6. За зону проникновения по радиусу скважины R_0 принята зона исследования $R — R_0$.

Из рис. 29-6 нетрудно установить, что при временах задержки 960 и 1200 мкс из зоны проникновения величиной 17 см к детектору достигает примерно 85% тепловых нейтронов. Из этого следует, что при измерениях с относительной погрешностью 10% наличие зоны проникновения величиной 20 см практически полностью экранирует ВНК (по границе между нефтеносным и минерализованным водоносным пластами).

Зависимость величины радиуса зоны исследования от радиуса зонда для разных задержек представлена на рис. 29-7 [19.175, 29.59]. Кривые получены по данным расчета пространственно-временного рас-

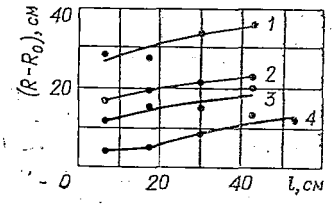


Рис. 29-7. Зависимость радиуса зоны исследования песчаника ($m_п = m_н = 20\%$) от размера зонда для различных времен задержки (мкс): *1* — >1540; *2* — 900—1280; *3* — 640—900; *4* — стационарный ННК.

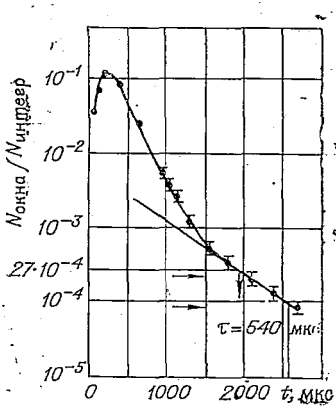


Рис. 29-8. Зависимость нормированной скорости счета тепловых нейтронов от времени задержки, используемая для определения среднего времени жизни тепловых нейтронов.

пределения плотности нейтронов в изучаемых средах $\Phi(l, r, t)$. С увеличением размера зонда величина $R - R_0$ несколько возрастает. Однако она повышается гораздо значительнее с возрастанием времени задержки. При ННК, как видим, величина $R - R_0$ гораздо меньше, чем при ИННК.

2. **Основы методики измерений.** При исследовании по ИННК, как уже отмечалось, необходимо определять нейтронные параметры пород — коэффициент диффузии и среднее время жизни тепловых нейтронов. Практические приемы, положенные в основу определения коэффициента диффузии, рассматривались выше (см. рис. 29-2). Экспериментальные данные D и τ и расчетные согласуются с относительной погрешностью 10% (для пород с пористостью 9%) [29.57]. Для реальных пород с широким изменением их пористости погрешности оценки этого параметра будут рассмотрены ниже.

Далее рассмотрим несколько других практических приемов, используемых для определения среднего времени жизни тепловых нейтронов.

Эта величина может быть оценена по экспериментальной кривой $N(t)$, нормированной к интегральной скорости счета. Типичный вид кривой $N(t)$ показан на рис. 29-8 [29.43]. Левая часть кривой обусловлена влиянием скважины, а правая, подчиняющаяся закону $e^{-t/\tau_п}$, влиянием породы. Для определения $\tau_п$ используется правая ветвь кривой $\ln N(t)$. Если длина этой кривой недостаточна, к ней строится касательная, также показанная на рис. 29-8. Для определения $\tau_п$ достаточно проделать следующую манипуляцию: выбрать на прямой $\ln N(t)$ точку, определяемую, например, координатами 10^{-4} и 2580 мкс. Увеличив ординату этой точки в «е» раз (в 2,7 раза), получим на оси абсцисс отрезок Δt, отвечающий величине $\tau_п$. В нашем случае $\tau_п = 540$ мкс. Однако изложенная методика не учитывает влияния скважины и коэффициента диффузии.

В. П. Одиноковым, Б. М. Буровым и др. [17.13, 29.23, 32.9] исследовалось влияние скважины на результаты определения среднего времени жизни тепловых нейтронов в породе. Установлено, что при $\tau_п > \tau_с$ влияние скважины тем сильнее, чем больше ее диаметр. Если прибор располагается у стенки скважины, искажения величины $\tau_п$ менее значительны, чем когда прибор располагается в центре скважины.

По данным $N = f(t)$ обычно определяется не истинное значение $\tau_п$, а некоторая величина, связанная с $\tau_п$. Эту связь обычно принято выражать через декремент затухания потока нейтронов $\lambda_з = \frac{-1}{\tau_п} + \Delta$. Здесь Δ — некоторая постоянная, зависящая от размера зонда и рассеивающих свойств пласта. Для некоторых оптимальных размеров зондов $\Delta = 0$ и $\lambda_з = \tau_п^{-1}$. По расчетам для ИННК и ИНГК величина оптимальных размеров зондов не выходит за пределы 40—60 см. Экспериментально же для скважины диаметром 20 см, заполненной прес-

ной водой, величина оптимального зонда равна 70 см для ИННК и ИНГК.

Величину $\tau_п$ с учетом Δ можно определять и по величинам $\lambda_з$, пользуясь специальными номограммами [32.9].

Правая ветвь кривых (см. рис. 29-8) может быть представлена суперпозицией двух экспонент и использована для определения $\tau_с$ и $\tau_п$ [4.19, 29.44]. Исследования по определению диффузионных параметров во внутрискважинном пространстве рассматриваются в работах [29.53, 29.78].

Р. Л. Колдуэлом и др. для определения среднего времени жизни тепловых нейтронов в скважинах разработана специальная методика, основанная на применении счетно-решающего устройства [14.4].

На основе идеи импульсных нейтронных методов, предложенной в СССР в 1954 г. И. М. Франком и независимо от него в Швеции Г. Ф. Дарделлом [14.4, 29.23], во ВНИИЯГГе В. В. Миллером и др. [32.9, 29.40, 29.45], для определения среднего времени жизни тепловых нейтронов создана лабораторная установка. В центре ее в замедлителе размещается образец керна диаметром 4 см и высотой 8 см. Сбоку от образца располагалась мишень генератора нейтронов. Расстояние между центром мишени и центром образца керна составляло около 10 см. Выход нейтронов в генераторе равнялся 10^7 нейтр/с. Сцинтилляционный счетчик находился снизу от образца керна. Между люминофором (ZnS+B) и образцом располагался слой замедлителя толщиной около 4 см. Регистрация временного распределения потока тепловых нейтронов осуществлялась с помощью временного анализатора АИ-256. Такая установка градуировалась по образцам с известным химическим составом, среднее время жизни для которых определялось расчетным путем. По результатам измерений строился график $N=f(t)$. Для времени задержки свыше 60 мкс в полулогарифмических координатах этот график носил линейный характер. По нему оценивался декремент затухания $\lambda_з$. По результатам расчетов и экспериментов строилась зависимость $\lambda_з=f(\tau_п)$. В дальнейшем при облучении изучаемых образцов по виду функции $N=f(t)$ определялся декремент затухания $\lambda_з$ и по его величине в соответствии с графиком $\lambda_з=f(\tau_п)$ оценивалось искомое значение времени жизни тепловых нейтронов.

Ведутся также исследования по определению коэффициента диффузии образцов, а также параметров τ и D по замерам на блоках и коренных выходах пород [32.9, 29.45].

В работах [17.13, 29.43, 29.50] показано наличие корреляционной связи между средним временем жизни тепловых нейтронов со скоростью распространения упругих волн, а в ряде случаев и с удельным сопротивлением пород. Следовательно, данные ИННК можно комплексировать с данными других геофизических методов для решения некоторых геологических задач.

Точку записи кривых ИННК следует относить к верхнему концу детектора. Контакт двух пород (мощностью $h>l$) с разными $\tau_п$ отбивается по перегибу кривой регистрируемой скорости счета. (Подробнее об этом см. в [32.9]).

Перед проведением работ по ИННК рекомендуется тщательно изучать литологию пород и их состав, чтобы оценить нейтронные параметры с целью выбора оптимальных параметров прибора и его режима. После этого уже рекомендуется переходить к экспериментам на скважине. Вначале проводят опытно-методические исследования (обычно по точечным замерам в скважинах или иногда на моделях). По этим результатам применительно к каждой конкретно решаемой задаче выбирается размер зонда, время задержки и ширина временного окна. После выбора основных параметров режима работы аппаратуры реко-

мендуется в дальнейшем использовать их в качестве типовых для данного региона.

Ширину временного окна каротажа следует выбирать по возможности наибольшей (для увеличения регистрируемой скорости счета), но не выше минимального времени жизни тепловых нейтронов в изучаемых породах. После выбора ширины временного окна необходимо построить зависимость $N=f(t)$, для этого рекомендуется провести замеры по крайней мере при четырех значениях времен задержки. Кривую $N=f(t)$ следует строить вплоть до самых высоких значений t, пока счет нейтронов еще превышает фоновое значение, обусловленное в основном наводками аппаратуры. При проведении опытно-методических исследований в качестве временных анализаторов необходимо пользоваться АИ-256-1 и др. (см. § 5 гл. 6). Однако на практике чаще всего применяют установки типа СГС-1, АИ-50, АИ-100, АИ-128 и др. (см. § 4 гл. 6), снабжая их специальными временными приставками.

В связи с тем, что выход нейтронов из генератора меняется со временем, рекомендуется применять мониторирование пучка и исправлять получаемые значения монитора. Ввиду отсутствия мониторов в серийно выпускаемых приборах их показания рекомендуется нормировать к интегральной скорости счета или к замеру со 2-й задержкой.

Поскольку генератор нейтронов является управляемым источником нейтронов, при проведении опытно-методических исследований важно выбрать не только указанные выше параметры режима работы прибора, но и длительность импульса нейтронов ΔT и частоту их следования (или время T), а также выход нейтронов из мишени генератора Q. Естественно, что при решении каждой задачи необходимо выбирать скорость подъема глубинного прибора, его постоянную времени и масштабы записи диаграмм и т. д.

Некоторые другие методические вопросы рассматриваются в работах [17.13, 29.44, 29.45].

3. **Области применения метода.** Нефтяные и газовые скважины. Метод ИННК наиболее широко применяется для определения ВНК при отделении нефтеносных пластов от минерализованных водоносных [5.9, 6.46, 6.63, 6.64, 14.4, 15.31, 17.13, 18.43, 18.66, 22.102, 29.1—29.8, 29.11, 29.14, 29.15, 29.23, 29.26, 29.27, 29.29, 29.31—29.37, 29.42—29.45, 29.50, 29.54, 29.57, 29.58, 29.67, 29.69, 29.76, 29.78, 32.9].

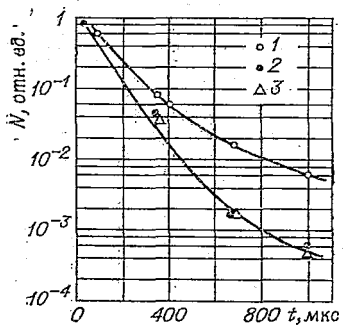


Рис. 29-9. Временное распределение скорости счета тепловых нейтронов в песчаниках, пройденных скважиной: *1* — заполненных нефтью, *2* и *3* — минерализованной водой.

Иллюстрацией возможностей ИННК применительно к рассматриваемой задаче могут служить результаты, показанные на рис. 29-9 и 29-10 [6.64]. Приведенные данные получены при исследовании скважин Волго-Уральской нефтеносной провинции. Исследования проводились в скважине диаметром 11 3/4″, обсаженной колонной 6″, в пластах песчаника со средней пористостью 20%. Минерализация пластовых вод составляла ~250 г/л. Выход нейтронов из скважинного генератора равнялся $2\cdot10^6$ нейтр/с с длительностью ионного импульса около 50 мкс. Детектирование тепловых нейтронов осуществлялось при помощи четырех пропорциональных борных счетчиков диаметром 15 мм и длиной 100 мм. Размер зонда был выбран равным 35 см (ИННК-т-35).

Из рис. 29-9 видно, что при исследовании скважины 10-кратное изменение скорости счета тепловых нейтронов достигается при задержках 800 мкс. При непрерывных измерениях с задержкой 780 мкс ВНК отбивается 6-кратным изменением скоростей счета (см. рис. 29-10),

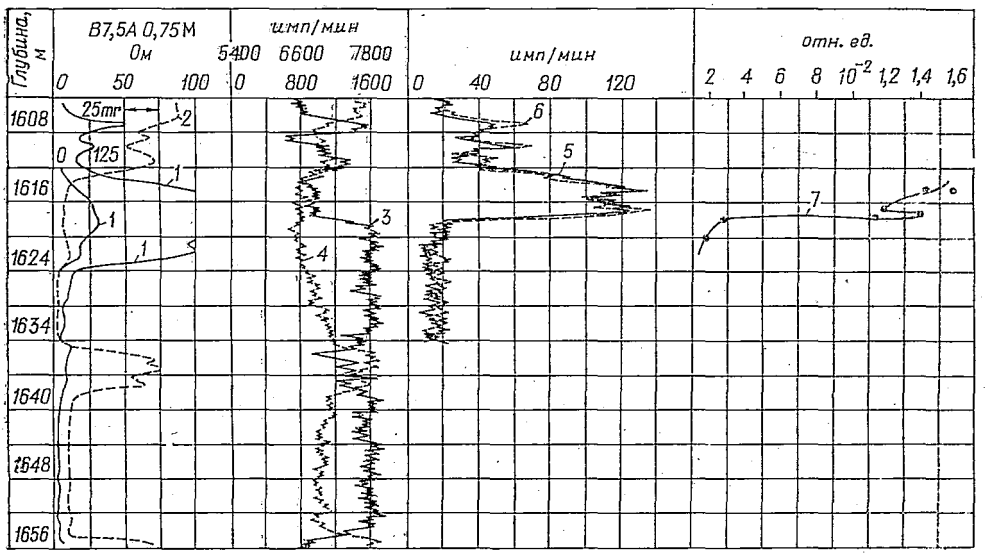


Рис. 29-10. Одна из первых диаграмм по отбивке ВНК по ИННК в сопоставлении с другими методами.

1 — кривая КС, *2* — кривая ПС, *3* — кривая НГК-50 (замеры с борным фильтром), *4* — кривая ГК, *5* — кривая ИННК-т-35 (время задержки — 780 мкс), *6* — повторный замер, *7* — кривая исследования зоны ВНК по точечным замерам (время задержки — 680 мкс, окно — 200 мкс).

а при точечных замерах с задержкой 680 мкс — примерно 10-кратным изменением скоростей счета. По НГК этот контакт, как видим, отбивается изменением скорости счета всего лишь на 12%. Возможности ИННК при отбивке ВНК более подробно рассматриваются в § 3 гл. 33.

Ф. А. Куриленко [29.43] при точечных измерениях на моделях пластов показано, что ВНК отбивается по середине переходной кривой $N=f(H)$, где H — глубина положения прибора в скважине. Другими словами, ВНК отбивается по величине $\frac{1}{2}(N_н - N_в)$, где $N_н$ — соответственно скорости счета против нефтеносного и минерализованного водоносного пластов. Точка записи при этом относилась к центру зонда.

Для обработки результатов измерений с целью определения ВНК и т. п. в последнее время стали применяться ЭВМ [29.36].

Метод ИННК удобен также для выявления газоносных пород и определения газожидкостного контакта (ГЖК) [14.4, 17.13, 22.102, 29.7, 29.11, 29.31, 29.43, 29.78]. Для высокопористых пород с коэффициентом газонасыщенности $m_н \geqslant 80\%$ характерны высокие значения времени жизни тепловых нейтронов, что позволяет по данным ИННК выявлять

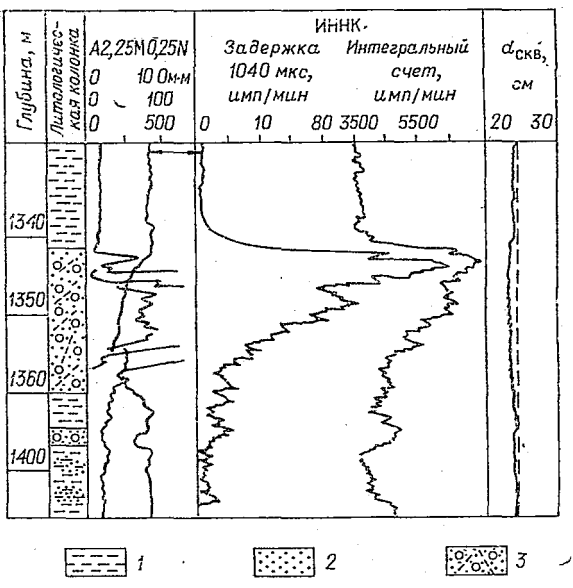


Рис. 29-11. Кривые ИННК и электрокаротажа на одной из скважин газоносного месторождения:

1 — глина; *2* — песок; *3* — песок газонасыщенный.

газоносные пласты и их контакт с водо- и нефтеносными породами. В малопористых породах или в породах с низкой газонасыщенностью метод ИННК необходимо комплексировать с другими нейтронами методами ННК, НГК и др., позволяющими учитывать вещественный состав пород.

Примером выявления газоносных пород по данным ИННК могут служить кривые, показанные на рис. 29-11 [29.43]. Газоносным пластам, как видно, соответствуют повышенные значения скорости счета. Другие убедительные примеры применения ИННК для выявления газоносных пород и определения ГЖК приводятся в работах [17.13, 22.102, 29.7, 29.11, 29.31]. Вместе с этим в работе [17.13] отмечается, что наряду с газоносными породами аналогичными аномалиями иногда выделяются и плотные породы с низким водородсодержанием. В данном случае метод ИННК необходимо комплексировать с другими ядерными методами, такими как ДГГК-п (см. § 8 гл. 19), ННК (см. гл. 22) и др.

При исследовании нефтяных и газовых скважин метод ИННК привлекается также для выявления обводненных зон, если их диаметр не превышает 70 см. Стандартные методы ННК и НГК при таких зонах не позволяют выявлять ВНК и ГЖК.

По диффузионным нейтронным параметрам горных пород можно определить коэффициенты пористости $m_п$ и нефтенасыщенности $m_н$. Для пластов, полностью насыщенных жидкостью, при отсутствии в скелете пород кристаллизационной воды, коэффициенты пористости и нефтенасыщенности могут быть определены из соотношений [32.9, 29.45]:

$$m_п = \frac{D_{пл}^{-1} - D_{ск}^{-1}}{D_ж^{-1} - D_{ск}^{-1}} = \frac{\gamma_{пл}\sum'_{sпл} - \gamma_{ск}\sum'_{sск}}{\gamma_ж\sum'_{sж} - \gamma_{ск}\sum'_{sск}}, \qquad (29\text{-}24)$$

$$m_н = \frac{\left(\tau_в^{-1} - \tau_{ск}^{-1}\right) - m_п^{-1}\left(\tau_{пл}^{-1} - \tau_{ск}^{-1}\right)}{\tau_в^{-1} - \tau_н^{-1}} = \frac{\left(\sum'_{aв} - \sum'_{aск}\right)m_п - \left(\sum'_{aпл} - \sum'_{aск}\right)}{\left(\sum'_{aв} - \sum'_{aн}\right)m_п}, \qquad (29\text{-}25)$$

$$\tau_в < \tau_н,$$

где $D_{пл}$, $D_{ск}$ и $D_ж$ — соответственно коэффициенты диффузии тепловых нейтронов в пласте, скелете и жидкости, насыщающей пласт; $\gamma_i = 1 - \cos\Theta_i$; $\gamma_{пл}$, $\gamma_{ск}$ и $\gamma_ж$ — соответственно величины, связанные с углом рассеяния нейтронов на ядрах атомов в пласте, скелете и жидкости; $\sum'_{sпл}$, $\sum'_{sск}$, $\sum'_{sж}$ — соответственно макроскопические сечения рассеяния тепловых нейтронов на ядрах атомов в пласте, скелете и жидкости; $\tau_{пл}$, $\tau_{ск}$, $\tau_н$ и $\tau_в$ — соответственно средние времена жизни тепловых нейтронов в пласте, скелете, нефти и минерализованной пластовой воде; $\sum'_{aпл}$, $\sum'_{aск}$, $\sum'_{aн}$ и $\sum'_{aв}$ — соответственно макроскопические сечения поглощения нейтронов ядрами атомов в пласте, скелете, нефти и минерализованной воде.

Величины $D_{пл}$ и $\tau_{пл}$ определяются по ИННК одним из рассмотренных выше приемов, величины $D_{ск}$, $\tau_{ск}$, $D_ж$, $\tau_в$ и $\tau_н$ — на основе геологических данных (величины $D_ж$, $\tau_в$ и $\tau_н$ могут быть определены с достаточной точностью). Таким образом, абсолютные среднеквадратичные ошибки будут находиться из соотношений [32.9, 29.45]:

$$\sigma_{m_п} = \frac{D_{ск}}{D_{ск} - D_ж}\left[\left(\frac{D_ж}{D_{пл}}\delta D_{пл}\right)^2 + \left(\frac{D_ж}{D_{ск}}\delta D_{ск}\right)^2 (1 - m_п)^2\right]^{1/2}, \qquad (29\text{-}26)$$

$$\sigma_{m_н} = \frac{\tau_в^{-1} - \tau_н^{-1}}{m_п m_н}\left[\left(\delta_{m_п}\right)^2\left(\tau_{ск}^{-1} - \tau_{пл}^{-1}\right)^2 + (\delta\tau_{ск})^2\frac{(1 - m_п)^2}{\tau_{ск}^2} + \frac{(\delta\tau_{пл})^2}{\tau_{пл}^2}\right]^{1/2}. \qquad (29\text{-}27)$$

В случае $m_п \geqslant 10\%$ погрешности в основном зависят от ошибок измерения нейтронных параметров пласта и в наименьшей степени

от параметров его скелета. Так, при $\delta D_{ск}=20\%$, $m_п>0{,}2$ получим $\delta m_п<5$—7%, а при $\delta\tau_{ск}=\delta D_{ск}=10\%$, $m_п=0{,}2$ и содержании в воде 200 г/л хлористого натрия — $\delta m_п\leqslant 1\%$.

Для определения пористости пластов с относительной погрешностью $\delta m_п=10\%$ величину коэффициента диффузии пласта по ИННК необходимо определять с относительной погрешностью $\delta D_{пл}=5\%$. При определении коэффициента нефтенасыщенности с аналогичной погрешностью при $m_н\geqslant 0{,}6$ и $m_п=0{,}2$ (0,1) погрешности $\delta D_{пл}$ и $\delta\tau_{пл}$ не должны превышать 5—6% (или 2—3%).

При высоких значениях величины $m_п$ можно не учитывать изменения $D_{ск}$, а брать типичные его значения для пород данного типа (с точностью 15—50%). Это не приведет к заметным погрешностям $\delta m_п$.

Впоследствии возможности ИННК к определению пористости пород стали оценивать менее оптимистично. Так, Р. А. Резвановым [29.79] показано, что при работе с современными скважинными генераторами, дающими выход $1\cdot 10^7$ нейтр/с, практически невозможно определять указанный параметр. Увеличение выхода нейтронов на два порядка также полностью не решает рассматриваемую проблему в основном из-за трудностей выбора оптимальных размеров зондов для каждого типа пород. Точность при этом может быть повышена лишь при учете изменений химического состава горных пород. Состав пород необходимо учитывать также и при оценке насыщенности пласта.

Пористость минерализованных пластов может быть определена по данным средних времен жизни: пласта $\tau_{пл}$, заполняющей его жидкости $\tau_в$ и скелета породы $\tau_{ск}$:

$$m_п=\frac{\tau_{пл}^{-1}-\tau_{ск}^{-1}}{\tau_в^{-1}-\tau_{ск}^{-1}}=\frac{\sum'_{апл}-\sum'_{аск}}{\sum'_{ав}-\sum'_{аск}}. \qquad (29\text{-}28)$$

Характер этой зависимости от величины $1/\tau_{пл}$ для чистого кварцевого водоносного песчаника показан на рис. 4-17. Видно, что чем больше минерализация пластовой воды, тем с более высокой точностью можно определять пористость пород. Пористость пластов, заполненных пресной водой, лучше всего определять по величинам коэффициентов диффузии (29-24).

В работе [29.31] приводится формула, аналогичная (29-28), для глинистых песчаников. Здесь же показано, что пористость их по этой методике можно определять с относительной погрешностью 2,4%.

В связи с тем, что среднее время жизни для скелета породы может меняться в значительных пределах, для определения коэффициента нефтенасыщенности $m_н$ и произведения $m_н\cdot m_п$ в работе [32.9] рекомендуется измерять отношение средних времен жизни против минерализованного водоносного пласта и нефтеносного $\tau_{впл}/\tau_{нпл}$. Связь между этой величиной и произведением $m_н\cdot m_п$ может быть выражена аналитически или графически в виде номограммы [32.9]. Нефтенасыщенность можно также оценивать по величине отношения потоков нейтронов, измеренных против нефтеносного и водоносного пластов (см. формулу 29-9).

Экспериментальные результаты по выяснению характера зависимостей показаний ИННК и ИНГК от пористости горных пород по замерам на специальных моделях проводились В. Р. Миллсом и др. [19.178, 29.66].

При оценке пористости, водо- и нефтенасыщенности пластов важно учитывать присутствие в породах и флюидах элементов с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов (бора и др.) [29.70] как по методике ИННК, так и по методике ИНГК.

Таким образом, метод ИННК может привлекаться для выявления коллекторов. Совместно с другими методами РК он может также при-

Таблица 29-3

Порог чувствительности ИННК, вес. %

Элемент	Массовое макроскопическое сечение захвата	Содержание элемента, %, при Δt, мкс				Промышленные концентрации
		500	250	100	50	%
Литий . .	6,11	0,0126	0,0252	0,063	0,13	0,1—1,5
Бор . . .	42,0	0,0018	0,004	0,010	0,02	~0,3—186
Марганец .	0,143	0,365	0,73	1,83	3,65	~5—55
Кобальт . .	0,378	0,089	0,178	0,445	0,89	~0,1—10
Кадмий . .	17,72	0,0039	0,0078	0,0195	0,039	0,02—0,09
Ртуть . . .	1,04	0,07	0,14	0,35	0,7	0,01—8
Вода . . .	0,022	5,7	9,4	20,6	—	—

меняться для литологического расчленения горных пород по разрезам скважин.

При исследовании углеразведочных скважин ИННК можно использовать для выявления угольных пластов по содержанию в них водорода. Метод ИННК наиболее благоприятен для обнаружения бурых углей, отличающихся повышенным содержанием водорода по сравнению с вмещающими водоносными горизонтами.

Рудные скважины. В рудной геофизике ИННК может применяться для определения в породах элементов с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов. Расчет среднего времени жизни тепловых нейтронов для целого ряда сред приводится в сборнике [29.23].

Порог чувствительности метода ИННК к содержанию в породе поглощающих элементов может быть оценен по формуле (29-20). Как и в ней, за порог чувствительности примем аномалию в 22%. Весовые концентрации элементов в породе, создающие аномалию, приведены в табл. 29-3. С помощью ИННК можно устанавливать низкие концентрации в рудах лития, бора и кадмия. Он может применяться также для определения марганца в рудах и средних и высоких концентраций ртути в рудах, а также высоких концентраций кобальта.

По поводу применения ИННК для определения бора в породах следует заметить следующее. Время жизни тепловых нейтронов с возрастанием содержания в породах бора резко убывает. Так, если во вмещающих породах оно равно сотням микросекунд, то в породах, представленных датолитом и ашаритом (см. табл. 4-5), убывает до долей микросекунд. Поэтому после импульса быстрых нейтронов поток тепловых нейтронов затухает в породе тем быстрее, чем больше в ней бора. В сухих скважинах метод ИННК вполне может быть применен для определения в породах бора. Однако необходима регистрирующая аппаратура с микросекундной разрешающей способностью [17.13]. Низкие концентрации бора можно измерять при относительно высоких задержках, а высокие — при измерении тепловых нейтронов сразу после импульса быстрых нейтронов. В скважинах, заполненных водой, при расположении между прибором и породой достаточно большого слоя воды (порядка 2 см) всегда будет иметь место сильное поглощение ($\tau_п < \tau_с$). Как уже отмечалось, о свойствах пород по ИННК судить невозможно. Для решения этой задачи необходимо использовать стационарную методику измерений, т. е. вести исследования с генератором нейтронов по ННК. Низкие концентрации бора следует определять по ННК-т, более высокие — по ННК-н, а большие концентрации — по ННК-р.

При определении бора в соленосных толщах вода, заполняющая скважину, всегда минерализована хлорными и борными солями. По-

этому возможно, что нейтроны в скважинах также вымирают раньше, чем в породе, и мы имеем дело со случаем $\tau_п > \tau_с$, что благоприятствует применению ИННК для выделения в разрезе скважин бороносных пород.

А. М. Блюменцевым и И. И. Фельдманом проведены исследования на моделях и в скважинах с целью выяснения возможностей ИННК применительно к определению в породах железа [29.23]. Ими показано, что увеличение в породах железа от 20 до 60% приводит к уменьшению среднего времени жизни тепловых нейтронов примерно от 220 до 60 мкс, т. е. примерно в 5,5 раза.

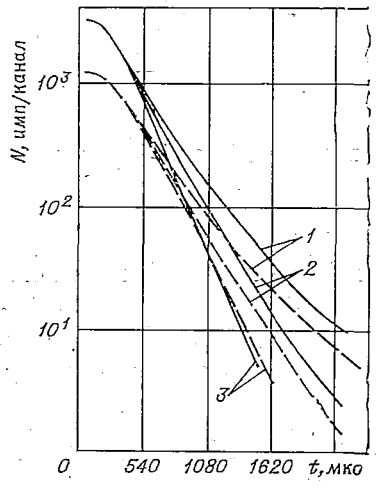


Рис. 29-12. Зависимость скорости счета нейтронов в скважине от времени задержки при измерениях на зондах размером 25 см (пунктир) и 50 см (сплошные кривые) в породах с содержанием железа: *1* — 0%; *2* — 10%; *3* — 40%.

Для экспериментальных исследований была создана рудная модель в виде цилиндра диаметром и высотой 1 м со скважиной диаметром 20 см, заполненной водой. Породы облучались с помощью макета генератора нейтронов, созданного на основе трубки НТ-10 (см. табл. 27-1). Поток нейтронов регистрировался пропорциональными нейтронными счетчиками с обогащенным бором. Макет скважинного генератора имел наружный диаметр 100 мм. Временное распределение потока нейтронов в скважине измерялось с помощью анализатора АИ-50, приспособленного для этих целей.

Результаты исследований приведены на рис. 29-12. Кривые $N(t)$ начинают расходиться при времени задержек около $t=500$ мкс; при $t=1500$ мкс это расхождение для кривых, отвечающих концентрациям железа в породе 0 и 10%, достигает 10-кратной величины для обоих зондов. Такая дифференциация намного превосходит соответствующую величину для методов ННК (см. п. 4 § 7 гл. 23) и НГК (см. § 4 гл. 24).

В реальных скважинах диаметром 110—150 мм, заполненных водой, измерения велись с генератором нейтронов, аналогичным ИГН-1 и ИГН-1м, но имеющим диаметр 60 мм. Для детектирования нейтронов в нем использовались 4 счетчика типа СНМ-20а. Генератор давал выход $1{,}17 \cdot 10^7$ нейтр/с при длительности импульса 100 мкс и частоте 400 Гц. Результаты измерений по двум скважинам приводятся на рис. 29-13. Измеряемая скорость счета нормировалась к интегральной с задержкой $t=0$. С возрастанием в породе железа скорость счета в полулогарифмических координатах меняется линейно и при изменении содержания железа на 10% — в 5 раз. Такая дифференциация недостижима ни для какого другого метода ядерного каротажа.

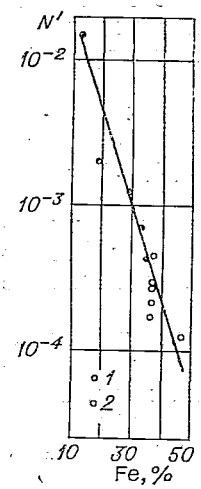


Рис. 29-13. Зависимость скорости счета (в отн. ед.) от содержания железа в породе по замерам в двух скважинах (*1* и *2*) при времени задержки 1 мс.

С целью выяснения чувствительности метода ИННК-т применительно к определению в однородных средах марганца, меди и ртути А. М. Блюменцевым и др. были проведены оценочные расчеты [29.23].

Чувствительность метода ИННК в соответствии с формулой (29-9) может быть определена соотношением

$$A_s = \frac{\Phi_1(t) - \Phi_2(t)}{\Phi_1(t)} = 1 - \frac{\Phi_2(t)}{\Phi_1(t)} = 1 - \exp\left[-t\left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1}\right)\right]. \quad (29\text{-}29)$$

С величиной дифференциации кривых α_s (см. формулу (7-25)), эта величина может быть связана соотношением

$$\alpha_s = \Delta A_s / \Delta p, \quad (29\text{-}30)$$

где ΔA — интервал изменения A_s, соответствующий интервалу Δp.

Зависимость величины A_s от содержания в породах марганца, меди и ртути при различных задержках t показана на рис. 29-14 [29.23]. Низкие концентрации изучаемых элементов выгодно определять при малых задержках, а высокие — при больших.

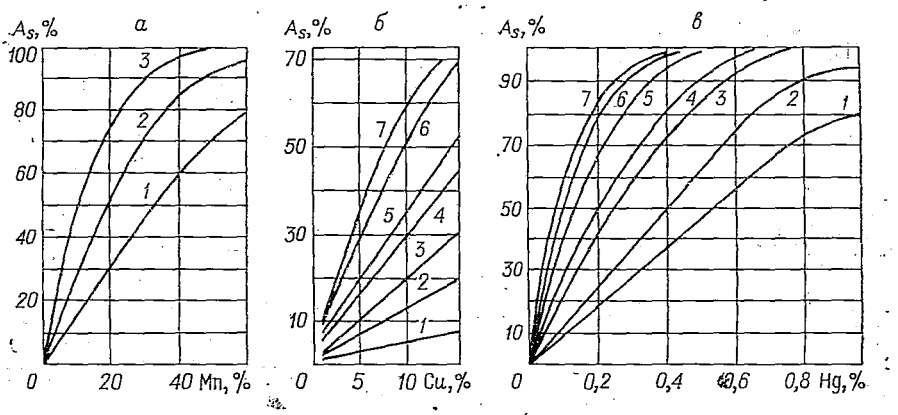


Рис. 29-14. Зависимость величины A_s (%) от содержания марганца (*а*), меди (*б*) и ртути (*в*) для времен задержек t, мкс:

а — *1* — 50, *2* — 200, *3* — 300; *б* — *1* — 100, *2* — 300, *3* — 500, *4* — 800, *5* — 1000, *6* — 1600, *7* — 2000; *в* — *1* — 100, *2* — 200, *3* — 400, *4* — 600, *5* — 800, *6* — 1000, *7* — 1400.

В Казахском ВИРГе [16.86] велись исследования по определению кадмия в полиметаллических рудах. При работе с генератором нейтронов ($n \approx 1{,}5 \cdot 10^7$ нейтр/с) и сцинтилляционным счетчиком с М-21В при задержке 950 мкс получен порог чувствительности 0,005%. Определению кадмия при этом мешают переменные концентрации в рудах меди, железа и серы. Их содержания в количествах 2, 5 и 7% эквивалентны пороговой чувствительности кадмия. Если концентрации перечисленных элементов соответственно не выходят за пределы 5, 6 и 15%, то с помощью ИННК-т можно определять в рудах кадмий в количестве от 0,02% и выше. По корреляционной связи кадмия с цинком при этом можно определять в рудах содержания цинка.

Авторы [16.86] показали также преимущества применения ИННК-т по сравнению с ННК при определении в рудах редкоземельных элементов. По корреляционной связи этих элементов с фосфором можно выявлять в разрезе скважин фосфориты.

Однако переменная влажность пород мешает выявлению всех указанных выше элементов по рассматриваемой методике. Для исключения мешающего влияния водорода необходимо провести специальные исследования.

Помимо ИННК-т на основе импульсных генераторов нейтронов может быть реализована модификация ИННК-р для определения в породах целого ряда элементов из числа редкоземельных и др. Резонансы, как известно, у разных элементов приходятся на разные энергии. Следовательно, время замедления нейтронов до этих энергий для

различных элементов различно. Между ним и резонансной энергией в полулогарифмических координатах существует линейная связь [29.23], которую можно использовать для определения в породах некоторых элементов по ИННК-р.

§ 3. Импульсный нейтронный гамма-каротаж радиационного захвата медленных нейтронов

Поле захватного гамма-излучения, условно совмещенное на рис. 29-1 с полем тепловых нейтронов, в действительности может резко отличаться от него. Это обусловливается тем, что поле нейтронов является источником гамма-лучей, которые в породе и скважине распространяются практически мгновенно в отличие от порождающих их тепловых нейтронов. В силу этого в отдельных участках пространства тепловых нейтронов может еще не быть, а гамма-кванты уже имеются. В связи с этим времена задержки при регистрации захватных гамма-лучей могут не совпадать с временем задержек, выбираемых при регистрации тепловых нейтронов. От излучения скважины при помощи ИНГК можно отстраиваться за счет применения гамма-спектрометров, обеспечивающих регистрацию характерных линий излучения, обусловленного содержанием в породе определяемого элемента. Интенсивность регистрируемых при этом гамма-лучей зависит от изменения плотности пород и их эффективного атомного номера.

1. **Основы теории метода.** Интенсивность гамма-излучения радиационного захвата нейтронов в однородной безграничной среде без учета рассеяния гамма-лучей может быть описана выражением [29.44]

$$\Phi_\gamma = i \int_v \Phi(l, t) \frac{e^{-\tau_\gamma R}}{4\pi R^2} dv, \qquad (29\text{-}31)$$

где $\Phi(l, t)$ определяется по формулам (29-1) — (29-4), (29-6) и (29-7); i — число гамма-квантов, возникающих при захвате нейтронов; τ_γ — линейный коэффициент ослабления гамма-лучей в породе на расстоянии R.

Подставляя в формулу (29-31) самое простейшее соотношение (29-1), получим:

$$\Phi_\gamma(l, t) = \frac{ie^{-\frac{t}{\tau}-\frac{l}{4Dt}}}{(4\pi Dt)^{3/2}\tau} \cdot \frac{2Dt}{vl} \int_0^\infty e^{-\frac{x^2}{4Dt}-\tau_\gamma x} Sh \frac{xl}{2Dt} \cdot \frac{dx}{x}, \qquad (29\text{-}32)$$

где v — скорость нейтрона.

Для нулевого зонда ($l=0$) это выражение принимает более простой вид:

$$\Phi_\gamma(0, t) = \frac{ie^{-t/\tau}}{(4\pi Dt)^{3/2}\tau v} \int_0^\infty e^{-\tau_\gamma x-\frac{x^2}{4Dt}} dx. \qquad (29\text{-}33)$$

Результаты расчетов для воды ($D=3{,}1\cdot10^4$ см^2/с) и сухого песка ($D=4{,}1\cdot10^5$ см^2/с) по формулам (29-32) и (29-33) для некоторых сред приведены на рис. 29-15 [29.44]. С увеличением времени задержки отношение функций стремится к постоянной величине. Это указывает на то, что при высоких задержках ход кривых ИНГК подобен ходу кривых ИННК. Отношение $iv\tau_\gamma\Phi_\gamma(l, t)/\Phi(l, t)$ растет с увеличением l, D и τ_γ. Кривые $\Phi_\gamma(l, t)$ и $\Phi(l, t)$ больше различаются при малых t, больших l и малых D. Эти закономерности справедливы и для пород, пересеченных скважиной.

Строже задача ИНГК решена в [29.77]. Данные ИНГК, как и ИННК, могут быть использованы для определения τ и D [29.42, 29.45, 29.65, 29.66, 29.69, 29.71]. Методика их оценки такова же, как и в ИННК.

С. А. Денисиком и др. [17.13] проведены расчеты пространственно энергетического распределения гамма-квантов по методу Монте-Карло для однородных сред: сухого песчаника и песчаника, заполненного пресной водой с пористостью 20%, а также для воды. При сравнении полученных данных ИНГК с данными для ИННК установлено следующее. С увеличением размера зонда поток гамма-квантов убывает медленнее, чем поток тепловых нейтронов. Кривые $\Phi_\gamma = f(t)$ быстрее выходят на асимптоту $e^{-t/\tau}$, чем кривые $\Phi_н = f(t)$.

По этому поводу см. также [29.42].

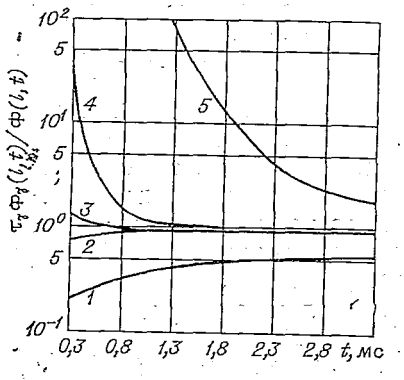


Рис. 29-15. Отношение временных распределений захватных гамма-лучей и тепловых нейтронов для различных размеров зондов l (см), параметров D (см²/с) и τ_γ (см$^{-1}$):

1 — $l = 0$, $D = 3{,}1 \cdot 10^4$, $\tau_\gamma = 0{,}05$;
2 — $l = 0$, $D = 4{,}1 \cdot 10^5$, $\tau_\gamma = 0{,}1$;
3 — $l = 40$, $D = 4{,}1 \cdot 10^5$, $\tau_\gamma = 0{,}1$;
4 — $l = 80$, $D = 4{,}1 \cdot 10^5$, $\tau_\gamma = 0{,}1$;
5 — $l = 40$, $D = 3{,}1 \cdot 10^4$, $\tau_\gamma = 0{,}05$.

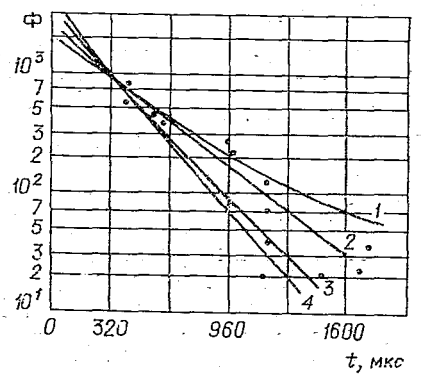


Рис. 29-16. Зависимость потока гамма-квантов на зонде размером 36 см от времени задержки для зон проникновения (см): 1 — ∞; 2 — 17; 3 — 7 и 4 — 0.

С целью оценки зоны проникновения В. Я. Гомерштадтом и др. [19.175, 29.59] произведены расчеты потока гамма-квантов с энергией свыше 0,51 МэВ. Начальная энергия нейтронов принята равной 14 МэВ. Исследования проведены для скважины диаметром 16 см, заполненной водой. Порода (песчаник) имела пористость 20% и была заполнена пресной и минерализованной водой (200 г/л хлористого натрия). Временное распределение гамма-квантов дано на рис. 29-16. Для тепловых нейтронов аналогичные данные приводятся на рис. 29-6. Временное распределение гамма-квантов в интервале 300—400 мкс имеет зону инверсии. При более высоких временах вид кривых такой же, как и при ИННК.

Для пород, пересеченных скважиной, некоторые теоретические исследования проведены А. Л. Поляченко и др. [19.175, 29.59]. Ими, в частности, показано, что при временах задержки $t > 0{,}5$—$1{,}0$ мкс кривые $\Phi_\gamma = f(t)$ выходят уже на асимптоту $e^{-t/\tau_п}$. Показано также, что с возрастанием радиуса скважины поток гамма-квантов убывает по закону, близкому к экспоненциальному. Получена формула для оптимального размера зонда

$$l_{опт} = \sqrt{\frac{1}{b}\left(\frac{1}{c} - a\right)}, \qquad (29\text{-}34)$$

где $a = 0{,}56 - 0{,}215t$; $b = (1{,}47 + 0{,}015m_п - 0{,}073R_0) \cdot 10^{-4}$; $c = 0{,}887 - 0{,}111t$.

Для пород пористостью $m_п \geqslant 5\%$ величина оптимального зонда оценивается равной 70 см [29.59]. В работе [29.78] показано, что величина оптимального зонда зависит от интервала определяемых пористостей пород. Так, для известняка пористостью в интервалах 0,5—5; 5—15 и 15—23% оптимальными являются зонды размерами соответственно 48; 54 и 67 см. При таких зондах величина поправки Δ к декременту затухания потока нейтронов $\lambda_з$ (см. п. 2 § 2 этой главы) равна нулю. Оценку параметра Δ в общем случае следует производить расчетным путем [29.78].

Пористость пластов на оптимальных зондах можно определять с относительной погрешностью не свыше 5%. Замеры с точностью 10% для диапазона пористости 0,5—23% можно вести на оптимальном зонде величиной 55 см [29.78].

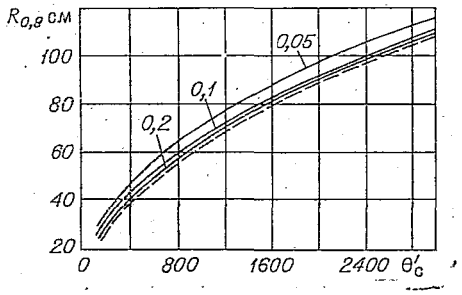


Рис. 29-17. Зависимость глубинности ИНГК (сплошные кривые) и ИННК (пунктир) от параметра Θ_c' для однородной среды при длине зонда 0 см и экстраполированной длине свободного пробега $a_s = 3$ см. Шифр кривых — линейный коэффициент ослабления в породе гамма-излучения ($см^{-1}$).

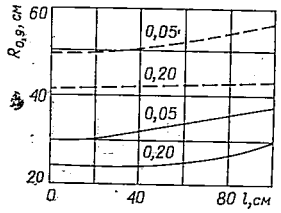


Рис. 29-18. Зависимость глубинности ИНГК от размера зонда в однородной среде при $\Theta_c' = 450$ $см^2$ (пунктир) и $\Theta_c' = 150$ $см^2$ (сплошные кривые). Шифр кривых — линейный коэффициент ослабления гамма-излучения ($см^{-1}$).

Исследована также зависимость символического возраста нейтронов от времени $\Theta_c' = f(t)$. По характеру эти кривые аналогичны кривым для ИННК. Они также могут быть использованы для определения коэффициента диффузии при задержках $t \geqslant 1{,}5$ мс.

Для оценки глубинности ИННК С. А. Кантором и В. А. Юдиным [17.13] для однородных сред выведена следующая приближенная формула:

$$R_{0,9} = 2{,}06 \sqrt{\Theta_c' + 1/\tau_\gamma^2} - a_s, \qquad (29\text{-}35)$$

где τ_γ — линейный коэффициент ослабления в породе гамма-излучения; остальные обозначения те же, что и в формуле (29-21). Это соотношение справедливо при $\Theta_c' \geqslant 450$ $см^2$ при $\tau_\gamma = 0{,}05$ $см^{-1}$ и для $\Theta_c' < 450$ $см^2$ при $\tau_\gamma > 0{,}05$ $см^{-1}$.

За счет наличия в этой формуле последнего члена под радикалом глубинность ИНГК по сравнению с ИННК несколько выше. Зависимость глубинности от возраста Θ_c' и длины зонда показана соответственно на рис. 29-17 и 29-18 [27-13]. С уменьшением линейного коэффициента ослабления гамма-излучения глубинность растет, но незначительно. Слабо возрастает глубинность и с увеличением размера зонда. При больших временах задержки (больших Θ_c') глубинность не зависит от размера зонда.

О глубинности исследования песчаника с пористостью 20%, пересеченного скважиной диаметром 16 см, заполненной водой, можно судить по данным рис. 29-19 [19.175, 29.59]. Аналогичные данные для

ИННК приводятся на рис. 29-7. Глубинность ИНГК, как видно, несколько больше, чем ИННК. Глубинность ИНГК, как и ИННК, гораздо сильнее зависит от времени задержек, чем от размеров зондов. По сравнению с НГК глубинность ИНГК значительно выше. С помощью других расчетов в работе [29.59] показано, что глубинность ИНГК может превосходить глубинность ИННК примерно в 2 раза.

2. **Основы методики измерений.** При проведении ИНГК на показания детектора гамма-лучей мешающее влияние оказывает фон, обусловленный естественной и наведенной радиоактивностью горных пород. Величина его тем больше, чем ниже скорость счета захватного гамма-излучения. Поэтому с целью повышения скорости счета гамма-лучей время задержки следует выбирать оптимальным. Влияние фона можно исключать при вычитании. Величина фоновых значений скоростей счета определяется при больших задержках. Кроме того, фон естественной и наведенной радиоактивности может быть снижен при работе со сцинтилляционными счетчиками путем дискриминации мягкого гамма-излучения. Эта методика применима особенно при определении содержания в породах элементов группы железа, имеющих жесткий спектр захватного гамма-излучения в пределах 6—10 МэВ (см. гл. 24). В работах [22.102, 29.23, 29.44] рекомендуется применять низкочастотные генераторы с частотой порядка 10 Гц. Для таких генераторов время между импульсациями T равно 10^5 мкс. Поэтому при ширине окна Δt=200 мкс величина фона может быть уменьшена в $\frac{T}{\Delta t}=\frac{10^5}{200}=500$ раз. Особенно эффективно применение ИНГК при сочетании обоих приемов. Аналогичные рекомендации даются в работах [29.64, 29.71].

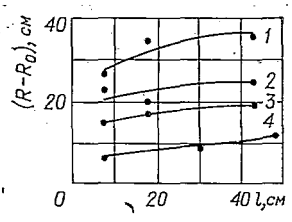


Рис. 29-19. Зависимость радиуса зоны исследования ИНГК от размера зонда для задержек (мкс):

1 — свыше 1540; 2 — 900—1280; 3 — 640—900; 4 — стационарный случай (НГК).

Помимо указанных выше факторов вклад в фон оказывают захватное гамма-излучение и наведенная активность люминофора и других частей прибора. О мерах устранения их см. в § 2 гл. 24.

В США [29.64, 29.65, 29.68, 29.70—29.74] для ИНГК широко применяются ван-де-граафовские генераторы нейтронов с частотой следования импульсов 1000 Гц. Скорости счета захватного гамма-излучения измеряются в области асимптотики $e^{-t/\tau_п}$ при двух задержках —400 и 700 мкс с шириной временных окон 100 мкс [29.65] или 200 мкс [29.70]. Качественную интерпретацию диаграмм ИНГК ведут по скоростям счета N_1 и N_2, замеренным при задержках t_1 и t_2, а количественную — по величине времени жизни тепловых нейтронов $\tau_п$ (мкс) или чаще по величинам макроскопических сечений захвата тепловых нейтронов Σ'_a (см$^{-1}$):

$$\Sigma'_a=\frac{1}{v\tau_п}=\frac{\ln(N_1/N_2)}{v(t_2-t_1)}=\frac{10{,}5\lg(N_1/N_2)}{\Delta t_2},$$

где v — скорость тепловых нейтронов; Σ'_a записывается автоматически на диаграммные ленты. Этот вид ИНГК в американской литературе получил название «сигма-каротажа».

Величина Σ'_a линейно связана с пористостью горных пород, содержащих минерализованную воду (см. формулу (29-28)), и используется для ее определения [29.65, 29.68, 29.70, 29.72]. Средняя длина свободного пробега гамма-квантов в воде и буровом растворе значительно больше средней длины свободного пробега тепловых нейтронов. Поэтому скважина с ее заполнением на измеряемую величину $N_\gamma=f(l, t)$ оказывает значительно меньшее влияние, чем на величину $N_т=f(l, t)$.

Особенно это заметно при исследовании скважин, заполненных минерализованным буровым раствором (с хлористым натрием). Так, в скважине диаметром 24,8 см, обсаженной колонной диаметром 12,7 см, для прибора диаметром 5 см в зависимости от положения его в скважине и минерализации бурового раствора показания ИНГК меняются в 1,2—1,3 раза, а показания ИННК — в 50—100 раз [29.57].

С целью дальнейшего ослабления влияния изменений минерализации бурового раствора на показания ИНГК в работе [29.70] глубинный прибор в месте нахождения детектора излучения рекомендуется окружать слоем бора толщиной 0,02 г/см^2.

При измерениях на моделях скважин с прибором диаметром 105 мм, оборудованным генератором с частотой следования импульсов 7 Гц и сцинтилляционным счетчиком с кристаллом йодистого цезия диаметром 35 мм и высотой 50 мм (размер зонда 50 см) установлено, что изменение диаметра скважины от 14,6 до 30 см в пределах точности замеров с задержкой 1 мс не искажает результатов ИНГК. Известняк в этих измерениях имел пористость $\sim 1\%$. Мягкое излучение с энергией 1 МэВ и ниже дискриминировалось [29.44].

Декремент затухания функций λ_3 за счет изменения $N_\gamma = f(t)$ обычно меняется на 10—20% (при $t < 1{,}5$ мс), а функции $N_т = f(t)$ — в несколько раз. Изменение размера зонда от 20 до 80 см при исследовании пород пористостью 5% для ИНГК приводит к изменению декремента затухания на 10%, а для ИННК на 30% [29.57].

В связи с этими явными преимуществами ИНГК по сравнению с ИННК исследователи в нефтепромысловой геофизике с каждым годом отдают предпочтение именно методу ИНГК.

3. **Области применения метода.** В нефтепромысловой геофизике ИНГК привлекается для определения ВНК, когда водоносные пласты насыщены минерализованной водой. ИНГК по сравнению с ИННК имеет преимущества в случае заполнения скважин минерализованной водой.

Временное распределение гамма-излучения радиационного захвата, измеренное против нефтеносных и водоносных известняков, показано на рис. 29-20 [22.102]. При измерениях с дискриминацией излучения 0,2 МэВ кривая *1*, начиная с задержек 500—600 мкс, резко выполаживается. Это обусловливается влиянием на детектор как естественной радиоактивности пород, так и наведенной. Дискриминация излучения с энергией 1 МэВ позволяет избавиться от мешающего излучения. Наклон кривых *2* и *3* при временах $t > 500$ мкс соответствует асимптотической функции $e^{-t/\tau_п}$ для нефтеносного и минерализованного водоносного пластов.

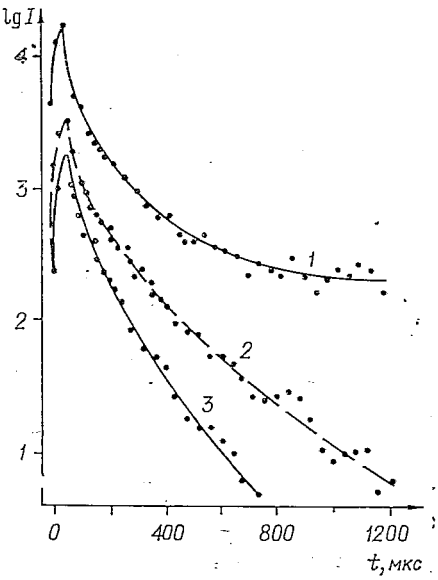


Рис. 29-20. Временное распределение интенсивности гамма-квантов радиационного захвата с дискриминацией излучения 0,2 МэВ (*1*) и 1 МэВ (*2, 3*) при измерениях против нефтеносного (*1, 2*) и минерализованного водоносного (*3*) известняков.

Результаты применения метода ИНГК для определения ВНК в сопоставлении с данными ИННК, НГК и ГК приводятся на рис. 29-21 [22.102]. Измерения ИНГК велись с помощью сцинтилляционного счетчика с кристаллом йодистого цезия, активированного таллием. С целью предохранения кристалла от активации тепловыми нейтронами его экранировали слоем кадмия. Временная задержка при

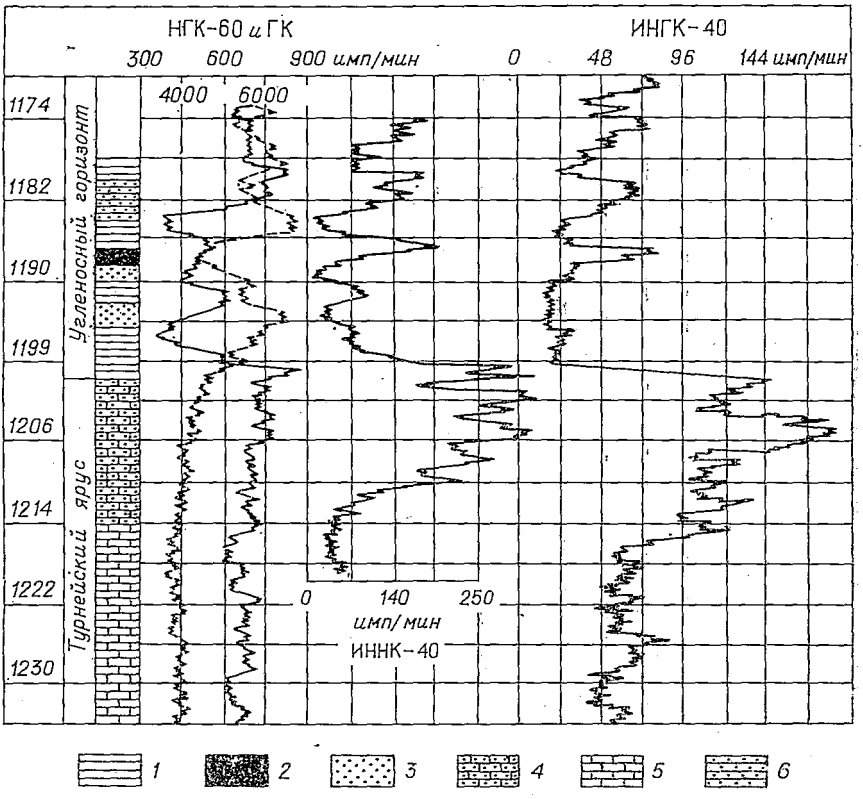


Рис. 29-21. Диаграммы методов ядерного каротажа, записанные в одной из нефтепромысловых скважин.

1 — глины, *2* — нефтеносный песчаник, *3* — водоносный песчаник, *4* — нефтенасыщенные карбонатные породы, *5* — глинистые карбонатные породы, *6* — водоносные карбонатные породы.

ИНГК и ИННК была равна 800 мкс, а временное окно — 700—800 мкс. Кривая ИНГК регистрировалась при спуске глубинного прибора, а остальные кривые — при подъеме приборов. Из рис. 29-21 видно, что нефтеносные пласты, а также ВНК четко выделяются по ИНГК. В работе [17.13] отмечается, что ВНК по ИНГК можно отбивать в низкопористых породах ($\sim 10\%$) при минерализации вод свыше 10—15 г/л. Другие примеры применения ИНГК для определения ВНК рассматриваются в работах [15.19, 29.14, 29.26, 29.64, 29.65, 29.68, 29.70—29.74].

При исследовании нефтепромысловых скважин метод ИНГК может привлекаться для определения ГЖК [29.65, 29.68], для выявления коллекторов и расчленения разрезов.

На показания ИНГК и ИННК существенное влияние оказывает изменение концентраций в каркасе породы элементов с высокими сечениями поглощения тепловых нейтронов [29.78].

В США методика ИНГК (сигма-каротаж) используется для определения пористости и нефтенасыщенности песчаников [29.65, 29.68] и известняков [29.70]. В работе [29.78] показано, что с помощью рассматриваемого метода по величине $\lambda_з = 1/\tau_п$ пористость однородных коллекторов по водонефтенасыщенности можно определять при $m_п \geqslant \geqslant 5\%$ и $p_{NaCl} \geqslant 15$ г/л.

По рассмотренной методике для определения коэффициента пористости пород по коэффициенту диффузии используются замеры на двух зондах. Однако методику ИННК, как и ИНГК, к двухзондовой не относят. Сугубо двухзондовой в последнее время стали считать методику, основанную на измерении отношения скоростей счета на двух зондах

[29.78]. Здесь показано также, что такое отношение скоростей счета линейно связано с пористостью пласта. Установлено, что чем больше размеры зондов l_1 и l_2, тем в меньшей степени изменения параметров внутрискважинной среды влияют на результаты измерения отношения $M=N_1(l_1)/N_2(l_2)$. Однако дифференциация кривой $M=f(m_п)$ с увеличением размеров зондов падает. Исследования в этом направлении продолжаются. Пока теоретически исследованы зависимости $M=f(m_п)$ для зондов не свыше $l_1=60$ см и $l_2=80$ см. Однако еще при рассмотрении двухзондовой методики ННК (см. п. 2 § 6 гл. 22) отмечалось, что наилучшие результаты получаются для пар зондов $l_1=70$ см и $l_2=90$ см. Возможно, что справедливо это и для двухзондового ИНГК или ИННК или их комбинации.

Метод ИНГК применяется для выявления в разрезах скважин угольных пластов (рис. 29-22). Исследования по ИНГК велись с генератором, имеющим частоту повторения импульсов 4 Гц при задержке 1000 мкс и временном окне 200 мкс. Гамма-кванты регистрировались газоразрядными счетчиками типа МС=6 (8 шт.). Из рис. 29-22 видно, что угольные пласты по ИНГК выделяются более высокими аномалиями по сравнению с ИННК, и особенно ННК; ИНГК в принципе можно использовать также для определения зольности углей.

Метод ИНГК может также привлекаться для выявления в породах элементов, сильно поглощающих тепловые нейтроны (бор, литий, хлор, марганец, кадмий, редкоземельные, ртуть и др.). Весьма перспективным является применение ИНГК для выявления в разрезах скважин титана, хрома, марганца, железа, никеля и меди (см. § 4 гл. 24).

Исключение влияния изменений содержания водорода на результаты определения указанных элементов в породах может проводиться по методике спектрометрических отношений или по совместной интерпретации показаний ИНГК и ИННК или ННК.

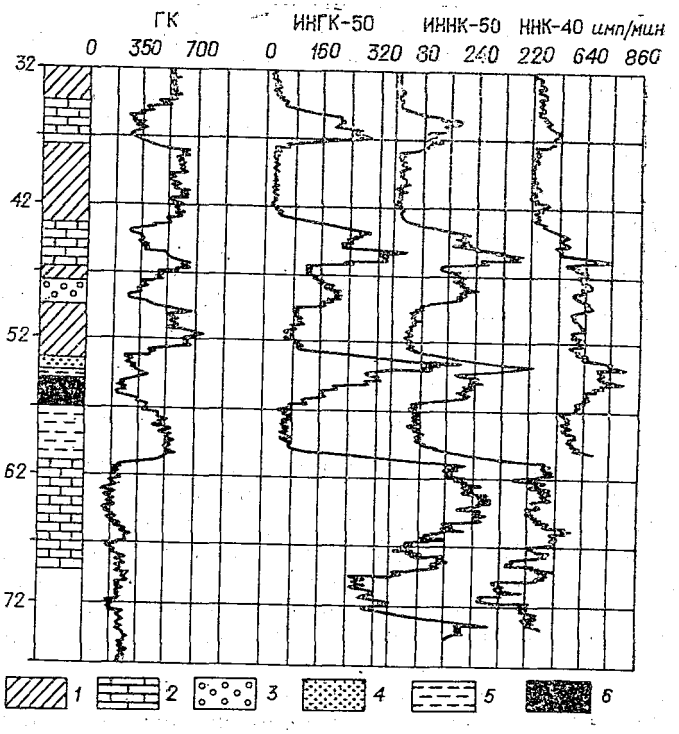


Рис. 29-22. Диаграммы различных методов ядерного каротажа в одной из углеразведочных скважин.

1 — глинистые сланцы, *2* — известняки, *3* — галечник, *4* — песчаники, *5* — аргиллиты, *6* — бурый уголь.

Таблица 29-4

Пороговые концентрации элементов (%) с высокими резонансными сечениями, вступающих в реакцию (n, γ) (по данным ВИРГа)

Элемент	Изотоп	Резонансная энергия, эВ	ИНГК	НГК	Промышленные концентрации, %
Серебро	Серебро-109	5,2	0,02	5,10	10^{-3}—5
Кадмий	Кадмий-113	0,178	0,02	0,18	0,02—0,09
Индий	Индий-115	1,457	0,01	1,80	$(1—2)\cdot10^{-3}$
Сурьма	Сурьма-121	6,24	0,15	56,0	0,04—50
Цезий	Цезий-133	5,90	0,03	14,4	$7\cdot10^{-4}$—0,5
Самарий	Самарий-149	0,0976	0,015	0,12	0,01—1,2
Европий	Европий-151	0,461	0,015	0,12	0,002—0,2
Гадолиний	Гадолиний-1570	0,0314	0,006	0,24	0,01—1,5
Диспрозий	Диспрозий-162	5,44	0,03	0,60	$5\cdot10^{-3}$—0,6
Гольмий	Гольмий-165	3,92	0,06	8,70	$2\cdot10^{-3}$—0,2
Эрбий	Эрбий-167	5,97	0,06	4,20	$4,5\cdot10^{-3}$—0,55
Тулий	Тулий-169	3,92	0,012	4,50	$1\cdot10^{-3}$—0,1
Лютеций	Лютеций-175	2,61	0,48	5,40	$1\cdot10^{-3}$—0,13
Гафний	Гафний-179	5,69	0,63	8,10	$1\cdot10^{-3}$—4,0
Тантал	Тантал-181	4,28	0,06	3,00	$(0, n—n)\cdot10^{-2}$
Вольфрам	Вольфрам-182	4,14	0,60	31,2	0,02—1,6
Рений	Рений-185	2,156	0,048	9,30	10^{-5}—$5\cdot10^{3}$
Осмий	Осмий-189	6,71	0,90	55,3	10^{-5}—10^{-4}
Иридий	Иридий-191	5,36	0,12	1,80	10^{-6}—$3\cdot10^{-5}$
Золото	Золото-197	4,906	0,012	6,90	$\sim10^{-5}$—$5\cdot10^{-4}$
Уран	Уран-238	6,68	0,30	100,00	10^{-3}—0, n

Ряд элементов, как уже неоднократно отмечалось, имеют высокие резонансные сечения захвата нейтронов с испусканием гамма-квантов. Регистрируя возникающие гамма-лучи радиационного захвата, можно определять в породах большое число элементов (табл. 29-4). ИНГК в первую очередь может быть применен для определения кадмия, самария, гадолиния и диспрозия в рудах, а также средних промышленных концентраций серебра, индия, сурьмы, европия и гольмия и высоких концентраций цезия, эрбия, тулия, гафния, тантала и вольфрама. Для выявления других приведенных в табл. 29-4 элементов метод ИНГК не перспективен. Необходимы исследования для разработки методики на каждый конкретный элемент.

§ 4. Импульсный нейтронный гамма-каротаж неупругого рассеяния быстрых нейтронов

Метод ИНГК′ по сравнению с двумя выше рассмотренными ИННК и ИНГК обладает существенной особенностью — необходимостью регистрации гамма-излучения в процессе короткого импульса быстрых нейтронов (несколько микросекунд). Прибор за это время должен обеспечить измерение не только интенсивности вторичного гамма-излучения, но и его спектрального состава. В ряде же случаев достаточно ограничиться дискриминацией излучения по какому-нибудь одному или нескольким уровням.

При решении некоторых задач, связанных с изучением элементного состава горных пород, бывает достаточно измерить соотношение интенсивностей, вызванных взаимодействием нейтронов на ядрах двух элементов. Например, часто необходимо измерять соотношение кислорода к углероду и наоборот или кремния к углероду и наоборот. При

этом достаточно измерить отношение интенсивностей гамма-излучения кислорода I_O к углероду $I_C(I_O/I_C)$ или наоборот или кремния I_{Si} к углероду $I_C\,(I_{Si}/I_C)$ или наоборот и т. д.

Реакция (n, n', γ) может происходить также на целом ряде других ядер химических элементов (см. § 1 и 5 гл. 24).

1. **Основы теории метода.** Неупругое взаимодействие быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ на ядрах атомов горных пород играет заметную роль даже при содержании в них значительных количеств водорода. Так, при облучении водоносного песчаника пористостью 20% около 75% быстрых нейтронов испытывает неупругие взаимодействия [29.57]. Это указывает на возможность применения ИНГК для решения большого круга геологических и геофизических задач.

Ниже рассмотрим распределение гамма-квантов в однородной безграничной среде. Для этого случая, как показано в работах [1.27, 29.50], в цилиндрической системе координат справедливо следующее соотношение для регистрируемого излучения:

$$\Phi = \frac{ni\Sigma'}{8\pi}\int_0^{\infty} rdr \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-(R_1/\lambda+\tau_\gamma R_2)}}{R_1^2 R_2^2}\,dZ, \qquad (29\text{-}36)$$

где $R_1^2 = r^2 + Z^2$; $R_2^2 = r^2 + (Z-l)^2$; l — размер зонда; n — число нейтронов в единицу времени; i — число гамма-квантов, возникающих при неупругом рассеянии нейтронов в породе; Σ' — макроскопическое сечение реакции $(n, n'\,\gamma)$; λ — средняя длина свободного пробега быстрого нейтрона с энергией 14 МэВ в породе; τ_γ — линейный коэффициент поглощения гамма-излучения, возникающего при неупругом рассеянии нейтронов.

Вычисление потока гамма-квантов с помощью этой формулы можно производить лишь численно, поскольку этот интеграл через элементарные функции не выражается. Однако для нулевого размера зонда это выражение можно свести к удобному для расчетов виду. Рассмотрим сферическую полость, грубо приближающуюся к действительной геометрии опыта (цилиндрической скважине). Вместо выражения (29-36) получим следующее:

$$\Phi = \frac{ni\Sigma'}{4\pi}\int_{R_0}^{\infty} e^{-R\left(\tau_\gamma+\frac{1}{\lambda}\right)}\frac{dR}{R^2}, \qquad (29\text{-}37)$$

где R_0 — радиус сферической «скважины».

Интегрирование этого выражения по радиусу дает формулу

$$\Phi = \frac{ni\Sigma'}{4\pi}\left\{\left(\tau_\gamma+\frac{1}{\lambda}\right)Ei\left[-R_0\left(\tau_\gamma+\frac{1}{\lambda}\right)\right]+\frac{1}{R_0}e^{-R_0\left(\tau_\gamma+\frac{1}{\lambda}\right)}\right\}. \qquad (29\text{-}38)$$

Результаты расчета по ней, выполненные Н. В. Поповым [29.50] для углей различной зольности и песчаников различной водо- и нефтенасыщенности, приведены в работе [29.50].

Глубинность ИНГК' $(R—R_0)$ может быть оценена из соотношения

$$G = \frac{\Phi(R)}{\Phi(\infty)} = \frac{\int_{R_0}^{R-R_0} e^{-R\left(\tau_\gamma+\frac{1}{\lambda}\right)}\frac{dR}{R^2}}{\int_{R_0}^{\infty} e^{-R\left(\tau_\gamma+\frac{1}{\lambda}\right)}\frac{dR}{R^2}} = 0{,}9. \qquad (29\text{-}39)$$

Вычисление приведенных интегралов дает

$$0{,}1 = \left(\tau_\gamma + \frac{1}{\lambda}\right) Ei\left[-(R-R_0)\left(\tau_\gamma + \frac{1}{\lambda}\right)\right] + \frac{1}{R-R_0} e^{-(R-R_0)\left(\tau_\gamma+\frac{1}{\lambda}\right)}. \quad (29\text{-}40)$$

Для пород осадочного комплекса величина $R - R_0$ не превышает 8—12 см.

Изучение временного распределения быстрых нейтронов, а соответственно и порождаемых ими гамма-квантов показало, что эта зависимость подчиняется экспоненциальному закону $e^{-t/t_п}$. При уменьшении энергии быстрыми нейтронами от 14 до 6,1 и 1,8 МэВ величина временного параметра $t_п$ соответственно равна ~ 7 и 16 нс [29.57]. Увеличение времени при этом отвечает возрастанию среднего пробега быстрых нейтронов в породе и объема изучаемой породы при ИНГК′. Так, в работе [29.57] показано, что при временах менее 6 нс величина $R—R_0$ равна 7 см, а для времен свыше 8 нс 50% регистрируемого излучения приходит к детектору из более удаленных частей породы.

Вообще при обычной модификации ИНГК′ радиус зоны исследования горных пород $R—R_0$ не должен превышать среднюю длину свободного пробега быстрых нейтронов, которая не выходит за пределы 15—20 см.

Увеличение глубинности ИНГК′ может быть достигнуто с помощью специального глубинного прибора, позволяющего получать информацию из определенных локальных областей породы, окружающей скважину. Вылет нейтронов при этом может фиксироваться специальными нейтронными трубками с системой кольцевых полупроводниковых детекторов альфа-частиц, расположенных внутри отпаянной трубки вокруг мишени. Применение специальной регистрирующей системы с регулируемой линией задержки и схемы совпадений, а также детекторов, расположенных в кольцевых коллиматорах, обеспечит возможность регистрации гамма-квантов из заданных объемов породы. Применение двух заколлимированных детекторов и специальной методики измерений может ослабить мешающее влияние ближней зоны на результаты ИНГК′.

При определении некоторых элементов по ИНГК′ возникает необходимость в регистрации жесткого гамма-излучения с энергией 6,1 МэВ (кислород) и 4,43 МэВ (углерод) и т. д. Коллимация детекторов в этом случае в пределах габаритов скважинного прибора затруднительна. Пространственная селекция регистрируемого излучения может осуществляться по методике задержанных совпадений. С помощью альфа-детектора фиксируется вылет нейтронов из прибора, а спустя некоторое время — гамма-кванты из некоторого объема породы, удаленного от стенки скважины на некоторое заранее установленное расстояние.

2. **Основы методики измерений.** С целью исключения влияния захватного гамма-излучения на результаты ИНГК′ длительность импульса ΔT рекомендуется при этом выбирать короткой — в пределах 1—5 мкс. Для регистрации жестких гамма-квантов углерода (4,43 МэВ) и кислорода (6,1 МэВ) в работе [10.23] в качестве люминофора применялся *n*-терфенил в полистироле с надлежащими оптическими добавками и активаторами, обладающий высокой разрешающей способностью — время высвечивания $3 \cdot 10^{-9}$ (см. табл. 5-3). Световые вспышки регистрировались с помощью ФЭУ-13. Разделение импульсов, обусловленных излучением углерода и кислорода, осуществлялось при помощи быстродействующих интегральных дискриминаторов, работавших по схеме совпадений. Подробное описание примененной схемы дается в работе [10.23]. Мертвое время схемы составляло 10^{-8} с. За каждый рабочий цикл (5 мкс) накапливалось от 5 до 15 импульсов. Для определения истинного количества импульсов в процессе каждой пульсации необходима аппаратура с постоянной величиной мертвого времени не

свыше 10^{-8} с. Другие методические вопросы по ИНГК′ рассматриваются в сборнике [29.42].

3. **Области применения метода.** ИНГК′ при исследовании скважин в первую очередь может быть применен для определения в породах породообразующих элементов кислорода-16 (E_γ=6,1 МэВ), углерода-12 (E_γ=4,43 МэВ), кремния-28 (E_γ=1,24 и 1,78 МэВ,) магния-24 (E_γ= =1,39 МэВ) и серы (E_γ=2,23 МэВ) [19.74, 19.178, 29.63].

Возможности выявления при помощи ИНГК′ в разрезах скважин песчаников по излучению кремния, доломитов по излучению магния, ангидритов по излучению серы (2,23 МэВ) рассмотрены в работах [19.178, 29.63]. Описание аппаратуры, применяемой при этом, приводится в [29.62]. По изменению отношения скоростей счета, обусловленных влиянием углерода и кислорода $N_C : N_O$, при выявлении нефте- и водоносных пластов по ИНГК′ можно исключать влияние: изменения диаметра скважины, заполнения ее буровым раствором, литологии пород, глинистости и минерализации вод [19.178, 29.63].

Дж. Титманом и В. Неллиганом [29.50] для выявления водо- и нефтеносных песчаников метод ИНГК′ рекомендуется комплексировать с методом ИНГК.

Заполнение скважины водой при ИНГК′ мешает определению кислорода в породах, поскольку глубинность этого метода невелика и реакция $(n, n'\gamma)$ в первую очередь происходит на ядрах атомов кислорода, непосредственно контактирующих с прибором. Поэтому высокое содержание кислорода в воде затрудняет определение его в породе. Таким образом, определение кислорода по ИНГК′ проще всего производить в сухих и заполненных водой скважинах, мало отличающихся по диаметру от глубинного прибора, т. е. когда буровая жидкость почти полностью вытеснена в местах нахождения прибора в скважине. Для этого условия, по всей вероятности, можно разработать методику, позволяющую исключать влияние изменений содержания воды в скважине и породе путем нормировки показаний ИНГК′ по определению кислорода к показаниям ИНГК при регистрации захватного гамма-излучения водорода в области энергии 2,23 МэВ. Однако эта задача весьма трудоемка.

Заполнение скважины водой мешает определению в породах и других элементов, кроме кислорода, так как гамма-кванты кислорода рассеиваются и размазывают спектр низкоэнергетических гамма-квантов других ядер, вступающих в реакцию $(n, n'\gamma)$.

Методика, основанная на определении кислорода, в нефтепромысловой геофизике в настоящее время используется для определения раздела вода — нефть в стволе нефтяных скважин. Глубинный прибор опускается в скважину через насосно-компрессорные трубы и с его помощью в межтрубном пространстве устанавливается положение контакта вода — нефть в процессе эксплуатации месторождения. Малая глубинность метода оказалась весьма благоприятной — колонна и порода практически не влияют на показания ИНГК′.

В работах [19.178, 29.62, 29.63] показано, что метод ИНГК′ может применяться для разделения нефтеносных пластов от водоносных по изменению отношения N_C/N_O, величина которого для этих сред равна соответственно 1,0—1,1 и свыше 1,1. Аналогично выделяются газоносные пласты на фоне плотных непродуктивных пластов по соотношению N_C/N_O величиной 1,1—1,25.

Выше было показано, что ИНГК′ может также привлекаться для выявления в разрезах скважин угольных пластов и определения их зольности. Исследования в этом направлении проведены Н. В. Поповым [29.50]. Им, в частности, показано, что при работе с импульсным генератором нейтронов получается более дифференцированный спектр регистрируемого гамма-излучения по сравнению со стационарным.

Результаты измерения энергетического спектра в углях с зольностью 10 и 40% и в песчанике при исследовании по методу ИНГК′ показали, что в угольных пластах наблюдается четко выраженный максимум в интервале 3,5—4,5 МэВ, обусловленный гамма-излучением, связанным с углеродом. Во всех кривых также четко отмечается пик 1,8 МэВ, связанный с кремнием, и слабый пик в области 6,1—1,02= =5 МэВ, связанный с кислородом. Увеличение зольности угля от 10 до 40% ведет к возрастанию скорости счета гамма-излучения для всего регистрируемого диапазона энергий в связи с увеличением в составе углей кремния и кислорода. Повышение скорости счета гамма-излучения в интервале энергий от 2 до 5 МэВ в основном обусловлено влиянием рассеяния гамма-квантов с начальной энергией 6,1 МэВ (кислород). Аналогичная картина наблюдается и при переходе от угля с зольностью 40% к песчанику, за исключением области энергий 3,2—4,7 МэВ, что объясняется отсутствием в песчанике углерода, приводящего к появлению излучения с энергией 4,53 МэВ.

§ 5. Нейтронный активационный каротаж

Применение мощных управляемых потоков нейтронов, получаемых с помощью генераторов, позволяет значительно расширить возможности метода НАК (см. гл. 25) при решении различных задач геологии и геофизики. С одной стороны, можно значительно сократить затраты времени для измерения наведенной активности в каждой исследуемой точке скважины, с другой — измерять гамма-излучение изотопов с короткими периодами полураспада (равными долям секунды) путем выключения стационарного генератора нейтронов и включения регистрирующего устройства. Последнее может быть осуществлено и с помощью генератора нейтронов, работающего в импульсном режиме.

Применение при этом в генераторах трубок с тритиевой мишенью позволяет активировать ядра атомов быстрыми нейтронами в результате реакций $(n, 2n)$, $(n, n'\gamma)$, (n, p) и (n, α) и тепловыми в результате захвата замедлившихся до тепловых энергий нейтронов по реакции (n, γ). Создание генераторов с дейтериевой мишенью позволит при проведении НАК активировать преимущественно ядра атомов тепловыми нейтронами по реакции (n, γ).

1. **Физико-технические основы метода.** Общефизические основы метода применительно к стационарной методике НАК рассматриваются в § 1 и 5 гл. 25. Они справедливы и относительно НАК при измерениях со стационарным генератором нейтронов. Вопросы теории, относящиеся к этому методу, рассматриваются в § 6 гл. 25, основы теории импульсного варианта этого метода ИНАК — в работе [28.18].

Как по стационарной, так и по импульсной методике НАК возможно определение по разрезу скважин лишь тех элементов, ядра атомов которых способны активироваться с образованием изотопов с периодами полураспада $T \geqslant (7—10)\tau$ [29.57], где τ — среднее время жизни тепловых нейтронов. Это связано с необходимостью исключения эффекта НГК′, НГК или ИНГК′ и ИНГК на показания НАК и ИНАК. При измерениях с импульсными источниками устранение эффектов НГК′ и НГК достигается за счет работы на больших размерах зондов (см. § 5 гл. 25). При измерениях с генераторами нейтронов от гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов и радиационного захвата можно избавиться, использовав временный режим работы аппаратуры.

Это в свою очередь позволяет при измерениях с генераторами нейтронов значительно уменьшить размеры зондов при НАК и ИНАК. Важно только, чтобы на показания НАК и ИНАК не влияла активация детектора и других частей прибора, примыкающих к детектору.

При количественных определениях различных элементов в горных породах требуется оценивать нейтронные параметры, в частности, среднее время жизни тепловых нейтронов. Этот параметр удобно определять при сочетании методик ИНАК и ИНГК. При малых временах задержек (в пределах примерно 0,6—4,0 мс) можно изучать временное распределение гамма-квантов радиационного захвата нейтронов, а при больших (10—20 мс) — наведенную активность образующихся изотопов. Данные ИНГК могут использоваться не только для определения среднего времени жизни тепловых нейтронов, но и для изучения элементного состава горных пород и руд. Таким образом, низкочастотные генераторы нейтронов (5—10 Гц) в принципе могут быть использованы для одновременного изучения элементного состава горных пород и руд по методикам ИНГК и ИНАК. Ширину временного окна при проведении ИНАК рекомендуется выбирать при работе с такими генераторами равной 75—175 мс [29.23].

Методы НАК и ИНАК в настоящее время в основном применяются для определения кислорода по разрезам скважин. Активационные характеристики этого элемента приведены в табл. 28-13.

С целью определения глубинности активационных методов во ВНИИЯГГе проведены исследования по оценке глубинности [22.102, 29.41]. Установлено, что для воды глубинность $(R—R_0)=17$ см. Для горных пород эта величина определяется из соотношения

$$(R—R_0)_{0,9}=17/\rho, \qquad (29\text{-}41)$$

где ρ — плотность породы. Для песчаника ($\rho=2{,}5$ г/см^3) глубинность равна 7.

2. **Области применения метода.** Методы НАК и ИНАК, как уже отмечалось, применяются для определения в породах кислорода. В связи с тем, что данные о распределении кислорода по разрезу скважин геологов и геофизиков непосредственно не интересуют, ими можно пользоваться для решения других задач. Так, при исследовании осадочных пород можно определять содержание в них целого ряда полезных ископаемых, не содержащих кислорода (нефть, уголь, серу и др.).

Определение кислорода по сравнению с другими элементами в горных породах удобно потому, что при его активации в реакции $O^{16}(n, p)N^{16}$ возникают гамма-кванты с высокой энергией — 6,1 и 7,1 МэВ (см. табл. 28-13). Помимо этого, азот-16 может возникать и в реакции $F^{19}(n, \alpha)N^{16}$. Однако в осадочных породах содержание фтора обычно бывает невелико, и его влиянием можно пренебречь. Влияние других элементов, активирующихся при облучении быстрыми и тепловыми нейтронами, можно устранять простой дискриминацией излучения с энергией 2,5—3,0 МэВ [22.102]. При этом также устраняется влияние естественной радиоактивности горных пород.

В работах ВНИИЯГГа [22.102, 29.41] показано, что по активации кислорода можно определять нефтенасыщенность горных пород. Так, при изменении пористости от 0 до 40% известняков и песчаников, заполненных нефтью, активационный эффект от кислорода убывает линейно примерно на 35%, а в водоносных известняках и песчаниках остается практически постоянным. Однако заполнение скважины водой и наличие в ней обсадной колонны с цементным кольцом значительно нивелируют эту зависимость (ухудшают в 1,5—2 раза).

При работе со стационарным генератором с выходом $5\cdot10^7$—10^8 нейтр/с, облучении пород в течение 30 с и измерении наведенной активности азота-16 и алюминия-28 интенсиметрической аппаратурой на протяжении 5—10 циклов достигнута абсолютная точность определения кислорода 3—5%. Скважина имела диаметр 248 мм и была обсажена колонной с внутренним диаметром 168 мм. Диаметр глубинного прибора равнялся 102 мм. Естественная радиоактивность измерялась перед

активацией породы и в дальнейшем из показаний исключалась. Измерения велись по точкам. Исследуемая точка породы вначале облучалась, затем здесь устанавливался детектор. Движение воды в стволе скважины между прибором и породой со скоростью 1,2 см/с благоприятствовало определению кислорода в породе. Кислород, связанный с водой и проактивированный, за время паузы между циклом облучения и измерения успевал перемещаться из места облучения на некоторое расстояние.

Методика ИНАК использовалась также для выявления нефтеносных пород пористостью около 20%. При дискриминации излучения с энергией 2,5—3 МэВ нефтеносные пласты от водоносных по точечным замерам отличались на величину скорости счета, равную 10% [22.102]. Такого же порядка достигает изменение в скоростях счета вследствие изменения литологии пород. Следовательно, задачу по выявлению нефтеносных пластов с помощью НАК и ИНАК решенной считать нельзя.

В нефтепромысловой геофизике методика, основанная на активации кислорода, может использоваться для выявления контакта вода — нефть в стволе скважины, а также для выявления мест и скорости поступления воды в скважину при эксплуатации нефтяных месторождений. В тресте «Татнефтегеофизика» [29.78] для решения этих задач созданы малогабаритные скважинные генераторы нейтронов. Так, для измерений через насосно-компрессорные трубы создан генератор с наружным диаметром 42 мм, а для измерений в межтрубном пространстве — генератор с внешним диаметром 38 мм.

Малая глубинность этой методики благоприятствует успешному решению задачи. Измерения в скважинах велись как по точкам, так и непрерывно. Генераторы нейтронов работали в импульсном режиме на частоте 10—20 Гц. Для устранения влияния гамма-излучения радиационного захвата осуществлялась временная дискриминация с задержкой 3—5 мс. Наведенная активность от других изотопов подавлялась путем дискриминации излучения с энергией 3 МэВ.

Скважины исследуются вначале при непрерывных замерах, а затем на участках детализации — при точечных. Замеры в движении ведутся в два этапа. Вначале диаграммы записываются при спуске прибора с детектором, установленным над мишенью генератора нейтронов, а затем при подъеме. Скорость прибора при спуске выбирают равной скорости перемещения жидкости в стволе, идущей снизу вверх. Относительная скорость при этом должна быть равна нулю.

Диаграммы ИНАК, полученные на одной из скважин Татарской АССР в сопоставлении с другими методами, приведены на рис. 29-23 [29.78]. Измерения по ИНАК велись с генератором, дающим выход 10^7 нейтр/с с задержкой 6 мс и временным окном 100 мс. Скважина дала 75% нефти и 25% воды. С помощью дебитомера установлены участки поступления жидкости в ствол скважины. Однако характер жидкости по этим данным установить невозможно. На диаграмме (*4*) резкие изменения скорости счета происходят при переходе из участка ствола, заполненного нефтью и водой, в участок, заполненный застойной водой. Этот участок находится ниже зоны перфорации и полностью заполнен водой. Поэтому на диаграмме (*4*) он отбивается максимальной скоростью счета. На диаграмме (*5*) максимумом скорости счета отбивается водоотдающий пласт. Уменьшение скорости счета против верхнего пласта, отдающего жидкость, указывает на поступление в скважину нефти.

Скорость притока воды в ствол скважины может быть оценена по точечным замерам. С этой целью результаты измерений в работе [29.78] рекомендуется представлять в виде функций

$$N_0(t) = [N(t) - N_\Phi]\, e^{\lambda(N^{16})t}, \qquad (29\text{-}42)$$

где $N(t)$ — суммарная скорость счета, измеряемая в разное время после включения генератора; N_Φ — скорость счета фона.

В зависимости от конкретного размера зонда и скорости движения воды в стволе на кривых $N_0(t)$ выявляются максимумы [29.78]. Определив время, соответствующее им, можно оценить и скорость движения воды в стволе скважины. Предварительно необходимо только построить градуировочную кривую $t_{max}=f(v)$. В работе [29.78] показано, что такие графики удобнее строить в виде зависимости $\frac{1}{t_{max}}=F(v)$. В таких координатах градуировочные кривые будут линейными.

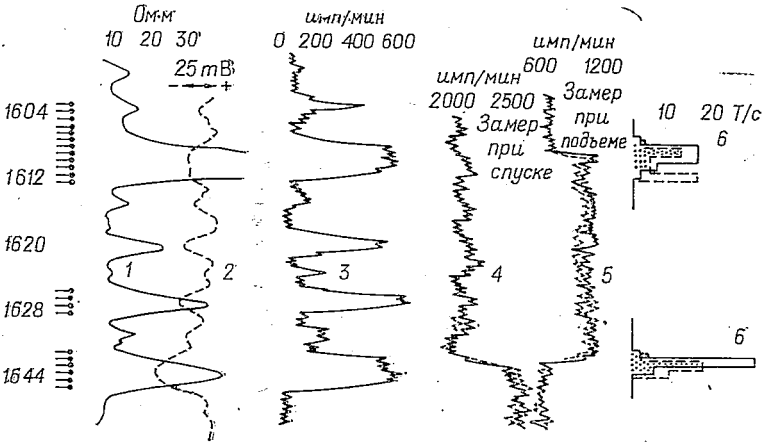


Рис. 29-23. Определение мест притока воды и нефти в скважину по данным треста «Татнефтегеофизика».
1 — КС (В 7,5 м, АО 75 м); *2* — ПС; *3* — ИНГК-30 (t_3=1,1 мс, Δt=0,3 мс); *4* — ИНАК — замер при спуске (t_3=0,8 мс; Δt=0,7 мс); *5* — ИНАК (то же, при подъеме); *6* — замеры с дебитомером РГД-1, полученные в разное время.

С более высокой точностью скорость движения воды в скважине определяется по двухзондовой методике, если один детектор помещается над источником, а другой под ним [25.13]. Скорость движения воды при этом оценивается по градуировочным кривым:

$$M(v)=\frac{N_в-N_{в.ф}}{N_н-N_{н.ф}}, \qquad (29\text{-}43)$$

где $N_в$ и $N_н$ — счет верхнего и нижнего детекторов; $N_{в.ф}$ и $N_{н.ф}$ — счет фона для тех же детекторов при выключенном генераторе.

Измерения по такой методике обеспечивают определение скоростей движения воды не только в стволе скважины, но и в затрубном пространстве между колонной и породой (при размыве цемента) или между цементом и породой (при размыве глинистой корки).

Метод ИНАК по недостатку кислорода использовался также для выявления в разрезе скважин угленосных пластов [22.102]. При измерениях в заполненных водой скважинах угольные пласты отличались от аргиллитов в области энергии 5—6 МэВ на 35%. Такая низкая разница в отсчетах связана с активацией кислорода в жидкости, заполняющей скважину.

А. И. Кедровым [29.23, 29.25, 32.9] показано, что методика ИНАК по недостатку кислорода может быть использована для определения серы, заполняющей поры в известняках. За опорные пласты можно брать плотные известняки, гипсы или ангидриты. Содержание серы в породах приводит к резкому спаду скорости счета активации кислорода. Самородную серу по этой методике можно определять начиная с ее бортовых концентраций (10%).

Рассматриваемые методы могут быть использованы для определения по разрезам скважин других породообразующих элементов (кремния, алюминия и др.). При определении кремния по реакции

$Si^{28}(n, p)Al^{28}$ мешает реакция $Al^{27}(n, \gamma)Al^{28}$. Поэтому для раздельного определения этих элементов необходимо использовать генераторы нейтронов с тритиевой и дейтериевой мишенями. Генератор с дейтериевой мишенью может привлекаться для определения алюминия и для оценки поправок, необходимых для выявления кремния при измерениях с генератором, работающим на тритиевой мишени. В противном случае замеры по определению кремния при помощи генератора с тритиевой мишенью необходимо комплексировать с замерами по НАК с полоний-борными источниками.

Использование одних только данных НАК, получаемых с помощью одного генератора нейтронов с тритиевой мишенью, может помочь в определении кремния. В США для этих целей применяется аппаратура ИНГК с дополнительным сцинтилляционным счетчиком, расположенным на расстоянии 3,66 м над мишенью генератора [19.178, 29.70]. При спуске глубинного прибора эта аппаратура применяется для одновременной записи кривых ИНГК (N_1, N_2 и $\sum_a'$) (см. § 3 этой главы) и НАК, а при подъеме — кривых ГК и ИНГК.

Оптимальная скорость НАК в соответствии с формулой (25-29) при измерении наведенной активности алюминия-28 оценена равной 66 м/ч. Однако в связи с тем, что для исследования нефтяных скважин эта скорость слишком мала, авторы [29.70] вели измерения при более высокой скорости (183 м/ч). Эта методика НАК использовалась ими для оценки содержания кремнезема в продуктивных известняках. Помимо этого, рассматриваемая методика привлекалась и для изучения терригенных отложений. Глинистые прослои (сланцы и т. д.) при этом отбраковывались с помощью ГК (см. гл. 12 и 31).

С высокой точностью (до 0,5%) кремнезем необходимо определять при изучении таких полезных ископаемых, как бокситы, флюориты, фосфориты и др. Эта задача может быть решена при измерениях с гамма-спектрометрами [16.86].

Алюминий по разрезам скважин можно выявлять по продуктам ядерной реакции $Al^{27}(n, p)Mg^{27}$ (см. табл. 28-13).

Генераторы с дейтериевой мишенью могут использоваться для определения фтора по реакции $F^{19}(n, \alpha)N^{16}$ (см. табл. 28-13). Азот-16 за счет кислорода при этом не образуется в связи с более высоким порогом реакции $O^{16}(n, p)N^{16}$.

Фтор по разрезам скважин можно определять и при работе с генератором нейтронов, работающим с тритиевой мишенью. Следует только оценивать наведенную активность кислорода-19, образующегося в реакции $F^{19}(n, p)$ O^{19} (см. табл. 28-13). В качестве опорной линии необходимо использовать гамма-кванты с энергией 1,36 МэВ. При измерении этого излучения следует учитывать влияние естественной радиоактивности горных пород, а также активацию целого ряда других элементов (кислорода, кремния, алюминия и др.). Использование скважинных генераторов с дейтериевой мишенью позволяет определять фтор без введения поправок на указанные факторы.

В практике ядерно-геофизических исследований генераторы нейтронов могут служить для определения по разрезам скважин марганца, меди и ванадия (см. гл. 25).

§ 6. Другие нейтронные методы

Аппаратура с генераторами нейтронов может быть использована для реализации методов ядерного каротажа на запаздывающих (НАКн) и мгновенных нейтронах деления (ИННК-м), а также для реализации некоторых других ядерных методов.

Запаздывающие нейтроны, как показано в п. 8 § 3 гл. 28, возникают в реакции $O^{17}(n, p)N^{17}$ и при делении ядер урана и тория.

Исследования по НАКн применительно к определению в породах урана проведены А. С. Игумновым [29.21, 20.21]. Так, при проведении модельных исследований с источником, имеющим выход $2 \cdot 10^7$ нейтр/с, и сцинтилляционным счетчиком с люминофором ZnS+B, концентрации урана 0,5% в течение 20—30 мин (несколько циклов измерений) можно определять с относительной погрешностью 15%. В одном цикле порода облучалась в течение 1—1,5 мин, пауза выбиралась равной $\sim$ 10 с, время измерения 0,5—1,5 мин.

В связи с тем, что для определения урана в породах по НАКн в одной точке необходимы большие затраты времени, теперь некоторые исследователи используют методику ИННК-м на мгновенных нейтронах . Так, в тресте «Татнефтегеофизика» [29.75] для выявления нефтеносных пластов применялся нейтронный генератор с трубкой НТ-10. Мгновенные нейтроны в нефтеносных пластах могут возникать в реакции деления на уране-238 (в нефтях обычно наблюдаются повышенные концентрации урана). Помимо этого, нейтроны в нефтеносных пластах возникают за счет реакции (γ, n) на дейтерии и углероде-13. Гамма-лучи, разрушающие ядра этих элементов, образуются в реакциях $O^{16}(n, p)N^{16}$, $(n, n'\gamma)$ и (n, γ).

В связи с тем, что в нефтях содержание всех этих элементов невелико, выявить их можно лишь по регистрации надтепловых нейтронов. С этой целью пропорциональный счетчик нейтронов окружался слоем кадмия толщиной 2—3 мм. Время задержки выбиралось равным 200 мкс. Оценку ВНК по этой методике можно вести лишь по точечным замерам.

Рассматриваемая методика ИННК-н может также привлекаться для определения урана в породах.

Аппаратура со скважинными генераторами нейтронов в ядерной геофизике может использоваться и для выявления бериллия и дейтерия по реакциям (γ, n). Для возбуждения этих элементов служит гамма-излучение азота-16 и алюминия-28, образующихся в реакциях O^{16} $(n, p)N^{16}$ (см. табл. 28-13), $Si^{28}(n, p)Al^{28}$ и $Al^{27}(n, \gamma)Al^{28}$. Излучение алюминия-28 при этом может быть использовано для прохождения реакции (γ, n) на бериллии, а излучение азота-16 — для прохождения реакции (γ, n) на бериллии и дейтерии.

Рассматриваемую методику, основанную на активации ядер с последующей фотонейтронной реакцией, следует называть комплексным методом и обозначать И(НА+ГН)К. Этот метод впервые предложен в тресте «Татнефтегеофизика». Используется он для выявления нефтеносных пластов по содержанию в них дейтерия. Для измерений служил прибор с трубкой НТ-10 и сцинтилляционный счетчик ZnS+B. Время задержки было достаточно высоким — 2 мс. Это делалось для того, чтобы все нейтронное излучение, связанное с импульсом, «вымирало». Для измерения нейтронов с достаточной статистической точностью замеры следует вести по точкам в течение примерно 1 ч.

§ 7. О возможности реализации гамма-методов с ускорителями

Скважинные генераторы гамма-квантов необходимы для реализации ГГК-п(и, в частности, ДГГК-п), ГНК, ГАК и других методов. Для реализации ДГГК-п достаточно иметь генераторы гамма-квантов с максимальной энергией 1—1,5 МэВ, для реализации ГНК на бериллии и дейтерии — генераторы с энергией гамма-лучей 2,2—3,5 и 3,5—4,5 МэВ соответственно, а для реализации ГНК на других элементах и ГАК — скважинные генераторы гамма-лучей с более высокими энергиями. В виде исключения некоторые низкоэнергетические генераторы гамма-лу-

чей (3,5—7 МэВ) могут служить для реализации ГАК′ (см. п. 2 § 2 гл. 28).

Для определения бериллия в породах, дейтерия в пластовых и нефтеносных водах углерода в нефтеносных пластах и т. д. существенные возможности имеет метод ИГНК. К настоящему времени он исследован применительно к разграничению нефтеносных пластов от водоносных. Проведен целый ряд расчетов (для однородных сред) и экспериментальных исследований [14.4, 22.10, 22.102, 28.10, 29.39, 29.42, 29.78 и др.]. На их основе можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Несмотря на то, что в ряде работ указывается на повышенные концентрации дейтерия в нефтях по сравнению с пластовыми водами, на практике вряд ли можно надеяться на положительный эффект по отбивке ВНК по дейтерию с использованием методики ИГНК. Сильные помехи создают скважины с заполнением.

2. Отбивка ВНК по методике ИГНК может быть осуществлена по регистрации фотонейтронов за счет реакции $C^{13}(\gamma, n)C^{12}$. Для решения этой задачи требуются ускорители с максимальной энергией электронов 6—8 МэВ. При регистрации фотонейтронов пропорциональными борными счетчиками СНМ-20 необходимо задержку выбирать равной 40 мкс с шириной временного окна около 1—1,2 мс (при частоте ускорителя 100 Гц). Для реализации метода ИГНК удобен генератор гамма-квантов с выходом жесткого излучения 10^9 фотон/имп. Этот генератор может использоваться для определения ВНК по точечным замерам. Для песчаников пористостью 20% (однородная среда) отношение потоков фотонейтронов из нефтеносного песчаника к водоносному составляет около 2,6 (по расчетам). В реальных скважинах эта величина должна быть значительно ниже. Тем не менее метод ИГНК вполне может быть привлечен для отбивки ВНК в терригенных разрезах.

В работе [29.12] исследована также принципиальная возможность разграничения нефтеносных пластов и водоносных в терригенных отложениях по запаздывающим нейтронам, возникающим в реакции $O^{18}(\gamma, p)N^{17}$ (см. п. 4 § 2 гл. 28). Метод, основанный на этой реакции, называется гамма-активационным каротажем на запаздывающих нейтронах — ГАКн. В связи с тем, что эта реакция имеет высокий порог (16,4 МэВ), для реализации ГАКн необходим источник жесткого излучения с энергией 20—25 МэВ. При исследовании на блоках песчаника пористостью 30% установлено, что водоносный пласт отбивается увеличением скорости счета запаздывающих нейтронов в 2 раза по сравнению с нефтеносным пластом. Поток нейтронов измерялся спустя 40 мс после окончания облучения блоков. Эта методика ИГАКн может привлекаться для определения ВНК в карбонатных разрезах. Существенной помехой при отбивке ВНК по ней является заполнение скважины водой. Изотоп азот-17 интенсивно образуется на кислороде, содержащемся в воде скважины.

Метод ГАКн при использовании ускорителей с энергией ниже 16,4 МэВ может применяться для определения в породах урана и тория (см. п. 4 § 2 гл. 28). Комплексирование ГАКн и ГК позволит раздельно определять содержание этих элементов в породах. Скважина с заполнением не будет создавать перечисленных выше помех.

Для выявления углерода по разрезам скважин, помимо рассмотренных методов, в принципе может также применяться гамма-гамма-каротаж резонансного рассеяния (ГГКрр) гамма-квантов с энергией 15,1 МэВ на ядрах углерода-12 [29.78].

Глава 30

ДРУГИЕ ЯДЕРНЫЕ МЕТОДЫ

В настоящей главе рассматриваются возможности применения портативных генераторов нейтронов для элементного анализа горных пород на месте их выхода и для решения других геологических задач с помощью как переносных, так и особенно транспортабельных установок, размещаемых, например, на прицепах к автомашинам или на различных летательных аппаратах (вертолетах, дирижаблях и т. п.). Эти методики исследований впервые предложены и обоснованы автором настоящей книги [30.17, 4.19]. В последующем этим вопросом занимались и другие исследователи [30.49]. Помимо этого, в печати широко обсуждаются возможности использования генераторов нейтронов для создания автоматических устройств с целью определения элементного состава различных космических объектов [30.24, 30.25, 30.29, 30.47, 30.51, 30.52 и др.].

Для поисков полезных ископаемых (бериллия и других, с ним связанных), а также для решения других геологических задач могут также применяться генераторы гамма-лучей при мобильной съемке (автомобильной, вертолетной и т. п.). Эти методики впервые предложены и обоснованы в работе [30.18].

Из других методов рассмотрим здесь кратко возможности метода меченых атомов при решении различных геологических и технических задач буровой геофизики.

В заключение остановимся на применении ядерных взрывов, использующихся при добыче некоторых полезных ископаемых и создании в породах хранилищ для нефти, газа и т. п.

В последнее время к ядерной геофизике стали также относить проблемы, связанные с изучением содержания в водном и воздушном океанах радиоактивных элементов как естественного, так и искусственного происхождения (ядерные взрывы, космическая радиация). Радиоактивные элементы, распределенные в водах, используются при этом для изучения законов движения в океанографии и гидрологии. Аналогично на распределении радиоактивных элементов в воздухе основываются при изучении перемещения воздушных масс и контроле за ядерными взрывами и т. д. Онако эти проблемы здесь не рассматриваются ввиду их сугубой специфики. Интересующихся этими вопросами отсылаем к работам [30.7, 30.27]. Связь их с геологическими науками дана во Введении к тому I.

§ 1. Методы, основанные на применении нейтронных генераторов, для изучения горных пород на месте их выхода

На основе нейтронных трубок (см. табл. 27-1) начали создаваться портативные генераторы нейтронов переносного и перевозного (автомобильного и т. п.) типов. С помощью этих ускорителей в первую очередь могут быть реализованы импульсный нейтрон-нейтронный метод (ИННМ), нейтронный активационный метод (НА), импульсный нейтронный гамма-метод радиационного захвата нейтронов (ИНГМ) и импульсный нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния нейтронов (ИНГМ′). Для экспериментальных исследований при изучении гамма-излучения могут быть использованы различные анализаторы (см. § 1, 4 и 5 гл. 6). При создании автомобильных методик некоторые из указанных анализаторов (СГС-1, АИ-128-1 и др.) могут быть непосредственно размещены в кузове автомашины.

Для решения частных задач при работе с переносными установками можно создавать специальные портативные анализаторы типа СП-3 (см. п. 1 § 4 гл. 6).

ИННМ в полевых исследованиях, подобно ННМ (см. гл. 22 и 23), может применяться для определения влажности горных пород, почв и грунтов, а также для выявления поглощающих элементов (бора, редких земель и т. п.) [19.178].

Методы НА, ИНГМ и ИНГМ′ в первую очередь можно использовать для определения в породах основных породообразующих элементов. Эта задача наибольший интерес представляет при изучении космических объектов. С этой целью, как уже отмечалось, предполагается на поверхность изучаемых космических тел высаживать автоматические устройства с генератором нейтронов и регистрирующей аппаратурой (в основном с анализаторами).

Устройство проектируемой системы с генератором нейтронов и сцинтилляционным счетчиком рассматривается в работах [30.24, 30.29, 30.47, 30.51]. Генератор нейтронов и детектор расположены на некотором расстоянии друг от друга и разделены экраном. По устройству этот прибор сходен с глубинным прибором ядерного каротажа. Зондовое устройство может располагаться в горизонтальной плоскости (лежать на исследуемой поверхности) или вертикальной (соприкасаться с исследуемой породой с торца — в месте расположения мишени) [30.24, 30.29].

Аппаратура для рассматриваемых исследований должна быть комплексной (например, в космических исследованиях для одновременных измерений по ИНГМ′, ИНГМ и НА). Мобильную аппаратуру в наземных условиях предполагается использовать для одновременных измерений по ИНГМ′, ННМ, ИННМ и НА [30.53]. Метод НА в движении при этом может быть удобен лишь для решения ограниченного круга задач (при изучении короткоживущих изотопов). Радиоактивность долгоживущих изотопов можно изучать только при точечных замерах. Поэтому основы теории методов применительно к исследованию пород на плоской поверхности и их области применения удобнее рассмотреть совместно.

1. **Основы теории методов.** В § 4 гл. 29 отмечалось, что гамма-излучение неупругого рассеяния быстрых нейтронов необходимо измерять в процессе импульса и суммировать замеры от нескольких импульсов. Поэтому распределение гамма-излучения на плоской поверхности породы можно описывать соотношениями, пригодными одновременно для НГМ′ и ИНГМ′.

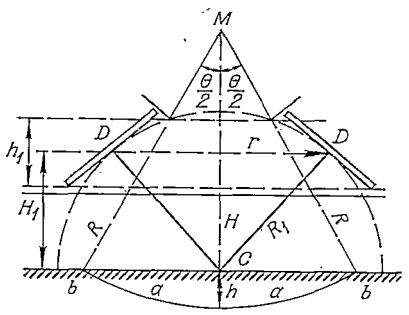


Рис. 30-1. Иллюстрация к выводу формул для автомобильных методов.
M — мишень генератора нейтронов; *D* — детекторы излучения; *C* — центр облучаемой поверхности, $R_1 = a + s$.

При автомобильной съемке мишень генератора нейтронов необходимо размещать на некотором расстоянии от поверхности земли, детекторы гамма-квантов — вне потока нейтронов также на некоторой высоте от поверхности земли. Схематически такое расположение источника нейтронов и детекторов представлено на рис. 30-1 [4.19]. В этой работе на основе приведенной геометрии расположения мишени генератора и детекторов, установленных сбоку от пучка быстрых нейтронов, выведено следующее приближенное соотношение для скорости счета при точечных замерах:

$$N'_\gamma = \frac{\pi j n \varepsilon r_д \sum f}{8H(\mu_п + \mu_\gamma)}, \qquad (30\text{-}1)$$

где n — выход нейтронов; ε — эффективность детектора; $r_д$ — радиус детектора; Σ — массовое макроскопическое сечение реакции (n, n, γ); $\mu_п$ — массовый коэффициент (полное массовое сечение) ослабления в облучаемой породе первичных нейтронов; μ_γ — массовый коэффициент ослабления в породе первичных гамма-квантов;

$$f = \frac{\left(1-\cos\frac{\theta}{2}\right)\left[\left(H\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}+b\right)^2+H_1^2\right]^{1/2}}{\left(H\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}+b\right)^2}. \qquad (30\text{-}2)$$

Здесь H_1 — расстояние от поверхности земли до центра детектора; остальные обозначения ясны из рис. 30-1.

Заметим, что рассматриваемое соотношение (30-1) выведено при условии $\rho(\mu_п+\mu_\gamma)R_1 \geqslant 5$. Применительно к горным породам (с их определенными $\mu_п$ и μ_γ) это соотношение справедливо при $\rho H \geqslant 60$ г/см^2.

При транспортировке генераторов нейтронов на больших высотах $H \geqslant 10$ м можно мишень генератора нейтронов и центр детектора считать совмещенными. В этом случае выражение для НГМ′ примет следующий вид [4.19, 30.17]:

$$N'_\gamma = \frac{jn\varepsilon r_д^2 \sum f_1}{8(\mu_п+\mu_\gamma)}, \qquad (30\text{-}3)$$

где

$$f_1(\gamma, H) = \frac{H}{6}\left[\gamma^3 Ei(-\gamma H) + \frac{1}{H^3}(2-\gamma H+\gamma^2H^2)e^{-\gamma H}\right].$$

Здесь $\gamma = \tau_п + \tau_\gamma$ — суммарный линейный коэффициент ослабления в воздухе быстрых нейтронов $(\tau_п)$ и первичных гамма-квантов, возникающих в породе (τ_γ).

Применительно к методам, базирующимся на регистрации надтепловых и тепловых нейтронов, к настоящему времени выведены соотношения лишь для стационарных методик ННМ [4.19, 30.17].

Плотности потока надтепловых нейтронов в случае плоской поверхности раздела (при автомобильной съемке) отвечает соотношение

$$J_н = \frac{8\pi\xi\omega n\eta}{\lambda}\left[\frac{e^{-x^2/4L_s^2}}{\sqrt{\pi}L_s} - \frac{e^{L_s^2/\lambda^2+x/\lambda}}{\lambda}\operatorname{erfc}x_1\right], \qquad (30\text{-}4)$$

где ξ — средняя логарифмическая потеря энергии нейтронов в породе (см. формулы (4-9) — (4-12)); $\omega = \frac{1}{2}\left(1-\cos\frac{\theta}{2}\right)$ — телесный угол; η — коэффициент, учитывающий поглощение замедляющихся нейтронов (см. (23-9)); x — расстояние от поверхности земли в глубь породы; $x_1 = \frac{L_s}{a} + \frac{x}{2L_s}$ (a — линейная экстраполированная длина свободного пробега нейтронов, $a = \frac{2}{3}\lambda_t$, см. формулу (4-6); L_s — длина замедления нейтронов.

Первый член в этом выражении соответствует решению для плотности замедления плоского источника с плотностью потока в направлении x для однородной безграничной среды. Второй член связан с отражением нейтронов от плоской поверхности раздела.

Зависимость плотности потока замедлившихся нейтронов от расстояния x для некоторых пород (табл. 30-1) в бесконечной среде и среде, граничащей с вакуумом, для случая плоских изотропных источников быстрых нейтронов показана на рис. 30-2. Плотность потока нейтронов для сред с плоской поверхностью раздела намного меньше плотности потока нейтронов в однородной среде и имеет характерный максимум, связанный с отражением (альбедо) нейтронов от породы.

Аналогичный вид имеют графики для плотности потока нейтронов с энергией в интервале 10 эВ—1 кэВ, полученные расчетным путем по методу Монте-Карло, для источника с начальной энергией 3 и 14 МэВ [30.49]. Так, для почвы максимум замедления этих нейтронов соответствует величине $x \approx 40$ см. В работе [30.49] приводятся также результаты расчета для более высокоэнергетических групп нейтронов.

Таблица 30-1

Параметры горных пород

Параметр	Песчаник	Глина-1	Глина-2	Известняк
ρ, г/см^3	2,65	1,88	1,88	2,72
L_s, см	29,7	50,0	41,5	26,65
a, см	2,97	4,73	4,54	2,67
ξ	0,0007	0,1060	0,1405	0,1005
L, см	18,0	19,8	14,7	11,86
τ, с	$1{,}32 \cdot 10^{-3}$	$9{,}14 \cdot 10^{-4}$	$8{,}9 \cdot 10^{-4}$	$5{,}4 \cdot 10^{-4}$
W	0,0011644	0,0009323	0,0012926	0,0018269
B	0,9950	0,9955	0,9940	0,9950

Этот вопрос изучался также и экспериментально применительно к пространственному распределению нейтронов космического происхождения. В работе [30.4] показано, что в песке плотностью 1,4 г/см^3 и влажностью 5,5% максимум плотности потока тепловых и медленных нейтронов наблюдается на расстоянии $\sim$45 см от дневной поверхности. При разработке аэронейтронных методов необходимо учитывать поведение плотности потока космических нейтронов с изменением высоты от поверхности земли.

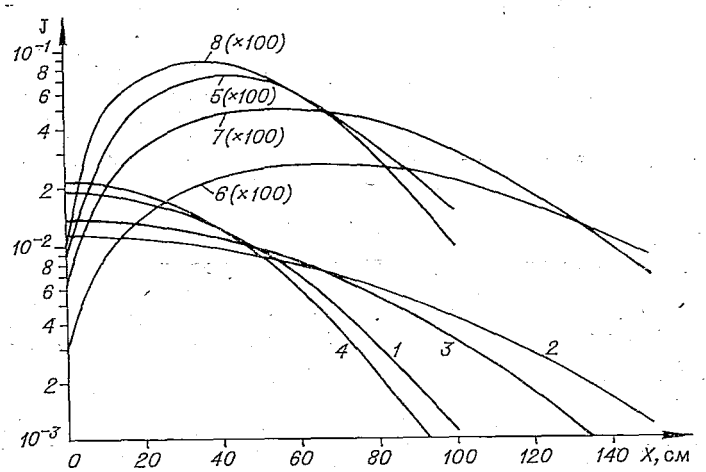


Рис. 30-2. Зависимость плотности потока замедлившихся нейтронов от x в однородной бесконечной среде (*1—4*) и в бесконечной среде, граничащей с вакуумом (*5—8*).

1, 5 — песчаник; *2, 6* — глина-1; *3, 7* — глина-2; *4, 8* — известняк.

Увеличение влажности породы ведет к смещению максимума кривых замедления нейтронов $J = f(x)$ влево, т. е. в сторону меньших значений x [30.49].

Выражение для скорости счета тепловых нейтронов при автомобильной съемке имеет вид:

$$N_т = \frac{\pi^3 \varepsilon r_д n \xi}{aH} f F_1, \qquad (30\text{-}5)$$

где

$$F_1 = \frac{La^2}{\sqrt{\pi}L_s} + (1 + e^{-2a/L})\,[e^{\beta^2}\,\mathrm{erfc}\,\beta - Be_1^{\beta^2}\,\mathrm{erfc}\,\beta_1].$$

Здесь $\beta = L_s/L$; $\beta_1 = L_s\left(W + \frac{1}{L}\right)$; $B = 1 - a^2/2L_s^2$, коэффициенты W и B приводятся в табл. 30-1. Расчет коэффициента W дается в работе [4.19].

Исходя из диффузионного уравнения выражение для скорости счета тепловых нейтронов в приближенном виде можно представить так:

$$N_т = \frac{\pi n \tau L v \varepsilon r_д \eta f}{4\,(L_s + L)\,(\tau v + 2L)\,H}. \qquad (30\text{-}6)$$

Соотношения (30-5) и (30-6) справедливы лишь для слабо поглощающих сред. На основе соотношений (30-5) и (30-6) выражения для вертолетной и т. п. съемок записываются таким образом:

$$N_т = \frac{\pi \varepsilon n r_д^{2\xi}}{a} F_1 f_1(\gamma_1, H), \qquad (30\text{-}7)$$

$$N_т = \frac{\pi \varepsilon n r_д^2 \tau L v}{4\,(L_s + L)\,(\tau v + 2L)} f_1(\gamma_1, H), \qquad (30\text{-}8)$$

где $f_1(\gamma_1, H)$ — то же, что и в формуле (30-3) при замене γ на $\gamma_1 = \tau_п + 1/\lambda_в$ (здесь $\lambda_в$ — средняя длина свободного пробега тепловых нейтронов в воздухе).

Для НГМ применительно к автомобильной съемке выведено соотношение

$$N_\gamma = \frac{\pi^2 j n \varepsilon \xi \Sigma_{n,\gamma} r_д v \tau B_1 f}{aH} F_{1,2}, \qquad (30\text{-}9)$$

где $\Sigma_{n,\ \gamma}$ — макроскопическое сечение реакции (n, γ); $B_1 = 1 - e^{-2a/L}$; $F_{1,2} = \frac{2\tau_\gamma L}{\tau_\gamma^2 L^2 - 1} F_1 - \frac{1}{\tau_\gamma L - 1} F_2$; F_2 — то же, что и F_1 в формуле (30-5) при замене β на $\alpha = \tau_\gamma L_s$ и β_1 на $\alpha_1 = L_s(W + \tau_\gamma)$.

Аналогичное соотношение при транспортировке ускорителя на большой высоте имеет вид:

$$N_\gamma = \frac{\pi j \varepsilon n \xi r_д^2 \Sigma_{n,\gamma} \tau v B_1}{a} F_{1,2} f(\gamma, H). \qquad (30\text{-}10)$$

Применительно к НА-б можно пользоваться соотношением

$$N'_{НА} = N_\gamma f(t_0, t, T), \qquad (30\text{-}11)$$

где $f(t_0, t, T)$ — то же, что и в формуле (25-7).

Аналогичным образом в методике НА-т можно пользоваться выражением

$$N_{НА} = N_\gamma f(t_0, t, T). \qquad (30\text{-}12)$$

В работах [4.19, 30.17] выведены соотношения для оценки глубинности исследования и облучаемых площадок (применительно к аэрометодам).

Об импульсных методах в рассматриваемых случаях можно судить лишь на основании работы [19.178] и данных предыдущей главы.

При измерениях на плоской поверхности породы величина глубинности для рассмотренных стационарных методов может меняться в следующих пределах: 10—20 см для НГМ′ для пород плотностью соответственно 2,5—1,5 г/см^3; 48 и 28 см при изучении песчаников ($\rho = 2{,}5$ г/см^3) соответственно методами ННМ-т и НГМ.

В работе [4.19] показано, что при автомобильных съемках для решения целого ряда задач достаточно использовать генераторы нейтронов с выходом 10^8 нейтр/с.

При аэросъемке важно, чтобы на поверхности облучаемой земли поток нейтронов не выходил за пределы допустимого — 18 нейтр/см^2·с для нейтронов с энергией 14 МэВ.

2. **Области применения методов.** Методы ННМ и ИННМ в полевых исследованиях могут применяться для определения влажности пород по профилям съемки и содержания в породах сильно поглощающих элементов (бора, редкоземельных элементов и др). Решение указанных задач по методам ИННМ и ИНГМ следует вести по оценке диффузионных параметров изучаемых пород [30.29] (см. также § 2 гл. 29). Эти параметры необходимо также оценивать и при измерениях другими методами: ИНГМ, ИНГМ′ и НА. Ниже остановимся несколько подробно на областях применения этих методов.

Нейтронные гамма-методы. С импульсным генератором нейтронов могут быть реализованы методы ИНГМ и ИНГМ′ (см § 1 гл. 29). Метод ИНГМ можно применять для определения некоторых породообразующих элементов группы железа и некоторых других (см. § 4 гл. 24).

Метод ИНГМ′ привлекается также для определения в породах породообразующих и других элементов. С целью выявления возможностей этого метода проведена серия экспериментов на плоской поверхности пород. Результаты их предполагается использовать при разработке автоматической системы для высадки на космические объекты с целью определения состава горных пород, выходящих на поверхность.

В работах [30.24, 30.25] рассматриваются эксперименты по определению в песке некоторых искусственных примесей элементов. Для получения нейтронов с энергией 14,6 МэВ был применен ускоритель Кокрофта — Уолтона на 500 кэВ, работающий в импульсном режиме. Длительность импульса менялась от 2 до 20 мкс с частотой от 1 Гц до 5 МГц и выходом до 10^7 нейтр/имп. Гамма-кванты регистрировались кристаллом йодистого натрия, активированного таллием, диаметром 4,4 см и высотой 5 см. В качестве вмещающей среды служил песок следующего состава (в ат. %): кислород — 64,6; кремний — 26,7; алюминий — 5,7; калий — 1,6; железо — 0,6; кальций — 0,5; прочие примеси — 0,3. Гамма-кванты неупругого рассеяния нейтронов фиксировались амплитудно-временным анализатором спустя 0,2 мкс после нейтронного импульса в течение нескольких десятых микросекунд. Было обнаружено, что гамма-кванты радиационного захвата нейтронов начинают улавливаться аппаратурой лишь спустя 10 мкс. Измерялись они в течение 1 мкс.

В связи со стационарными условиями эксперимента после нескольких импульсов нейтронов на результаты измерений ИНГМ′ начинает действовать наведенная активность изотопов, образующихся в породе в ходе различных реакций на нейтронах. Но так как гамма-излучение неупругого рассеяния нейтронов после импульса регистрировалось в течение десятых долей микросекунды, счет от наведенной активности не превышал 2%.

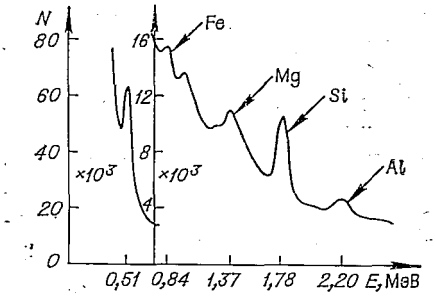


Рис. 30-3. Типичный спектр гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов.

Определение содержания в песке химических элементов, вступающих в реакцию $(n, n'\gamma)$, велось по следующим реперным линиям: 6,14 МэВ — кислород; 2,21 МэВ — алюминий; 1,78 МэВ — кремний; 1,37 МэВ — магний и 0,84 МэВ — железо. Типичный спектр гамма-излучения этих элементов показан на рис. 30-3 [30.24], отдельные спектры гамма-лучей неупругого рассеяния нейтронов для железа, магния и алюминия (двух энергетиче-

ских диапазонов) — на рис. 30-4 [30.25]. Пик, обусловленный аннигиляцией электронов и позитронов (0,511 МэВ), резко выраженный на всех кривых, использовался в качестве калибровочного.

Концентрация в песке 2,2% (атомных) железа создает пик в 13 000 импульсов с энергией 0,84 МэВ. Пунктирная кривая на вставке рис. 30.4, *а* отвечает фону. Увеличение в песке железа с 2,2% до 3,85 и 5,31% ведет к заметному повышению скорости счета в области пика 0,84 МэВ. Пики 1,78 МэВ на кривой *а* рис. 30-4 обусловлены кремнием, а пики 1 и 2,2 МэВ — алюминием.

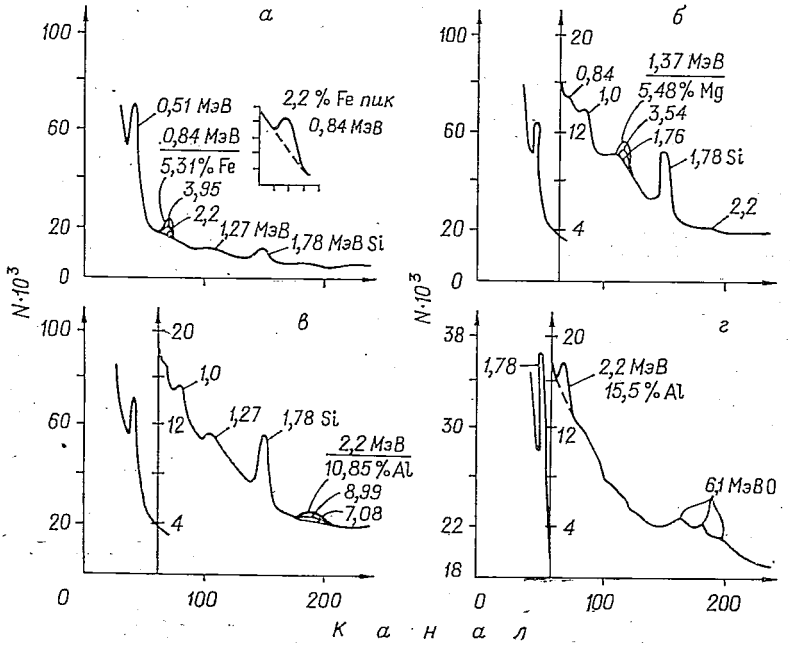


Рис. 30-4. Спектр гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов для железа (*а*), магния (*б*) и алюминия (*в* и *г*).

Аппаратура с генератором нейтронов, дающим выход 10^7 нейтр/с и работающим на частоте пульсаций от 200 до 1000 Гц, и сцинтилляционным счетчиком (кристалл йодистого натрия размерами 7×7 см) использовалась для изучения гранитов [30.29]. При определении содержания в породах небольших концентраций того или иного элемента результаты измерения в работе [30.25] предлагается выражать в относительных единицах. При этом в качестве опорной рекомендуется линия 1,78 МэВ, обусловленная реакцией на кремнии. Полученные градуировочные кривые для Fe, Mg и Al приведены на рис. 30-5 [30.25].

При определении в породах низких концентраций магния его пик с энергией 1,37 МэВ начинает сливаться с пиком кремния с энергией 1,27 МэВ. Разделить их можно специальной обработкой результатов [30.25].

В работе [30.25] показано, что содержания в породе железа, магния и алюминия порядка 5% могут быть определены с относительной точностью не выше 10%. С такой точностью может быть определена и величина отношения кремния к кислороду (см. рис. 30-4). Порог чувствительности при установлении железа оценен в 0,09%.

Помимо этого, для оценки порога чувствительности ИНГМ′ использовалась аппаратура с генератором нейтронов, дающим поток 10^7 нейтр/с, и кристаллом йодистого натрия, активированного таллием, размерами 5×5 см [30.51]. Результаты приведены в табл. 30-2.

Нейтронный активационный метод. Устройства с нейтронными генераторами в полевой съемке и при изучении космических объектов в первую очередь могут быть использованы для изучения элементного состава пород по активации быстрыми нейтронами (НА-б) (см. табл. 28-13). О возможностях этого метода можно судить по данным,

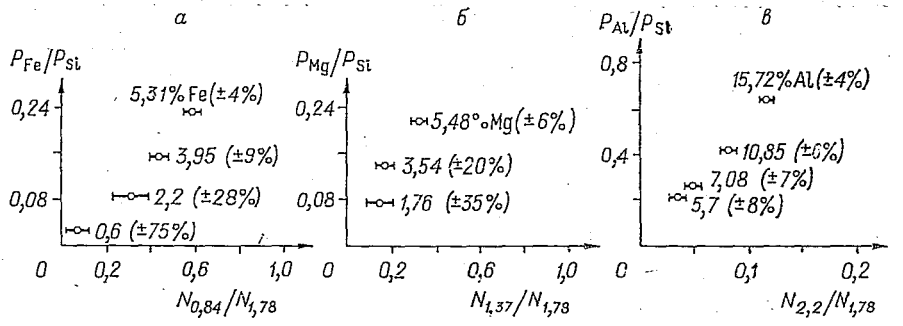


Рис. 30-5. Градуировочные кривые для железа (*а*), магния (*б*) и алюминия (*в*) (числа в скобках соответствуют ошибкам измерения; по оси ординат отложены отношения количеств атомов соответствующих элементов).

приведенным в п. 5 § 3 гл. 29. В основном метод НА-б может быть применен для определения в породах кислорода, фтора, натрия, магния, кремния и алюминия. Так, Р. Л. Колдуэллом и др. [30.29] при облучении блоков гранитов и базальтов установлено, что по методике НА-б при работе с генератором нейтронов с выходом 10^7 нейтр/с и кристаллом йодистого натрия размерами 7×7 см можно определять содержание натрия (E_γ=2,75 и 1,38 МэВ), кремния (E_γ=17,8 МэВ) и алюминия (E_γ=0,834 МэВ) (см. табл. 28-13).

Таблица 30-2

Порог чувствительности ИНГМ'

Изотоп	Распространенность изотопа, %	Порог чувствительности, %	
		атомные	весовые
Кислород-16	99,8	3,7	2,7
Натрий-23	100	1,3	1,3
Магний-24	78,6	0,3	0,3
Алюминий-27	100	2,0	2,4
Кремний-28	92,3	0,5	0,6
Калий-39	93,0	1,0	1,7
Кальций-40	97,0	1,2	2,1
Железо-56	91,5	0,1	0,2

Однако в связи с замедлением быстрых нейтронов в породе их захват приводит к образованию изотопов под действием тепловых нейтронов, что позволяет определять в породах ряд элементов и по методике НА-т (см. п. 7 § 3 гл. 28).

В США для измерений по этому методу создано устройство, располагающееся на прицепе к автомобилю [30.28, 30.48]. Предназначено оно для определения в породах серебра. Порода облучается потоком нейтронов, прицеп затем передвигается настолько, чтобы под облученным участком устанавливался сцинтилляционный детектор. Концентрации серебра ($4{,}25\cdot10^{-3}$%) при этом четко фиксировались по пикам 620(0,80%) и 430(0,28%) кэВ (серебро-108) и 656(60%) кэВ (серебро-110) [30.48].

Дистанционное определение содержания в породах некоторых элементов по НА рассматривается в работе [30.49].

§ 2. Возможности применения электронных ускорителей в полевой съемке

Электронные ускорители для полевой съемки предложены в работах [30.18, 10.23, 16.31]. На их основе прежде всего может быть разработана методика автомобильной и вертолетной съемки (или им подобной) для поисков бериллия и других связанных с ним полезных ископаемых.

Применительно к автомобильной гамма-нейтронной съемке (АвГНМ) приближенное соотношение для оценки скорости счета по аналогии с формулой (26-4) может быть представлено в виде:

$$N = \frac{0{,}86 \cdot \varepsilon \cdot a n \Sigma \cdot \alpha_F}{\mu_\gamma + \mu_\text{п}}, \qquad (30\text{-}13)$$

где 0,86 — коэффициент, учитывающий выход гамма-квантов из мишени ускорителя в конус с углом при его вершине $\theta = 1$ рад (рис. 30-6); ε — эффективность детектора (для жидкостного детектора, показанного на рисунке, она может быть принята равной 0,5); α — коэффициент, учитывающий преобразование потока электронов в жесткое гамма-излучение с $E_\gamma \geqslant 1{,}67$ МэВ; n — выход электронов; Σ — массовое сечение фотонейтронной реакции; μ_γ и $\mu_\text{п}$ — массовые коэффициенты ослабления в породе гамма-квантов и промежуточных нейтронов;

$$\alpha_F = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{H}{\sqrt{H^2 + R^2}}\right).$$

Здесь H — расстояние от мишени и детектирующей системы до облучаемой поверхности земли; R — радиус детектора (см. рис. 30-6).

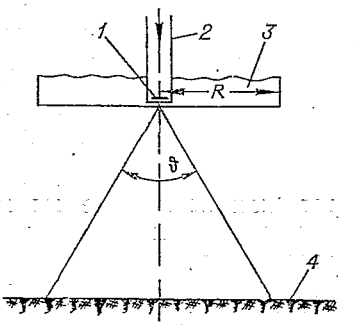


Рис. 30-6. Иллюстрация к выводу формулы для автогамма-нейтронного метода.

1 — мишень ускорителя, *2* — канал вывода электронного пучка ускорителя, *3* — детектор нейтронов, *4* — облучаемая поверхность земли.

В соответствии с данными § 2 гл. 2 и рис. 2-6, исходя из выхода гамма-квантов, падающих в угол $\theta = 1$ рад, можно оценить коэффициент α для ускорителя с энергией, например $E_e = 3$ МэВ, в $7{,}73 \cdot 10^{-3}$. Средняя энергия гамма-квантов для интервала 1,67 — 3,0 МэВ в соответствии с рис. 2-6 составляет 2,6 МэВ. Промежуточные нейтроны при этом в соответствии с формулой (3-30) имеют среднюю энергию 0,83 МэВ. Для породы, представленной кремнеземом, можно принять в этом случае, что $\mu_\gamma = 0{,}039$ см^2/г и $\mu_\text{п} = 0{,}09$ см^2/г. Величина макроскопического сечения реакции (γ, n) $\Sigma = 3{,}35 \cdot 10^{-10}$ см^2/г (при содержании в породе $5 \cdot 10^{-4}$% бериллия — кларк).

В качестве ускорителя для АвГНМ возьмем микротрон ИГиГ СО АН СССР (см. п. 2 § 2 гл. 27). Он весьма портативен и может быть взят за основу для создания прибора для поисков бериллия. С его помощью можно получать средний ток электронов 1,5 мк с энергией 3 МэВ. Величина $n = 1{,}5 \cdot 10^{-6}/1{,}6 \cdot 10^{-19} = 9 \cdot 10^{12}$ электр/с [36.15].

При оценке величины скорости счета необходимо знать фоновую скорость счета. В § 5 гл. 9 показано, что величина плотности потока надкадмиевых нейтронов равна $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ нейтр/см^2 с. Для выбранного нами детектора с радиусом 50 см, покрытого сверху кадмием, величина $N_\Phi = 0{,}5 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-3} = 11$ имп/с. Вместо жидкостного сцинтиллятора при этом можно использовать всеволновые детекторы, созданные на основе пропорциональных счетчиков, заполненных гелием-3. Их эффективность порядка 50%.

Располагая мишень ускорителя и регистрирующую систему на высоте 10 см от поверхности земли ($\alpha_F = 0{,}4$), можно достичь следующей скорости счета:

$$N_n = \frac{0{,}86 \cdot 0{,}5 \cdot 7{,}73 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{12} \cdot 3{,}35 \cdot 10^{-10} \cdot 0{,}4}{0{,}039 + 0{,}09} = 31 \text{ имп/с}.$$

Полезная скорость счета от кларковых концентраций бериллия примерно в 3 раза выше величины фона. Таким образом, разработанный микротрон вполне может быть положен в основу создания передвижного прибора для поисков бериллия. Энергию ускоряемых электронов

можно увеличивать до 3,5 МэВ. Дейтерий при этом, как отмечалось в п. 1 § 2 гл. 28, не будет мешать определению бериллия.

По аномальным значениям бериллия можно вести поиски других сопутствующих ему полезных ископаемых — лития, олова, вольфрама, молибдена, тантала и т. д., а также геологическое картирование в комплексе с методом ГМ (см. гл. 31).

С помощью микротрона с энергией до 10 МэВ можно определять одновременно содержание в породах бериллия, дейтерия, лития, урана, тория и др. [30.18, 10.23, 16.31]. В этих работах показано, что поиски этих элементов при необходимости можно вести с помощью воздушной съемки.

Применительно к аэросъемке ИГНМ проводились также численные расчеты по методу Монте-Карло [30.11, 30.22]. В результате установлено, что, используя временной режим ускорителя и регистрирующей системы, можно осуществлять раздельную регистрацию тепловых и надтепловых нейтронов. Совместная обработка результатов этих исследований, возможно, может помочь исключению таких непостоянных факторов, как изменение высоты транспортировки ускорителя и детектора над облучаемой поверхностью и изменение содержания в породах водорода и сильно поглощающих элементов. Учет изменения расстояний до облучаемой поверхности может производиться также по регистрации отраженного гамма-излучения [30.3].

§ 3. Метод меченых атомов

1. **Общие вопросы.** Метод меченых атомов (МА), или метод изотопов (МИ), предложен для исследования скважин в 1939 г. В. Н. Дахновым и др. [12.5]. На первом этапе исследований для этих целей в основном применялись различные вещества, меченные радиоактивными изотопами. Соблюдались специальные меры, препятствующие загрязнению приборов, скважины и территории около скважины [30.33]. Тем не менее опасность заражения указанных объектов существует всегда. Поэтому в последующем Л. С. Полаком (1951 г.) было предложено для решения некоторых задач закачивать в скважину вещества с аномальными ядерными свойствами по отношению к нейтронам (бор и др.). Помимо бора в скважины в настоящее время закачиваются также другие легкоактивирующиеся вещества, содержащие, например, фтор и другие элементы. Активируют эти изотопы нейтронами как от ампульных источников, так и от скважинных генераторов нейтронов. Для решения некоторых задач активацию короткоживущих изотопов выгодно производить при помощи передвижных нейтронных генераторов или размножителей нейтронов непосредственно у устья скважины перед закачкой в нее меченых соединений.

Перед закачкой радиоактивных или стабильных изотопов ведется первичный каротаж (ГК-1, ННК-1, ИНГК-1, НАК-1 и т. д). Затем в скважину закачивается меченое вещество. Повторно записывается какой-либо из вышеперечисленных видов каротажа (ГК-2 и т. д.), после чего сравниваются кривые первичного каротажа с вторичным. По аномальным отклонениям вторичных кривых от первичных судят о решении того или иного вопроса.

В настоящее время метод МА применяется для контроля за проникающей жидкостью в колонну и пласты, за гидравлическим разрывом пластов и для изучения гидродинамики пластовых вод в породах.

Меченые соединения в наибольшей степени привлекаются для изучения нефтяных и газовых залежей [30.14, 30.15].

Меченое вещество для контроля за проникновением жидкости в места перфораций и разрыва колонны, а также в пласты, может поступать в скважину различным путем: с поверхности вместе с закачиваемой

жидкостью или непосредственно из скважины с помощью инжекторов. К настоящему времени создано несколько типов инжекторов [19.79, 30.9, 30.14, 30.23], с помощью которых меченая жидкость сливается в скважину на нужную глубину (или на этой глубине раздавливаются ампулы с радиоактивным веществом). Существуют также инжекторы для механического, электрического или взрывного способа распыления в скважине радиоактивного вещества. Сверху или снизу его устанавливается один или несколько детекторов излучения. По времени достижения к ним радиоактивного вещества можно судить о скорости перемещения жидкости в изучаемых интервалах.

Радиоактивные вещества, вводимые в скважину, могут подразделяться на растворимые в воде или нефти [20.40] или твердые (радиоактивный песок, пластиковые зерна и т. п.). Удельный вес пластика, в частности, можно подбирать равным плотности жидкости в изучаемом интервале. Применяются также и газообразные вещества [30.15].

В последующем для изучения движения жидкости в скважине стали привлекаться методы, основанные на активации нейтронами кислорода (НАК при работе с генератором нейтронов, см. § 5 гл. 29).

Помимо этого, для выявления поглощающих пластов в качестве меченых атомов в скважину закачивались соединения бора. В местах проникновения жидкости в пласт происходит накопление этих соединений, они фиксируются с помощью ННК-I или ИННК-I.

Метод МА применялся для контроля за высотой подъема цемента в скважине и за его толщиной. При этом к цементу подмешивались радиоактивные изотопы [1.27, 30.9, 30.44]. Теперь эти задачи успешно решаются при помощи методов ГГК-п (см. гл. 19).

В инженерно-геологических исследованиях метод МА применяется для контроля за сжатием грунтов и пород [14.4]. С этой целью из контрольной скважины в породу выстреливаются шарики, содержащие кобальт-60. Затем прибором ГК фиксируется перемещение изотопа в породе по отношению к контрольному изотопу, крепящемуся на некоторой фиксированной глубине в обсадной трубе.

При разработке месторождений важно следить за сдвижением горных пород в толще массива, что также достигается с помощью реперных источников (кобальт-60 и др.) [30.8].

Из всего многообразия перечисленных задач рассмотрим ниже более подробно две — для их решения метод МА применяется особенно широко.

2. **Контроль гидравлического разрыва пласта.** Для повышения нефтеотдачи продуктивных пластов в эксплуатационных скважинах и приемистости пластов в нагревательных скважинах в основном привлекается метод гидравлического разрыва пласта [30.2]. Основан он на разрыве (расслаивании) пласта под действием на него закачиваемой в скважину под большим давлением вязкой жидкости. Вместе с жидкостью в разрываемые пласты задавливается крупнозернистый песок (0,5—0,8 мм), чтобы сохранить возникшие трещины после прекращения давления в скважине.

С целью контроля за местом разрыва пласта в скважине к песку, задавливаемому в пласт, подмешивают радиоактивный изотоп. В результате по кривой ГК-2, полученной после тщательной промывки пласта, можно судить, какой пласт разорван. Местоположение разрыва на кривой ГК-2 выявляется резким максимумом интенсивности регистрируемого гамма-излучения.

В ВУФ ВНИИГеофизики [5.9, 6.46, 30.5] для контроля за гидроразрывом разработан способ с предварительным размещением прибора. Раньше прибор ГК опускали в скважину после закачки песка, теперь он находится в скважине уже к моменту закачки. В месте уплотнения скважины, подготовляемой к гидроразрыву, создается избы-

точное давление. Не снижая этого давления, необходимо протащить прибор вдоль исследуемой зоны. И. Г. Жувагиным и др. [5.9] создан специальный прибор, помещаемый в трубах с внутренним диаметром 32 мм и наружным 41,5 мм, обеспечивающий сохранение уплотнения. В зависимости от протяженности уплотняемой зоны длина этой трубы выбирается равной 15—20 м. Прибор ГК диаметром 28 мм помещается внутри труб и может в них перемещаться. Внутри труб имеется лебедка и моторчик. По команде с поверхности земли прибор ГК может подниматься с помощью моторчика или спускаться под действием силы тяжести при проведении записи кривых ГК-2.

Для исследований вначале использовался песок, меченный изотопом радиоактивного железа-59 (T=45,1 дня, E_γ=1,29 (43%) и 1,1 МэВ (57%)). Недостатком было то, что территория вокруг скважины загрязнялась. Вместо песка в работе [30.10] стали использовать 1—2 капроновых шарика (диаметром 5—10 мм) с радиоактивными изотопами. Но они задавливались либо глубоко в пласт, либо в побочные трещины, что затрудняло исследования гидроразрыва пласта. В ВУФ ВНИИГеофизики [6.63, 30.6] в качестве носителя радиоактивных изотопов предложены ионообменные смолы, обладающие способностью к полной абсорбции меченого соединения. Раствор, вытекающий из скважины, не загрязняется радиоактивными веществами. Таким способом была улучшена техника безопасности работ на скважинах. Вместо радиоактивных изотопов в качестве меченых атомов служат стабильные изотопы с высокими сечениями захвата нейтронов. Роль растворимого соединения играет борная кислота H_3BO_3 (растворимость 4,9 г на 100 г воды) или хлористый кадмий $CdCl_2$ (растворимость 114 г на 100 г воды). Скопление бора в скважине в дальнейшем фиксируется по ННК-т, а кадмия с хлором — по ННК-т и НГК. На кривых ННК-т проявляются минимумы, а на кривых НГК — максимумы.

3. **Изучение гидродинамики подземных вод.** При решении ряда гидрогеологических (рудная и шахтная гидрогеология), инженерно-геологических (фильтрация вод через грунты и породы) и гидротехнических (фильтрация вод через гидротехнические сооружения) задач и задач нефтепромысловой геологии (законтурное заводнение и т. п.) необходимы знания о направлении скорости и движения потоков вод.

В одну из скважин (пусковую) закачивается какой-либо радиоактивный изотоп в виде соли, растворимой в воде, а в некоторых соседних скважинах (контрольных) периодически записываются кривые ГК-2, наблюдается перемещение радиоактивной воды по изучаемым пластам. Иногда о движении потока судят по уходу меченого раствора из пусковой скважины.

Физические основы рассматриваемого метода применительно к изучению потоков подземных вод излагаются в работах [30.14, 30.15, 30.23].

При проведении разнообразных исследований важно выбрать соответствующий изотоп с относительно высоким периодом полураспада, чтобы успеть замерить радиоактивность в контрольных скважинах. В качестве излучателей удобнее использовать изотопы, испускающие гамма-кванты. Их появление в контрольных скважинах можно устанавливать непосредственно по данным ГК-2. О появлении в контрольных скважинах бета-радиоактивных изотопов можно судить в основном по замерам радиоактивности отобранных проб.

Радиоактивные изотопы при этом необходимо приготовлять в виде соединений, не абсорбирующихся в породе или абсорбирующихся слабо (при замерах в контрольных скважинах), либо, наоборот, сорбирующихся хорошо (при замерах в пусковых скважинах).

К настоящему времени наметились следующие приемы для определения движения вод по пластам. При изучении, например, фильтра-

ции через земляные и намывные тела плотин и нескальные основания гидротехнических сооружений используется йод-131 [T=8,06 дней, E_γ= =0,637 (9,3%); 0,364 МэВ (80,9%) и др.] в виде соединений йодистого натрия или калия [19.79]. Движение вод определяется с помощью ГК как в контрольных скважинах, так и по замерам ухода меченого раствора из пусковой скважины прибором ГК, оборудованным коллиматорами [19.79]. Иногда сочетают замеры в пусковой и контрольной скважинах. При этом можно оценивать пористость и проницаемость пород на пути движения изотопов [30.14, 30.34].

Для контроля за уходом меченой жидкости из пусковой скважины в качестве радиоактивных препаратов используются кадмий-115 [T= =53 ч, E_γ=0,52 (25%); 0,49 (12%) и 0,34 МэВ (50%)], находящийся в равновесии с индием-115 м [T=4,5 ч, E_γ=0,535 МэВ (95%)], или железо-59 (см. выше). Эти изотопы абсорбируются в породах. Места абсорбции их фиксируются прибором ГК с коллимационными щелями. Вместо радиоактивных соединений при решении этой задачи берутся также стабильные изотопы бора и хлора. Места их абсорбции в породах фиксируются прибором ННК-т или НГК, оборудованным коллиматором.

Для исследования движения вод в почвах и торфяниках применяется изотоп сера-35 [T=87,1 дня, E_β=0,167 МэВ (100%)] в виде сернокислого натрия. Пробы вокруг пусковой скважины отбираются с помощью почвенных буров, легко вдавливаемых в почвы и особенно в торфяник.

Я. К. Финкельштейном и др. [19.73] для изучения гидродинамики вод предложено использовать изотоп трития в виде тритиевой воды. Тритиевая вода добавляется к порции обычной, закачиваемой в скважину. По физико-химическим свойствам этот индикатор практически не отличается от обычной воды. Большой период полураспада трития (T=12,3 года) и мягкое бета-излучение (18,6 кэВ) позволяют использовать его в течение длительного времени после закачки в скважины и делают практически безопасным при сильной степени разбавления (как при разбавлении перед закачкой, так и в процессе перемещения по пласту). Однако одним из наиболее существенных неудобств применения трития является необходимость отбора проб воды из исследуемых скважин, электролитическое обогащение иногда пробы тритием и последующее измерение на установке с малым фоном [30.14]. В последнее время для решения этой задачи стали использовать дейтериевую воду [19.177]. Анализ дейтерия в отобранных пробах может вестись по ГНМ (см. § 2 гл. 28).

Природный тритий в водах используется также для решения других гидрогеологических задач [19.79, 19.169]. При изучении гидродинамики подземных вод по результатам метода МА строят эпюры в виде изолиний скоростей движения вод и определяют основные направления их движения [19.79, 30.23].

Некоторые другие вопросы, связанные с изучением гидродинамики подземных вод, рассматриваются в работах [19.79, 19.177, 30.1, 30.14, 30.16, 30.19, 30.21, 30.23, 30.30—30.34, 30.37—30.39, 30.44].

§ 4. Использование ядерных взрывов

Ядерные взрывы в последнее время начинают использоваться при разработке месторождений различных твердых полезных ископаемых, при добыче нефти и газа, для создания подземных нефтегазохранилищ, при строительных работах и т. п. [30.12, 30.13, 30.26, 30.35, 30.36, 30.41—30.43, 30.45, 30.46, 30.50]. Наиболее полный обзор американских работ приводится в библиографическом справочнике [30.35].

В работах [30.12] показано, что промышленные взрывы наиболее рациональны при разработке крупных по запасам, но бедных по ка-

честву месторождений полезных ископаемых, глубоко залегающих от дневной поверхности в отдаленных пустынных районах. Помимо этого, с помощью ядерных взрывов можно дробить и удалять верхний слой пустых пород; дробить рудные тела при подготовке их к добыче открытым способом; дробить полезные ископаемые и вмещающие породы при подземной добыче полезных ископаемых; дробить рудную залежь с целью выщелачивания из нее полезного ископаемого; дробить и зажигать каменный уголь для подземной газификации.

С целью исключения заражения поверхности взрывы следует делать подземными, без выхода продуктов ядерных реакций в атмосферу. Ядерное устройство устанавливается на глубину через скважину, которую цементируют; после схватывания цемента производят взрыв. Подача команды о взрыве с наземного пульта осуществляется по кабелю. При взрыве в породах образуются полости сферической формы с радиусом

$$R = \frac{Cw^{1/3}}{(\rho H)^{1/4}},$$

где C — константа, зависящая от типа пород и меняющаяся от 350 для гранита до 461 для туфа; w — эквивалентная мощность взрыва, кг; ρ — плотность покрывающих пород, г/см^3; H — глубина заряда от поверхности, м.

После обрушения кровли пород полость принимает форму трубы с радиусом, равным примерно радиусу сферической полости, и длиной в 4—5 раз больше этого радиуса. Зона кавернозности распространяется от центра взрыва на 6 радиусов вверх, 1,5 радиуса вниз и 3 радиуса вбок.

Ядерные взрывы могут быть основаны на реакции деления или термоядерной реакции синтеза. В первом случае образуются твердые радиоактивные продукты: стронций-90, цезий-137 и углерод-14. Они практически полностью улавливаются расплавом на дне полости. Помимо твердых радиоактивных продуктов образуются и газообразные: ксенон-133 (T=5,65 дней), йод-131 (T=8,06 дней) и криптон-85 (T=4,4 ч и 10,6 лет), которые загрязняют полость с ее содержимым. Ксенон-133 и йод-131 практически полностью распадаются соответственно через 5 и 10 месяцев. Допустимыми концентрациями при этом считают любую смесь продуктов деления в количестве $1 \cdot 10^{-6}$ мкКи/см^3 в воздухе и $1 \cdot 10^{-4}$ мкКи/мл в воде.

При реакциях синтеза в больших количествах возникают газообразные продукты трития (T=12,26 года). При использовании концентрированной окиси водорода тритий способен выпадать в осадок, тем самым полости очищаются от него. Допустимой считается концентрация трития в воздухе $2 \cdot 10^{-5}$ мкКи/см^3, а в воде — $3 \cdot 10^{-4}$ мкКи/мл.

Прежде чем добывать полезное ископаемое из взорванного массива породы или использовать полости в качестве хранилищ, важно убедиться, что продукты распада не создают опасных доз. Проводятся специальные дозометрические исследования. Из-за высокой радиоактивности пород и руд в полостях в отдельных случаях планируется эксплуатировать их спустя несколько лет после взрыва.

Что касается твердых полезных ископаемых, то с помощью ядерных взрывов рассчитывается добыча железных руд.

Путем дробления с последующим выщелачиванием полезного ископаемого выгодно эксплуатировать руды, бедные медью [30.50] и т. п. Рудное тело дробится таким образом, чтобы разрушенная порода контактировала с водонепроницаемыми породами, т. е. важно, чтобы дробленая руда находилась в своеобразном сосуде. В эту емкость подают соответствующие выщелачивающие растворы. При необходимости таким

способом можно выщелачивать отдельные компоненты руды. Затем раствор откачивается на поверхность, там из него извлекаются необходимые полезные компоненты. Их содержания в растворах могут контролироваться ядерно-геофизическими методами. В книге [30.12] показано, что таким образом выгодно осуществлять эксплуатацию руд с содержанием меди около 0,5% и запасами свыше 10 млн. т.

Ядерные взрывы могут быть эффективны при добыче нефти за счет разрушения и раздробления горных пород с целью повышения их проницаемости. Так, С. А. Оруджев (СССР) на Восьмом Всемирном нефтяном конгрессе (июнь 1971 г., Москва) сообщил, что с помощью ядерных взрывов удается существенно повысить нефтеотдачу месторождений. В СССР для интенсификации добычи нефти из угасающего месторождения проведено три взрыва (два по 2,3 кт и один в 8 кт) на глубине от 1348 до 1370 м. По расчетам, нефтеотдачу пласта предполагалось повысить на 10%. Фактически же отбор нефти увеличился на 34%. Кроме того, проводились эксперименты для повышения эффективности эксплуатации одного из действующих месторождений. В результате двух взрывов по 8 кт коэффициент продуктивности пласта в 7 скважинах увеличился в 1,3—1,6 раза.

Установлено также, что при взрывах в районах действующих нефтяных месторождений не наносится ущерба скважинам, сооружениям, коммуникациям и населенным пунктам. Достигнута полная радиационная безопасность для обслуживающего персонала и населения района.

В природе, как известно, существуют залежи нефти с весьма высокой вязкостью, которая не позволяет извлекать нефть через скважины. Привлечение разнообразных способов для ее извлечения не дало положительных результатов. Разогрев с помощью ядерных взрывов больших объемов породы с заключенной в них вязкой нефтью приводит к существенному снижению ее коэффициента вязкости. В результате нефть становится готовой для извлечения ее через скважины. Проведенные расчеты показывают, что с помощью ядерных взрывов, по всей видимости, можно будет решить и эту задачу.

В природе также существуют твердые нефтеносные сланцы, которые в настоящее время не эксплуатируются на извлечение из них нефти,— отсутствуют рентабельные способы добычи. Расчеты показывают, что при разогреве этих сланцев ядерным взрывом органическое вещество в значительной степени способно превращаться в нефть и газ, которые можно извлекать из обрушенных пород с помощью скважин. Дополнительное разложение органического вещества на нефть и газ может быть осуществлено за счет горения части нефти и газа, содержащихся в обрушенном объеме. При этом предполагается в одну из скважин для поддержания горения подача разогретого воздуха, а из других скважин извлечение продуктов. Подробно этот вопрос рассматривается в работах [30.12, 30.41].

Ядерные взрывы используются также для воздействия на слабопроницаемые газоносные пласты с целью интенсификации притока из них газа [30.26, 30.36, 30.42]. Применение ядерных взрывов при этом выгодно в случае, если продуктивные пласты имеют большую мощность и большую протяженность и залегают на приемлемой глубине от дневной поверхности в районах, где водоносных горизонтов нет. Образовавшаяся при взрывах полость одновременно может выполнять роль газохранилища. Газ из нее можно извлекать по мере необходимости.

В соленосных и глинистых пластах с помощью ядерных взрывов можно делать резервуары для хранения нефти и газа [30.13, 30.43, 30.45]. Стенки пород при этом оплавляются, что препятствует утечке нефти и газа в поры горных пород. Нефть и газ в таких полостях заполняют пространство между глыбами и кусками пород. Если при взрыве

и обрушении порода превращается в песок, полости невозможно использовать в качестве хранилищ нефти и газа. Капиллярное сцепление препятствует извлечению нефти и газа. Поэтому после взрыва важно убедиться, в каком состоянии находится обрушенная порода. С этой целью в резервуар забуриваются скважины для исследования обрушенных пород различными геофизическими методами. Только после заключения специалистов может быть принято решение о целесообразном заполнении резервуара.

Заполнение резервуаров в дальнейшем осуществляется через одни скважины (нагнетательные), а извлечение — через другие (эксплуатационные). В процессе заполнения и извлечения нефти из таких резервуаров важно осуществлять контроль за уровнем нефти в резервуаре и т. п. с помощью ядерного каротажа и других методов.

Раздел 7

Применение комплекса радиометрических и ядерно-геофизических методов

Методы ядерной геофизики применяются для геологического картирования, расчленения и корреляции разрезов пород, определения их плотности, влажности, пористости и выявления в них различных химических элементов. Последняя задача важна с точки зрения поисков, разведки и разработки различных видов полезных ископаемых.

Автор не придерживается строгой классификации полезных ископаемых по группам, как это обычно принято в соответствующих курсах. Это связано в основном со спецификой применения методов ядерной геофизики для решения перечисленных задач. Поэтому расположение элементов и полезных ископаемых в группах произведено главным образом в соответствии с периодической системой Д. И. Менделеева.

Глава 31

ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ ПОРОД НА ПОВЕРХНОСТИ И В СКВАЖИНАХ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ

§ 1. Геологическое картирование

При изучении по-разному обнаженных районов со сложным геологическим строением геофизические методы вообще, и радиометрические в особенности, имеют важное значение [31.4, 31.20].

Для картирования могут использоваться как самостоятельные радиометрические исследования, так и радиометрические карты, составленные при поисковых работах на уран (к настоящему времени огромная территория покрыта уже различными видами гамма-съемки, а также эманационной съемки).

Все виды радиометрической съемки для геологического картирования основываются на геохимических закономерностях распределения радиоактивных элементов в горных породах. В табл. 9-2 показано, что в различных типах горных пород содержится различное количество радиоактивных элементов, поэтому каждая порода, выходящая на дневную поверхность или перекрытая маломощными наносами, отмечается на поверхности земли различными показаниями интенсивности регистрируемого гамма-излучения. Наибольшими показаниями из изверженных пород отмечаются кислые, а наименьшими — основные и ультраосновные. Эффузивные породы характеризуются более высокими показаниями по сравнению с их изверженными аналогами [31.22, 31.26]. Из разновозрастных интрузий наибольшими показаниями отбиваются более молодые по сравнению с древними. Кроме того, разные фации одного и того же интрузивного массива могут отмечаться также различными показаниями [31.2]. Из осадочных пород наибольшими показаниями отмечаются глинистые породы, а наименьшими — химически чистые осадки: известняки, доломиты, кварцевые пески, каменная соль и др.

Эти различия в показаниях интенсивности регистрируемого гамма-излучения геофизики и геологи учитывают при геологическом картировании. Гамма-спектрометрия позволяет более точно подразделять породы по преобладающим содержаниям того или другого радиоактивного элемента.

Эффективность гамма-съемки тем выше, чем меньше мощность покровных отложений и больше выходов коренных пород на дневную поверхность. Контакты различных пород отбиваются тем лучше, чем сильнее разнятся эти породы по содержанию в них радиоактивных элементов.

Эффективность того или иного гамма-метода при решении этой задачи зависит от масштаба съемки. При исследовании больших площадей весьма рациональны мобильные методы (аэро- и автогамма-методы). Пешеходный гамма-метод применим лишь при крупномасштабном детальном картировании.

В работе [31.26] отмечается, что аэрогамма-съемка дает наилучшие результаты в том случае, если выполнена в более крупном масштабе по сравнению с наземным картированием. Метод аэрогамма-съемки весьма эффективен также при геологическом картировании в залесенных районах с широким развитием маломощного почвенного покрова, дешифрирование аэрофотоснимков и аэровизуальные наблюдения в которых весьма затруднены. Эффективность аэрогамма-съемки значительно возрастает, если она подкрепляется наземными гамма-методами.

Возможности применения аэрогамма-съемки проиллюстрируем на примере, взятом из работы [31.26]. На рис. 31-1 показан район с хорошей обнаженностью гранитного массива, выступающего в виде хребта в рельефе местности, и слабой депрессией юрско-меловых отложений. В результате сопоставления геологической и радиометрической карт можно: а) уточнить по изолинии 15 мкР/ч контакт гранитов среднего мезозоя (активностью 15—21 мкР/ч) с метаморфической толщей нижнего палеозоя (активностью 6—10 мкР/ч) и, таким образом, четко ограничить массив гранитоидов (участок А); б) дифференцировать гранитный массив, выделенный предположительно по геологическим данным как мезозойский, на два, по всей видимости, разновозрастных массива: мезозойский (15—18 мкР/ч) и палеозойский (6—10 мкР/ч); в) выделить среди гранитоидов (15—18 мкР/ч) пегматитовые жилы (21 мкР/ч), перспективные для поисков редкоземельных месторождений.

Применение при геологическом картировании гамма-спектрометров позволяет производить более качественную интерпретацию. Так, в работе [31.7] описаны результаты исследований с самолетным гамма-спектрометром на участке развития эффузивно-осадочной толщи со слабовсхолмленным рельефом. Участок работ был покрыт на 50—60% маломощными наносами со щебенкой подстилающих пород. Авторами работы [31.7] проводилось абсолютное определение содержания радия и тория в породах. Результаты этих исследований приведены на рис. 31-2. Эффузивные породы среднего состава по аэрорадиометрической съемке отбиваются повышенными значениями регистрируемого гамма-поля (до $11 \cdot 10^{-4}$% тория и $7 \cdot 10^{-4}$% радия в эквивалентах урана), а эффузивные породы основного состава — пониженными значениями гамма-поля ($4 \cdot 10^{-3}$% тория и $1{,}5 \cdot 10^{-4}$% радия в эквивалентах урана). Кристаллические сланцы и песчаники отмечаются промежуточными значениями гамма-поля.

Другие примеры применения гамма-спектрометрии для геологического картирования рассматриваются в работах [11.28, 31.6, 31.8, 31.9, 31.10, 31.11, 31.15, 31.21].

Помимо гамма-методов для геологического картирования используется и эманационная съемка [12.37]. Она наиболее эффективна в комплексе с другими геофизическими методами, например, с гамма-съемкой и магнитной съемкой.

В качестве примера рассмотрим эманационную съемку для геологического картирования одного из районов Западной Сибири (по А. Ф. Кондратенко [31.24]). Район сложен осадочно-метаморфизованными сланцами и известняками кембрийского возраста, прорванными гранитной интрузией. Эманационная съемка здесь проводилась совместно с магнитной (рис. 31-3) и геологическими наблюдениями. Гранитный массив оконтурен по изолинии 10 эман. По изолинии 20 эман можно выявить зону тектонических нарушений (отобранные образцы исследовались на радиоактивность; установлено, что по активности образцы в этой зоне и за ее пределами практически не различаются). На местности эта зона ничем характерным не выделяется: район закрыт курумами и задернован. Однако прослеженная зона вполне коррелируется с выявленной в северной части зоной тектонических наруше-

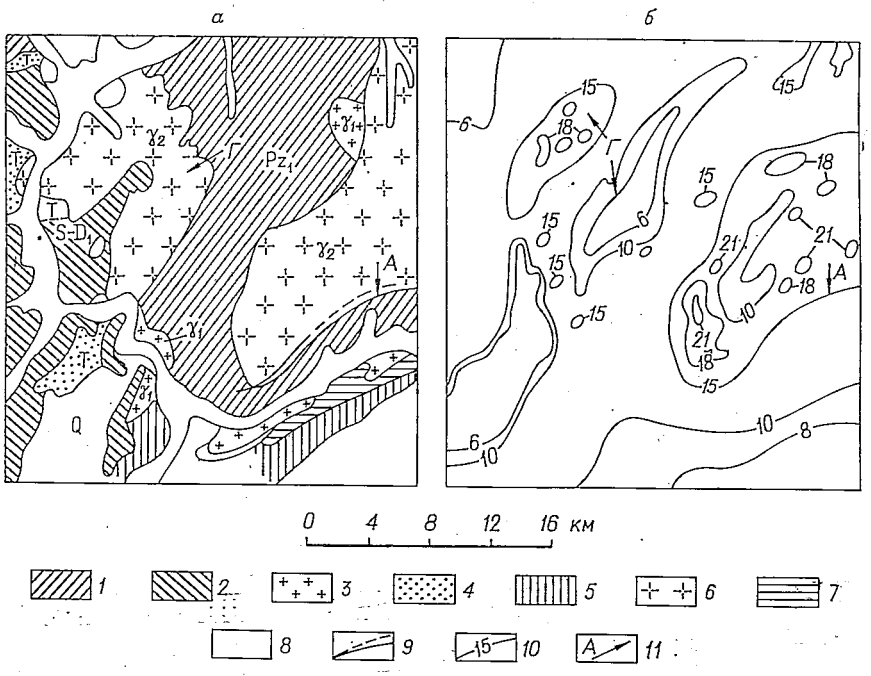


Рис. 31-1. Геологическая карта (*а*) и радиометрическая карта интенсивности гамма-поля (*б*).

1 — метаморфические сланцы Pz; *2* — метаморфические сланцы и гнейсы *S—D*; *3* — граниты Pz; *4* — песчаники и сланцы *T*; *5* — песчаники и алевролиты T_{1-2}; *6* — граниты Mz; *7* — угленосная свита C_{T_1}; *8* — четвертичные отложения; *9* — тектонические нарушения; *10* — интенсивности гамма-поля и их значения; *11* — сопоставляемые участки и их индексы.

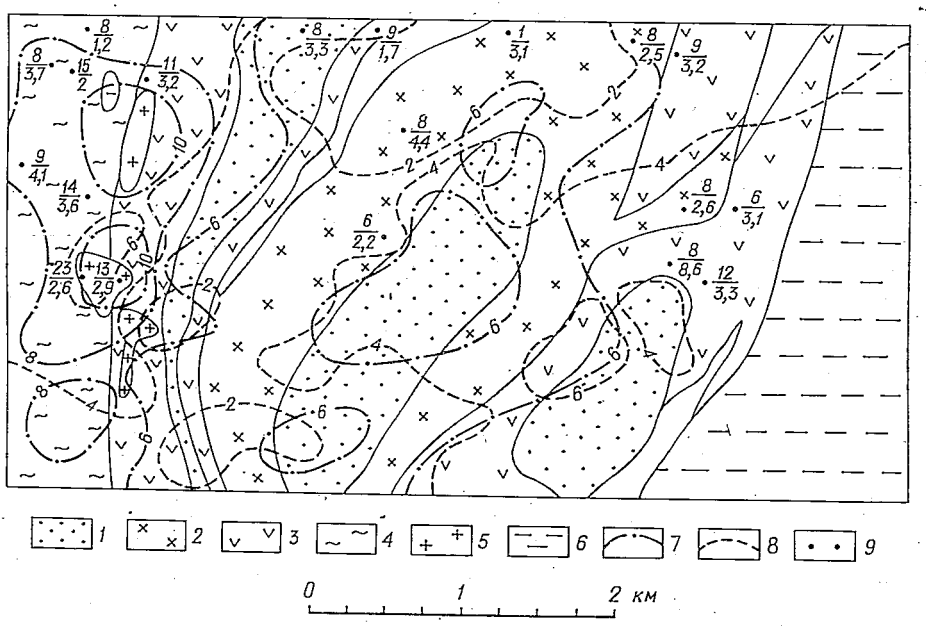


Рис. 31-2. Сопоставление результатов спектрометрической аэрогамма-съемки с геологической.

1 — красноцветные песчаники, *2* — эффузивные породы основного состава с прослоями песчаников, *3* — эффузивные породы среднего состава, *4* — песчаники, переслаивающиеся с эффузивами среднего состава, *5* — гранитные интрузии, *6* — сланцы и гнейсы архея, *7* — изолинии содержаний тория $n \cdot 10^{-4}$%; *8* — то же радия $n \cdot 10^{-4}$% эквивалентного урана, *9* — места отбора проб с результатами радиохимического анализа в единицах $n(\mathrm{Th})/n(\mathrm{Ra})$.

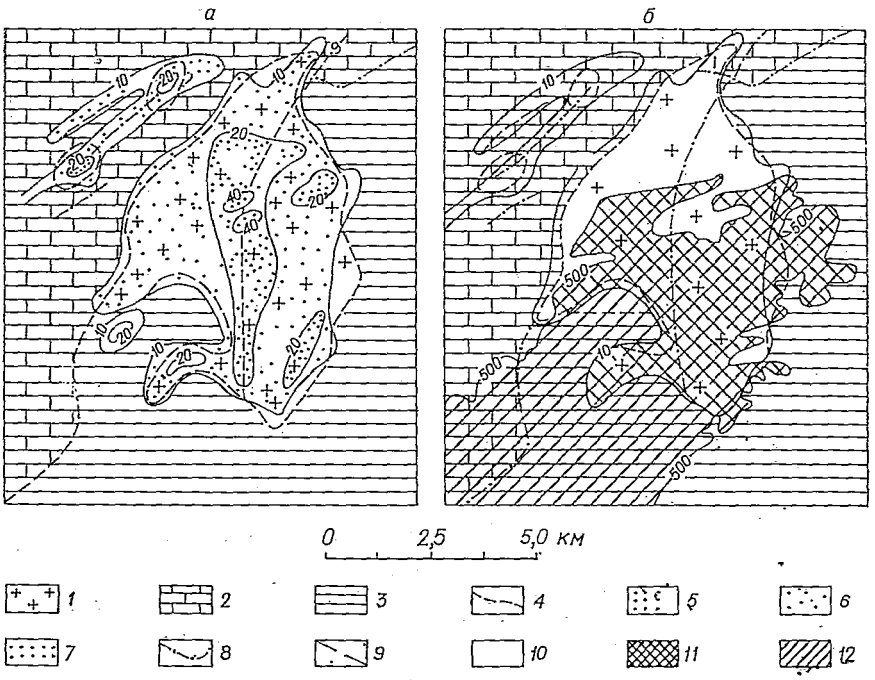


Рис. 31-3. Карта эманационной и магнитной съемок и геологических наблюдений.

а — карта изоэман, *б* — схематическая карта результатов эманационной и магнитной съемок; *1* — граниты, *2* — известняки, *3* — сланцы, *4* — геологические границы, *5* — зоны, оконтуренные изолинией 10 эман, *6* — то же — 20 эман, *7* — то же — 40 эман и выше, *8* — зоны тектонических нарушений по данным эманационной съемки, *9* — то же по геологическим данным, *10* — повышенные концентрации эманации и низкое магнитное поле, *11* — повышенные концентрации эманации(более 10 эман) и повышенное магнитное поле (более 500 γ), *12* — пониженные концентрации эманаций (менее 10 эман) и повышенное магнитное поле.

ний. Магнитная съемка позволила установить наличие пологого падения интрузии под осадочную толщу в юго-западной части района работ. В [31.24] обсуждаются также и другие примеры применения эманационной съемки для геологического картирования.

В работе [31.13] показана возможность применения эманационной съемки для картирования метаморфизованных графитизированных пород, залегающих среди гранито-гнейсов и слюдистых сланцев (на примере районов восточного склона Среднего Урала). На фоне указанных пород графитизированные породы выделяются весьма высокими концентрациями эманаций радона, превышающими в 18 раз его концентрации в гранито-гнейсах и слюдистых сланцах. Обычной же гамма-съемкой эти породы практически не различаются. Высокие концентрации радона в породах графитизированных пород обусловлены исключительно их высокой эманирующей способностью.

Весьма эффективно применение эманационной съемки при обнаружении зон тектонических нарушений (разломов, трещин, сбросов и т. п.), скрытых под наносами небольшой мощности. Выявление этих зон важно с точки зрения поисков различных полезных ископаемых (полиметаллов, редких металлов и т. д.), которые бывают связаны с зонами нарушений [31.24, 31.31]. Подобного рода аномалии наблюдаются также над участками разрушенных гранитных пород с кларковыми содержаниями радиоактивных элементов. Однако на профилях эманационной съемки эти участки выделяются, как правило, плавными повышениями концентрации эманаций в отличие от резко выраженных максимумов, связанных с зонами тектонических нарушений. Величина же абсолютных максимумов в том и другом случаях зависит как от степени разрушен-

ности пород, так и от мощности слоя наносов. По площади аномалии над зонами тектонических нарушений имеют обычно вытянутую форму, а аномалии над разрушенными телами — чаще всего овальную и близкую к ней. Примеры разделения аномалий подобного рода приведены в работе [31.31]. Вопросы применения ЭС для выявления зон тектонических нарушений рассматриваются также в [10.14, 31.17, 31.34, 31.35, 31.36].

Для трассирования зон тектонических нарушений находят применение еще автогамма-съемка [31.1, 31.15] и аэрогамма-съемка [31.37]. В США автогамма-съемка широко используется для геологического картирования и выявления зон тектонических нарушений, перспективных с точки зрения поисков некоторых видов полезных ископаемых. В качестве индикаторов излучения служат ионизационные камеры больших размеров (объемом порядка 350 л, заполненным инертным газом, находящимся под давлением до 30 атм) [31.39 31.40]. Сбросы на профилях автогамма-съемки выделяются резкими максимальными значениями интенсивности регистрируемого гамма-излучения. Повышение интенсивности гамма-излучения над сбросами обусловлено более интенсивным (по сравнению с окружающими породами) выделением эманаций радона в атмосферу [31.16]. Продукты распада эманаций являются, как уже неоднократно отмечалось, интенсивными гамма-излучателями, что и приводит к увеличению интенсивности регистрируемого гамма-излучения над зонами дробления пород.

Зоны тектонических нарушений автогамма-съемкой весьма эффективно могут фиксироваться сцинтилляционными счетчиками интенсиметрического и гамма-спектрометрического типов.

Радиометрическая съемка может применяться не только для картирования горных пород, выходящих на дневную поверхность, но и отложений, залегающих на дне моря [11.47, 31.3, 31.19, 31.27].

Наземной гамма-съемкой и гамма-каротажем на Южном Урале (рис. 31-4 [10.11]) при детальных поисковых работах выявлены дайки кварцевых сиенит-порфиров, интересных с точки зрения присутствия в них редких элементов. Они отчетливо выделяются на фоне окружающих (вмещающих) пород.

ГК может использоваться для выявления по разрезам скважин зон тектонических нарушений [35.15].

Вопросы применения радиометрической съемки для геологического картирования рассматриваются в работах [10.14, 31.4, 31.5, 31.14, 31.18, 31.22, 31.25, 31.28, 31.29, 31.30, 31.32, 31.33, 31.38 и др.].

Итак, применение гамма-съемки при геологическом картировании позволяет решать следующие основные задачи:

1. Уточнять контакты различных пород друг с другом.
2. Выделять и расчленять породы одного типа в породах другого типа, а также интрузии по их составу и возрасту.
3. Выявлять зоны тектонических нарушений в основном дезъюнктивного характера.
4. Уточнять основные структуры района.

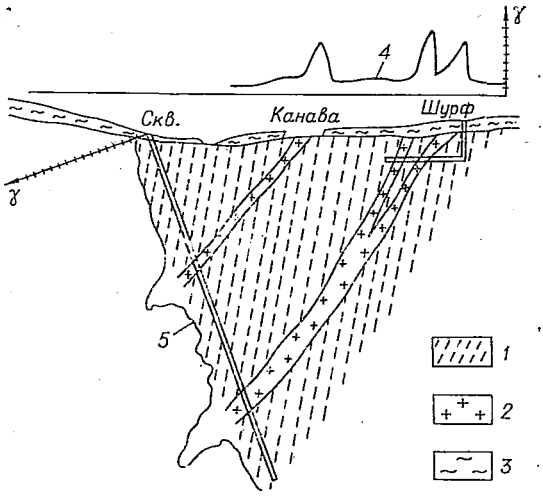


Рис. 31-4. Результаты выявления даек кварцевых сиенит-порфиров гамма-съемкой и гамма-каротажем.
1 — гнейсы биотитовые, *2* — кварцевые сиенит-порфиры, *3* — наносы, *4* — кривая наземной гамма-съемки, *5* — кривая гамма-каротажа.

5. Интерполировать и экстраполировать геологические контуры, а также увязывать съемки соседних планшетов.

6. Вести поиски различных полезных ископаемых.

В качестве других методов для решения этих задач выгодно использовать различные нейтронные и фотонейтронный (по бериллию) методы. Однако в этом направлении необходимы дальнейшие исследования.

Выявление рудных тел, залегающих между дневной поверхностью и горной выработкой или скважиной, по аномальным значениям плотностей может производиться по регистрации излучения космической радиации (см. § 3 гл. 13).

§ 2. Составление геологических разрезов

Для литологического расчленения разрезов и их корреляции применяется следующий комплекс методов: ГК, ГГК-п, ННК и др. С помощью ГК породы расчленяются по их естественной радиоактивности. На диаграммах ГК четко выделяются глинистые разности (по максимумам) и известняки, доломиты и т. д. (по минимумам) [31.23 и др.]. ГГК-п дает дополнительную информацию в соответствии с изменениями плотностных характеристик пород, а ННК и интенсиметрический НГК — по изменению их водородсодержания. С помощью спектрометрического НГК расчленение пород дается по вариациям в них породообразующих элементов. Из табл. 31-1 видно, что наиболее высоким сечением захвата тепловых нейтронов обладает водород, затем идут калий, железо и натрий. Для кислорода характерно весьма низкое сечение радиационного захвата тепловых нейтронов, поэтому его определение следует вести не по СНГК, а по СНГК′ (по гамма-излучению с энергией 6,1 МэВ). Для расчленения пород по калию эффективен комплекс методов СГК и СНГК. Другие породообразующие элементы проще выявлять по СНГК. Так, в осадочных разрезах можно четко установить кремний и кальций (см. рис. 24-13 и 24-14). При регистрации гамма-излучения в области

Таблица 31-1

Основные породообразующие элементы и их свойства по отношению к радиационному захвату тепловых нейтронов

Элемент	Среднее содержание в земной коре, вес. %	Сечение захвата нейтронов, барн	Массовое макроскопическое сечение, $см^2/г$	Энергия наиболее характерных линий гамма-излучения, МэВ (интенсивность 1 гамма-кванта на 100 нейтронов)
Кислород . .	49,13	0,0012	$4,6 \cdot 10^{-6}$	—
Кремний . . .	26,00	0,13	0,003	6,4(9); 4,93(60); 3,54(47) и др.
Алюминий . .	7,45	0,23	0,005	7,72(35); 4,79(9); 3,88(8); 3,02(15) и др.
Железо . . .	4,20	2,53	0,027	7,64(31,5); 6,03(7,9); 5,92(8,7) и др.
Кальций . . .	3,25	0,43	0,006	6,41(22); 4,42(12,3); 2,0(12,7); 1,94(39) и др.
Натрий . . .	2,40	0,515	0,014	6,4(22); 3,985(17,2); 3,56(18); 3,1(9,5) и др.
Калий	2,35	1,97	0,030	7,76(4,4); 5,73(11); 2,06(9); 1,6(13); 0,77(26) и др.
Магний . . .	2,35	0,063	0,002	8,15(3); 3,918(47); 2,816(24) и др.
Водород . . .	1,00	0,33	0,198	2,23(100
Остальные . .	1,87	—	—	

энергии 5—6 МэВ интенсивность измеряемого излучения для известняков и песчано-глинистых отложений может меняться на 50%.

В качестве примера расчленения разреза по СНГК могут служить результаты, приведенные на рис. 31-5 [24.34]. Разрез, как видим, сложен из роговиков и диоритов. В состав роговиков в основном входит кислород и кремний, а в состав диоритов — кислород, кремний, натрий, кальций, алюминий и железо. Наиболее отчетливо роговики от диоритов отличаются по СНГК с регистрацией излучения в диапазоне 7,3—7,9 МэВ, т. е. обусловленного содержанием в них железа и алюминия. Помимо, этого, роговики выделяются и по ГГК-п.

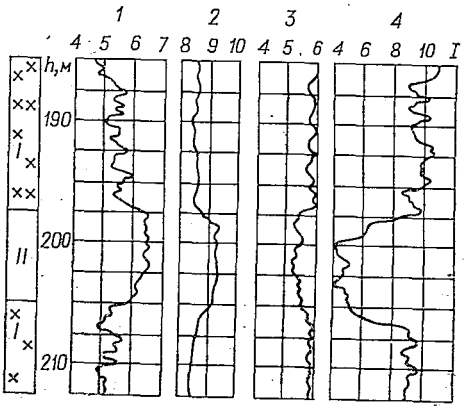


Рис. 31-5. Кривые ГГК-п и НГК одного из разрезов скважины, сложенного диоритами (I) и роговиками (II) по А. А. Федорову и др.

1 — ГГК-п, источник кобальт-60; 2 и 3 — НГК, интегральный спектр при уровне дискриминации соответственно 0,1 и 4,5 МэВ; 4 — СНГК (при измерении спектра в диапазоне энергий 7,3—7,9 МэВ).

Кривые *2, 3* и *4* получены при использовании полоний-бериллиевого источника с выходом $2 \cdot 10^5$ нейтрон/с.

Методом СНГК можно также четко расчленять изверженные породы на кислые, средние и основные [24.39]. Эта задача успешно решается также с помощью метода ГК.

Метод СНГК привлекается и для выявления в породах некоторых элементов за обсадной колонной [19.175].

Указанный комплекс методов радиоактивного каротажа широко используется для составления разрезов и структурных карт в пределах отдельных геологических участков [12.25, 12.28]. Производится увязка (корреляция) кривых РК и других методов по различным скважинам. Выделяются отдельные наиболее характерные участки пород — опорные горизонты. Иногда весьма отчетливо на кривых РК и других видны отдельные стратиграфические горизонты или зоны размыва. Такие маркирующие горизонты — реперы весьма ценны для увязывания разрезов монотонных толщ карбонатных и других пород.

Для расчленения и корреляции рыхлых отложений глубиной не свыше 25 м широкое распространение получили пенетрационнокаротажные методы: ГК, ННК, ГГК-п [19.78, 19.79]. Существенную помощь при этом, естественно, может оказать и метод СНГК.

§ 3. О возможности прогнозирования землетрясений

И. А. Лучиным [36.12] и Б. З. Мавашевым и В. И. Уломовым [36.13, 36.14] установлено, что перед началом землетрясений вблизи их очагов в поры и омывающие их воды начинает интенсивно поступать эманация радона. Такое влияние зафиксировано в Ташкенте, Тюпском районе Киргизии и др. Связано оно с тем, что в сейсмически активных районах еще задолго до землетрясений начинается деформация горных пород, приводящая к разрушению минералов и повышению пористости пород. По капиллярам от очага землетрясения к поверхности земли начинает интенсивно распространяться эманация, которая позднее попадает в водоносные пласты. В пробах воды при этом с помощью эманометров фиксируется повышение эманации перед началом землетрясения. В процессе землетрясения происходит встряска пород, капиллярная связь нарушается, и поступление эманации в водоносные пласты резко снижается.

Глава 32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ, ВЛАЖНОСТИ И ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. Определение плотности

Для определения плотности грунтов и горных пород на месте залегания применяются два метода: ГГМ-п (см. гл. 19) и ГМп-п (см. гл. 18). Плотность образцов горных пород и грунтов устанавливается с помощью гамма-просвечивающих гамма-плотномеров (см. рис. 18-2) с относительной погрешностью 1%.

Плотность горных пород и грунтов на дневной поверхности и в стенках горных выработок устанавливается приставными плотномерами с точностью 1—2% (см. § 3 гл. 19 [32.3 и др.]. Для скоростных определений плотностей по маршрутам и профилям съемки применяется автомобильный ГГМ-п (см. § 4 гл. 19). С помощью диффузионных плотномеров плотность пород фиксируется с точностью 4—6%. Более высокая точность может быть получена только при работе с двухлучевыми автомобильными плотномерами.

Плотности грунтов, почв и других рыхлых сред с точностью 1—2% на глубинах не свыше 1,5 м определяют по ГМп-п (см. § 2 гл. 18). Наиболее эффективно при помощи этого метода можно устанавливать плотности грунтов на глубине до 0,5 м при задавливании в грунт штыря с источником; измерение интенсивности излучения осуществляется двумя детекторами, расположенными симметрично относительно штыря (см. рис. 18-7, *в*).

Плотность грунтов на глубинах свыше 1 м и до 25 м определяют с помощью пенетрационного ГГК-п с относительной точностью примерно 1,5% и абсолютной —0,02—0,03 г/см³ [19.78, 19.79, 19.177].

Плотности горных пород в скважинах с нормальным состоянием стенок с точностью 1,5—2% можно регистрировать однозондовыми плотномерами с прижимными устройствами (см. § 6 гл. 19). Определение плотностей пород в кавернозных скважинах ведется однолучевыми плотномерами (см. рис. 19-21) или приборами с дополнительным источником (см. рис. 19-30). Для определения плотностей горных пород и руд с высоким содержанием радиоактивных элементов привлекается двухзондовая методика с использованием однозондовых плотномеров с моторчиком, необходимым для изменений размеров зонда в процессе каротажа (см. рис. 19-27).

При наличии в скважинах глинистой корки толщиной не свыше 13 мм плотность горных пород с относительной погрешностью 1,5—2% необходимо определять при помощи двухзондовых плотномеров (см. рис. 19-31 и 19-32). Измерения плотностей горных пород в скважинах со сложным состоянием следует вести двухлучевыми гамма- гамма-плотномерами (см. рис. 19-42; относительная точность определений ~3% с исключением ближней (промежуточной) зоны толщиной 3—5 см в зависимости от параметров прибора. В принципе на их основе могут быть созданы приборы для изучения обсаженных скважин [19.63].

Результаты сопоставления данных по определению плотностей горных пород с помощью приборов РГП-1 и ДГГП-120 на одной из скважин диаметром $9^1/_2''$ (243 мм) показаны на рис. 32-1. Измерения с прибором РГП-1 велись с источником цезий-137 активностью 71,5 мг·экв радия на скорости 210 м/ч ($\tau=8$ с), а прибором ДГГП — с источником кобальт-60 активностью 30 мг·экв радия на скорости 110 м/ч ($\tau=16$ с). Плотность пород, по данным прибора РГП-1, определяется по палетке, показанной на рис. 19-33. С помощью отградуированного прибора ДГГП плотность горных пород записывается на диаграмму непосредственно в абсолютных значениях.

В геологическом отношении исследованный участок скважины представлен однородной карбонатной толщей с плотностью пород 2,60 г/см³. Для отдельных участков она понижается до 2,39 г/см³ за счет сильной трещиноватости. Так, зона пониженной плотности (от 2,45 до 2,32 г/см³) отмечается на глубине от 370 до 380 м. Трещиноватые участки четко выявляются на глубине 414 м (ρ=2,48 г/см³); 420 м (ρ=2,42 г/см³); 425—428 м (ρ=2,50 г/см³) и 441—446 м (ρ=2,52 г/см³).

Воспроизводимость результатов проверялась по данным записи повторных кривых (пунктир). Приборы градуировались только для необсаженной части скважины. Поэтому измерения велись на глубине от 335 м и ниже. Повторные данные для прибора РГП-1 можно сопоставлять лишь для интервала 338—346 м, а для прибора ДГГП-120 — для интервала 338—400 м. По диаграммам видно, что повторные данные удовлетворительно согласуются с первичной записью. Максимальные расхождения получаются на кавернах: для прибора ДГГП они достигают 0,12 г/см³, а для прибора РГП-1 — 0,17 г/см³.

Для расчета по формуле (7-44) средних отклонений первичных замеров от вторичных в случае прибора ДГГП было произведено 125 сопоставлений плотностей, а для прибора РГП-1—21 сопоставление. Это связано с различной протяженностью опробованных интервалов. В результате средняя абсолютная ошибка сопоставлений для прибора ДГГП получается равной 0,024 г/см³, а для прибора РГП-1 — 0,06 г/см³. Эти значения отвечают относительным погрешностям, соответственно равным примерно 1 и 2,5%. При большем сопоставлении данных для прибора РГП-1, несомненно, получилась бы значительно меньшая ошибка измерений.

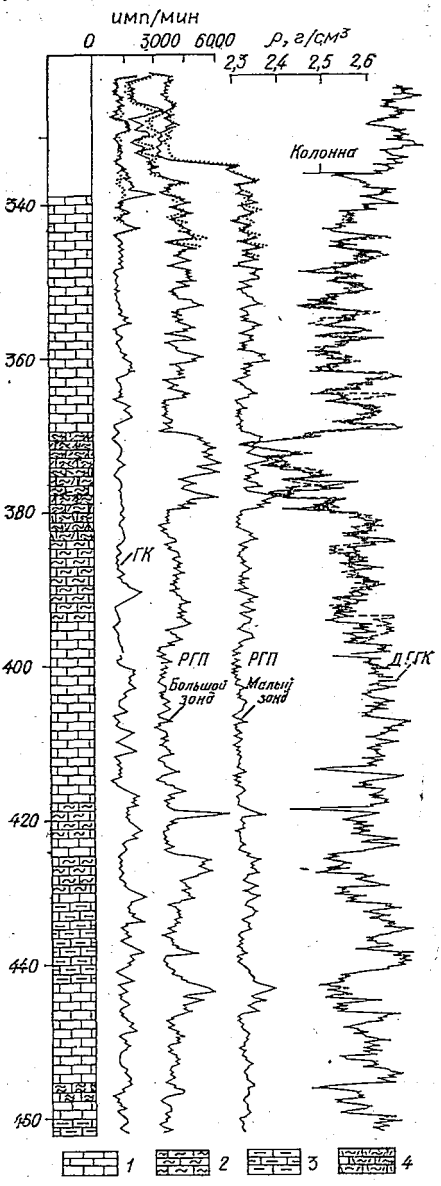


Рис. 32-1. Диаграммы ГК, $ГГК_1$ и $ГГК_2$, записанные с помощью прибора РГП-1, и ДГГК, записанная с помощью прибора диаметром 120 мм (ДГГП-120), на одной из скважин Саратовского Поволжья.

1 — известняки, *2* — трещиноватые известняки, *3* — глинистые известняки, *4* — высокопористые известняки.

В общем случае с помощью приборов РГП-1 плотность пород можно определять с меньшими погрешностями, поскольку на их показания из мешающих факторов в данном случае оказывает влияние только глинистая корка, а на приборы ДГГК, регистрирующие многократно рассеянное излучение,— корка и буровой раствор. К тому же приборы РГП-1 оборудованы секторными коллиматорами, обеспечивающими облучение породы и прием рассеянного излучения только из породы. Тем не менее возможности применения приборов РГП-1 ограничиваются скважинами большого диаметра (~200—

300 мм). Для изучения скважин меньшего диаметра необходимы другие приборы. В качестве таких приборов, в частности, можно использовать приборы ДГГП. Так, уже в настоящее время установлено, что приборы ДГГП в виду отсутствия на них прижимных пружин могут найти применение для изучения скважин с небольшим зазором (3—5 см) между прибором и породой (см. табл. 19-1). В первую очередь они могут применяться для изучения рудных и углеразведочных скважин [36.15].

Для изучения нефтяных скважин приборы ДГГП необходимо делать большого диаметра, чтобы зазор между прибором и породой не выходил за определенные пределы. Этого можно достичь также с помощью приборов ДГГП, оборудованных металлическими центраторами с коллимационными отверстиями, совмещаемыми с соответствующими коллиматорами глубинных приборов.

В последнее время для определения плотностей горных пород все шире начинает привлекаться метод НГГК (см. стр. 77). Однако и в этом направлении требуется провести целый ряд методических исследований для разработки специальной аппаратуры, упоминаемой, в частности, в § 3 этой главы.

§ 2. Определение влажности

Влажность проб грунтов с помощью просвечивающих установок (см. рис. 18-1 и рис. 18-2) можно определять с абсолютной погрешностью 0,2—0,3% (см. п. 4 § 1 гл. 18).

Влажность порошковых проб определяют с помощью различных нейтронных методов. При отсутствии в пробах сильно поглощающих элементов измерения ведут по методике ННМ-т (см. § 1 гл. 22). Влажность проб, содержащих элементы с высокими сечениями захвата тепловых нейтронов, определяют по методике ННМ-б (см. § 1 гл. 22) или НПМ (см. § 1 гл. 21.).

Для определения влажности в поверхностных отложениях привлекаются нейтронные методы [19.65, 19.79, 32.6] с использованием приставных влагомеров (см. рис. 22-7). Порог чувствительности может быть равным 1—2%, абсолютная точность — 0,5—1%. При скоростной съемке с помощью автомобильной методики влажность поверхностных отложений можно определять с абсолютной точностью не свыше 1—1,5% (см. § 4 гл. 22).

С более низкой точностью измерять влажность поверхностных отложений можно по ослаблению излучения естественных радиоактивных элементов, содержащихся в горных породах [11.28, 32.5, 32.7], с помощью как переносных радиометров, так автомобильной и самолетной съемок. Наилучшие результаты получаются при спектрометрических измерениях. Аэрогамма-съемка используется также для определения толщины снежного покрова.

Для определения влажности грунтов на глубине не свыше 6 м применяются приборы, основанные на принципе ННМ (см. § 5—7 гл. 22) и НГМ-Cd (см. п. 1 § 2 гл. 24). При отсутствии зазора между прибором и породой влажность грунтов по ННМ в идеальном случае измеряют с абсолютной точностью 0,5—1%, по методике НГК-Cd в диапазоне от 2,4 до 40% — с абсолютной точностью ±2% (с помощью прибора НИВ-1 и др.).

Влажность грунтов с неменяющейся плотностью на глубинах не свыше 1,5 м определяют также по методике ГМп-п с помощью наклонно вводимых труб (см. рис. 18-8 и рис. 18-9). Абсолютная погрешность измерений достигает 1—2%.

Для определения влажности грунтов на глубинах до 25 м применяются пенетрационные методики ННК-т и ГГК-п [19.78, 19.79, 79.177]. Абсолютная погрешность измерений по ННК-т не выходит за пределы 1,5% при $m<30\%$ и 4% — при $m>30\%$. Влажность пород ниже

уровня грунтовых вод по ГГК-п определяется с абсолютной точностью 0,02 г/см^3 (~0,5%).

Для одновременного определения плотности и влажности грунтов можно комбинировать методы ГГМ-п и ННМ-т при работе с прибором, оборудованным одним радий-бериллиевым источником и одним сцинтилляционным детектором. Раздельная регистрация гамма-квантов и тепловых нейтронов при этом может осуществляться, например, при помощи кристалла йодистого натрия, окруженного слоем бора. Однако такой прибор необходимо оборудовать спектрометром (см. § 9 гл. 5). Излучение в диапазоне 150—350 кэВ используется для определения плотности пород, а излучение с энергией 479 кэВ, возникающее при захвате бором нейтронов,— влажности грунтов.

§ 3. Определение пористости

Для определения коэффициента пористости кернов в лабораторных условиях начинает привлекаться метод ГГМ-п (см. § 2 гл. 19). Однако эта задача может решаться и с помощью ГМп-п (см. § 1 гл. 18). Помимо этого коэффициент пористости кернов может быть установлен по результатам измерения коэффициента диффузии пород по методике ИННМ-т (см. п. 2 § 2 гл. 29).

Для определения пористости горных пород по разрезам скважин в основном применяются различные нейтронные методы: ННК (см. п. 2 § 7 гл. 22), НГК (см. п. 2 § 3 гл. 24) и НГК-Cd (см. п. 2 § 3 гл. 24). Эти методы применительно к изучению карбонатных разрезов рассматриваются в работе [32.2]. Для определения пористости песчано-глинистых отложений привлекается комплекс методов ННК, ГГК-п, ГК и ПС [32.4], а в последнее время — импульсные нейтронные методы ИННК и ИНГК [32.9].

Результаты применения вышеперечисленных методов для решения этой задачи сведены в табл. 32-1.

Методы ГГК-п выгодно применять для определения пористости песчано-глинистых отложений, а нейтронные — карбонатных. Методы НГК и особенно НГК-Cd используются при этом для изучения пород с пористостью от 5% и выше. Методы ННК-т и ННК-н, наоборот,— для изучения плотных низкопористых карбонатных пород соответственно с низкой (меньше 50 г/л) и высокой (свыше 50 г/л) минерализацией. Так, для диапазона пористости 1—10% показания ННК-т на зонде 60 см меняются в 3 раза, а показания НГК на том же размере зонда — всего лишь в 1,7 раза [17.13]. Однако метод ННК-т в обычной модификации очень чувствителен к влиянию глинистой корки и неровностям стенок скважин. Поэтому при исследованиях скважин со сложным состоянием наилучшие результаты получаются при работе с двухзондовой аппаратурой ННК с измерением отношения скоростей счета. Особенно эффективен этот метод при измерениях на больших размерах зондов. Однако при этом необходимо значительно увеличивать активность применяемого нейтронного источника.

Методы ННК-т и ННК-н могут также применяться и для определения пористости песчанистых отложений. Однако в этом случае замеры по ННК необходимо комплексировать с методом ГК и вводить поправки за счет изменения глинистости пород. Методы НГК и НГК-Cd в таких разрезах обладают значительно худшей дифференциацией по сравнению с ННК. Например, в работе [17.13] показано, что при изучении пористости пород в диапазоне 15—40% показания НГК на зонде 60 см меняются в 1,7 раза, а показания ННК-т на зонде 50 см — в 3,5 раза.

Для изучения пористости пластов с неизвестной литологией привлекается комплекс ГГК-п, ННК и ГК, см. § 7 гл. 22.

Таблица 32-1

Сравнительные данные по определению пористости нефтеносных и водоносных коллекторов методами ядерного каротажа

Метод	Тип разреза	Диапазон пористости m, %	Точность измерений, %	Примечание
ОГГК-п	Песчано-глинистый	$\geqslant 5$	2—3 абс.	Глинистая корка толщиной $\leqslant 6$ мм
ГГК-п на двух зондах	То же	$\geqslant 3$	1—2 абс.	То же $\leqslant 13$ мм
ДГГК-п	» »	$\geqslant 3$	3—5 абс.	С исключением ближней зоны до 3—4 см
ННК-т — на зонде 40—50 см в комплексе с ГК (при наличии глинистости в пластах)	То же при минерализации пластовых вод <50 г/л	$\geqslant 2$	1—2 отн.	Глинистая корка толщиной 6 мм
ННК-н, то же	То же — 50 г/л	$\geqslant 2$		То же
ННК-т на зондах 50—60 см	Карбонатный	1—10	1—2 отн.	То же » »
ННК-т на двух зондах ($l_1=25$ и $l_2=40$ см) или трех ($l_1=25$, $l_2=40$ см, $l_3=60$ см)	»	$\geqslant 1$—2		При наличии глинистой корки примерно до 2 см измерения ведут по отношению скоростей счета
ННК-т на двух зондах ($l_1=70$ и $l_2=90$ см)	Песчаники, карбонаты	$\geqslant 1$—2	1 абс.	То же
НГК на зонде 60 см	$\geqslant 1$—2	5—20	15 отн.	При отсутствии глинистой корки
НГК-Cd на зонде 60 см	$\geqslant 1$—2	5—20	10 отн.	То же, дифференциация по сравнению с НГК возрастает на 30—40%
ИННК или ИНГК по замерам на двух зондах ИГК	Песчано-глинистый и карбонатный	$\geqslant 1$—2	2,5—5 отн.	

Определения пористости горных пород с помощью методов ИННК и ИНГК ведутся по замерам на двух зондах — с целью измерения коэффициента диффузии породы, связанного с ее пористостью (см. формулу (29-24)). По измерению среднего времени жизни тепловых нейтронов по ИННК или ИНГК на зонде размером 70 см устанавливается коэффициент насыщенности пластов при $\tau_в < \tau_н$ (см. формулу (29-25)). Подробнее этот вопрос рассматривается в § 3 гл. 33.

Одновременное определение плотности, пористости и насыщенности пластов можно осуществлять одним прибором, созданным на основе скважинного генератора нейтронов и двух спектрометрических гамма-детекторов. Измерять плотность при этом можно по регистрации мягкого гамма-излучения в интервале энергии 150—350 кэВ, обусловленного радиационным захватом нейтронов в породе. Измеряя отношения скоростей счета этого излучения с помощью двух заколлимированных детекторов, можно надеяться определять плотности пород в скважинах со сложным состоянием, т. е. с исключением влияния ближней зоны.

Эффект ИННК при этом может измеряться по гамма-излучению с энергией 479 кэВ (см. § 9 гл. 5), а эффект ИНГК — при регистрации

гамма-излучения с энергией свыше 1 МэВ (см. § 3 гл. 29). Пористость определяется по оценке коэффициента диффузии на двух зондах, а коэффициент насыщенности пласта при $\tau_в < \tau_н$ по величине среднего времени жизни тепловых нейтронов. С помощью этого прибора можно выявлять газонасыщенные коллекторы и отличать водоносные и нефтеносные коллекторы от пород, содержащих связанную воду (гипсы и глины) [19.63].

Методы ядерного каротажа в практике геофизических исследований в комплексе с другими методами привлекаются также для выявления водоносных горизонтов, необходимых для получения воды [32.1, 32.8]

Глава 33

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРЮЧИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

К горючим полезным ископаемым, как известно, относят нефть, газ, каменные угли и углистые сланцы. Ниже рассмотрим возможности ядерных методов при решении задач, связанных с поисками и разведкой этих полезных ископаемых.

§ 1. Поиски месторождений нефти и газа

Нефтяные и газовые залежи, как известно, приурочиваются к определенным тектоническим структурам (сводам поднятия и т. п.). Своды и крылья таких поднятий формируются из различных литологических разностей пород [33.1, 33.2, 33.13, 33.14], что проявляется даже на земной поверхности. Над сводами обычно фиксируется понижение гамма-поля на 20—30%, а на крыльях — увеличение его на 10—15% по сравнению с фоном окружающих пород. Таким образом, общий аномальный эффект может достигать 70%. Изменение интенсивности над сводом и крыльями структур в основном обусловливается изменением содержания элементов урано-радиевого ряда. Таким образом, с помощью поверхностной гамма-съемки, особенно самолетной, вертолетной и автомобильной, а также морской, можно выявлять геологические структуры, перспективные с точки зрения поисков месторождений нефти и газа. Наиболее эффективно при этом применение гамма-спектрометрии с регистрацией радиевой составляющей гамма-поля.

Ф. А. Алексеевым и др. [33.14] показано, что названные закономерности проявились для следующего количества изученных месторождений нефти и газа: 70% в Саратовском Поволжье, 60% в Башкирской АССР, 80% на западе Туркменской ССР и 80% в Азербайджанской ССР. Перспективные площади открыты в Канаде и США (Техас), и при бурении дали нефть.

Наличие тектонических сбросов, разломов и т. п. над площадями сводов приводит к нарушению указанных выше закономерностей — обычно к повышению гамма-поля.

Наиболее обстоятельно вопрос о поисках структур, перспективных на нефть и газ, рассматривается в работах [6.63, 6.64, 33.1, 33.13 и др.].

Методы ядерной геофизики весьма широко привлекаются также для изучения нефтяных и газовых скважин с целью решения разнообразных задач [1.14, 1.27, 6.63, 6.64, 12.5, 12.28, 12.34, 33.5, 22.70, 33.13, 33.15, 33.18 и др.].

Вопросы расчленения и корреляции разрезов нефтяных и газовых скважин рассмотрены нами в § 2 гл. 31, а вопросы определения плотности и пористости коллекторов — в гл. 32. Достаточно широко методы ядерного каротажа применяются для выявления контактов между нефтяными и водоносными пластами, а также газоносными, с одной стороны, и нефтеносными и водоносными — с другой. Однако прежде чем переходить к этому вопросу, заметим, что в нефтепромысловой геофизике для решения задач, связанных с изучением технического состояния скважин, гидроразрыва пластов и гидродинамики подземных вод, широко применяется метод изотопов, рассмотренный в § 3 гл. 30.

§ 2. Методика анализа проб нефтей

С помощью методов ядерного анализа в пробах нефтей можно определять содержание основных элементов: углерода, водорода, серы, азота и кислорода. О содержании их в нефтях см. в § 1 гл. 21. Вопрос об анализе в нефтях указанных элементов подробно рассмотрен в сборнике [19.63]. Кислород и азот в нефтях рационально определять нейтронным активационным анализом на быстрых нейтронах (НА-б) по реакциям $O^{16}(n, p)N^{16}$ и $N^{14}(n, 2n)N^{13}$. Азот-16 имеет период полураспада $T=7{,}35$с и испускает гамма-кванты с энергией 6,14 (69%) и 7,11 МэВ (5%). У азота-13 период полураспада $T=9{,}96$ мин, испускаются позитроны с энергией 1,2 МэВ, аннигиляция их приводит к образованию гамма-излучения с энергией 0,511 МэВ. Определение кислорода при этом осуществляется в начале цикла измерений, а азота — в конце.

Для определения кислорода проба объемом 7 см³ облучается в течение 15—30 с, переносится с помощью пневмопочты к детектору и измеряется такое же время по регистрации гамма-квантов с энергией 6,14 МэВ. При облучении проб в потоке 10^8 нейтр/см²·с достигнут порог чувствительности определения кислорода 0,001%, средняя абсолютная погрешность измерений 0,02%.

В связи с тем, что на определения азота влияют изменения содержания в пробе водорода, после оценки кислорода определяются водород и сера. Пренебрежение содержанием 1% азота в пробе ведет к ошибке определения водорода не более 0,0004% и к ошибке определения серы не свыше 0,02%.

Содержание водорода и серы в пробах нефтей толщиной 2—4 мм может быть определено по комбинации методов, основанных на поглощении бета-излучения (БМп) стронций-иттриевого источника и мягкого гамма-излучения (ГМп) изотопа железо-55. Концентрации этих элементов могут быть установлены из соотношений:

$$p_{\text{H}} = \frac{\Delta\mu_{CS}(a - b\Delta\Sigma_{SC}/\Delta\mu_{SC})}{\Delta\Sigma_{\text{HC}}\Delta\mu_{SC} + \Delta\Sigma_{SC}\Delta\mu_{\text{CH}}},$$

$$p_S = \frac{b}{\Delta\mu_{SC}} + \frac{\Delta\mu_{\text{CH}}\Delta\mu_{CS}(a - b\Delta\Sigma_{SC}/\Delta\mu_{SC})}{\Delta\Sigma_{\text{HC}}\Delta\mu_{SC} + \Delta\Sigma_{SC}\Delta\mu_{\text{CH}}},$$

$$a = \Delta\Sigma_{\Sigma C} - p_O\Delta\Sigma_{OC}; \quad b = \Delta\mu_{\Sigma C} - p_O\Delta\mu_{CO}.$$

Здесь p_O — концентрация кислорода в пробе; $\Delta\Sigma_{\Sigma c}=\Sigma-\Sigma_c$, Σ — суммарное сечение поглощения бета-лучей в пробе, отнесенное к ее весу (см²/г) и определяемое по замеру на эталоне; Σ_c — массовое макроскопическое сечение поглощения бета-излучения в углероде (см²/г); $\Delta\Sigma_{ij}$ — разность макроскопических сечений поглощения бета-лучей в пробе в i-ом и j-ом элементах; $\Delta\mu_{\Sigma C}=\mu_\Sigma-\mu_C$; μ_Σ — массовый суммарный коэффициент поглощения гамма-лучей в пробе, определяемый по замеру на эталоне; μ_c — массовый коэффициент поглощения гамма-излучения углеродом; $\Delta\mu_{ij}$ — разность массовых коэффициентов поглощения гамма-лучей i-ым и j-ым элементами.

Водород и сера определяются с абсолютной погрешностью 0,03%. Далее измеряется содержание азота в пробе объемом 50 см³. Облучение пробы для его определения рекомендуется проводить в кадмиевых кассетах с перегородками, чтобы исключать активацию на тепловых нейтронах ванадия, также содержащегося в нефти в заметных количествах. Порог чувствительности к определению азота по НА-б оценивается равным 0,08%, а абсолютная погрешность — 0,04% с учетом интерферирующей реакции на протонах отдачи $C^{13}(p,n)N^{13}$.

Содержание углерода в пробах при этом определяется по разностной методике

$$p_C = 100 - p_\Sigma,$$

где p_Σ — суммарное содержание в пробе всех остальных элементов. Углерод по этой методике измеряется с абсолютной погрешностью 0,12%.

Содержание микрокомпонентов в пробах нефтей может определяться с помощью активационных методов при облучении проб в каналах ядерного реактора и т. п. и измерении наведенной активности полупроводниковыми детекторами [19.63, 25.13].

§ 3. Разделение коллекторов по их водонефтегазонасыщению

Разделение коллекторов и отбивка между ними водонефтяного (ВНК) и газожидкостного (ГЖК) контактов в настоящее время решается лишь в случае минерализованных пластовых вод. На первом этапе исследований применялись методы ННК-т (см. гл. 20), НГК (см. гл. 24) и НАК (см. гл. 25). Однако с их помощью в наиболее благоприятном случае ВНК может отбиваться по величине эффекта не свыше 15—20% для ННК и НГК и — 40% для НАК. Велись исследования также по выявлению возможностей СНГК для решения этой задачи при измерении жесткого гамма-излучения хлора в области энергий 6—8 МэВ [12.34]. Кривые СНГК обладают гораздо лучшей дифференциацией по сравнению с кривыми интенсиметрического НГК. Так, в работе [12.28] показано, что по НГК ВНК отбивается по величине эффекта в 10—12%, а по СНГК (с регистрацией гамма-излучения с энергией $E_\gamma > 4$ МэВ и в диапазоне 5,5—6,5 МэВ) — по величине эффекта соответственно в 50 и 100%. С целью исключения влияния изменений плотности потока тепловых нейтронов на результаты определения хлора в пластовых водах Д. Д. Оуеном [24.58] предложено измерять отношение потока гамма-излучения радиационного захвата с помощью гамма-детектора и нейтронного детектора, расположенных один вблизи другого.

В настоящее время задача по отбивке ВНК для минерализованных пластовых вод успешно решается при помощи импульсных методов ИННК и ИНГК (см. гл. 29).

В случае, если нейтроны в скважине поглощаются быстрее, чем в пласте ($\tau_п > \tau_с$), при отбивке ВНК методом ИННК установлено следующее [29.23, 29.57]. При изучении однородных терригенных отложений с $m_п \geqslant 15\%$ в неперфорированных скважинах ВНК четко отбивается при минерализации пластовых вод свыше 150 г/л. Для пород с пористостью около 30% ВНК может отбиваться при минерализации вод от 60 г/л и выше. В перфорированных скважинах ВНК отбивается при минерализации пластовых вод от 100 г/л и выше (при условии, если зона проникновения имеет диаметр менее 70 см) [29.42]. В однородных по пористости терригенных пластах и неперфорированных скважинах ВНК фиксируется при минерализации пластовых вод порядка 30 г/л (при $m_п > 15\%$). Пласты с переменной пористостью свыше 10% в неперфорированных скважинах могут фиксироваться при

минерализации пластовых вод свыше 150 г/л. Однако для оценки пористости пород метод ИННК необходимо комплексировать с НГК. Доказана также принципиальная возможность отбивки ВНК в неперфорированных скважинах для карбонатных разрезов с мощностью пластов свыше 2 м в отсутствие зоны проникновения. Необходимо учитывать пористость карбонатов. Для этого метод ИННК комплексируется с НГК [29.35, 29.56]. Это справедливо в случае, если минерализация пластовых вод превышает 150 г/л. Если она ниже этой величины, то для определения ВНК помимо пористости (при $m_п < 15\%$) необходимо учитывать и химсостав горных пород. В работах [29.35, 29.56] показано, что в слабоглинистых карбонатах, не содержащих гипса и ангидрита, ВНК можно определять для пород пористостью более 10% с минерализацией 150—230 г/л, а для пород пористостью свыше 20% — при минерализации пластов от 70 до 120 г/л.

Если нейтроны в пласте поглощаются быстрее, чем в скважине ($\tau_п < \tau_с$), ВНК отбивать невозможно. Такой случай может наблюдаться при заполнении скважины пресной водой и минерализации пластовой жидкости 100 г/л для песчаников пористостью $m_п > 30\%$ и при минерализации 200 г/л при $m_п > 18\%$ [12.28]. Наличие небольших количеств хлористого натрия в скважинной жидкости переводит эту систему скважина — пласт в случай слабого поглощения ($\tau_п > \tau_с$).

Успешному решению этой задачи иногда мешают неоднородность пластов по пористости, изменение литологии разреза и особенно наличие зоны проникновения.

С помощью ИНГК, как уже отмечалось в п. 3 § 3 гл. 29, ВНК можно отбивать в низкопористых породах ($\sim 10\%$) при минерализации вод свыше 10—15 г/л.

Для определения ВНК в случае пресных вод нет еще разработанной методики. Эта задача может решаться с помощью ИНГК′ по измерению отношения интенсивности излучения углерода (4,43 МэВ) к интенсивности излучения кислорода (6,1 МэВ), возникающих в реакции $(n, n'\gamma)$ (см. п. 3 § 4 гл. 29). Содержание в нефти азота (до 1,7%), вступающего в реакцию (n, γ) с образованием жесткого излучения с энергией 10,83 МэВ, позволяет надеяться на возможность разработки методики СНГК или СИНГК для определения контакта нефти с пресной пластовой водой.

Ядерные методы привлекаются также для выявления газожидкостного кантакта (ГЖК) и, в частности, контакта газа с водой (ГВК) и нефтью (ГНК).

Я. Н. Басиным, Л. Б. Берманом [19.173] и др. для отбивки ГЖК используется комплекс методов НГК-Cd и ННК-т при измерении соответственно на зондах 70 и 40 см. Полученные результаты показаны на рис. 33-1. Выражены они в относительных единицах

$$N'_{нгк} = (N_x - N_в) : (N_{пл} - N_в),\ N'_{ннк} = (N_x - N_в) : (N_{пл} - N_в),$$

где N_x — показания НГК или ННК-т против исследуемого пласта; $N_в$ — то же в баке с водой или против больших каверн (в местах размытых глин); $N_{пл}$ — то же против плотных пород (ангидритов, известняков и т. д.).

Из рис. 33-1 видно, что показания для газоносных и водоносных пород значительно отличаются и ложатся на разные кривые. Большой разброс точек относительно кривой *2* обусловлен значительными вариациями пористости известняков (в пределах от 6 до 20%) по сравнению с песчаниками, пористость которых меняется в небольших пределах от 28 до 30%.

Разграничение пластов на водоносные (нефтеносные) и газоносные по НГК и ННК основано на различии чувствительности этих методов к плотности и водородсодержанию. Для повышения чувствительно-

сти НГК к изменениям плотности пород Я. Н. Басиным и др. [17.13] рекомендуется измерять мягкое рассеянное гамма-излучение радиационного захвата, т. е. измерение вести по методике НГГК на больших размерах зондов (порядка 70 см) при помощи сцинтилляционного счетчика. Изменение плотности пород за обсадной колонной на 0,01 г/см^3 ведет к изменению показаний НГГК на 3%. Комплекс методов НГГК и ННК при этом можно использовать для решения поставленной задачи при изучении песчано-глинистых высокопористых коллекторов. Вместо комплекса НГГК и ННК-т может применяться также и комплекс методов ДГГК-п (см. § 9 гл. 19) и ННК-т. В § 3 гл. 32 указывалось уже, что может быть создан прибор для одновременного определения плотности, пористости и насыщенности пород.

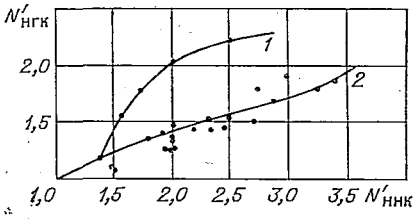


Рис. 33-1. Сопоставление показаний НГК-Cd и ННК-т (в усл. ед.) для газоносных и водоносных известняков при измерениях в скважине диаметром 247 мм (9^3/$_4$″), обсаженной колонной диаметром 152 мм (6″).

1 — кривая для газоносных песчаников пористостью 28—30%, *2* — кривая для водоносных известняков пористостью 6—20%.

В ряде случаев аналогичные графики могут строиться в виде зависимостей $N'_{НГК} = f(M_{ННК})$, где $M_{ННК}$ — отношение показаний ННК-т, измеренных на двух зондах различной длины. Внутреннее пространство между кривыми может быть заполнено изолиниями, соответствующими определенным значениям пористости пород [19.173].

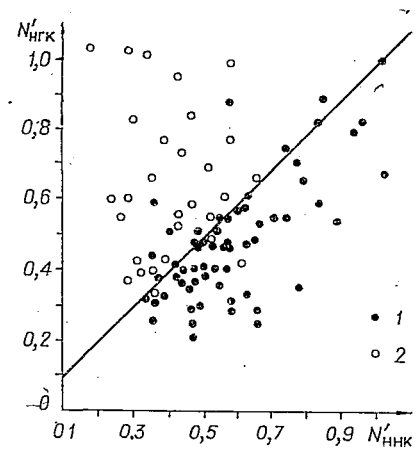


Рис. 33-2. Сопоставление показаний НГК-50 и ННК-т-30 в водоносных (*2*) и нефте- и газоносных (*1*) пластах (сплошная прямая соответствует величинам $N'_{НГК} = N'_{ННК}$).

В некоторых случаях на графиках $N'_{НГК} = f(N'_{ННК})$ нефтеносные и газоносные пласты от водоносных могут отличаться различным расположением групп точек (рис. 33-2) [17.13]. Для водоносных пластов в основном справедливо условие $N'_{НГК} > N'_{ННК}$, а для нефтеносных и газоносных — $N'_{НГК} \leqslant N_{ННК}$.

Разграничение пластов на водоносные, нефтеносные и газоносные может осуществляться с помощью комплекса методов ИННК, НГК и ГК [33.20].

Выделение высокогазоносных пластов в разрезах скважин может также производиться по методике двухзондового НГК [24.23] по приращению скоростей счета $\Delta N = N_с - N_б$, где $N_с$ соответствует среднему размеру зонда (35—40 см), $N_б$ — большому размеру зонда (70—80 см). Измерения велись с двухзондовым прибором НГК, в котором детектор для среднего зонда состоял из одного счетчика типа ВС-4, а для большого — из четырех счетчиков типа СИ-4Б.

Контакт между газом и водой отбивался по НГК-Cd (по разностным замерам) с источником, окруженным слоем борной кислоты и без борного окружения. В работе [24.5] показано, что контакт газ — вода при измерениях на зонде 45 см отбивается по расхождению кривых НГК-Cd на 5—7%.

Другие вопросы применения нейтронных методов с ампульными источниками для выявления газоносных коллекторов рассматриваются в работах [18.66, 22.78, 24.3, 24.6, 24.22, 24.25, 24.29, 29.78].

В последнее время для определения ГЖК все шире начинают использоваться импульсные нейтронные методы. Вопросы применения ИННК для решения этой задачи рассматриваются в п. 3 § 2 гл. 29.

Для отбивки контакта между нефтью и водой в стволе скважины привлекается метод ГМп-п (см. п. 5 § 2 гл. 18), а также НАК с ампульными источниками (см. п. 2 § 8 гл. 25) и нейтронными генераторами (см. п. 2 § 5 гл. 29), с помощью которых устанавливается не только контакт нефть — вода, но и скорость движения жидкости в стволе скважины и в пластах за обсадной колонной.

В промысловой геофизике нейтронные методы используются также для контроля за сооружением подземных газохранилищ [15.31, 18.66, 24.7, 24.45, 24.56, 33.18].

§ 4. Выявление угольных пластов и оценка их зольности

Для решения этой задачи применяется большой комплекс ядерных методов: ГК, ГГК-п, ГГК-с. ННК, НГК, ИНГК и др.

Угли наряду с другими породами органического происхождения содержат, как правило, наименьшие количества радиоактивных элементов и на кривых ГК отбиваются минимальными показаниями. Причем чем меньше зольность углей, тем более низкими показаниями ГК они отбиваются. Особенно четко на кривых ГК регистрируются пласты углей среди глинистых пород. Каменные угли, залегающие среди песчаников, также достаточно уверенно фиксируются минимальными значениями ГК. В качестве одного из примеров кривых ГК, полученных на одном из месторождений угля, может служить рис. 33-3[33.4]. Как видно из кривой ГК, все пласты угля отбиваются четкими минимумами. Песчаники в этом разрезе фиксируются более высокими значениями по сравнению с аргиллитами и сланцами. Зона дизъюнктивного нарушения отбивается резким максимумом, что связано с повышенными концентрациями эманации в трещинах пород. Метод ГК при этом достаточно уверенно позволяет регистрировать угольные пласты мощностью вплоть до 5 см и прослои породы в углях мощностью до 5—10 см. ГК привлекается также для оценки зольности углей с абсолютной точностью 1,5; 2,5 и 3,5% соответственно при зольности до 5; 10 и 15%.

Другие примеры применения ГК для решения поставленной задачи обстоятельно рассматриваются в книге И. А. Гаркаленко и др. [33.12] и других работах [33.6, 33.8, 33.11]. В работах [6.64, 33.8], в частности, отмечается, что пласты бурых углей на кривых ГК невозможно отличить от песчаников. Для некоторых типов углей, наоборот, присуща высокая радиоктивность. Поэтому метод ГК в этих и иных случаях следует сочетать с другими методами РК.

Низкая плотность углей (см. табл. 15-1) по сравнению с вмещающими породами позволяет при их выявлении, определении мощности, строения и изучении зольности использовать метод ГГК-п (см. гл. 19).

Количественные результаты могут быть получены лишь при работе с проградуированной аппаратурой. Одна из таких диаграмм ГГК-п приведена на рис. 33-4 [19.55]. Измерения велись прибором РК-38 с прижимным устройством. Источник в нем располагается в коллиматоре, а против детектора в свинцовом кожухе сделано окно шириной 12 мм и высотой 36 мм. Плотность углей в диапазоне 1,2—1,7 г/см^3 с помощью этого прибора можно определять с точностью 2% [33.19], а плотность вмещающих пород в диапазоне 1,9—2,3 г/см^3 с точностью 5—6%. По наличию линейной корреляционной связи между плотностью и зольностью углей по данным ГГК-п можно определять последнюю с абсолютной точностью 2,5% [33.19]. По этому вопросу см. также работы [19.99, 19.135, 19.169, 33.12].

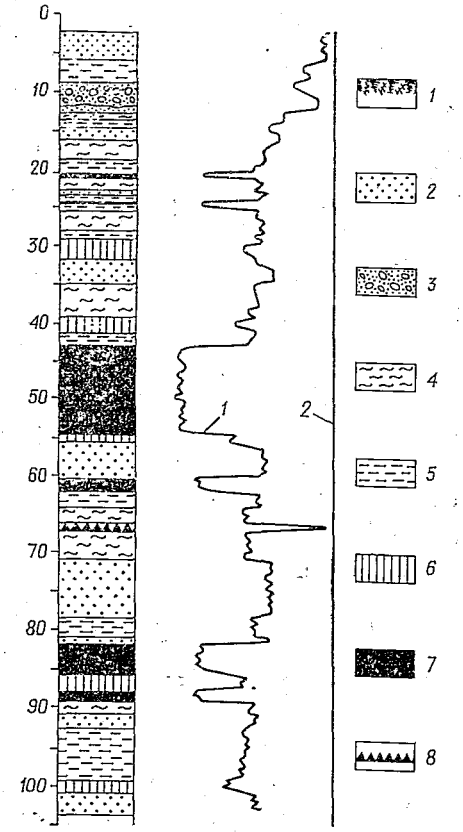


Рис. 33-3. Кривая ГК (*1*) по одной из скважин месторождения каменного угля; *2* — кривая натурального фона.

1 — почва, *2* — песчаники, *3* — конгломераты, *4* — аргиллиты, *5* — сланцы, *6* — углистые сланцы, *7* — угли, *8* — зоны тектонических нарушений.

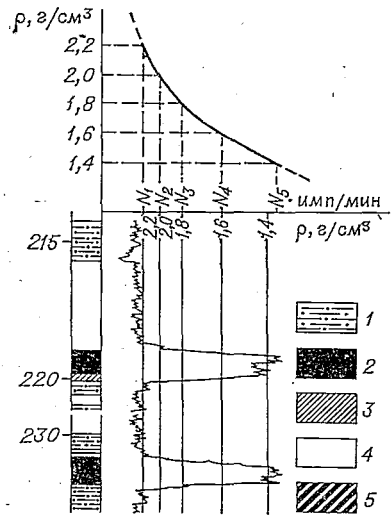


Рис. 33-4. Плотностная диаграмма ГГК-п, полученная на одной из углеразведочных скважин диаметром 120 мм (по А. А. Коржеву и И. А. Дунченко).

1 — алевролит, *2* — уголь, *3* — песчаник глинистый, *4* — аргиллит, *5* — аргиллит углистый.

В практике углеразведочной геофизики мощность и строение пластов можно значительно точнее определять с помощью ГГК-п по сравнению с методикой отбора керна. В частности, по измерениям в скважинах Челябинского угольного бассейна установлено, что по ГГК-п удается выделять в пластах угля в 2 раза больше прослоев породы, чем по методике отбора керна [19.62].

Метод ГГК-п применяется для выявления горючих сланцев [33.10] и изучения механического состояния горных пород и углей [19.70, 19.75, 19.140, 19.165, 33.16].

Методы ГГК-п и ГК в геофизической разведке применяются также в практике предупредительного контроля направленных скважин по наклонным пластам угля с целью их газификации [6.46, 19.72, 33.17].

Определение плотностей углей с помощью ДГГК-п рассматривается в п. 3 § 9 гл. 19.

При помощи ГГК-с с выносными зондовыми приборами с тулиевым источником и счетчиком МС-13 зольность бурых углей можно устанавливать с абсолютной точностью 2,1%, а зольность каменных углей при работе с источником селен-75 и тем же счетчиком — с абсолютной точностью 2—3%. При работе с одноканальной гамма-спектрометрической аппаратурой с выносным зондом зольность углей можно определять с абсолютной погрешностью 1,5—1,7%. При измерении же по методике спектральных отношений достигнута точность 1—1,2%. Результаты сопоставления различных модификаций ГГК-с показаны на рис. 20-24.

Наличие водорода в углях (см. п. 4 §7 гл. 22) позволяет для их выявления использовать методы ННК и НГК. Например, с помощью

СНГК зольность углей можно определять с абсолютной точностью 3% (см. п. 1 § 4 гл. 24).

И. И. Бредневым [33.3] показано, что с более высокой точностью зольность углей можно устанавливать с помощью НАК по активации алюминия. Относительная точность измерений при этом оценивается в 10%, т. е. зольность в интервале 10—50% может определяться с абсолютной точностью 1—5% соответственно.

Выявление углей может осуществляться также по методике ИНГК и ИНГК′. Однако в этом направлении необходим целый цикл исследований. Особого внимания заслуживает разработка методики ИНГК′, позволяющей непосредственно определять углерод по разрезам скважин (см. § 4. гл. 29).

Для определения зольности проб в настоящее время применяется ББМ (см. п. 1 § 3 гл. 15) и РРМ с ГГМ-с (см.п. 2 § 1 гл. 20).

Глава 34

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 1. Поиски и разведка месторождений борного сырья

Некоторые сведения о боре приводятся в § 1 гл. 23 и приложении 6.

Для поисков, разведки и анализа борного сырья в основном применяется метод ННМ (см. гл 23).

В лабораторных условиях анализ порошковых проб весом 50—100 г по ННМ-т можно вести с порогом чувствительности 0,02% (см. § 1 гл. 23), проб весом 2—3 кг с порогом чувствительности до 0,003%. Из-за самопоглощения бора его содержания в малых пробах можно определять до концентраций 6—10%. Анализ бора в более широком диапазоне концентраций (0,01—100%) можно вести по методике ННМ-р (см. п. 6 § 3 гл. 23). Анализ бора и штуфах ведется по методике ННМ-т (см. п. 2 § 1 гл. 23).

Для определения бора в коренных породах с поверхности созданы переносные и автомобильные приборы. Так, с помощью таких приборов, созданных в ГеоХИ АН СССР, бор можно определять в интервале 0,003—0,2% (см. § 5 и 6 гл. 23), а с помощью приставного прибора ИГиГ СО АН СССР в диапазоне от 0,2 до 7—8% в зависимости от типа месторождений (см. § 5 гл. 23).

При изучении разрезов сухих скважин с помощью метода ННК-т можно обнаружить бор примерно с 0,003—0,03% до 4—5%, а в заполненных водой скважинах — примерно от 0,03—0,1% до 1—1,5% (см. п. 1 § 7 гл. 23). Более высокие концентрации бора в разрезах скважин можно определять по методике ННК-р (см. § 8 гл. 23).

Для выявления борных пластов по разрезам скважин может применяться метод НГК — как для качественной, так и количественной интерпретации полученных результатов [24.33, 23.52]. Разрешающая способность НГК при этом в сильной степени зависит от изменения химического состава горных пород. Например, в работе [24.33] для выявления бороносных пород в соленосной толще применялась аппаратура НГК на газоразрядных счетчиках. Соленосные породы в основном были представлены каменной солью (NaCl) и сильвинитом (KCl), а сульфатные — гипсом ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Установлено, что

в сульфатных породах, содержащих к тому же связанную воду, по НГК можно выявлять пласты с содержанием до 1% бора (3% B_2O_2), а в соленосной толще — пласты с содержанием до 6% бора (18% B_2O_3). Порог чувствительности НГК к бору оценен равным примерно 0,3%, точность — 0,3—1,0%.

§ 2. Поиски кимберлитовых трубок

В последние годы появляются сообщения о возможности использования радиометрических методов (АэГС и др.) для поисков месторождений алмазов [34.2, 34.10, 34.23, 34.25, 34.26 и др.]. Это применение основано на различии радиоактивности кимберлитовых трубок, с которыми связаны эти месторождения, и вмещающих пород. Кимберлитовые трубки, приуроченные к базальтам, фиксируются пониженными аномальными значениями интенсивности регистрируемого гамма-излучения на фоне вмещающих пород. Так, в районах развития траппов, связанных с кимберлитом, наблюдается понижение гамма-полей до 2—3 мкР/ч [34.2].

Поиски алмазов АэГС осуществляются обычно в комплексе с аэромагнитной съемкой, поскольку кимберлиты отличаются повышенной намагниченностью за счет наличия в их составе сильномагнитных минералов. Таким образом, методика поисков кимберлитовых трубок сводится к обнаружению пониженных аномалий гамма-поля и повышенных аномалий магнитного поля с обязательной последующей наземной проверкой данных воздушной съемки, поскольку только по ее данным трудно установить природу аномалий.

Имеются также сведения [34.10] и о возможности применения для поисков алмазов электроразведки, поскольку породы, к которым бывают приурочены алмазы, отмечаются более низкими сопротивлениями по сравнению с вмещающими породами.

§ 3. Поиски и разведка месторождений флюорита

Для поисков флюорита CaF_2 в основном применяется гамма-метод (ГМ) и метод наведенной активности (НА).

Фактором, благоприятствующим применению радиометрических методов для поисков этого вида сырья, является совместное нахождение скоплений флюорита и урановых минералов в так называемом урано-флюоритовом типе месторождений плавикового шпата. Кроме того, в состав некоторых разновидностей флюорита (иттрофлюорита) могут входить редкоземельные элементы (иттрий, цезий и др.) и радиоактивные (уран и торий). И наконец, флюорит приурочен к интрузивным, главным образом гидротермальным, типам месторождений, с которыми связаны такие полезные ископаемые, как барит, свинец, цинк, медь, сурьма, ртуть, бериллий, редкие земли и др. В этих месторождениях наблюдаются также повышенные концентрации урана и тория. Все это и позволяет применять радиометрические методы для поисков этого вида минерального сырья [31.22, 34.28].

Количественные определения фтора в породах могут вестись лишь по методике НА. В § 3 гл. 25 отмечалось, что с помощью этого метода при пешеходных исследованиях фтор в породах можно определять начиная от 0,2 до 0,3%. К настоящему времени разработаны и автомобильные приборы для этой цели (p_0=0,03—0,08%). С указанным порогом чувствительности содержания фтора в породах можно определять и при изучении разрезов скважин по методике НАК (см. п. 1 § 5 гл. 25). Методика НА используется также для выявления фтора в порошковых пробах с порогом чувствительности 0,1% (см. п. 2 § 2 гл. 25).

§ 4. Поиски и разведка месторождений фосфоритов и апатитов

Возможность применения радиометрических методов для анализа фосфора в пробах фосфоритов и апатитов рассматривалась в § 9 гл. 10. Там же в табл. 10-2 приведен и состав этих минералов. Вмещающими породами для фосфоритов являются пески, глины, песчано-глинистые породы, мергелистые породы, известковистые песчаники, песчаный мел, известняки, мел и доломиты. Кроме глин, все они обладают низкой радиоактивностью, что и благоприятствует поискам и разведке фосфоритов. Наличие линейной зависимости между гамма-активностью фосфоритов и содержанием в нем фосфора позволяет по гамма-активности пород определять содержание в них фосфора.

Особенно эффективно применение гамма-методов для поисков месторождений фосфоритов, образующихся в процессе выветривания. При этом залежи фосфоритов по внешнему виду в ряде случаев практически не отличаются от вмещающих осадочных пород. Применение же гамма-съемки позволяет уверенно выявлять эти месторождения. Например, в работе [10.11] показано, что при помощи гамма-метода удалось обнаружить остаточное фосфоритовое месторождение, образовавшееся в результате выветривания фосфоритизированных известняков артинского яруса. При этом землистые фосфориты практически не отличались от землисто-бурых суглинков, но уверенно фиксировались гамма-съемкой.

В исследовании [34.4] описываются также результаты поисков и разведки оруденений фосфоритов, связанных с карбонатно-фосфатными брекчиями, приуроченными к контакту сланцев и известняков. Эта зона контакта уверенно фиксировалась гамма-съемкой и эманационной съемкой под наносами мощностью 1—2,5 м. Помимо гамма-метода для поисков фосфоритов может применяться и эманационная съемка (ЭС). Так, в работе [34.4] показано, что ЭС с успехом используется для прослеживания оруденения фосфоритов, приуроченных к контакту сланцев с доломитизированными известняками.

Радиометрические методы, и в частности ГК, могут применяться и для подсчетов запасов фосфоритовых руд в разрезах скважин. Порог чувствительности спектрометрического ГК к фосфору оценен равным 0,2%, а относительная погрешность 5—10% [32.9].

Другие примеры применения радиометрических методов для поисков и разведки фосфоритов рассматриваются в работах [16.83, 31.22, 34.1, 34.11, 34.13, 34.17—34.22, 34.24, 34.27, 34.30, 34.31, 35.28 и др.].

Месторождения апатитов бывают обычно связаны с пластообразными линзами, линзами крупных размеров, жилами, системой жил или жилок и прожилками [31.22]. Многие разности апатитов содержат повышенные концентрации редкоземельных элементов. К последним, как известно, приурочиваются и повышенные концентрации радиоактивных элементов. Это обстоятельство и благоприятствует поискам и разведке апатитов с помощью радиометрических методов [31.22, 34.13].

О содержании фосфора в фосфоритах можно судить также по спектрометрической методике НГМ и НА. При захвате ядром фосфора тепловых нейтронов возникают гамма-кванты радиационного захвата с энергией 6,76(24%); 5,71(6%); 4,68(26%) МэВ и др. Массовое макроскопическое сечение образования гамма-квантов равно 0,0033 $см^2/г$ (0,17 барн). При исследовании спектра захватного гамма-излучения фосфоритов установлено [24.12], что в их спектре наиболее интенсивно проявляются линии с энергией примерно 5,8 и 6,8 МэВ. Богатые руды особенно четко выделяются в области энергий 5,6—5,8 МэВ, а бедные — в более широкой области — 5,4—6,4 МэВ. Порог чувствительности определения фосфорного ангидрида в этом типе руд равен 3% P_2O_5. Мешающее влияние на результаты определения фосфора оказы-

вает кальций, при бомбардировке ядер которого образуется излучение с энергией 6,4 МэВ с парным пиком 5,4 МэВ. При изучении фосфоритов по СНГК в них также важно определять железо [24.1] (подробнее об этом см. § 6 гл. 35).

При изучении руд апатит-нефелинового типа установлено, что определению фосфора по этой методике мешает захватное гамма-излучение ядер железа, стронция, кальция и редких земель. В связи с этим в таком типе руд фосфорные залежи могут выделяться лишь качественно. Количественная интерпретация, как и при ГК, может вестись лишь по корреляционной связи фосфора с одним из указанных элементов, например, стронцием [24.12].

С помощью нейтронного активационного метода о содержании фосфора в апатитах и фосфоритах можно судить по наличию фтора в решетке минералов (см. п. 1 § 7 гл. 25). Содержание фосфора в породах при этом можно определять примерно с порогом чувствительности 0,1% (2% P_2O_5) со средней погрешностью 0,4%.

§ 5. Поиски и разведка месторождений калиевых и натриевых солей

Наличие в калии радиоактивного изотопа (калия-40) позволяет вести его определения по методике БМ и ГМ. Применение этих методов для определения калия в пробах рассматривается в § 7 гл. 10.

Коренные залежи калийных солей, как правило, залегают от дневной поверхности на значительной глубине (десятки — сотни метров) [31.22]. Поэтому поиски и разведка месторождений калийных солей в основном ведутся бурением с последующим обследованием скважин различными методами каротажа. Прямым методом их поисков и разведки является ГК.

Вмещающими породами калийных солей обычно служат пласты каменной соли и глинистые пропластки. Содержание калия в приконтактовых частях пластов каменной и калийной солей обычно невелико и меняется от 0,1 до 5%. Содержание других радиоактивных элементов в таких пластах, как правило, невелико и не затрудняет определения в них калия. Однако на каждом новом месторождении калийного сырья в этом следует убедиться путем специальных исследований с помощью гамма-спектрометрии и т. д.

Применение метода ГК для выявления в разрезе скважин калийных солей в СССР началось с 1952 г. [10.22]. В настоящее время этот метод для поисков и разведки калийных солей широко применяется у нас [10.23, 31.22, 34.3, 34.6—34.9, 34.11—34.13], в ПНР [34.14—34.16, 34.29, 34.33], ГДР, ЧССР и других странах.

Извлечение керна калийных солей — весьма трудоемкая задача. Поэтому метод ГК при поисках и разведке калийных солей и получил достаточно широкое распространение. Это позволило при исследовании большинства скважин перейти на бескерновое бурение.

Методом ГК исследуются как вертикальные скважины, буримые с поверхности земли, так и горизонтальные и наклонные, буримые из горных выработок. При исследовании сухих скважин метод ГК иногда комплексируют с измерениями бета-активности пород (бета-каротаж БК) [12.53, 34.16]. На диаграммах ГК минимальными показаниями отбиваются каменные соли, а максимальными — калийные. Глинистые пропластки отмечаются промежуточными значениями интенсивности регистрируемого гамма-излучения. Интенсивность гамма-аномалий против калийных пластов превосходит интенсивность против каменных солей примерно в 20—60 раз, благодаря чему при помощи метода ГК можно уверенно фиксировать соли калия.

Подводя итог изложенному, следует отметить, что метод ГК при поисках калийных солей позволяет решать следующие задачи: 1) выявлять калийные соли в разрезах скважин; 2) определять глубину залегания пластов соли и их мощность; 3) в комплексе с методами НГК, ННК и ГГК (см. ниже) оценивать минералогический состав солей. Наличие в карналлите кристаллизационной воды приводит к более интенсивному замедлению в нем быстрых нейтронов по сравнению с сильвином, поэтому на кривых ННК карналлит и сильвинит отмечаются различными показаниями. Метод же ГГК-п позволяет выявлять в разрезе скважин сильвин, имеющий сравнительно с другими породами наименьшую плотность. Кроме того, по заранее построенным градуировочным графикам с помощью ГК можно определять содержания в разрезе скважин калия с относительной погрешностью 1,1—7,5% [12.53].

Для опробования стенок горных выработок используется БМ. С его помощью [12.53] можно определять калий в породах с относительной погрешностью 0,34—0,46%.

Определение кларковых концентраций калия в горных породах производится совместно с определением в них радия и тория (см. гл. 11 и 12). Вопросы определения калия в почвах рассматриваются в работе [31.21].

Выше отмечалось, что пласты каменной соли отбиваются пониженными значениями ГК. В связи с этим по минимумам ГК ведутся поиски этих солей в разрезах скважин [34.6]. Кроме того, для поисков и оконтуривания солянокупольных поднятий применяются различные виды полевой радиометрии, главным образом, аэро- и автогамма-съемки [10.14, 31.22, 34.5, 34.32].

Интенсивность регистрируемого гамма-излучения для каменных солей меняется в пределах от 2 до 5 мкР/ч. Радиоактивность солей с включением глин при этом может достигать 15 мкР/ч, а глинистой шляпы — 20 мкР/ч [31.22].

Для выявления соленосных толщ по разрезам скважин и их расчленения применяется комплекс методов ГК, НГК и ННК [12.53, 14.4, 23.4, 24.44, 24.46, 24.61, 26.67, 31.22]. Метод НГК позволяет расчленять пласты карналлитов ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) от сильвинов (KCl) по наличию кристаллизационной воды в карналлите. Аналогичным образом выделяются породы, обогащенные бишофитом ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$). На кривых ННК-т пласты этих солей отбиваются минимумами. В работе [24.67] для раздельного определения ряда элементов по НГК и ГК построена номограмма.

В связи с тем, что соли легко растворяются, против соленосных пластов, как правило, всегда наблюдаются каверны. Поэтому интерпретацию кривых РК всегда следует сочетать с данными кавернометрии. В противном случае интерпретация диаграмм РК будет затрудняться. С этим, по-видимому, и связано появление максимумов ННК-т на некоторых кривых в работе [23.4]. Порог чувствительности ННК-т к хлору равен примерно 2%.

Радиационный захват хлором тепловых нейтронов приводит к возникновению гамма-квантов с энергией (МэВ): 7,79 (7,8%); 7,42 (14%); 6,64(14,4%); 6,11(21%); 5,72(5,6%); 4,98(6%); 2,88(9,5%); 1,95(29%); 1,17(36%); 0,79(23%); 0,51(26%) и других менее интенсивных линий. Таким образом, хлорные соли в разрезах скважин вполне могут выделяться по спектрометрическому НГК. Определение хлористого натрия в породах можно вести также по методике НАК (см. п. 1 § 8 гл. 25). При этом за счет радиационного захвата хлором-37 (24,6%) нейтронов образуется изотоп хлор-38 (T=38 мин, E_γ=2,15(47%) и 1,6 МэВ (31%)). Регистрация этого гамма-излучения и позволяет определять хлористый натрий в породах.

§ 6. Возможности выявления других полезных ископаемых

Из других неметаллических полезных ископаемых с помощью НАК по недостатку кислорода в карбонатных породах определяют самородную серу начиная с ее бортовых содержаний (6—10%) (см. п. 2 § 5 гл. 29). Прямым методом обнаружения серы в породах является СНГК с регистрацией излучения в диапазоне 4—5,2 МэВ. Серу с помощью СНГК можно определять начиная с 1%.

С помощью ядерных методов, особенно СНГМ, СНГМ′, НА и их импульсных вариантов, можно определять содержания различных породообразующих элементов в горных породах и судить об их качестве применительно к использованию в различных отраслях промышленности.

Глава 35

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

§ 1. Бериллий

Некоторые сведения о содержании бериллия в геологических объектах рассматриваются в § 1 гл. 26. Там же показано, что в лабораторных условиях его содержания в порошковых пробах можно определять по ГНМ начиная с кларковых содержаний (см. приложение 6). Более низкие концентрации бериллия в пробах фиксируются по методике ИГНМ с использованием ускорителей (см. п. 1 § 2 гл. 28). ГНМ применяется также для анализа штуфных проб (см. п. 4 § 1 гл. 26).

В природе весьма часто повышенным концентрациям в породах бериллия соответствуют повышенные концентрации радиоактивных элементов. Поэтому для поисков бериллия в практике геофизических исследований привлекается гамма-метод. Так, Р. И. Дубовым и др. [35.18] обнаружена связь бериллиевой минерализации с ториевой. Это позволило им с помощью аэро- и наземной гамма-съемки выявить в щелочном гранитном массиве штокверковую зону, обогащенную бериллом и торитом. К местам скопления берилла и радиоактивных элементов приурочиваются также аномалии естественного нейтронного фона (см. § 2 гл. 13).

Однако наиболее эффективным методом для поисков и разведки бериллия является прямой гамма-нейтронный метод — ГНМ. Как уже указывалось (см. гл. 26), для поисков и разведки бериллиевых руд применяют переносные пешеходные и перевозные автомобильные, а также скважинные приборы.

При помощи переносных бериллометров бериллий обычно определяют начиная с $1 \cdot 10^{-3}$%. Однако имеются приборы, позволяющие фиксировать в породах его кларковые концентрации. С помощью автомобильных бериллометров в движении (со скоростью 5—6 км/ч) уверенно обнаруживаются концентрации бериллия с 0,003% и выше. Кларковые концентрации в породах можно определять только при точечных замерах.

С помощью скважинных бериллометров в процессе движения прибора можно устанавливать в породах присутствие бериллия начиная с 0,001 до 0,005% в зависимости от вида исследований (см. табл. 26-2). При точечных замерах при этом можно фиксировать кларковые концентрации бериллия в породах.

§ 2. Алюминий

Основным сырьем на алюминий являются бокситы — руды, богатые глиноземом (Al_2O_3). В них обычно содержатся повышенные концентрации радиоактивных элементов, что благоприятствует применению радиометрических методов для их поисков. Так, Дж. Адамс и К. Рихардсон [35.43] отмечают, что к бокситам могут приурочиваться содержания тория от $5 \cdot 10^{-6}$ до $131 \cdot 10^{-6}$ г/г породы (или в среднем $48{,}9 \cdot 10^{-6}$ г/г породы) и урана от $2{,}7 \cdot 10^{-6}$ до $26{,}7 \cdot 10^{-6}$ г/г породы (или в среднем $20{,}9 \cdot 10^{-6}$ г/г породы). Сравнивая эти данные для пород изверженного и осадочного комплексов (см. табл. 9-2), находим, что содержания радиоактивных элементов в бокситах значительно превосходят соответствующие содержания в горных породах. Это и благоприятствует поискам бокситов с помощью радиометрических методов.

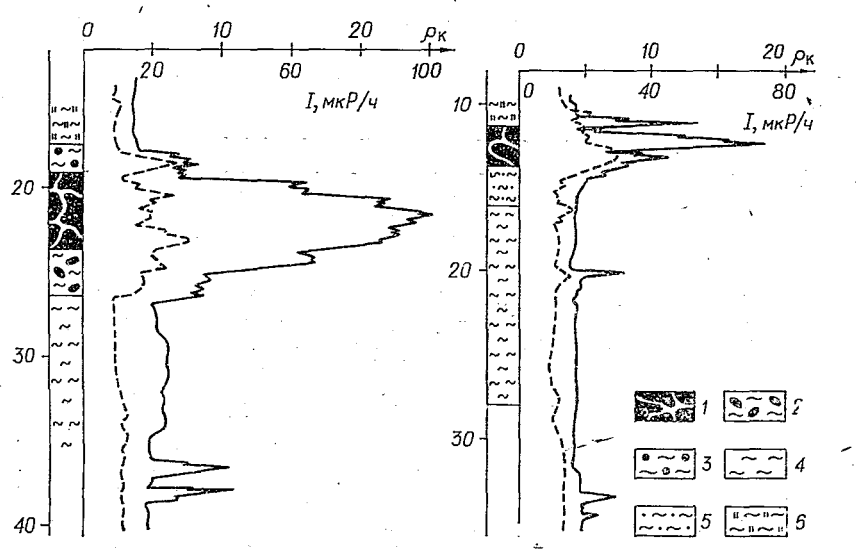


Рис. 35-1. Кривые ГК (пунктир) и КС (сплошные) по скважинам Амангельдинского месторождения бокситов (по И. С. Михельсону).

1 — каменный боксит, *2* — рыхлый боксит, *3* — рыхлые глинистые бокситовые породы (нестандартные), *4* — глины, *5* — бокситоподобные глины, *6* — глины пестроцветной свиты.

Л. Б. Сочеванов [31.22] указывает, в частности, на возможность поисков этого вида сырья с помощью магнитной и аэрогамма-съемки. При поисках и разведке бокситов в скважинах достаточно широко начинает применяться метод ГК [31.22, 35.27, 35.44]. Бокситы на кривых ГК, как правило, отбиваются повышенными значениями интенсивности регистрируемого гамма-излучения (20—75 мкР/ч) по сравнению с вмещающими породами. Наличие в разрезе скважин глин иногда не позволяет однозначно отбивать бокситы по кривым ГК. Поэтому на практике метод ГК необходимо комплексировать с другими методами каротажа (каротажем сопротивлений — КС и др.).

В качестве одного из примеров применения метода ГК для поисков бокситов могут служить кривые, показанные на рис. 35-1 [35.27]. Наиболее высокими показаниями ГК отбиваются каменистые бокситы, затем идут рыхлые, дальше глинистые и, наконец, глины. В исследуемом районе глины всегда отмечаются более низкими показаниями ГК по сравнению с бокситоносными породами. Каменистые бокситы отчетливо также выделяются и по кривым КС. Однако на кривых КС аналогичными максимумами кажущегося сопротивления отбиваются

и пласты песков и песчаников. Поэтому КС может применяться для выявления в разрезе скважин бокситов лишь совместно с ГК. Пески и песчаники на кривых ГК отбиваются минимальными показаниями. Применение методов ГК и КС позволяет вести лишь качественную интерпретацию диаграмм при поисках бокситов. Количественную же интерпретацию результатов исследований можно осуществлять только методом нейтронного активационного каротажа (НАК) (см. п. 2 § 7 гл. 25). С его помощью алюминий в породах можно определять начиная с 3—7%, т. е. примерно с кларковых концентраций (7,45%). О результатах применения НАК для определений алюминия в породах можно судить по данным рис. 25—10. Видно, что по данным ГК бокситы плохо выделяются. Однако по методике НАК они фиксируются четко. При спектрометрических измерениях алюминий в породах можно фиксировать с относительной точностью 8%.

В настоящее время разрабатывается также аппаратура для определения алюминия в поверхностных отложениях.

§ 3. Титан

Среднее содержание титана в земной коре по весу равно 0,6%, а в главнейших типах пород может меняться от 0,23 до 0,9%. Наиболее известными минералами титана являются рутил TiO_2 и ильменит $FeTiO_3$. Месторождения титана генетически связаны с магматическими, метаморфическими и осадочными комплексами горных пород. Они могут быть как собственно титановыми, так и комплексными — с железом и ванадием. Осадочные месторождения титана приурочиваются к россыпям, в которых наряду с титаном могут встречаться и другие тяжелые металлы. Содержание титана в рудах в зависимости от их типа и масштаба может меняться в широких пределах — примерно от 4 до 30%..

Титановые минералы, содержащие железо, являются магнитными. Целый ряд других титановых минералов в своем составе содержит повышенные концентрации радиоактивных элементов (тория и урана). Поэтому для поисков месторождений титана применяют радиометрическую и магнитную съемки. Титан часто образует россыпные месторождения в пониженных местах рельефа. Там скапливаются и другие тяжелые металлы, в частности, радиоактивные элементы уран и торий. Это и используется для поисков россыпных месторождений титана и других руд. Так, В. А. Евстрахин [34.4] указывает, что в СССР таким образом было открыто месторождение титана. Скопления титана (ильменит, рутил) и радиоактивных элементов (монацит, циркон) в пониженных местах аллювиальных отложений реки отмечались аэрогамма-съемкой величиной аномалий 10—15 мкР/ч на фоне вмещающих пород (5—6 мкР/ч).

Количественные содержания титана в рудах могут определяться с помощью РРМ (см. гл. 16) и СНГМ (см. гл. 24). На основе метода РРМ к настоящему времени разработаны переносные (см. § 6 гл. 16) и автомобильные приборы (см. § 7 гл. 16). Метод СНГМ привлекается для изучения разрезов скважин (см. § 4 гл. 24). Для определения титана в стенках горных выработок применялся прибор с пропорциональным счетчиком и цирконий-тритиевым источником [16.66]. При этом для выяснения типа оруденений необходимо также определять содержание в них железа и кальция. В процессе поинтервального опробования руд установлено, что с помощью РРМ титан в рудах можно фиксировать с точностью 0,3—0,6%, а железо — с точностью 0,5—1%. Порог чувствительности на титан, железо и кальций при этом в отдельности оценивается в 0,3%. Примеры применения автомобильной съемки для определения титана в поверхностных отложениях рассматриваются в § 7 гл. 16.

При измерениях по СНГК установлено, что спектр титановой руды отличается от спектра вмещающей породы в области энергий 3,0—4,6 МэВ и 5,0—6,6 МэВ. Отношение скоростей счета для этих диапазонов равно 1,22 для титановой руды и 2,38 для вмещающей породы [4.19].

Для выявления титановых руд по разрезам скважин с помощью СНГК необходимо использовать спектрометрическую аппаратуру, обеспечивающую стабильность измерения спектра с точностью до 2—5%, а для количественного определения титана стабильность аппаратуры должна быть повышена до 1—2%. При определении титана в комплексных титано-железистых рудах помимо титана необходимо оценивать и содержание железа, искажающего жесткую часть спектра захватного гамма-излучения. Градуировочные кривые для СНГК носят линейный характер лишь для концентраций 25% титана [24.39].

§ 4. Хром

Среднее содержание хрома в горных породах по весу равно 0,02%. Содержание его в рудах может достигать от 3,5 до 40%. Руды хрома от вмещающих пород отличаются по эффективному атомному номеру и плотности. Поэтому для анализа образцов пород в принципе могут использоваться методы ГМп (см. гл. 18), а при анализе порошковых проб, кроме этого метода, также ББМ (гл. 15), РРМ (гл. 16), ГГМ-с и ГГМО (гл.20). Однако в настоящее время для этих целей применяется лишь СНГМ, с помощью которого хром в рудах можно определять с порогом чувствительности 0,2% (см. табл. 24-2).

Для изучения коренных выходов пород в стенках горных выработок и скважинах могут привлекаться методы ГГМ-с, ГГМ-п и СНГК [35.6]. Наибольший цикл исследований в настоящее время проведен по методике СНГК. Для определения хрома в рудах рекомендуется измерять спектральное отношение M в диапазоне энергий 3—5 МэВ и 7—10 МэВ [14.4, 35.6]. Величина M составляла для богатых руд 1,58, для бедных — 2,17, а для вмещающих пород — 7,43. При исследовании скважин установлено [24.14], что с помощью интенсиметрического НГК хромовые руды не выделяются. СНГК они особенно отчетливо выявляются при регистрации жесткого гамма-излучения с энергией выше 8 МэВ. Работа велась с аппаратурой СГС-1 глубинными приборами диаметрами 80 и 42 мм на зонде 25 см с полоний-бериллиевым источником с выходом $5,5 \cdot 10^6$ нейтр/с. Руды с содержанием 33—36% хрома отбивались аномалиями, превышающими скорость счета над вмещающими породами в 7—8 раз. В связи с тем, что коренные хромитовые руды обладают высокой плотностью по сравнению с вмещающей средой, метод СНГК целесообразно комплексировать с ГГК-п (см. гл. 19). А так как они залегают в серпентинитовых породах, имеющих в составе связанную воду и являющихся пористыми, для их выявления в работе [24.14] рекомендуется привлекать также методы ННК-т и ННК-н. Спектрометрическая аппаратура при измерениях по СНГК должна обеспечивать стабильность $\pm 2\%$. Порог чувствительности составляет при этом примерно 4—5%, относительная точность измерений 10—15%. Линейность градуировочной кривой наблюдается при содержании в руде хрома до 10%. Спектрометрическая аппаратура, обеспечивающая стабильность 5%, может применяться лишь для выявления оруденелых тел.

И. И. Фельдманом и другими во ВНИИЯГГе [29.78] для определения хрома в рудах с абсолютной погрешностью 1,66% использовался метод ГГК-с с одним источником (селен-75 активностью 1,8 мг · экв радия), расположенным в пирамидообразном коллиматоре, с помощью которого формировался поток первичного излучения, соответствующий одновременно доинверсионной, инверсионной и заинверсионной областям

выбранного зонда. Измерения на этом зонде позволяли с относительной точностью 2—3% исключать влияние изменений плотности горных пород в диапазоне 1,5—4 г/см³. По принципу работы зондовое устройство глубинного прибора эквивалентно двухисточниковому. Глубинным прибором служил радиометр ДРСТ-2. Его корпус на всей длине зонда был сделан из дюралюминия — для понижения ослабления первичного и рассеянного излучения.

Порог чувствительности этой методики ГГК-с к хрому можно оценить в 2,3%.

§ 5. Марганец

Среднее содержание марганца в горных породах по весу равно 0,09%. Максимальные его количества в богатых рудах могут достигать 63%.

Для анализа проб на марганец применяются методы РРМ, НА и СНГМ. По методике РРМ содержания марганца в пробах можно определять с порогом чувствительности 0,07% (по методике ХХМ) и 0,3% (по методике ГХМ, см. табл. 16-1), по методике НА — 0,01—0,1% (см. п. 6 § 2 гл. 25), а по методике СНГМ — 0,1% (см. табл. 24-2).

Для определения марганца в стенках горных выработок в принципе может служить РРМ (см. гл. 16). Для выявления оруденений марганца по разрезам скважин могут привлекаться методы ГГК-п и ГГК-с, а также нейтронные методы ННК, НГК, НАК, ИННК и ИНГК. Количественные определения марганца в породах при этом можно вести по СНГК, НАК и ИНГК.

При измерениях по СНГК спектр марганцевой руды от спектра карбонатов отличается в области энергий 4,8—6 МэВ (преобладание излучения кальция) и 6,2—10 МэВ (преобладание излучения марганца). Отношение скоростей счета в этих диапазонах равно 1,44 для марганцевой руды и 5,25 — для известняка. Таким образом, по СНГК марганцевые руды в карбонатных разрезах могут быть вполне выделены по рассматриваемой методике. Градуировочные графики при этом линейны до концентраций 10—15% Mn [14.4, 4.19, 32.9].

Сложнее обстоит дело с выделением марганцевых руд в глинистых породах — спектры марганцевой руды и глины различаются лишь в одной области: 5,5—6,5 МэВ. Присутствие в глинах и марганцевых рудах железа делает жесткий спектр этих сред сопоставимым, что мешает оценке марганца в глинистых разрезах.

Возможности применения НАК для определения марганца по разрезам скважин рассматриваются в п. 4 § 7 гл. 25. Там, в частности, показано, что при работе со спектрометрической аппаратурой можно фиксировать в породах марганец с порогом чувствительности 0,01—0,1% в зависимости от вещественного состава пород, а при работе с аппаратурой на газоразрядных счетчиках — с порогом 0,2%.

§ 6. Железо

Железо широко распространено в природе, его среднее содержание в земной коре по весу составляет 5,1%. Месторождения железа образуются в различных геологических условиях, поэтому для них весьма характерно разнообразие вещественного состава. Однако с этой точки зрения их обычно подразделяют на два типа — с силикатной и карбонатной основой. Промышленными считаются руды со средним содержанием железа в пределах 30—66%.

Для определения в пробах железа привлекается большое число ядерно-геофизических методов (табл. 35-1), с помощью которых железо можно оценивать начиная с десятых долей процента. О содержании

Таблица 35-1

Методы для определения железа в породах разного состава

Методика	Основа руд			
	силикатная		карбонатная	
	порог чувствительности, %	ошибка абс. (отн.), %	порог чувствительности, %	ошибка абс. (отн.), %
Лабораторный анализ				
ББМ	0,6—0,8	0,3—0,4	2—4	1—2
БГМ	—	0,4	—	0,4
РРМ	0,4—0,6	0,2—0,3	—	—
ГМп-с	0,7	0,5	—	—
СНГМ	0,2—0,5	—	—	—
Опробование на плоской поверхности				
ГГМ-п	—	—	2—5	1,0—2,5
ДГГМ-с	2—3	1—1,5	—	—
РРМ	0,3	0,5—1	—	—
Исследование разрезов скважин				
ГГК-с	3—5	1,5—2,5	6	3
ГГКО	4—6	2—3	—	—
ДГГК-с	2—4	1—2	4—6	2—3
СГГК-с	⩾2	⩾1	—	—
ГГК-с	—	—	2—3	1,5

железа в штуфных пробах можно судить по наличию корреляционной связи между плотностью и содержанием железа в образце. Измерение следует вести по методике ГМп (см. п. 3 § 1 гл. 18). Аналогичным образом можно определять железо в коренных выходах пород с помощью ГГМ-п (см. табл. 35-1). Однако более надежно о содержании железа в рудах можно судить с помощью методов РРМ и ДГГМ-с.

Для изучения руд железа по разрезам скважин привлекаются методы ГК [35.35] и ГГК-п [35.6]. Однако наличие пористости у ряда руд железа мешает ведению количественной интерпретации по этим методам и особенно ГГК-п (см. § 6 гл. 19). В связи с этим при исследовании разрезов скважин метод ГГК-п необходимо комплексировать с методами ННК или НГК.

В настоящее время для определения железа в разрезах скважин применяются различные модификации ГГК-с (см. табл. 35-1).

Одним из существенных недостатков ГГМ-с является его низкая глубинность (2—3 см). Поэтому для определения железа по разрезам скважин в последнее время стал применяться метод СНГК. При спектрометрических исследованиях установлено, что для определения железа прибор необходимо настраивать на энергетический диапазон свыше 6—6,4 МэВ. При измерениях по этой методике можно легко подавлять гамма-излучение неупругого рассеяния на углероде (4,43 МэВ) и кислороде (6,06 МэВ). О влиянии скважины на СНГК можно судить по следующим данным. Отмечено, что увеличение на 10 мм диаметра сухой и заполненной водой скважины диаметром 90—190 мм приводит к уменьшению скорости счета жесткого гамма-излучения на 4—5%, а отклонение прибора на 10 мм от стенки скважины, заполненной водой,— на 2—3%. Эти погрешности намного ниже соответствующих погрешностей, получаемых при измерении скважин методом ГГК-с. Влияние влажности исключается при измерении спектрального отношения [32.9].

Сопоставление данных СНГК, полученных при измерении на зонде размером 20 см, с другими каротажными диаграммами для одной из скважин железорудного месторождения показано на рис. 35-2 [23.6]. Железные руды в этой скважине представлены высокопористыми сильно обводненными рудами. Методы ГГК и каротажа магнитной восприимчивости (КМВ), как это видно из приведенных диаграмм, по сравнению с СНГК мало эффективны. Регистрация жесткого гамма-излучения с энергией свыше 6 МэВ по СНГК позволяет по максимумам скорости счета однозначно выделять руды железа по скважине. Дифференциация

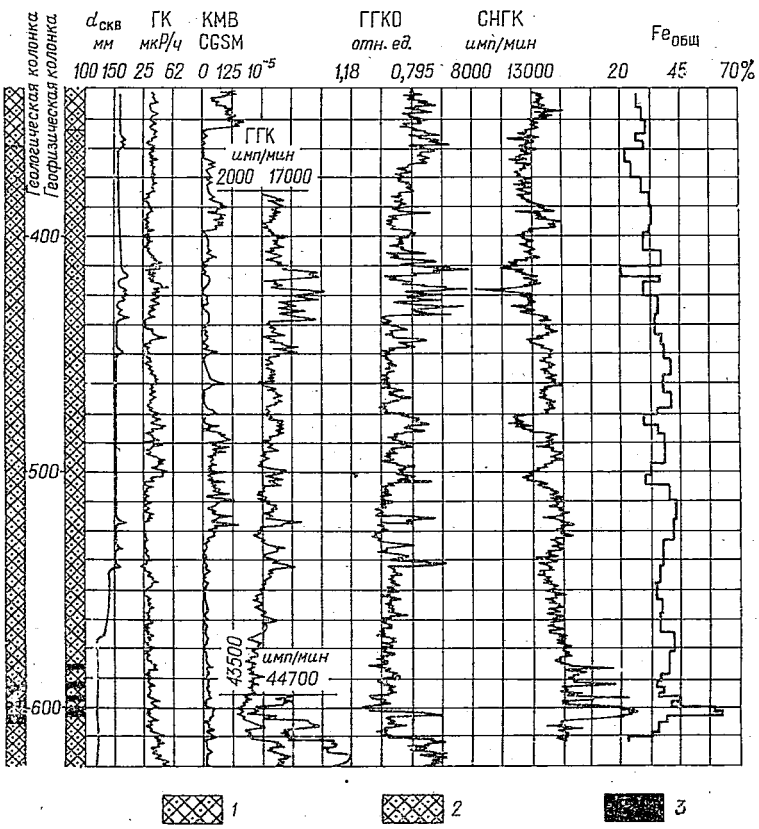


Рис. 35-2. Сопоставление данных СНГК с результатами каротажа магнитной восприимчивости (КМВ), гамма-гамма-каротажа (ГГК) в его обычной модификации и модификации ГГКО (обратного рассеяния) и гамма-каротажа (по А. М. Блюменцеву и И. И. Фельдману).

1 — роговики хлорито-магнетитовые, *2* — роговики мартитовые, *3* — руда мартитовая.

кривых СНГК, как показано в работах [32.9, 24.39], носит линейный характер лишь до концентраций железа не свыше 25%. Для выявления железа в породах достаточно использовать спектрометрическую аппаратуру, обеспечивающую стабильность до 2—5%, а для количественных измерений — до 2%. При регистрации жесткого гамма-излучения с энергией свыше 6 МэВ наблюдается четкая корреляция между показаниями СНГК и результатами анализов кернов на содержание в них железа [24.49].

Весьма эффективными для определения железа в рудах являются также методы ИННК и ИНГК (см. §§ 2 и 3 гл. 29).

§ 7. Никель

Среднее содержание в горных породах по весу равно 0,008%. Содержание никеля в рудах может меняться в пределах 0,26—5%. Для извлечения никеля промышленное значение имеют сульфидные, гидросиликатные и мышьяковые руды. Наиболее важное значение представляют сульфидные руды, являющиеся одновременно сырьем на медь. Существенное мешающее влияние при выявлении никеля в рудах оказывает железо, содержащееся в больших количествах в этом типе руд,

коррелирующихся с никелем (при нахождении в совместных минералах) и не коррелирующихся с ним.

Для лабораторного анализа проб никеля применяются методы РРМ и СНГМ, с помощью которых содержание этого элемента можно определять соответственно с 0,5% (см. табл. 16-1) и 0,2—0,5% (см. табл. 24-2).

Для выявления оруденения никеля по разрезам скважин применяется метод ГГК-п [35.2, 35.3], а для количественных определений — метод СНГК [3.16, 4.19, 14.4, 24.21, 24.30, 24.65, 24.66]. Для устранения влияния железа при СНГК спектр никеля рекомендуется измерять в области энергий 8,6—9 МэВ и нормировать его к спектру железа в области энергий 6—7 МэВ [3.16]. В этот диапазон попадает также и излучение меди. Исследования скважин подтвердили целесообразность измерения спектра в этих интервалах — на всех диаграммах никелевые руды отбивались максимальными значениями регистрируемого отношения. Зависимость скоростей счета жестких гамма-квантов в интервалах энергий 7,4—8,2 МэВ и 8,6—9 МэВ от содержания в породе никеля от 0 до 3% носит линейный характер.

Большой цикл исследований по разрезам скважин силикатно-никелевых месторождений проведен А. Ф. Постельниковым, Л. А. Зивом и др. [24.30, 24.65, 24.66, 24.70]. Работы ими велись со специальным скважинным гамма-спектрометром, оборудованным реперным устройством, обеспечивающим стабильность с точностью ±1%. Гильза прибора была изготовлена из слоистого стеклопластика диаметром 65 мм. Захватное гамма-излучение регистрировалось фотоумножителем типа ФЭУ-13 и кристаллом йодистого натрия размерами 40×50 мм. Используемый источник имел выход $(1—2)\cdot 10^7$ нейтр/с. Размер зонда выбран равным 22 см. Пространство между детектором и источником заполнялось свинцом (12 см) и плексигласом (с обеих сторон свинцового экрана). Кристалл и ФЭУ размещались в стальном стакане с толщиной стенок 1,5 мм, покрытом снаружи слоем бора с массовой толщиной 0,2 г/см^2.

При измерении жесткого гамма-излучения никеля (8,3—8,8 МэВ) на фоне излучения железа (7,0—7,4 МэВ) и хрома (8,9—9,9 МэВ) рассматриваемый элемент определяют с порогом чувствительности 0,5—0,7%. Многократные записи диаграмм СНГК и их обработка, основанная на дисперсионном анализе, позволили авторам этой методики повысить абсолютную точность определений никеля до 0,1—0,4% в диапазоне концентраций 0,5—2,5% [35.45].

§ 8. Медь

Среднее содержание меди в земной коре по весу равно 0,01%. В промышленных рудах ее количества могут меняться примерно от 0,3 до 10%. В медных месторождениях наряду с медью присутствуют и другие полезные ископаемые, очень часто имеющие самостоятельное значение (свинец, цинк, ванадий, молибден, никель, железо, а иногда и уран).

Для лабораторного анализа меди в пробах привлекаются методы РРМ, НГМ и НА, с помощью которых содержание этого элемента можно определять с порогом чувствительности соответственно ~0,5—1; 0,2—0,5 и 0,03%.

Присутствие урана и продуктов его распада в указанных выше рудах благоприятствует поискам оруденений меди с помощью гамма-метода (ГМ) и эманационной съемки (ЭС) [31.22, 34.4, 35.9, 35.19, 35.34, 35.37, 35.38]. Так, Б. В. Смирновым и В. А. Герасимовым [35.34] ЭС привлекалась для поисков меди на одном из медноколчеданных месторождений Среднего Урала. Оруденение связано с кварцево-хлоритовыми сланцами, обладающими несколько повышенной радиоактивностью по сравнению с вмещающими породами. Месторождение перекрыто на-

носами мощностью порядка 10 м. С помощью ЭС установлено, что кварцево-хлоритовые сланцы под наносами выделяются повышенными концентрациями эманаций до 40 эман и более на фоне 8—10 эман. Природа эманационных аномалий в основном тороновая с незначительным присутствием радона. В районе работ пробурено несколько скважин разведочного бурения, которые исследовались гамма-каротажем. Отмечено, что кварцево-хлоритовые сланцы более четко фиксируются с поверхности эманационной съемкой по сравнению с гамма-каротажем. Данное обстоятельство названные выше авторы объясняют повышенной эманирующей способностью кварцево-хлоритовых сланцев по сравнению с вмещающими породами. Повышенными концентрациями эманаций также выделяются и зоны тектонических нарушений, с которыми в данном случае не связаны медноколчеданные оруденения. Из этого следует, что при поисках месторождений эманационной съемкой задача решается неоднозначно, поэтому для повышения эффективности этот метод целесообразно сочетать с другими, например, электроразведкой.

Для определения меди в стенках горных выработок применяется метод РРМ, а при изучении разрезов скважин — методы ГГК-п, СНГК и НАК.

При измерениях по РРМ И. Неводничанским (ПНР) [14.4] показано, что с помощью цирконий-тритиевого источника и гейгеровского счетчика можно определять содержания в рудах меди по излучению с энергией 8,05 кэВ. Это излучение выделялось дифференциальными фильтрами из никеля и кобальта, имеющими соответственно следующие К-края: 8,3 и 7,7 кэВ. Переменные содержания железа (K_{α_1}=6,4 кэВ) не мешали определению меди. Ошибка во всех случаях не выходила за пределы 0,3—0,5%. Градуировочный график для изучаемого диапазона концентраций меди в пределах от 0 до 6% носил линейный характер.

В. Н. Орловым и др. [16.66] для оценки меди привлекалась аппаратура с пропорциональными счетчиками. Порог чувствительности равнялся 0,15—0,3%, а абсолютная и относительная погрешности измерений — соответственно 0,05—0,1 и 5—10%.

Метод ГГК-п [35.2, 35.3] при этом использовался для проведения качественной интерпретации, а методы СНГК и НАК — для количественной. При измерениях по СНГК установлено, что гамма-спектры медистого песчаника и вмещающей породы (песчаник) различаются в области энергий 3,0—6,6 и 6,8—9,0 МэВ. Отношение скоростей счета для этих диапазонов равно 7,3 для руды и 13,6 для породы. Для колчеданной руды спектры различаются в диапазонах энергий 5,4—6,4 и 7,2—10 МэВ. Отношение скоростей счета для этих диапазонов равно 2,73 для руды и 4,23 для породы.

Определение меди в рудах можно вести при соотношении меди к железу 1:15 (по Постельникову). При однократных замерах порог чувствительности к меди оценивается равным примерно 0,5—0,7%. При оценке меди по методике многократных замеров с обработкой результатов по методике дисперсионного анализа может быть достигнут порог чувствительности 0,2%. С таким же порогом чувствительности медь можно определять и по методике НАК (см. п. 5 § 7 гл. 25).

§ 9. Олово

Среднее содержание олова в земной коре по весу равно $6 \cdot 10^{-4}$%. Основными промышленными минералами олова являются касситерит SnO_2 и частично станнин Cu_2FeSnS_4. Промышленными считаются руды с содержанием олова не ниже 0,1—0,2%.

Для определения олова в пробах применяются методы РРМ (см. гл. 16) и ГМрп, ГГМрп (см. гл. 17). РРМ привлекается для выявления

общего олова с порогом чувствительности 0,007% (методика ХХМ) и 0,01—0,1% (методика ГХМ). С помощью методов ГМрп и ГГМрп можно оценивать содержание в пробах лишь касситерита с порогом чувствительности по олову соответственно равным 0,01—0,05 и 0,1%.

Рудопроявления олова бывают связаны с повышенными концентрациями радиоактивных элементов. Это позволяет для поисков месторождений олова использовать радиометрические методы [34.4, 35.1, 35.18]. Количественные определения олова в рудах проводятся по РРМ — общее олово — и методике (ГГМрп) — касситерит. Оба метода привлекаются для изучения стенок горных выработок и скважин (в основном сухих). Олово при помощи рассматриваемых методов проще всего определять в кварц-касситеритовых и им подобных оруденениях и сложнее — в сульфидных, из которых олово добывается совместно со свинцом и цинком.

Опробование стенок горных выработок и скважин наиболее качественно в случае осреднения результатов по интервалам большой мощности. Порог чувствительности к олову всех методик оценивается равным 0,1% для руд кварц-касситеритового типа. В сульфидных рудах определяются более высокие концентрации олова. Примеры применения ГГМрп для оценки олова рассматриваются в § 3 гл. 17, а РРМ — в § 6 и 8 гл. 16.

§ 10. Сурьма

Среднее содержание сурьмы в земной коре по весу равно $4 \cdot 10^{-5}$%. Промышленными считаются руды с содержанием сурьмы от 0,04 до 10—20%. Основным типом месторождений сурьмы являются сульфидные руды гидротермального происхождения.

Для анализа порошковых проб на сурьму привлекаются ББМ (см. гл. 15) и РРМ (гл. 16). С их помощью достигнуты соответственно следующие пороги чувствительности: 0,32 и 0,05—0,06%.

К рассмотренным выше типам руд приурочивается высокая естественная радиоактивность. В связи с этим для поисков месторождений сурьмы привлекались воздушная и наземная гамма-съемки. [35.18].

Для количественных определений сурьмы в рудах применяются методы ГГМ-с (гл. 20) и РРМ (гл. 16). С помощью интенсиметрической методики ГГМ-с содержание сурьмы в мономинеральных рудах выявляется с порогом чувствительности 0,5—0,6%, а по методике ДГГМ-с с порогом чувствительности 0,2—0,3%. Указанные величины в обоих случаях соответствуют замерам как на поверхности, так и в скважинах.

Определение сурьмы в рудах по РРМ ведут по K_{α_1}- и K_{α_2}-линиям с энергией соответственно 26,4 и 26,1 кэВ. Выделялись эти линии дифференциальными фильтрами из серебра и кадмия, имеющими энергии К-краев поглощения соответственно 25,5 и 26,7 кэВ. Толщина фильтров, изготовленных в виде фольг, была выбрана оптимальной — равной 0,034 мм (0,0354 г/см^2) для серебра и 0,040 мм (0,0350 г/см^2) для кадмия.

При опробовании стенок горных выработок порог чувствительности метода при интегральном счете с одним серебряным фильтром оценен в 0,2% сурьмы, а при дифференциальном счете — в 0,05% [16.7].

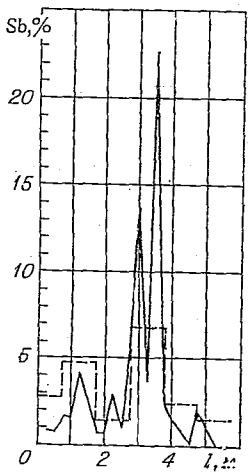


Рис. 35-3. Результаты определения сурьмы в рудах по стенке горной выработки по данным РРМ (сплошные кривые) и бороздового опробования (пунктир).

В связи с тем, что глубинность РРМ невелика (порядка 3—5 мм), для замеров на коренных выходах пород следует выбирать сравнительно ровные участки.

Результаты сопоставления данных РРМ по определению сурьмы с данными бороздового опробования приведены на рис. 35-3. Измерения по РРМ проводились с помощью интегрального сцинтилляционного радиометра типа СРП-2 и дифференциальных фильтров. Среднее содержание сурьмы, по данным РРМ, 3,31%, а по данным бороздового опробования — 3,58%.

Для определения сурьмы по разрезам скважин с помощью РРК по методике спектральных отношений характеристическое излучение измерялось в диапазоне 20—30 кэВ, а рассеянное излучение — в диапазоне 45—55 кэВ. Градуировочный график для диапазона концентраций сурьмы от 0 до 10% носил линейный характер. Изменение содержания в руде железа до 10% и ртути до 1% существенно не искажало результатов РРК. Порог чувствительности этого метода к сурьме оценен в 0,2—0,3%, абсолютная точность определения — в 0,1%, а относительная — в 10%.

§ 11. Барий

Среднее содержание бария в земной коре по весу равно 0,05%. Содержание бария в рудах может меняться от 3 до 40%. В природе встречаются как собственно бариевые месторождения обычно осадочного типа, так и комплексные (со свинцом, цинком и др.) гидротермального происхождения.

Для определения бария в пробах привлекались ГБМ (см. § 1 гл. 17) и ББМ (см. гл. 15). Порог чувствительности равнялся 0,3%. Эта задача может также решаться при помощи РРМ, порог чувствительности которого к барию можно оценить примерно в 0,01—0,05%.

Повышенные концентрации радиоактивных элементов в рудах гидротермального происхождения позволяют для их выявления использовать метод ГК. В связи с тем, что руды бария обладают повышенной плотностью, для их оценки по разрезам скважин может быть удобен метод ГГК-п. Количественные определения бария в мономинеральных рудах можно вести по методике ГГМ-с (см. гл. 20). При интенсиметрических измерениях на поверхности и в скважинах по ГГМ-с при этом можно определять барий с порогом чувствительности 0,2—0,3%. С таким же порогом можно выявлять барий и в сложных рудах по методике спектрометрических отношений РРМ. Эти вопросы, в частности, будут рассматриваться в параграфе, посвященном поискам и разведке полиметаллических месторождений.

§ 12. Редкоземельные элементы

К редкоземельным, как известно, относится большая группа химических элементов (см. п. 3 § 9 гл. 10). Данные об их содержании приводятся в приложении 6. О суммарном содержании редкоземельных элементов в пробах можно судить по ГМ (см. п. 3 § 9 гл. 10), РРМ (см. гл. 16) и ННМ-т (§ 2 гл. 23). Некоторые элементы в этой группе можно определять по методикам ННМ-р (§ 3 гл. 23) и НГМ с применением излучения генератора нейтронов (см. п. 2 §3 гл. 28).

В природе редкоземельные элементы обычно связаны с пегматитами, карбонатитами, монацитовыми песками, полиметаллами и т. д. В этих типах месторождений наблюдаются повышенные содержания радиоактивных элементов по сравнению с вмещающими породами. Поэтому для их поисков можно применять радиометрические методы [11.28, 12.37, 31.22, 35.5, 35.7, 35.8, 35.11—35.14, 35.20, 35.29, 35.30, 35.33, 35.40, 35.42 и др.].

Для поисков и разведки месторождений редкоземельных элементов в карбонатитах широко привлекаются аэрогамма-съемка и различные виды наземной съемки. Месторождения, связанные с контактами, успешно фиксируются по данным эманационной съемки [34.4].

Большая часть редкоземельных элементов имеет высокие сечения захвата медленных нейтронов. Это свойство позволяет для их поисков и разведки использовать ННМ. Для исключения изменений влажности пород приходится применять комплекс методов ННМ-т и ННМ-н. По результатам этих методов, пользуясь специальными палетками (см. рис. 23-34), можно определять суммарное содержание редкоземельных элементов в рудах (см. рис. 23-35).

Для выделения отдельных элементов из этой группы следует применять методы ННМ-р (§ 8 гл. 23) и СНГК. Существенную помощь при этом могут оказать и методы ИННМ и ИНГМ (см. гл. 29).

§ 13. Вольфрам и молибден

Среднее содержание вольфрама и молибдена в земной коре по весу равно соответственно $2 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-4}$%. Вольфрам извлекается как из собственно вольфрамовых руд с содержанием от 1 до 3%, так и из комплексных (совместно с молибденом и другими элементами) с содержанием от 0,02 до 0,4%. Молибден также можно добывать из собственных руд с содержанием от 0,04 до 1—1,5% и иногда до 3% и из комплексных руд (совместно с вольфрамом и др.) с содержанием от 0,004 до 0,02%.

Для анализа проб на вольфрам применяются ББМ (см. гл. 15) и РРМ (см. гл. 16). Порог чувствительности ББМ к вольфраму оценивается равным 0,2%. С помощью РРМ вольфрам можно определять примерно с 0,05%. О содержании молибдена в рудах по методике РРМ можно судить начиная с концентраций 0,005—0,03% в зависимости от методики измерений.

К указанным выше месторождениям вольфрама и молибдена обычно приурочиваются повышенные концентрации радиоактивных элементов [35.18]. Поэтому для их поисков используются радиометрические методы. Установлена приуроченность некоторых типов этих полезных ископаемых к контакту гранитоидных интрузий. Наличие в районе развития этих контактов зон тектонических нарушений благоприятствует применению эманационной съемки.

Количественные определения в рудах рассматриваемых элементов могут производиться по методикам ГГМ-с (гл. 20) и РРМ (гл. 16).

Содержание молибдена в мономинеральных рудах по ГГМ-с и ДГГМ-с определяют соответственно с порогом чувствительности 0,6—0,7 и 0,3—0,4%, а вольфрама — соответственно с порогом чувствительности 0,2—0,3 и 0,1—0,2%.

В комплексных рудах эти элементы могут определяться лишь по методике спектрометрических отношений РРМ. Порог чувствительности оценивается примерно 0,2—0,3% для молибдена и 0,1—0,2% для вольфрама.

§ 14. Ртуть

Среднее содержание ртути в земной коре равно $7 \cdot 10^{-6}$%, а содержание в рудных месторождениях может меняться от 0,01% (комплексные руды) до 5—8% (собственно ртутные месторождения). Основным рудным минералом ртути является киноварь (HgS) с содержанием ртути 86,2%. Важное практическое значение имеет также самородная ртуть. Выделяют собственно ртутные, ртутно-сурьмяные, ртутно-мышьяковые и полиметаллические месторождения.

Для анализа проб на ртуть применяются ББМ (гл. 15) и ННМ-т (см. § 2 гл. 23). Порог чувствительности этих методов к ртути оценивается равным соответственно 0,1 и 0,5%.

В коренных выходах для определения ртути в мономинеральных рудах используются методы ГГМ-с, ДГГМ-с, РРМ, СНГМ и ННМ. С помощью интенсиметрических методик ГГМ-с и ДГГМ-с содержание ртути в рудах можно определять соответственно с порогом чувствительности 0,15—0,3 и 0,1—0,2% (см. гл. 20).

При измерениях на плоской поверхности с помощью РРМ при работе со сцинтилляционными счетчиками порог чувствительности на ртуть достигнут равным 0,05%, а при работе с полупроводниковыми счетчиками — 0,01% [35.36]. При изучении разрезов скважин с приборами на сцинтилляционных счетчиках порог чувствительности к ртути оценен в 0,2—0,3% (см. гл. 16), а при измерениях по СНГК — в 0,1% (см. гл. 24).

В связи с тем, что на показания ННМ существенное влияние оказывают изменения влажности горных пород, для определения ртути в мономинеральных рудах привлекают двухисточниковую методику ДННК (см. рис. 23-31). С ее помощью в зависимости от вещественного типа руд содержание ртути можно выявлять с порогом чувствительности от 0,08 до 0,3%.

Для определения ртути в сложных рудах привлекается комплекс методов ННК-т и ДГГК-с. С их помощью ртуть можно определять с порогом чувствительности 0,03—0,04%. Наиболее рациональным при этом следует считать комплекс методов ДГГК-с и ДННК-т. Существенную помощь при выявлении ртути могут оказывать методы ИННК и ИНГК.

§ 15. Полиметаллические месторождения

Из полиметаллических месторождений обычно извлекается большое число полезных ископаемых. Важными из них являются свинец, цинк, серебро и др. По составу вмещающих пород полиметаллические месторождения подразделяются на карбонатные (скарновые) и силикатные (осадочного и магматического происхождения).

Для анализа свинца в пробах мономинеральных руд привлекаются ББМ (гл. 15) и ГБМ (§ 1 гл. 17). С их помощью достигнут порог чувствительности 0,1%. Раздельное определение в пробах свинца, бария и цинка может производиться по методике РРМ (см. табл. 16-2). К полиметаллическим месторождениям обычно приурочиваются концентрации радиоактивных элементов. Поэтому для их поисков привлекаются различные радиометрические методы (гамма-методы и эманационная съемка) [12.37, 31.22, 35.16, 35.39, 35.40].

Так, эманационная съемка эффективна при поисках полиметаллических оруденений, связанных с зоной скарнов, приуроченных к контакту гранитов и известняков [35.40]. Наличие контакта с достаточной уверенностью может быть прослежено гамма-съемкой и магнитной съемкой. Однако собственно скарновые породы гамма-съемкой не выделяются, что обусловлено, по всей видимости, выщелачиванием из скарнов в приповерхностном слое радиоактивных элементов. Магнитная съемка также не везде позволяет выделять зоны скарнов, например на участках, где сильномагнитные минералы отсутствуют. Эманационная же съемка позволяет четко отмечать скарновые зоны во всех случаях. Ее применению благоприятствует также наличие зон дробления скарнов.

Результаты исследований с применением ЭС на одном из участков Центрального Казахстана показаны на рис. 35-4 [35.39]. Видно, что рудное тело на профилях эманационной съемки четко выделяется рез-

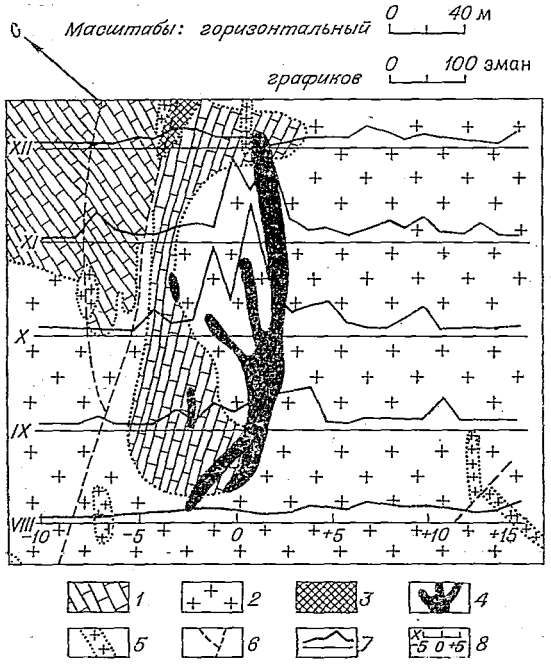


Рис. 35-4. Графики концентраций радона в почвенном воздухе (по И. С. Цигельману).

1 — мраморизованные, местами слабо скарнированные известняки, *2* — порфировидные роговообманково-биотитовые граниты, *3* — кварциты по известнякам, *4* — рудные тела с полиметаллическим оруденением, *5* — аплитовидные графит-порфиры, *6* — тектонические разломы, *7* — концентрации радона в подпочвенном воздухе, *8* — профили и точки отбора проб.

кими максимумами величиной до 50—150 эман, что намного превосходит общий фон, условно принятый в 10 эман. Подобного рода скарновые зоны выделяются под плащом наносов мощностью не свыше 2—3 м.

Поскольку выделенные эманационной съемкой тектонические и скарновые зоны не всегда содержат полиметаллическое оруденение, ее необходимо сочетать с другими геофизическими методами, например, электроразведкой, так как рудные тела рассматриваемого типа, как правило, выделяются на фоне окружающих пород низкими сопротивлениями. Следует иметь в виду, что электроразведка также однозначно не выделяет рудные зоны. Комбинация же эманационной съемки и электроразведки намного повышает вероятность выявления рудных зон [35.18].

О суммарном содержании в полиметаллических рудах полезных ископаемых можно судить по данным ГГМ-п. Количественные определения различных элементов ведут по методикам ГГМ-с, РРМ и НГМ. Ниже рассмотрим возможности определения в этом типе руд отдельных полезных ископаемых.

О возможностях выявления свинца в полиметаллических рудах разного типа можно судить по данным табл. 35-2.

При изучении полиметаллических месторождений в рудах важно оценивать, кроме свинца и бария, и содержания цинка. Одновременное определение этих элементов может быть произведено при работе с шестиканальным анализатором и возбуждении характеристического излучения *K*-серий бария и цинка и *L*-серии свинца. В качестве источников излучения при решении этой задачи можно использовать препарат $BaS^{35}O_4$ и др. Регистрировать излучение следует при помощи пропорциональных счетчиков. Примером определения всех трех элементов служат кривые, показанные на рис. 35-5. При определении этих элементов в рудах спектральное отношение измерялось в следующих энергетических диапазонах: 9—10 и 15—16 кэВ (цинк); 12—14,5 и 19—21 кэВ (свинец) и 31—33,5 и 40—50 кэВ (барий). Видно, что данные РРК хорошо согласуются с результатами кернового опробования руд.

Аналогичная методика использовалась также для одновременного определения в рудах свинца, цинка и железа.

Дж. Р. Родесом и др. [10.28] для определения серебра по K_α-излучению использовался изотоп прометий-147 (активностью 2 Ки) с тормозной мишенью из алюминия. Порог чувствительности к серебру при точечных замерах оценен равным 0,015%. В качестве дифференциальных фильтров использовались фольги из молибдена и родия толщиной соответственно 50 и 63 мг/см^2.

Для определения кадмия в полиметаллических рудах привлекался метод ННК. В результате исследований установлено, что этот элемент в рудах можно выявлять с порогом чувствительности 0,03—0,05% (см. п. 5 § 7 гл. 23).

Определение меди в рудах этого типа может производиться по методике НАК с порогом чувствительности 0,2—0,3% или по методике РРК (см. § 8 этой главы).

§ 16. Редкие и рассеянные элементы

Редкими элементами обычно считаются литий, бериллий, цирконий, гафний, тантал и ниобий, а рассеянными — цезий, рубидий, скандий, галлий, рений, селен, кадмий, индий, таллий, германий и теллур. К ним относятся и благородные металлы — платина, золото и др. Все они в природе встречаются в небольших количествах и в основном извлекаются в комплексе с рудами других полезных ископаемых.

Вопросы анализа в пробах лития рассматриваются в § 2 гл. 23, бериллия — в § 1 гл. 26 и § 1 гл. 35, кадмия — в § 2 гл. 23 и циркония — в § 9 гл. 10. В связи с тем, что большинство из перечисленных элементов в природе встречается в небольших количествах, определение их в пробах может производиться лишь при облучении мощными потоками излучения (с применением ускорителей, ядерных реакторов и т. п.). Подробно все эти вопросы обсуждаются в гл. 28 (см. также приложение 6).

К указанным типам месторождений полезных ископаемых обычно приурочиваются повышенные концентрации радиоактивных элементов. Это позволяет для их поисков использовать радиометрические методы в комплексе с другими геофизическими методами [35.12—35.14, 35.17, 35.18, 35.21, 35.22, 35.24, 35.31, 35.32, 35.40, 35.41]. Таким образом ведутся поиски как коренных, так и россыпных месторождений перечисленных полезных ископаемых.

Таблица 35-2

Возможности методов при определении в рудах свинца

Метод с регистрацией излучения, кэВ	Типы руд	Порог чувствительности, %	Ошибка абс. (отн.), %
ГГМ-с, ГГК-с	Без бария, с небольшими вариациями железа, цинка и меди	0,2—0,3	(5—8)
ДГГС-с	То же	0,1—0,2	0,06
ГГК-с (70-90; 100—120)	Без бария, с меняющимся содержанием железа, цинка и меди	0,4—0,5	0,3
ГГК-с (36—65; 95—105)	С барием и меняющимся содержанием железа и др.	0,5—0,6	0,65
ГГК-ск (75—85; 95—105; 150—160)	То же для вкрапленных руд	0,2—0,5	0,2—0,4
РРМ и РРК (25—35 и 35—40 для Ва; 70—80 и 135—145 для Рв)	С барием	0,2—0,3	0,1—0,15

Так, установлено, что в пониженных местах рельефа скапливаются различные тяжелые минералы, образующие месторождения золота, серебра и др. Здесь же имеют тенденцию скапливаться и тяжелые минералы урана и тория, что позволяет для поисков указанных месторождений использовать радиометрические методы (аэросъемку и наземные методы). Таким образом был открыт ряд россыпных месторождений.

Аэрогамма - съемка применялась также для

поисков и коренных месторождений рассматриваемых элементов. Например, Р. И. Дубовым и др. [35.18] указывается, что к районам месторождений олова, вольфрама, молибдена, золота, полиметаллов, сурьмы и плавикового шпата в районах Забайкалья приурочиваются повышенные содержания радиоактивных элементов. Там же, где аэрогамма-съемкой не было обнаружено аномальных гамма-полей, нет и сколько-нибудь значительных месторождений рассматриваемых полезных ископаемых. При обследовании всех более или менее изученных промышленных месторождений золота, вольфрама, олова и молибдена всегда отмечаются радиоактивные аномалии самой разнообразной величины. При залегании месторождений среди гранитоидов они в среднем значительно больше по сравнению со случаем залегания их среди осадочных толщ или эффузивных образований.

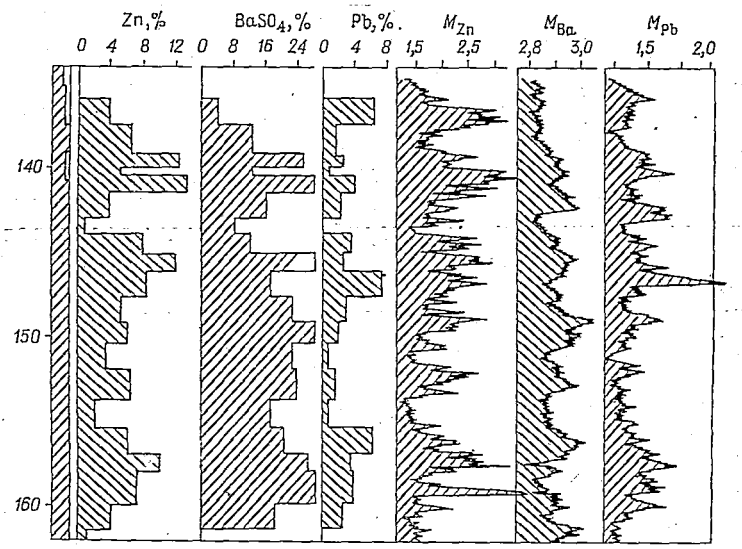


Рис. 35-5. Сопоставление данных РРК с результатами кернового опробования (по В. А. Мейеру и др.).

При изучении месторождений вольфрама, олова, молибдена и золота полное совпадение радиоактивных аномалий с участками максимальной концентрации перечисленных элементов отмечается не всегда. Причем чаще всего наблюдается связь радиоактивных аномалий с рудными телами первых трех элементов (вольфрам, олово, молибден) по сравнению с последним (золото).

В связи с тем, что рудопроявления искомых элементов могут несколько смещаться от участков максимальной радиоактивности, гамма-съемку всегда следует сочетать с металлометрической съемкой. При этом гамма-съемка позволит обнаружить наиболее перспективные участки, а металлометрия — осуществлять их дальнейшую детализацию.

Так, В. А. Евстрахин [34.4] отмечает, что при исследованиях по АэГС в одном из районов повышенными значениями гамма-поля в 17 мкР/ч (на высоте 30 м) были выявлены интрузии сиенит-порфиров, залегающие под наносами мощностью 1,5—2,5 м среди слаборадиоактивных пород песчано-сланцевой толщи. По данным наземной съемки, эти сиенит-порфиры отбивались аномалиями 20—100 мкР/ч и выше, а вмещающие песчано-сланцевые породы — значениями 10—15 мкР/ч. Минералогический анализ показал, что аномальные участки обусловлены вкрапленностью пирохлора — $(Na, Ca, \ldots)_2$, $(Nb, Ti, \ldots)_2$ $O_6[F, OH]$. Содержание пирохлора в породах оказалось столь высоким, что их можно рассматривать как ниобиевые руды.

Аналогичного рода картина наблюдается и при выявлении сиенит-порфиров, интересных с точки зрения содержания в них ниобия [31.4], и зон гидротермальных изменений, содержащих тантал [31.5]. Таким же образом было открыто месторождение ниобиевых руд, связанное с карбонатитами и т. д. [31.4].

Выявление полезных ископаемых, приуроченных к кварцевым жилам, можно вести с помощью НАК по недостатку алюминия (см. п. 2 § 7 гл. 25).

В связи с низкими концентрациями рассматриваемых элементов в горных породах к настоящему времени практически нет ни одного прямого метода для их определения. Исключениями являются бериллий, рассмотренный в § 1 этой главы, и кадмий, встречающийся в полиметаллических месторождениях (см. § 15 этой главы). Для определения циркония в поверхностных отложениях привлекалась автомобильная методика РРМ (см. § 7 гл. 16). Определение других редких и рассеянных элементов может производиться только по анализу образцов проб, о чем говорилось в начале этого параграфа.

Глава 36

ПОИСКИ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ РУД

К радиоактивным элементам, как известно, относят семейства урана и тория. Из них наибольший практический интерес представляет уран. Поэтому его поискам, разведке и разработке в ядерной геофизике уделяется наибольшее внимание. Некоторые сведения о содержании радиоактивных элементов в породах и урана в рудах рассматриваются в § 1—3 гл. 9.

§ 1. Применение радиометрических методов для поисков радиоактивных руд

Интенсивное развитие в послевоенное время методов разведочной радиометрии связано исключительно с остро возникшей задачей поисков и разведки радиоактивных руд (урана и др.). Над решением этой задачи в СССР и за рубежом работали большие группы геофизиков и геологов. Для поисков руд урана привлекались все методы разведочной радиометрии от аэрогамма-съемки до автомобильной, пешеходной и эманационной съемок, а также металлометрия и гамма-каротаж (см. раздел III и работы [1.2, 1.7, 1.19, 9.14, 9.18, 9.21, 36.9, 36.3]. После того, как вся территория с коренными выходами пород на дневную поверхность (или перекрытыми маломощными наносами) была покрыта съемкой, исследования распространились на районы с более мощными наносами. Для поисков урана все шире стали применяться методы, основанные на измерениях радиоактивности в бурках (шпурах) и скважинах, проходимых с помощью виброзадавливателей (пенетрационно-каротажная съемка). (Возможности лабораторного радиометрического анализа рассмотрены в гл. 10).

Остановимся на радиометрических методах при изучении коренных пород.

При работе с приборами, оборудованными газоразрядными счетчиками, в основном велось качественное определение радиоактивных элементов в горных породах и только при пешеходной бета- и гамма-съемке в отдельных случаях — урана в коренных породах. Внедрение в практику геофизических исследований аппаратуры со сцинтилляци-

онными счетчиками и особенно гамма-спектрометров позволило по данным гамма-методов непосредственно выявлять радиоактивные элементы в горных породах. Уран при этом, как уже неоднократно отмечалось, можно определять лишь в равновесных рудах по радию. В работе И. П. Шумилина и Н. И. Калякина [10.7], в частности, показано, что при наличии радиоактивного равновесия между ураном и радием содержание урана в коренных породах с помощью интенсиметрического гамма-радиометра типа СРП-2 можно определять с точностью примерно $3 \cdot 10^{-4}$%. Порог чувствительности ГМ при этом в зависимости от типа пород может меняться от $n \cdot 10^{-4}$ до $n \cdot 10^{-3}$%.

С помощью полевого переносного гамма-спектрометра СП-3 радиоактивные элементы уран (по радию), торий и калий можно фиксировать начиная с их кларковых концентраций [11.16]. В работе [11.7] показано, что уран (по радию) и торий можно определять с концентрацией $1 \cdot 10^{-4}$%, а калий — с концентрацией 0,1—0,2%. Относительные ошибки измерений составляют 30—40%, а более высокие концентрации определяются с ошибкой 10—20%. Различные примеры использования СП-3 для указанных целей рассматриваются в работах [11.7, 11.16], возможности применения трехканального гамма-спектрометра — в § 2 гл. 11.

С помощью аэрогамма-метода при работе с анализатором АИ-100 и сцинтилляционным счетчиком (кристалл йодистого натрия диаметром 12 см и высотой 6 см и ФЭУ-49) на высоте полета 25 м можно вести определения радиоактивных элементов со следующим порогом чувствительности: радия в пределах $(1{,}5—7) \cdot 10^{-4}$% равновесного урана, тория — $(4—11) \cdot 10^{-4}$% и калия — 1—2,5% [31.7]. Погрешность определения радия и тория в среднем равнялась соответственно 28 и 21% в сравнении с данными радиохимического анализа отобранных проб. Применение при этих исследованиях более толстого кристалла (8 см при прочих равных условиях) позволяет понизить погрешность определения радия до 2—5%, тория до 8—12% и калия до 6—19%. Результаты выявления радиоактивных элементов с самолета обсуждаются также в работах [10.28, 11.28, 31.6, 31.9, 31.10].

В работе [31.8] показана возможность определения радиоактивных элементов с помощью автомобильной гамма-съемки с применением анализатора АИ-100 и сцинтилляционного счетчика (с кристаллом йодистого натрия диаметром 7 см и толщиной 5 см и ФЭУ-11Б). При изучении гранитов получены следующие погрешности: при определении радия — 12—16%, тория — 10—13% и калия — 10—13%.

Кларковые содержания в породах урана по радию, как показано в работах [6.71, 6.85], при помощи гамма-спектрометрической аппаратуры ГК можно фиксировать с относительной погрешностью 30%, тория — 20% и калия — 10%. Содержание урана в 0,006% при этом можно определять с относительной ошибкой 9—10%, а содержания тория в 0,0013 и 0,011% — соответственно с ошибками 13 и 5%. При изучении обсаженных скважин относительные ошибки определения в породах радиоактивных элементов возрастают до 25—50%, а в ряде случаев и до 100% [6.85].

При наличии в скважинах радона определение урана по радию ведут с регистрацией излучения в двух энергетических диапазонах: $\Delta E_1 = 180—230$ кэВ и $\Delta E_2 = 580—630$ кэВ или других [12.54, 36.7, 10.4].

§ 2. Поиски месторождений урана по их солевым ореолам

При разрушении горных пород уран сравнительно легко переходит в растворы, переносится поверхностными и грунтовыми водами и образует месторождения со смещенным радиоактивным равновесием.

Поиски таких месторождений урана, а также коренных месторождений, залегающих на глубине и подверженных выщелачиванию, весьма затруднены. Ведутся они обычно по их солевым ореолам рассеяния [10.8, 36.3].

К методам, основанным на изучении солевых ореолов урана, относятся уранометрическая [1.7, 1.19, 36.3], радиогидрогеологическая [36.10; 10.8] и биогеохимическая съемки [9.18, 36.3].

Уранометрическая съемка сводится к поискам месторождений урана по их первичным (эндогенным) и механическим (обломочным) ореолам рассеяния, а также по твердой фазе солевых ореолов и потоков рассеяния. Сущность ее заключается в массовом опробовании на уран коренных пород и рыхлых отложений. При решении этой задачи предварительно оценивается нормальный фон пород по 150—200 пробам. За поисковый критерий обычно принимается 2—3-кратное превышение над этим фоном. Анализ содержания урана в пробах обычно проводится с помощью радиометрических методов (см. гл. 10). В зависимости от исследуемых районов уранометрическая съемка подразделяется на три разновидности:

1. Металлометрия аллювия с отбором проб донных отложений в небольших речках и ручьях в малоизученных районах. Солевые потоки урана в таких долинах могут составлять от 0,5 до 6—7 км. Поэтому расстояния между точками отбора проб выбираются через 300—400 м. Обнаруженные повышенные концентрации урана наносятся на карту в виде специальных условных обозначений.

2. Металлометрия почв, продуктов разрушения, пород, оставшихся на месте (элювий), и скоплений разрушенных пород на склонах (делювий). Этот вид съемки приводится в районах с установленной урановосностью, прежде всего на площадях, которые прилегают к аномальным участкам гидросети. Отбор проб производится по профилям вкрест простирания предполагаемых рудоносных зон. Съемка обычно проводится в масштабе 1 : 10 000 (100×20 м) со сгущениями в пределах выявленных рудных зон. Результаты исследований в виде изолиний наносятся на карту. За фоновую концентрацию урана в породах принимается содержание $3 \cdot 10^{-4}\%$, а за аномалии — $(5—50) \cdot 10^{-4}$ и выше.

Этот вид съемки применяется сравнительно редко в местах развития сильно трещиноватых пород либо пород, перекрытых значительными наносами, препятствующими проведению обычной гамма-съемки. Глубинная гамма-съемка, естественно, имеет преимущество по сравнению с металлометрией.

3. Металлометрия коренных пород проводится в пределах рудных полей для выявления «слепых» рудных тел. Пробы отбираются прямо из обнажений и стенок горных выработок. Анализ их ведется с помощью радиометрии.

Радиогидрогеологический метод поисков радиоактивных руд основан на способности урана, радия и радона мигрировать в подземных и поверхностных водах. Вынос того или иного компонента из пород зависит от минерализации вод. Радиоактивные элементы могут удаляться от материнской породы на сотни метров и даже километры. Поэтому радиогидрогеологический метод считается весьма глубинным. С его помощью могут быть обнаружены глубоко залегающие руды урана.

При проведении исследований вначале оценивается радиоактивность вод с помощью СРП-2 и др., а затем отбираются пробы. Исследованиям подвергаются воды из родников, ручьев, рек, колодцев, горных выработок, скважин и т. д. Определение содержания радиоактивных элементов в пробах вод производится в лабораторных условиях: радия и радона — радиометрическими методами, урана — люминесцентным или калориметрическим методами. Последним этапом радиогидрогеологических исследований является детальное изучение геологической

и геохимической обстановки местности с целью выяснения причин аномальных содержаний в водах исследуемых элементов. За нормальные (фоновые) содержания урана в водах принимаются обычно значения от $n \cdot 10^{-7}$ до $n \cdot 10^{-5}$ г/л, а за аномальные — от $n \cdot 10^{-5}$ до $n \cdot 10^{-2}$ г/л, реже до $n \cdot 10^{-1}$ г/л.

В качестве поисковых критериев принимаются следующие: а) резко повышенные содержания в пробах воды урана; б) совместное повышенное содержание в пробах воды урана и радона; в) совместное повышенное количество в пробах воды урана, радия и радона. Съемка по одному радону представляет ценность лишь в районах развития плотных пород. По одному радию поиски урана, как правило, не ведутся.

Биогеохимическая съемка сводится к массовому отбору проб наземной флоры (растений и деревьев) и поискам растений — индикаторов урана. Последняя разновидность этой съемки иногда называется геоботанической.

Индикаторными растениями на уран являются хвойные деревья и розовоцветные кустарники, растущие в полупустынной местности, и розовоцветные травы (иван-чай и др.).

Отобранные пробы сжигаются, оставшаяся зола исследуется на уран. С помощью биогеохимического метода месторождения уран осадочного типа удается обнаружить на глубинах от 20 до 25 м от поверхности.

Следует заметить, что для поисков урана применяется также иногда люминесцентный метод, основанный на облучении пород ультрафиолетовыми лучами от специальных приборов. Под действием этих лучей многие вторичные минералы урана способны светиться в темноте.

§ 3. Разведка и разработка радиоактивных руд (рудничная радиометрия)

Применение радиометрических методов на этапе разведки, разработки и обогащения радиоактивных руд получило название рудничной радиометрии [10.8, 36.4, 36.8]. В задачи рудничной радиометрии входит: 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. Основным методом исследований в рудничной радиометрии является гамма-метод.

Для выявления, оконтуривания и опробования рудных тел в массивах могут применяться обычные радиометры, используемые при пешеходном гамма-методе. Однако в последнее время для этих целей разработан целый ряд специальных рудничных радиометров с подсветом шкалы и водонепроницаемым кожухом [6.34]. С их помощью производится детальное обследование горных выработок (стенок, кровли, забоя). Обследуются также шпуры и скважины (см. § 3 гл. 12), буримые из горных выработок.

В целях борьбы с потерями рудной массы при транспортировке руд производится тщательное обследование (контроль) путей их транспортировки при помощи рудничных радиометров. Контроль за потерями осуществляется также при сортировке и обогащении руд.

Качество отбитой горнорудной массы на первом этапе добычи радиоактивных руд оценивается в лабораторных условиях по отобранным пробам. При этом вначале применялись в основном химические методы анализа, а затем — радиометрические. В последнее время они в значительной степени заменены гамма-опробованием (гамма-экспресс-анализами [10.8, 36.5]) всей отбитой массы, а не отдельных проб, как

это делалось раньше. С этой целью гамма-опробование отбитой массы пород производится непосредственно в горных выработках (в забоях и очистных блоках). Кроме того, при гамма-опробовании обследуются ящики, вагонетки, транспортеры, автомашины, железнодорожные вагоны и т. д.

Для экспресс-анализов используются специальные рудосортировочные стационарные радиометры с блоками счетчиков различной конфигурации в зависимости от формы тары и транспорта.

Гамма-экспресс-анализы используютя для учета добычи руды, а также для контроля за технологическими процессами добычи, обогащения и переработки руд.

Для отделения радиоактивной руды от пустой породы необходимо производить ее сортировку и обогащение. При этом обогащаются руды до концентраций, определяемых данными технологического режима, необходимого для извлечения урана на определенной стадии его обогащения. Для сортировки и обогащения радиоактивных руд разработана специальная рудоразборочная аппаратура. Эта аппаратура при регистрации радиоактивного излучения выдает сигнал для приведения в действие рудосортировочного устройства шибера, пневмосбрасывателя и др.

Применение радиометрических методов на этапах разведки, добычи, обогащения и переработки руд обусловило экономию времени, снижение стоимости работ и повышение точности замеров [36.2]. Вопросы получения максимального технико-экономического эффекта при разработке и обогащении радиоактивных руд рассматриваются в работе [36.6, 36.11].

§ 4. Другие ядерные методы определения урана в горных породах и рудах

Из-за невозможности определения урана существующими радиометрическими методами назрела еще большая необходимость в разработке новых методов.

Я. А. Чубек (ПНР) обратил внимание на возможность использования в качестве репера на уран провала в спектре рассеянного излучения естественных радиоактивных элементов (ГМр-с, см. § 1 гл. 13). К-скачок для урана, как известно, приходится на энергию 115,4 кэВ. Поэтому область провала в спектре урановых руд падает на диапазон 100—150 кэВ. Наилучшие результаты получаются при измерении спектрального отношения в указанном диапазоне и диапазоне 300—700 кэВ. Порог чувствительности рассматриваемого метода к урану оценен в 0,05—0,1%. С помощью рассматриваемого метода в урановых рудах можно определять и другие тяжелые элементы. Так, измерение спектрального отношения в диапазоне энергий 95—105 и 150—160 кэВ позволяет вести определения в урановых рудах свинца, встречающегося совместно с ураном в полиметаллическом типе месторождений. Порог чувствительности к свинцу можно считать равным примерно 0,2—0,3%. По методике двойных спектральных отношений можно выявлять одновременно содержания в рудах урана и свинца и т. д.

В комплексе с ГК для определения урана в рудах в ряде случаев привлекается двухзондовый метод ГГК-п (см. п. 1 § 8 гл. 19). С его помощью определяются плотности руд; эти величины в свою очередь используются для оценки их пористости. С помощью этого комплекса методов можно определять только высокие концентрации урана в рудах (от 1% и выше). Метод ГК, естественно, позволяет выявлять уран только по радию.

Дж. Родесом и др. [10.28] для определения урана в рудах привлекался метод РРК с изотопом кобальт-57 ($T=270$ дней, $E_\gamma=123$ (88%) и

137(11,8%) кэВ) активностью 2 мКи. Дифференциальными фильтрами служили свинец и тантал толщиной соответственно 0,4 и 0,3 г/см^2 при измерении K_α-излучения урана с энергией 98,5 кэВ. Градуировочный график для диапазона 0—3% урана носил линейный характер. Порог чувствительности РРК к урану оценен равным 0,15%.

В последнее время для определения урана в рудах привлекаются нейтронные методы. Под действием тепловых нейтронов, как известно, может происходить деление ядер урана-235 с испусканием мгновенных и задержанных нейтронов.

С. А. Игумновым [29.20, 29.21] для определения урана по задержанным нейтронам были произведены исследования с ампульным нейтронным источником (см. § 6 гл. 29). При нескольких циклах измерений в течение 20—30 мин установлено, что концентрации урана в количестве 0,5% можно определять с относительной погрешностью 15%. При работе с нейтронными генераторами, по всей видимости, можно будет регистрировать и более низкие концентрации урана в рудах.

Об определении урана в рудах и породах можно судить по измерению мгновенных нейтронов. В тресте «Татнефтегеофизика» [29.75] этот метод привлекался для отбивки водонефтяного контакта по повышенным содержаниям урана в нефтях (см. § 6 гл. 29). Для выделения мгновенных нейтронов на фоне замедленных нейтронов генератора велось измерение надтепловых нейтронов с задержкой 200 мкс. Пропорциональный нейтронный счетчик окружался толстым слоем кадмия (2—3 мм).

Методы, основанные на применении радиоизотопных источников

Ядерная реакция или другое физическое явление, используемое в методе	Регистрируемая ядерная частица	Название метода	
		полное	сокращенное
1	2	3	4
А. Нейтронные методы			
(n, p)	Протон	Нейтрон-протонный метод	НПМ
(n, α)	Альфа	Нейтронный альфа-метод	НАМ
Взаимодействие нейтронов с ядрами вещества, используемое для определения влажности и сильно поглощающих элементов	Нейтрон	Нейтрон-нейтронный метод	ННМ
а) измерение потока тепловых нейтронов	»	Нейтрон-нейтронный метод на тепловых нейтронах	ННМ-т
б) измерение потока надтепловых нейтронов	»	Нейтрон-нейтронный метод на надтепловых нейтронах	ННМ-н
в) измерение потока резонансных нейтронов	»	Нейтрон-нейтронный метод на резонансных нейтронах	ННМ-р
г) измерение потока промежуточных нейтронов	»	Нейтрон-нейтронный метод промежуточных нейтронов	ННМ-п
д) измерение потока быстрых нейтронов	»	Нейтрон-нейтронный метод на быстрых нейтронах	ННМ-б
е) измерение зависимости потока тепловых нейтронов от потока надтепловых нейтронов, позволяющее исключать влияние изменения влажности пород на результаты определения в них сильно поглощающих элементов	»	Комплексный нейтрон-нейтронный метод	ННМ-т. н
ж) измерение отношения потока тепловых и надтепловых нейтронов и т. д. При выбранных оптимальных параметрах приборов это отношение не зависит от изменения содержания в породах водорода	Нейтрон	Нейтрон-нейтронный метод отношения тепловых к надтепловым нейтронам	ННМ-т.н
з) отношение потока тепловых нейтронов, измеренное на двух зондах (M зависит только от содержания в породах водорода, а $N'(l_2)$ — от содержания в них сильно поглощающих элементов)	»	Нейтрон-нейтронный метод измерения отношения тепловых нейтронов на двух зондах	ДННМ-т
и) измерения с двумя источниками (суммарный эффект при этом не зависит от изменения влажности пород)	Нейтрон	Двухисточниковая методика ННМ-т	ДННМ-т

1	2	3	4
к) измерение потока нейтронов, прошедших через толщу породы, применяющееся для определения влажности грунтов	»	Нейтронный метод пропускания нейтронов	НМп
Пространственно-временной анализ тепловых нейтронов по методике корреляции	»	Полуимпульсный нейтрон-нейтронный метод со стационарным источником	ИННМ′
$(n, n'\gamma)$	Гамма	Нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния нейтронов	НГМ′
Пространственно-временной анализ гамма-излучения, возникающего в реакции $(n, n'\gamma)$, по методике совпадений	»	Полуимпульсный нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния нейтронов	ИГНМ″
Возникновение гамма-излучения радиационного захвата нейтронов (n, γ)	»	Нейтронный гамма-метод	НГМ
Эффект комптоновского рассеяния гамма-квантов, возникающих в реакции (n, γ)	»	Нейтронный гамма-гамма-метод	НГГМ
Пространственно-временной анализ гамма-излучения, возникающего в реакции (n, γ), по методике корреляции	»	Полуимпульсный нейтронный гамма-метод	ИНГМ′
Измерение потока гамма-квантов радиационного захвата по методике просвечивания	»	Нейтронный гамма-метод просвечивания	НГМп
Суммарное измерение эффектов НГМ и ННМ с помощью гамма-детектора, обернутого слоем кадмия	Гамма-нейтрон	Нейтрон-нейтронный метод совместно с нейтронным гамма-методом	НГМ+ ННМ или условно НГМ-Cd
Измерение отношения потока гамма-лучей радиационного захвата к потоку тепловых или надтепловых нейтронов	»	Комплекс нейтронного гамма-метода и нейтрон-нейтронного метода	НГМ/ННМ
Это отношение при определенных параметрах (размер зонда и т. д.) не зависит от изменения содержания в породе водорода			
Возникновение радиоактивных изотопов под действием нейтронов:	Бета, гамма	Нейтронный активационный анализ	НА
а) возникновение радиоактивных изотопов под действием тепловых нейтронов	»	Нейтронный активационный анализ на тепловых нейтронах	НА-т
б) возникновение радиоактивных изотопов под действием резонансных нейтронов	»	Нейтронный активационный анализ на резонансных нейтронах	НА-р
в) возникновение радиоактивных изотопов под действием быстрых нейтронов	»	Нейтронный активационный анализ на быстрых нейтронах	НА-б
Возникновение метастабильных радиоактивных изотопов под действием нейтронов	Гамма	Нейтронный активационный анализ запаздывающих совпадений	НАзс
		Б. Фотонейтронные методы	
(γ, n)	Нейтрон	Гамма-нейтронный метод	ГНМ
Пространственно-временной анализ нейтронов (γ, n) по методике корреляции	»	Полуимпульсный гамма-нейтронный метод	ИГНМ′

Методы, основанные на использовании мощных ядерных установок

Ядерная реакция или другое физическое явление, положенное в основу метода	Регистрируемая ядерная частица	Название метода	
		полное	сокращенное
1	2	3	4
1. Методы, основанные на заряженных частицах			
Рассеяние ионов на ядрах атомов	Ионы	Ион-ионный метод	ИИМ
Активация ионами ядер атомов	Альфа и т. д.	Ионный активационный анализ	ИА
Рассеяние альфа-частиц на ядрах атомов	Альфа	Альфа-альфа-метод	ААМ
$(\alpha, n\gamma)$, $(\alpha, p\gamma)$ и другие процессы	Гамма	Альфа-гамма-метод	АГМ
Активация ядер атомов под действием альфа-частиц	Бета (+, —), гамма	Альфа-активационный анализ	АА
То же под действием гелионов (He^3)	»	Гелион-активационный анализ	He^3А
То же под действием тритонов	»	Тритонный активационный анализ	ТА
Возникновение запаздывающих нейтронов при активации некоторых ядер атомов под действием тритонов	Нейтрон	Тритонный активационный анализ на запаздывающих тритонах	ТАн
(d, p)	Протон	Дейтрон-протонный метод	ДПМ
Возбуждение ядер атомов под действием дейтронов	Гамма	Дейтронный гамма-метод	ДГМ
(d, n)	Нейтрон	Дейтрон-нейтронный метод	ДНМ
Активация ядер атомов под действием нейтронов	Бета (+, —), гамма	Дейтронный активационный анализ	ДА
Рассеяние протонов на ядрах атомов	Протон	Протон-протонный метод	ППМ
(p, n)	Нейтрон	Протон-нейтронный метод	ПНМ
(p, γ) и другие явления, приводящие к образованию гамма-квантов	Гамма	Протонный гамма-метод	ПГМ
Активация ядер атомов под действием протонов	Бета (+), гамма	Протонный активационный анализ	ПА
2. Гамма-методы			
(γ, n)	Нейтрон	Гамма-нейтронный метод	ГНМ
Возникновение в облучаемой среде фотонейтронов под действием тормозного излучения электронов (бета-частиц)	Нейтрон	Бета-нейтронный метод	БНМ
Регистрация фотонейтронов после импульса тока в ускорителе	»	Импульсный гамма-нейтронный метод	ИГНМ
Фотовозбуждение изомерных уровней ядер атомов (γ, γ')	Гамма	Гамма-активационный анализ	ГА′
(γ, n), (γ, p) и др.	Бета (+, —), гамма	Гамма-активационный анализ	ГА

1	2	3	4
Возникновение запаздывающих нейтронов при активации ядер атомов некоторых изотопов под действием гамма-квантов	Нейтрон	Гамма-активационный анализ на запаздывающих нейтронах	ГАн
		3. Нейтронные методы	
Измерение во времени потока замедляющихся нейтронов	Нейтрон	Импульсный нейтрон-нейтронный метод	ИННМ
а) регистрация тепловых нейтронов			ИННМ-т
б) регистрация надтепловых нейтронов			ИННМ-н
в) регистрация резонансных нейтронов			ИННМ-р
$(n, n'\gamma)$	Гамма	Нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния нейтронов	НГМ′
(n, γ)	»	Нейтронный гамма-метод радиационного захвата	НГМ
Измерение временного распределения гамма-излучения после импульса быстрых нейтронов	»	Импульсный нейтронный гамма-метод радиационного захвата	ИНГМ
а) при захвате тепловых нейтронов		»	ИНГМ-т
б) при захвате резонансных нейтронов		»	ИНГМ-р
Измерение гамма-излучения неупругого рассеяния в процессе импульса быстрых нейтронов	»	То же неупругого рассеяния нейтронов	ИНГМ′
(n, O)	Осколки	Нейтронно-осколочный метод	НОМ
Активация ядер атомов под действием нейтронов	Гамма, бета (—, +) альфа	Нейтронный активационный анализ	НА
а) быстрых		То же	НА-б
б) резонансных		»	НА-р
в) тепловых		»	НА-т
Возникновение запаздывающих нейтронов при активации ядер некоторых элементов под действием нейтронов	Нейтрон	Нейтронный активационный анализ на запаздывающих нейтронах	НАн
Возникновение в реакциях с нейтронами заряженных частиц, регистрируемых активационным способом по наведенной активности изотопов, образующихся на ядрах атомов элементов с известным их содержанием в пробах	Гамма, бета (+, —)	Нейтронные методы с регистрацией заряженных частиц по наведенной активности ядер атомов индикаторных (детекторных) изотопов, содержащихся или специально добавляемых в пробу	
а) реакция (n, α)	»	Нейтронный альфа-метод с активацией детекторных изотопов	НАМа
б) реакция (n, t)	»	Нейтрон-тритонный метод с активацией детекторных изотопов	НТМа
в) реакция (n, d) или образование дейтронов отдачи	»	Нейтрон-дейтронный метод с активацией детекторных изотопов	НДМа
г) реакция (n, p) или образование протонов отдачи	»	Нейтрон-протонный метод с активацией детекторных изотопов	НПМа

Нейтронные и фотонейтронные радиоизотопные лабораторные приборы

Название прибора и его тип	Назначение прибора (время анализа)	Тип детекторов	Тип источника и его активность, нейтр/с	Питание	Порог чувствительности, %	Абс. (отн.) ошибка, %	Вес, кг		Разработчик
							датчика	пульта	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нейтронная установка с ПС-10 000 и ВС-22 [4.19]	НПМ для определения водорода и влаги, НАМ для анализа лития и бора	ФЭУ-19	Ри+Be $5 \cdot 10^5$	Сеть	0,06—0,2	0,1—0,5			ИГиГ СО АН СССР
Нейтронная установка РАП-2М (нейтрон) [16.60]	ННМ для определения водорода и поглощающих элементов	ФЭУ-35 и литиевое стекло	$2 \cdot 10^4$	Сеть, Батареи	1 (H_2O) 0,03 (B)	(5—10) (5—15)		14	ВИМС
Нейтронная установка НИХ-2М [1,27]	ННМ для определения бора и других поглощающих элементов	Ионизационная камера	$(0{,}3—2) \cdot 10^6$	Батарея	0,03	(10)	180		ГеоХИ АН СССР
Нейтронная сцинтилляционная установка СНУ с радиометром СРП-2 [4.19]	ННМ для определения влажности и поглощающих элементов	ФЭУ-35, Т-1, Т-5, литиевое стекло	$5 \cdot 10^5$	Батарея	1 (H_2O) 0,03 (B)	(5—10) (3)		10	ИГиГ СО АН СССР
Нейтронно-резонансная установка НРУ со стандартной радиометрической аппаратурой [4.19]	ННМ-р для определения серебра, индия, диспрозия и других элементов, а также высоких концентраций бора	Резонансный детектор и счетчики	$6{,}8 \cdot 10^6$	Сеть	0,01 (Ag)	0,006			ИГиГ СО АН СССР
Нейтронно-резонансная установка с ручным управлением НРУР со стандартной радиометрической аппаратурой [23.62]	То же	То же	$6{,}8 \cdot 10^6$	»	0,01 (Ag)	0,006			То же
Нейтронно-резонансная установка «Резонанс-1» со стандартной радиометрической аппаратурой [23.17]	»	»	$5 \cdot 10^6$	»	0,01 (Ag)	0,006			ВНИИРТ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нейтронная гамма-установка [24.42]	НГМ для определения железа в пробах	Сцинтилляционный счетчик	$1 \cdot 10^6$	Сеть	3	1,6			Р. Кристель, К. Люнгрен
Нейтронная гамма-установка «Нейтрон-3» [24.12]	НГМ для определения N, Si, S, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu	То же	$n \cdot 10^5$	»	0,2—1,0S 0,2—0,5 Fe, Ni, Cu				ВНИИЯГГ
Нейтронная гамма-установка [24.27]	НГМ для определения кадмия	СТС-6	$3 \cdot 10^5$	»	0,035				ИГД им А. А. Скочинского
Установка нейтронно-активационная («Нейтрон-2») [10.8, 25.59]	НА для определения алюминия, кремния, марганца, фтора, ванадия, меди и других элементов	Газоразрядный или сцинтилляционный счетчики	Ро+Be 10^7	Сеть, Аккумуляторы	10(F), 5(Al), 10(Si), 0,01(V, Mn) 0,1(Cu)	(5—10)	32	16,3 (пульт), 130 (активатор)	ОКБ МГ СССР, ВНИИЯГ, ВГТ МГ РСФСР
Фотонейтронная установка типа ФНМ-2 с радиометром С4-3 [26.22]	ГНМ для анализа бериллия в порошковых цилиндрических кассетах	СНМО-5 (1 шт.)	Сурьма — 124 0,1 Ки	Сеть	0,001	(20—30)	350	40	Х. Б. Межиборская
Фотонейтронная установка КазИМСа [26.16]	То же	СНМО-5 (3 шт.)	То же 0,075 Ки	»	0,001—0,0002				И. П. Кошелев и др.
Фотонейтронная универсальная установка РОБ-1 (ФНУВ-4-59) с радиометром С4-3 [26.28]	»	СНМО-5 (4 шт.)	То же	»	0,0007	(30)	180	40	ВИРГ
Универсальная лабораторная фотонейтронная установка УЛУФОН с радиометром С4-3 [20.20]	»	СНМО-5 (20 шт.)	То же	»	$2 \cdot 10^{-5}$		400	40	»
Фотонейтронная установка «Маяк-1» [26.28]	»		То же 0,2 Ки	»					Англия
То же «Маяк-2» [26.28]	»		То же 1 Ки	»					»
Фотонейтронная установка «Берилл-2» (РАП-6Л) [16.60]	ГНМ для анализа бериллия в порошковых дискообразных кассетах и штуфах		То же 20 мКи	Сеть и батареи	$5 \cdot 10^{-4}$	(20—30)	190		ВИМС
Дейтериометр К. П. Хайга	ГНМ для анализа дейтерия	Борные камеры	Натрий-24 1 Ки	Сеть		(2—5)			Англия
Дейтериометр В. И. Баранова и др. [26.2]	То же	Пропорц. борные счетчики (20 шт.)	Натрий-24 126 мКи	»		(1,5—2,5)			ГеоХИ АН СССР
Дейтериометр В. Н. Сойфера и А. В. Егорова [26.5]	»	То же (18 шт.)	Натрий-24 100 мКи	»		(2—3)			ВНИИЯГГ

Нейтронные и фотонейтронные переносные и перевозные радиоизотопные приборы

Название прибора и его тип	Назначение прибора (время измерений)	Тип детекторов	Тип источника и его активность, нейтр/с	Питание	Порог чувствительности, %	Абс. (отн.) ошибка, %	Вес, кг		Разработчик
							датчика	пульта	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нейтронный влагомер универсальный НВУ-1 с радиометром М-30М [19.65]	ННМ-т для измерений с поверхности и в бурках	СНМ-11	Pu+Be $5 \cdot 10^4$	Батареи	1—2 H_2O	0,5—1 H_2O (0,01 г/см^3)			ВНИИГИМ
Нейтронный влагомер Р-21 [19.79]	ННМ-т для измерений с поверхности	Нейтрон. счетчик (10 шт)	Ra+Be $8 \cdot 10^4$	»	»	То же	19 (общ. вес)		США
Нейтронный влагомер Р-19 [19.79]	ННМ-т для измерений в скважинах	Пропорц. счетчики	$6 \cdot 10^4$	»	»	»			»
Нейтронный влагомер МНР-100 [19.65]	То же	То же	То же	»	»	»			Франция
Нейтронный приставной борметр со специальным радиометром [21.1]	ННМ-т для определения бора и других поглощающих элементов	СНМО-5 (2 шт.)	$2 \cdot 10^4$	»	0,003В		11,2	5,3	ГеоХИ АН СССР
Нейтронный приставной борметр с пультом радиометра СРП-2 [21.1]	То же	СНМО-5 (2 шт.)	То же	»	»	»	6	2	»
Нейтронный приставной борметр с радиометром СРП-2 и приставкой с ЭМСом [4.19]	»	Т-1 или Т-5 с ФЭУ-35	$5 \cdot 10^5$	»	0,1—0,2		3	4	ИГиГ СО АН СССР
Нейтронный приставной прибор с пультом радиометра СРП-2 [4.19]	»	Т-1 с ФЭУ-24	$2 \cdot 10^6$	»	0,2Hg		2	2	ВИРГ
Автомобильный нейтронный прибор [21.1]	ННМ-т и НГМ для определения бора и хлора	Пропорц. и газоразрядн. счетчики	$1 \cdot 10^7$	Аккумулятор	0,003В		(170 общ. вес)		ГеоХИ АН СССР

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нейтронный индикатор влажности НИВ-1 с радиометром М-30М [19.65]	НГМ+ННМ для измерения влажности в бурках и скважинах глубиной до 6 м	СТС-5 (4 шт) с кадмиевым экраном	10^5	Батарея	2,4 H_2O	2	0,8	5,5	ВНИИГИМ
Переносной бериллометр Г. Бизби и др. [26.37]	ГНМ для поисков бериллия	Пропорц. нейтронные счетчики (4 шт.)	Сурьма-124 50 мКи	То же	0,002	(30)	16 (Общ. вес)		Англия
Переносной бериллометр А. К. Сенько [6.46]	То же	СНМО-5 (4 шт.)	Сурьма-124 10 мКи	»	0,003	(30)	5		ВИРГ
Переносной бериллометр Л. Левборга [10.28]	»	Счетчики с He^3 (2 шт.)	Сурьма 124 20 мКи (31 ампула)	»	0,0015		20		
Переносной бериллометр И. П. Кошелева, О. В. Шишакина и др.	»	СНМО-5 (2 шт.)	Сурьма-124 15—20 мКи	»	0,007	(40)			КазИМС
на базе радиометра ПГР [20.19]	»								
Переносной бериллометр Э. В. Егорова [26.10]	»	ФЭУ и люминофор с Т-2	Сурьма-124 75 мКи	»	0,0007		8,5		ВИРГ
Переносной бериллометр Г. Браунелла [26.40]	»	ФЭУ с ZnS+ +B	Сурьма-124 46 мКи	»			10		Канада
Переносной бериллометр «Берилл-2» (РАП-6) А. Л. Якубовича и др. [16.60]	»	ФЭУ-49 с ZnB+ +B	Сурьма-124 20 мКи	»	0,001		10	2,5	ВИМС и ОКБ МГ СССР
Переносной бериллометр Б. И. Полякова и др. [6.17]	»	СНМО-5 (6 шт.)	Сурьма-124 100 мКи	»	0,0001		17		ВИРГ
Портативный бериллометр «Берилл-3» [26.8]	»	ФЭУ-13 с ZnS+ +B	Сурьма-124 5 мКи	»	0,005		5	3,5 (пульт) 18 (тележка)	ВИРГ и ОКБ МГ СССР
Переносной бериллометр В. В. Шестакова [16.62]	»	ФЭУ-14 с ZnS+ +B	Сурьма-124 15 мКи	»	0,01		1,7		ИГУФ АН СССР
Полевой высокочувствительный бериллометр «Берилл-4» [6.17]	»	Сцинтилляц. счетчик	Сурьма-124 30 мКи	»	0,0005		18	4,5	ВИРГ и ОКБ МГ СССР

Некоторые нейтронные и фотонейтронные скважинные радиоизотопные приборы

Название прибора и его тип, скорость каротажа	Назначение прибора, порог чувствительности (p_0), точность абсолютная (и относительная)	Тип детектора	Тип источника и его активность, нейтр/с	Питание	Глубина исслед. скважин и температура t, °С	Диаметр глубинного прибора, мм	Вес, кг: глубинного прибора	Вес, кг: пульта	Разработчик
Прибор для определения влажности пород с рессорной пружиной [22.116]	ННК-т	Сцинтилляционный							ПНР
Прибор для определения пористости пород, естественной радиоактивности и кавернограммы [22.166]	ННК-н, ГК и кавернометрия. Зонд ННК-н расположен в выносном блоке	Пропорциональный		Движок, сеть		127 (скважина)			США
Двухзондовый прибор ННК-н для определения пористости пород с каналом ГК [5.9]	ННК-н на зондах 25 см (учет влияния глинистой корки) и 50 см (для определения пористости)	Сцинтилляционный	Ро+Be	То же	3 км, +70	85	70		ВУФНИИ Геофизика
Двухзондовый прибор ННК-т для определения пористости пород [19.178]	ННК-т на зондах 70 и 90 см с измерением отношения скоростей счета	Пропорц. с He^3	10^3 нейтр/с	»		29			США
Прибор ННК с прижимной пружиной и экранировкой со стороны скважины из кадмия и бора [16.8]	ННК-т и ННК-н для определения бора, редких земель и кадмия	СНМО-5	$5 \cdot 10^6$	»		73			Каз. фил. ВИРГа
Сцинтилляционный влагомер-плотномер [22.171]	ННК, ГГК-п, ГМп	СНМО-5 ФЭУ-13 и ЛДНМ-11	10^5 цезий-137 0,2—0,5 мг·экв радия и кобальт-60 1—2 мг·экв радия	Аккум. КН — 10 (10 шт.)	20 м для ННК и ГГК-п и 5 мм для ГМп				ВНИИРТ
Каротажный бериллометр ГНК-1 (см. табл. 26-2) [26.7]	ГНК для определения бериллия ($p_0 = 5 \cdot 10^{-3} — 5 \cdot 10^{-4}$ %)	ФЭУ-13 и ZnS+B (Ø 52, h = 65 мм, ε = 20%)	Сурьма-124; 40—100 мКи			60	25		ВИРГ
То же	То же	ФЭУ-16 и ZnS+B	То же			48			»
Каротажный бериллометр ГНК-2А [26.7]	(ННК) и ГК (ГГК)	ФЭУ-35 и М-21В или NaJ(Tl)	»		1 км, +40	38	8		»

Некоторые сведения о химических элементах и определении их ядерными методами (названия установок в столбце 9 расшифрованы в примечании)

Элемент	Символ	Z	A	$\beta_0=\frac{Z}{A}$	ρ, г/см³	Кларковое содержание, вес. %	Промышленное содержание или содержание в породе, вес. %	Ядерные методы определения, пороги чувств. (погрешн.) при измерениях в лаб. (без индекса), п—в поле, в обн. и горн. выр., с— в скважинах
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Азот	N	7	14,008	0,5		0,01	75,5 (воздух) 0,07—1,7 (нефть) 1—5 (уголь)	ААМ—0,5%, АПМ—0,5%, НГМ—0,1—0,5%
Актиний . . .	Ac	89	(227)	0,3886	—	$5{,}5\cdot10^{-14}$	$1{,}5\cdot10^{-8}$ (уран. руда)	Естественно-радиоактивный
Алюминий . .	Al	13	26,98	0,4820	2,7	8,8	20—32 (бокситы)	ААМ — 1%, АПМ — 1%, АА (2% отн.), НГМ — 15% с, НА — 0,15—1,5% (1,05—1,5 отн. %), 3—7% (8% отн..) ДА — 0,02%, ПГМ — 0,01%, НА-б — 0,1% (4% отн. НГ), НА-т — $7\cdot10^{-3}$% (НР) $1\cdot10^{-3}$% (ЯР).
Америций . .	Am	95	(243)	0,391	—	—	—	Искусственно-радиоактивный
Аргон	Ar	18	39,944	0,4506		$4\cdot10^{-4}$	0,934 об. % (воздух)	НА-т — $1\cdot10^{-4}$% (ЯР)
Астатин . . .	At	85	(210)	0,4005	—	—	Содержится в радиоактивных рудах	—
Барий	Ba	56	137,36	0,4076	3,65	0,05	3—40	ББМ — 0,3% (0,15%), ГХМ, п, с — 0,02—0,3%; ГБМ — 0,3% (0,15—1%); ГА′ — $6{,}5\cdot10^{-5}$ (ЛУЭ); ГА — $8\cdot10^{-3}$ (Б) НА-т — 0,02% (НР), $1\cdot10^{-4}$ (ЯР).
Бериллий . .	Be	4	9,013	0,4434	1,82	$5\cdot10^{-4}$	0,01 —0,1	АНМ (1, 5% отн.), АГМ; ГНМ — $2\cdot10^{-5}$%, $4\cdot10^{-4}$ п, с; АГМ — 0,01% (ВГ); ПГМ — $6\cdot10^{-3}$%; ГНМ — $2\cdot10^{-6}$%
Берклий . . .	Bk	97	(247)	0,393	—	—	—	Искусственно-радиоактивный

Бор	B	5	10,82	0,46,21	1,73;2,34	$3 \cdot 10^{-4}$	До 10 (часто) ÷ 20 (редко)	ААМ — 0,5%; АПМ — 0,5%; АНМ (1,5% отн.): АГМ, АА (2% отн.) НАМ (1,5% абс.), ННМ-т — 0,003——0,02% (0,001—1%), ННМ-р (1——1,6% отн.) ННМ-т — 0,003—0,1% п, с. НГМ — 0,03%, 0,3% с; АА——0,1 (ВГ); ДА — $1 \cdot 10^{-3}$%; ПГМ — 0,01% (М)
Бром	Br	35	79,916	0,4379	3,12	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$	0,007—0,5	ГА′— 0,5% НА-б — $8 \cdot 10^{-3}$% (НГ) НА-т — $5 \cdot 10^{-6}$% (ЯР)
Ванадий . . .	V	23	50,95	0,4514	6,0	0,015	0,1 ÷ 5	НА — 0,01—0,1% (5% отн.); НА-т —$5 \cdot 10^{-4}$% (НГ, НР), $1 \cdot 10^{-4}$% (ЯР)
Висмут . . .	Bi	83	209,0	0,3971	9,8	$2 \cdot 10^{-4}$	0,01—3 (часто), 7—25 (редко)	ГХМ, п, с,— 0,2÷0,3%; НА-т — $5 \cdot \cdot 10^{-3}$% (ЯР)
Водород . . .	H	1	1,008	0,9922		1,0	11, 19 (вода) 12÷15 (нефть)	БМп — 0,06% (0,03%); ГМп-п (0,2—0,3% воды), п — (0,4—0,8% воды), ГМп — сп (3% воды), НПМ — 0,06%; ННМ-т; НГМ — 0,1% (ЯР)
Вольфрам . .	W	74	183,92	0,4021	19,3	$2 \cdot 10^{-4}$	0,02—3	ББМ — 0,2%, ББМ′ — 0,02%; ХМп — 0,05 % (0,02—0,07%); БХМ; ГХМ — 0,1% (0,05%); п, с 0,2—0,3; ГГМ — с, п, с 0,3% (12% отн.); ГГМОп, с 0,2% (0,1% абс.), НА — 0,02% (10% отн.) ГНМ — $3 \cdot 10^{-4}$% (Б); НА-б — 0,1% (НГ); НА-т — $1 \cdot 10^{-3}$% (НР); $2 \cdot 10^{7}$% (ЯР)
Гадолиний . .	Gd	64	156,9	0,4068	7,96	0,001	0,01—1,35	ННМ-т — $n \cdot 10^{-4}$ — $2 \cdot 10^{-2}$% 0,003——0,01% с; НГМ — $5 \cdot 10^{-5}$% (ЯР); НА-т — $2 \cdot 10^{-6}$% (ЯР)
Галлий . . .	Ga	31	68,72	0,4446	5,91	0,0015	0,001—0,03	НА-б — $5 \cdot 10^{-4}$% (НГ)
Гафний . . .	Hf	72	178,6	0,4031	13,31	$3{,}2 \cdot 10^{-4}$	0,001—0,85	ГА′— $6 \cdot 10^{-4}$% (М); ГА — $1 \cdot 10^{-3}$% (Б); ИННМ-р — 0,04%; НА-б — $1 \cdot \cdot 10^{-3}$% (НГ), НА-т — $1 \cdot 10^{-4}$% (ЯР)
Гелий	He	2	4,003	0,4997		$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$ (воздух)	о, п — 10 (газы земного происхождения)

Продолжение приложения 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Германий . . .	Ge	32	72,60	0,4407	5,35	$7 \cdot 10^{-4}$	0,001—0,01	ГА — $3 \cdot 10^{-4}$% (Б) в золе углей; НА-б — $6 \cdot 10^{-4}$% (НГ); НА-т — $1 \cdot 10^{-4}$% (ЯР).
Гольмий . . .	Ho	67	164,94	0,4097	8,76	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,0015—0,2	НА-т — $2 \cdot 10^{-9}$% (ЯР)
Дейтерий . .	D	1	2,0147	0,496			0,015 (в водороде воды)	ГНМ (1,5—3% отн.); ДНМ — $5 \cdot 10^{-4}$%; ГНМ — $4 \cdot 10^{-4}$% (М)
Диспрозий . .	Dy	66	162,46	0,4062	8,56	0,001	0,005—0,6	ННМ-р — 0,2—0,5%; НА-т — $2 \cdot 10^{-5}$% (НР); $6 \cdot 10^{-7}$% (ЯР)
Европий . . .	Eu	63	152,0	0,4144	7,94	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,0015—0,2	НА-т — $5 \cdot 10^{-5}$% (НР), $1 \cdot 10^{-10}$% (ЯР)
Железо . . .	Fe	26	55,85	0,4656	7,87	5,1	30—66	ББМ — 1,5% (0,3—1%), ББМ′— 0,15%; БГМ (0,4%), ХХМ (0,3%), ГГМ-с, п, с 3—5% (1,5—2%), ГГМО л (0,5—1% абс.) п (2—3% абс.). ДГГМ-с п, с (0,7—1,4% абс.), ННМ-т 6%; 10—15% с; НГМ′—3% (1,6%; НГМ — 0,2—0,5%; ГА — 0,05% (Б) НГМ-о, п (НГ) НА-б— 0,1% (НГ); 2—3% (НР); НА-т— $2 \cdot 10^{-9}$% (ЯР)
Золото . . .	Au	79	197,0	0,4006	19,32	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$—$5 \cdot 10^{-4}$ до 0,02 россыпи	ННМ-р 0,07% (0,035%); НА — $4 \cdot 10^{-5}$— $1,5 \cdot 10^{-4}$%; ГА — $1' \cdot 10^{-4}$%, (М); ИННМ-р — 0,037%; НА-т— $5 \cdot 10^{-4}$% (НР); $1 \cdot 10^{-9}$% (ЯР)
Индий . . .	In	49	114,76	0,4269	7,31	$1 \cdot 10^{-5}$	0,01—0,1	ННМ-р — 0,16—0,3%; НА — $10^{-5} \div 10^{-4}$; ГА′— $5 \cdot 10^{-5}$% (М); ИННМ-р — 0,02%; НА-т — $1 \cdot 10^{-4}$% (НР), $5 \cdot 10^{-10}$% (ЯР)
Иридий . . .	Ir	77	192,2	0,3986	225	$1 \cdot 10^{-7}$	до 0,001	ГА′ — $4,3 \cdot 10^{-3}$% (ЭСГ);
Иттербий . .	Yb	70	173,04	0,4044	7,02	$3 \cdot 10^{-4}$	0,003—0,04	НА-т — $5 \cdot 10^{-7}$%
Иттрий . . .	Y	39	88,92	0,4385	4,34	0,002	0,015÷2	ХХМ (0,1%); ХМп — 0,03%; ГА′— 0,1% (ЛУЭ) $\cdot 1 \cdot 10^{-4}$% (М); НА-б — $1 \cdot 10^{-2}$% (НГ)
Йод	J	53	126,91	0,4175	4,93	$3 \cdot 10^{-5}$	0,003 (в водах нефт. м-ний)	БХМ; НА-т — 0,04% (НР)

Кадмий . . .	Cd	48	112,41	0,4270	8,64	$5 \cdot 10^{-5}$	0,02—0,09	ННМ-т — 0,01—0,05%; 0,03—0,005% с; НГМ — 0,035%; ГА′ — $1 \cdot 10^{-3}$% (ЛУЭ); ГА — 0,1% (Б); НА-т — $1 \cdot 10^{-5}$ (ЯР)
Калий . . .	K	19	39,1	0,4859		2,6	10—50	ГМ — 0,25% (0,8%); 175±0,2% п; с БМ — 0,22% (0,07%), ААМ — 1%, ГБМ — 0,15—0,35% (0,07—0,17%) НА — 1% (8% отн.); ГА — 0,03% (Б) НА-б — ~3% (НГ); НА-т — 0,03% (НР)
Калифорний .	Cf	98	(249)	0,395	—	—	—	Искусственно-радиоактивный изотоп
Кальций . .	Ca	20	40,08	0,4990	1,55	3,6	до 50 (породы)	ААМ — 1%, НГМ — 2—5%, НА-т — 5% (НР)
Кислород . .	O	8	16,000	0,5	4	47,2	44,80—51,84	ААМ — 0,5%, АГМ — $4 \cdot 10^{-3}$% (ВГ); ГА — $5 \cdot 10^{-3}$% (Б); НГМ′ (3% НГ); НА-б — 0,025% (НГ), $2 \cdot 10^{-3}$% (ЯР)
Кобальт . . .	Co	27	58,94	0,4580	$8,83_5$	0,003	0,1—12	НА — 0,03%; НА-т — $3 \cdot 10^{-3}$% (НР), $1 \cdot 10^{-6}$% (ЯР)
Кремний . . .	Si	14	28,09	0,4989	2,4	27,6	20—32	ААМ — 1%, АПМ — 1%, НГМ — 2—5%, НА — 0,5—2,5% (1—2,5% отн), 10—20% с; ГА — 0,01% (Б); НА-б — 0,05% (НГ); 2% (НР), $1 \cdot 10^{-3}$ (ЯР)
Криптон . . .	Kr	36	83,80	0,4301		$2 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-4}$ (водух)	—
Ксенон . . .	Xe	54	131,3	0,4112		$3 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-6}$ об. % (воздух)	—
Курчатовий . .	Ku	104	(260)	0,4	—	—	—	Искусственно-радиоактивный
Кюрий . . .	Cm	96	(250)	0,384	—	—	—	То же
Лантан . . .	La	47	138,92	0,4106	6,15	0,0018	0,015—2,5	НА-т — $2 \cdot 10^{-7}$% (ЯР)
Литий . . .	Li	3	6,940	0,4322	0,534	0,0065	0,1—1,5	АГМ — 0,05% (~0,1%), НАМ — 0,05%, ННМ-т — 0,05% (10% отн.), ПГМ — $1 \cdot 10^{-4}$%, ГНМ — $7 \cdot 10^{-4}$% (М)
Лоуренсий . .	Lr	103	257)	0,401	—	—	—	Искусственно-радиоактивный

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Лютеций . .	Lu	71	174,99	0,4057	9,81	$1 \cdot 10^{-4}$	0,001—0,13	ГА′ — 0,02% (ЛУЭ), НА-т — $2 \cdot 10^{-7}$% (М)
Магний . . .	Mg	12	24,32	0,4934	1,738	2,1	4÷10	ААМ — 1%, АПМ — 1%, АГМ, АА; ПГМ — 0,2%, ГА — 0,3% (Б); НА-б — 0,5% (НГ); НА-т — 0,5% (НР)
Марганец . .	Mn	25	54,94	0,4551	7,3	0,09	5—55	ББМ — 1,5% (1%), ХХМ — 0,066%, ГХМ — 0,3%, ННМ-т — 6%, 1——10% с, НГМ — 0,1—0,2%, НА — 0,01%, 0,01—0,1% с, НА-б — 3% (НГ); НА-т — $1 \cdot 10^{-4}$ (НР), $5 \cdot 10^{-4}$% (ЯР)
Медь	Cu	29	63,54	0,4561	8,95	0,01	0,3—10	РХМ — 0,1% (0,2%); ХХМ (0,4%) 0,3% п, ХМп (0,3%), НГМ — 0,2—0,5% лаб. и скв., НА — 0,03——0,3% (2,5—3% отн.) 0,2—0,4 (10—15% отн.) п, 0,2—1,0% с; ГА — $5 \cdot 10^{-3}$% (Б); НА-б — 0,05% (НГ); НА-т — 0,02% (НР), $1 \cdot 10^{-4}$% (ЯР)
Менделевий . .	Mv	101	(256)	0,395	—	—	—	Искусственно-радиоактивный
Молибден . .	Mo	42	95,95	0,4375	10,3	$3 \cdot 10^{-4}$	0,004—3	БХМ, ГХМ п, с — 0,3%, л.— 0,03%, ГА — 0,05% (Б)
Мышьяк . .	As	33	74,91	0,4405	5,73	$5 \cdot 10^{-4}$	0,02—30	БХМ; НА-т — $3 \cdot 10^{-4}$% (НР), $1 \cdot 10^{-4}$% (ЯР)
Натрий . . .	Na	11	22,991	0,4783	0,97	2,64	до 39,34 (NaCl)	ААМ — 1%, АПМ — 1%, АА, НА — 0,1% (8% отн.), ДА — 0,05%, ПГМ — 0,02%; НА-б — 0,5% (3+ +5% отн., НГ); НА-т — $3 \cdot 10^{-3}$% (НР), 10^{-3}% (ЯР)
Неодим . . .	Nd	60	144,27	0,4158	7,0	0,0025	0,03—3,5	ХХМ (0,1%); ГА — $п \cdot 10^{-3}$ г (Б); НА-б — $2,6 \cdot 10^{-3}$% (НГ); НА-т — $2 \cdot 10^{-3}$% (ЯР)
Неон	Ne	10	20,183	0,4954	—	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ (воздух)	

Нептуний . .	Np	93	(237)	0,3927	—		—	Искусственно-радиоактивный
Никель . . .	Ni	28	58,69	0,4770	8,8	0,008	0,25—5	ХХМ (0,25%); НГМ — 0,1—0,3%; 0,14% с; НГМ — 0,45% (ЯР), НА-т — $1 \cdot 10^{-5}$% (ЯР)
Ниобий . . .	Nb	41	92,91	0,4394	8,5	0,001	$0{,}00n$—0,7	ГМ (Nb+Ta, 11% отн.); БХМ, ХХМ — 0,0063%, ГХМ — 0,02—0,05%
Нобелий . . .	No	102	(254—256)	0,4	—	—	—	Искусственно-радиоактивный
Олово	Sn	50	118,70	0,4212	5,77	0,004	0,01—7	ХХМ — 0,007%, ХМп — 0,05% (0,02—0,07%) ГХМ — 0,02—0,1% (0,02—0,05%) п, с — 0,2÷0,3%; ГМрп — 0,01—0,05% (0,02—0,2%) ГГМрп; п, с ~0,1% (5—40% отн.), ГГМ-с, п с 0,5÷0,6; ГА′ — 1% (ЛУЭ); НА-б — 0,165% (НГ); НА-т — $1 \cdot 10^{-2}$% (ЯР)
Осмий	Os	76	190,2	0,3968	22,5	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$—$2 \cdot 10^{-3}$	НА-т — $1 \cdot 10^{-8}$% (ЯР)
Палладий . .	Pd	46	106,7	0,4311	12,0	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$—$3 \cdot 10^{-3}$	НА-т — 10^{-6}% (ЯР)
Платина . . .	Pt	78	195,23	0,3995	21,45	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$—0,03	ГА′ — 0,04% (ЛУЭ)
Полоний . . .	Po	84	210	0,4	—	$2 \cdot 10^{-14}$	Урановые и радиевые руды	Естественно-радиоактивный
Празеодим . .	Pr	59	140,92	0,4189	6,75	$7 \cdot 10^{-4}$	0,01—1,2	ГА — $n \cdot 10^{-3}$ г (Б); НА-б — $3{,}5 \cdot 10^{-4}$% (НГ); НА-т — $1 \cdot 10^{-6}$% (ЯР)
Прометий . .	Pm	61	(145)	0,4178		$1{,}67 \cdot 10^{-18}$		
Протактиний .	Pa	91	(231)	0,3944	—	$9 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-7}$	
Радий	Ra	88	226,05	0,39	—	$1 \cdot 10^{-10}$	10^{-9}—$4 \cdot 10^{-7}$	ГМ — $(1{,}3 \pm 4) \cdot 10^{-10}$%; $(1{,}6 \pm 0{,}1) \cdot 10^{-10}$% п, с
Радон	Rn	86	(222)	0,3873	—	$(2{,}5—10^4)$ 10^{-15} (почв. воздух)		ЭМ — $5 \cdot 10^{-13}$ Ки/л, $3 \cdot 10^{-3}$ эман,
Рений	Re	75	186,31	0,4025	21	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-7} \div 0{,}07$	п, НА-т — $4 \cdot 10^{-7}$% (ЯР)
Родий	Rh	45	102,91	0,4372	12,4	$1 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}—$3 \cdot 10^{-4}$	ГА′ — 0,04% (ЛУЭ); НА-т — $1{,}5 \cdot 10^{-4}$% (НР); $2 \cdot 10^{-5}$% (ЯР)

Продолжение приложения 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ртуть	Hg	80	200,61	0,3987	13,6	$7 \cdot 10^{-6}$	0,01—8	ББМ — 0,11% (0,06%), ББМ′ — 0,01%, ГХМ, с — 0,2÷0,3%; ГГМ-с, п, с 0,15—0,20%, ННМ-т — 0,5%; ННК-т+ГГМ-с — 0,08+0,1% с; ГНМ — $8 \cdot 10^{-4}$% (Б); ГА′ — $7 \cdot 10^{-3}$% (ЛУЭ); НГМ — 0,1% (ЯР), НА-б — 0,065% (НГ); НА-т — $4 \cdot 10^{-7}$% (ЯР)
Рубидий . . .	Rb	37	85,48	0,4330	1,53	0,031	0,031—1	НА-т — 0,1% (НР); $4 \cdot 10^{-6}$% (ЯР)
Рутений . . .	Ru	44	101,1	0,4326	12,45	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$—$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	НА-т — $1 \cdot 10^{-10}$% (ЯР)
Самарий . . .	Sm	62	150,43	0,4121	8,50	$7 \cdot 10^{-4}$	0,01—1,2	НГМ — $1 \cdot 10^{-3}$% (ЯР), НА-б — $2{,}6 \cdot 10^{-3}$% (НГ); НА-т — $2 \cdot 10^{-9}$% (ЯР)
Свинец . . .	Pb	82	207,21	0,3957	11,3	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$	0,5—18	ББМ — 0,1% (0,05%), ББМ′ — 0,01%, БГМ; РХМ — 0,1% (0,06÷÷0,2%), ХХМ (0,2%, ХМп, БХМ, ГХМ п, с — 0,2—0,3%; ГБМ — 0,1% (0,05—0,4%), ГМп-с — 0,3% (0,14%), ГГМрр (3% отн.), ГГМ-с — 0,2—0,3% (0,44% абс.), ГГМ′-с (0,1% абс.) ИА — 10^{-4}% ГА — 0,1% (Б)
Селен	Se	34	78,96	0,4305	4,80	$6 \cdot 10^{-5}$	0,00n—1	БХМ; ГА′ — $5 \cdot 10^{-3}$% (ЛУЭ); НА-б — $5 \cdot 10^{-4}$% (НГ); НА-т — $5 \cdot 10^{-8}$% (ЯР), НА — 0,01% (8%)
Сера	S	16	32,066	0,4990	2,07	0,05	8—70	ААМ — 1%, ББМ — 1% (0,5%), НГМ — 0,2—1% с, ПГМ — 0,06%, ГА — 1% (Б)
Серебро . . .	Ag	47	107,88	0,4356	10,508	$1 \cdot 10^{-5}$	0,001—5	ННМ-р ~ 0,01% (0,02%), НА — —0,005% (2% отн.); ГА′ — $7{,}5 \cdot 10^{-5}$% (М); ГА — $5 \cdot 10^{-3}$% (Б); НА-т — $6 \cdot 10^{-4}$% (НР); $3 \cdot 10^{-6}$ (ЯР)
Скандий . . .	Sc	21	44,96	0,4656	3,1	$6 \cdot 10^{-4}$	0,03—0,2	НА-т — $1 \cdot 10^{-5}$ (ЯР)

Стронций	Sr	38	87,63	0,4336	2,63	0,04	0,8—25	ГА′— $6\cdot10^{-3}$ (ЛУЭ); ГА — 0,05% (Б); НА-б — 0,04% (НГ); НА-т — $1\cdot10^{-3}$% (ЯР)
Сурьма	Sb	51	121,76	0,4188	6,62	$4\cdot10^{-5}$	0,04—20	ББМ — 0,32% (0,16%), ББМ′ — 0,03%, ГХМ — 0,1%, ХХМ, п — 0,05÷0,2%; с — 0,2—0,3% (0,1%); ГГМ-с, п, с 0,5—0,7% ГГМО — 0,05%, ДГГМ-с, п, с 0,02—0,05%; ГА — $5\cdot10^{-3}$% (Б)
Таллий	Tl	81	204,39	0,3963	11,85	$3\cdot10^{-4}$	0,00*n*—0,1	НА-т — $1:10^{-8}$% (ЯР)
Тантал	Ta	73	180,95	0,4024	16,6	$2\cdot10^{-4}$	0,00*n*—0,4	ГМ (Nb+Ta, 11% отн.); ХМп — 0,03%, ГХМ — 0,012—0,016%; НА-т — $1\cdot10^{-8}$% (ЯР)
Теллур	Te	52	127,61	0,4074	6,24	$1\cdot10^{-6}$	0,00*n*—0,*n*	НА-б — 0,1% (НГ); НА-т — $1\cdot10^{-5}$% (ЯР)
Тербий	Tb	65	158,93	0,4082	4,75	$1{,}5\cdot10^{-4}$	0,002—0,2	НА-б — $2{,}6\cdot10^{-3}$% (НГ); НА-т — $1\cdot10^{-6}$% (ЯР)
Технеций	Tc	43	(99)	0,435	11,5	—	—	Радиоактивный изотоп
Титан	Ti	22	47,90	0,4592	4,5	0,6	4—30	НГМ — 0,2%; ГА — 0,01% (Б)
Торий	Th	90	232,05	0,3877	—	0,0012	0,00*n*—10	ГМ $(1{,}2\pm0{,}4)\cdot10^{-4}$%; $(7{,}5\pm0{,}7)\cdot10^{-4}$% п, с; ГНМ — 0,03% (М); НОМ — $4\cdot10^{-3}$% (ЯР); НА-т — 10^{-7}% (ЯР)
Тулий	Tu(Tm)	69	168,94	0,4073	9,26	$8\cdot10^{-5}$	0,001—0,11	НА-т — $1\cdot10^{-6}$% (ЯР)
Углерод	C	6	12,011	0,4995	—	0,14	65—99 (угли)	ААМ 0,5%; ББМ (зола 0,25%, 0,4% п, графит — 1—2%), ГХМ (зола), ГМп-п — (1% зола), ГМп-с (0,1—1% зола); ДА — $5\cdot10^{-3}$%; ПГМ — 0,05%; ПА — 0,02—0,07%; ГА — $1\cdot10^{-3}$% (Б); НГМ (1%, НГ)
Уран	U	92	238,07	0,3863	—	$3\cdot10^{-4}$	0,004—1,5	ГМ $(2{,}2\pm0{,}7)\cdot10^{-4}$; ГНМ — 0,01% (М); НОМ — $2\cdot10^{-4}$% (ЯР); НА-т — $1\cdot10^{-5}$% (ЯР), НАн — т — $2\cdot10^{-8}$% (ЯР)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фермий . . .	Fm	100	(253)	0,403	—	—	—	Искусственно-радиоактивный
Фосфор . . .	P	15	30,975	0,4085	—	0,08—0,12	2—18	ГМ ~ 1% (0,5%), НГМ — 3÷5% с, ДА — 0,01%; ГА — 0,1 (Б), НА-б — 3% (НГ); НА-т — 10^{-4}% (ЯР)
Франций . . .	Fr	87	(223)	0,3901	—	—	урановые руды	
Фтор	F	9	19,0	0,4736	—	0,027	15—40	ААМ — 1%, АПМ — 1%, АНМ (1,5% отн.) АГМ, НА — 0,1—0,25%; 0,2÷0,3% п; 0,2 (0,04—0,07% абс.) с, ПГМ — 10^{-4}%; ГА — $2 \cdot 10^{-3}$% (Б) НА-б — 0,01% (НГ); НА-т — 3% (НР)
Хлор	Cl	17	35,457	0,4794	—	0,045	до 60, 66 (NaCl)	ААМ — 1%, ННМ-т — 1,0—1,5%, 2% с, НА-б ~ 3% (НГ) НА-т — 0,05% (НР), 10^{-4}% (ЯР)
Хром	Cr	24	25,01	0,4614	7,14	0,02	9—40	НГМ — 0,2; 4—5% (2%) с, НА-б — 3% (НГ)
Цезий	Cs	55	132,91	0,4140	1,93	$7 \cdot 10^{-4}$	до 0,5	БХМ, НА — 0,1%; $1 \cdot 10^{-6}$% (ЯР)
Церий	Ce	58	140,13	0,4139	6,80	0,0045	0,05—6	НА-б — $8{,}5 \cdot 10^{-4}$% (НГ); НА-т — $5 \cdot 10^{-6}$ (ЯР)
Цинк	Zn	30	65,38	0,4588	7,13	0,005	1—50	БГМ, РХМ — 0,1% (0,2%); ХХМ (0,2%), 0,3% п, с; ХМп — 0,03%, ГХМ — 0,3%; ГГК-с (1% абс.), ННМ-т (по Cd) 5% с, ГА — $1 \cdot 10^{-3}$% (Б), НА-т — 0,5% (НР) $1 \cdot 10^{-6}$% (ЯР)
Цирконий . .	Zr	40	91,22	0,4385	6,25	0,02	0,2—12	БМ (7% отн.); ГА — $1 \cdot 10^{-3}$% (Б); НА-т — $1 \cdot 10^{-7}$% (ЯР)
Эйнштейний . .	Es	99	(254)	0,4015	—	—	—	Искусственно-радиоактивный
Эрбий	Er	68	167,2	0,4116	9,16	$4 \cdot 10^{-4}$	0,0045—0,55	ГА′ — 0,03% (ЭСГ); ГА-п $\cdot 10^{-3}$ г (Б); НА-б — $7 \cdot 10^{-3}$% (НГ); НА-т — $7 \cdot 10^{-7}$% (ЯР)

Примечание. Названия методов даны в соответствии с предыдущими приложениями. Для большинства методов, реализуемых также с помощью ядерных установок, введены сокращения: НГ — нейтронный генератор; НР — нейтронный размножитель типа НР-1; ЯР — ядерный реактор; Б — бетатрон; М — микротрон; ВГ — генератор Ван-де-Граафа; ЭСГ — электростатический генератор, ЛУЭ — линейный ускоритель электронов.

Литература к главе 21

21.1. Баранов В. И., Барсуков В. Л., Иванова В. Ф., Христианов В. К. Нейтронные методы поисков и анализа борного сырья. «Наука», 1964.

21.2. Джемардьян Ю. А., Малышева Н. Г., Старчик Л. П. Определение содержания лития в растворах по ядерной реакции (n, α).— В сб. «Научные сообщения Института горного дела им. А. А. Скочинского», вып. 36. М., 1966.

21.3. Зайцев Е. И., Залесский В. Ю. Определение лития в пробах ядерно-физическим методом.— Зав. лаб., 1961, т. 27, № 5.

21.4 Иващенко Г. А. Контроль влажности продуктов обогащения методом протонов отдачи. Канд. дисс. М., 1969.

21.5. Иващенко Г. А., Старчик Л. П. Определения влажности продуктов обогащения методом протонов отдачи.— Ж. аналит. хим., 1969, № 11.

21.6. Иващенко Г. А., Старчик Л. П., Тустановский В. Т. Использование упругого рассеяния быстрых нейтронов для определения влажности различных материалов.— Ат. энергия, 1969, т. 27, вып. 3.

21.7. Плаксин И. Н., Джемардьян Ю. А., Малышева Н. Г., Старчик Л. П. Исследования факторов, влияющих на определения лития и бора в продуктах обогащения по ядерной реакции (n, α).— Цветные металлы, 1965, № 6.

21.8. Шмонин Л. И., Чердынцев В. В., Тартаковский Д. И. Определения содержания бора при помощи облучения медленными нейтронами.— В сб. «Ученые записки Казахского университета», вып. 30. Алма-Ата, 1957.

Литература к главе 22

22.1. Алексеев Ф. А. Использование радиоактивных излучений и изотопов в геологии нефти.— Геол. нефти, 1957, № 5.

22.2. Алексеев Ф. А., Гулин Ю. А., Дахнов В. Н., Флеров Г. Н., Шимелевич Ю. С. Использование методов атомной физики в разведке и добыче нефти.— В сб. «Пятый Международный нефтяной конгресс», т. 1. Гостоптехиздат, 1961.

22.3. Алексеев Ф. А., Денисик Ф. Ц. Радиоактивные методы контроля за разработкой нефтяных месторождений. Геофизические и гидродинамические исследования пластов и скважин.— Тр. Всес. нефтегазового НИИ, вып. 29. Гостоптехиздат, 1960.

22.4. Арбузов В. М. Расчет нейтронных параметров песчаников 20%-ной пористости горизонта $Д_1$ Ромашкинского месторождения.— Тр. Татарского нефтяного науч.-иссл. ин-та, вып. 8, 1965.

22.5. Арбузов В. М., Орлинский Б. М. О возможности количественных определений нефтенасыщенности терригенных коллекторов нейтронными методами радиометрии.— Тр. Татарского нефтяного науч.-иссл. ин-та, вып. 8, 1965.

22.6. Барсуков О. А., Авзянов В. С. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в системе скважина — пласт.— Ат. энергия, 1961, т. 10, вып. 5. Сб. «Изотопы в народном хозяйстве СССР», № 3. Изд. В/О «Изотоп», 1962.

22.7. Басин Я. Н. Выделение карбонатных коллекторов по данным нейтронного и электрического каротажа. Канд. дисс. М., ВНИИЯГГ, 1964.

22.8. Беломар О. Д., Бардовский В. Я., Архангельский В. К. Размеры инверсионных зондов для различных пород при нейтрон-нейтронном каротаже скважин.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1966, № 10.

22.9. Беломар О. Д. и др. Результаты опробования нейтрон-нейтронного каротажа на угольных месторождениях Донбасса.— Докл. АН УССР, 1963, № 5.

22.10. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. «Энергия», 1965.

22.11. Бикулов Р. В. Определение интервалов затрубной циркуляции по комплексу НГК-ННК-т.— Разв. геофиз., вып. 1. «Недра», 1964.

22.12. Бланков Е. Б., Бланкова Т. Н., Донов Г. М. и др. Применение методов ядерной геофизики для контроля за разработкой нефтяных месторождений в Татарской АССР.— Разв. геофиз., вып. 19, 1967.

22.13. Буров Б. М., Дарвойд Г. Н., Крон Ф. Ц. Метод нейтрон-нейтронного каротажа для изучения геологического разреза скважин.— Геол. нефти, 1957, № 12.
22.14. Варварин Г. Б., Жаворонков В. Я., Филиппов Е. М. Способ определения объемного веса и влажности горных пород в их естественном залегании.— Авт. свид. № 164086.— Бюлл. изобретений и товарных знаков, 1964, № 14.
22.15. Варварин Г. Б., Жаворонков В. Я., Филиппов Е. М. Устройство для одновременного определения влажности пород в их естественном залегании. Авт. свид. № 171938.— Бюлл. изобретений и товарных знаков, 1965, № 12.
22.16. Воларович М. П., Скворцова Н. И. Применение счетчиков коронного разряда при определении влажности дисперсных материалов методом обратного рассеяния нейтронов.— Колл. ж., 1966, т. 28, № 6.
22.17. Воловик В. Д., Стрелков Г. П., Черкасов А. С., Чурсин Г. Н. Определение влажности песка по ослаблению потока быстрых нейтронов.— Ат. энергия, 1964, т. 16, вып. 4.
22.18. Глауберман А. Е., Тальянский И. И. О распределении нейтронов в средах с заданными свойствами при цилиндрической границе раздела.— Ат. энергия, 1957, т. 3, вып. 7.
22.19. Глауберман А. Е., Кобылянский В. Б., Тальянский И. И. Распределение нейтронов в средах с цилиндрической границей раздела при внеосевом расположении источника.— Ат. энергия, 1961, т. 10, вып. 5.
22.20. Гольдин И. М. К вопросу определения нейтронных параметров горных пород.— В сб. «Методы разведочной и промысловой геофизики при изучении Западно-Сибирской низменности». Л., «Недра», 1966.
22.21. Горшков Г. В., Лятковская Н. М. Нейтронный каротаж.— Вестн. ЛГУ, 1946, № 2.
22.22. Дворецкий В. Г., Нестеренко Н. Г., Ручкин А. В. Усовершенствование методики и комплекса геофизических исследований карбонатных отложений Волго-Уральской области.— Геол. нефти и газа, 1963, № 11.
22.23. Дворкин И. Л., Шапиро Д. А. Интерпретация результатов нейтронного каротажа действующих нефтяных скважин. М., Изд. ЦНИИТЭнефтегаз, 1965.
22.24. Долль Г. Г., Мартен М., Тиксье М. П. Развитие методов промысловой геофизики в период между IV и V Международными нефтяными конгрессами.— В сб. «Пятый междун. нефтяной конгресс», т. 1. Гостоптехиздат, 1961.
22.25. Дядькин И. Г. Пространственно-энергетически-угловое распределение нейтронов в многокомпонентных безграничных средах.— В сб. «Нейтронная физика». Госатомиздат, 1961.
22.26. Дядькин И. Г. Решение кинетического уравнения переноса нейтронов или гамма-квантов методом парциальных вероятностей.— Ж. эксп. и теорет. физики, 1958, т. 34, вып. 6.
22.27. Дядькин И. Г., Лисененков А. Т., Понятов Г. И. Об ускорении сходимости метода Монте-Карло при решении задач радиоактивного каротажа.— Ж. вычислит. матем. и математ. физики, 1965, т. 5, № 4.
22.28. Емельянов В. А., Бескин Л. И., Осипов В. И. Нейтронный метод измерения влажности почв и его перспективы.— Почвоведение, 1963, № 7.
22.29. Емельянов В. А., Синицын В. И. Радиометрия и изотопы в гидромелиоративных исследованиях.— Гидротехника и мелиорация, 1967, № 6.
22.30. Зайцев И. Ф., Осмачкин Б. П. Применение нейтронного метода при измерении влажности угля.— Научн. тр. Укр. проектно-констр. и науч.-иссл. ин-та по обогащению и брикетированию углей, вып. 4, 1964.
22.31. Зверев Г. Н., Лисененков А. Т. Применение методов аппроксимации и Монте-Карло к задаче количественной интерпретации промыслово-геофизических данных.— Тр. Московского ин-та нефтехим. и газовой пром., вып. 62, 1966.
22.32. Иванкин В. П. Использование нейтронных методов исследования скважин для оценки пористости пород.— Пром. геол. и геофиз., вып. 4. Изд. Саратовского ун-та, 1966.
22.33. Иванкин В. П. Некоторые вопросы методики радиометрических исследований скважин.— Тр. Нижневолжского НИИ геологии и геофизики, вып. 1, 1964.
22.34. Иванкин В. П. Некоторые вопросы методики радиометрических исследований скважин Саратовского Поволжья. Канд. дисс. М., ВНИИЯГГ, 1965.
22.35. Иванкин В. П., Салтанов Н. И., Шерман Г. Х. Выделение нефтеводонасыщенных пластов в скважинах Саратовского Поволжья нейтронными методами.— Пром. геол. и геофиз. вып. 4. Изд. Саратовского ун-та, 1966.
22.36. Итенберг С. С. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М. «Недра», 1972.
22.37. Кадисов М. Б., Бланкова Т. Н., Куриленко Ф. А., Лукьянов Г. П., Соловьева О. И. Применение радиоактивных изотопов и ядерных излучений в нефтедобывающей промышленности.— Изотопы в народном хозяйстве СССР. Инф. бюлл., 1961, № 1.
22.38. Каипов Р. Л. Опыт применения актиний-бериллиевых источников нейтронов при исследовании нефтяных скважин.— Бюлл. науч.-техн. инф. ГГК СССР ОНТИ ВИЭМС, 1964, № 3.
22.39. Кантор С. А. О глубинности исследования горных пород нейтрон-нейтронным каротажем.— Прикл. геофиз., вып. 21. Гостоптехиздат, 1958.

22.40. Кантор С. А. Основы теории нейтронного каротажа.— Прикл. геофиз., вып. 13. Гостоптехиздат, 1955.
22.41. Кантор С. А. О характере влияния диаметра скважины на показания прибора нейтрон-нейтронного каротажа.— Прикл. геофиз., вып. 23. Гостоптехиздат, 1959.
22.42. Кантор С. А. Теоретическое исследование проблемы изучения геологического разреза нейтронными методами. Канд. дисс. М., ВНИИГеофизика, 1959.
22.43. Кожевников Д. А. Исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов в средах с высоким водородсодержанием.— Тр. Московского ин-та нефтехим. и газовой пром., вып. 25, 1959.
22.44. Кожевников Д. А. Изучение распределения нейтронов в горных породах и расчет их нейтронных характеристик. Канд. дисс. М., МГУ, 1964.
22.45. Кожевников Д. А. Приближенное подобие нейтронных полей, образованных источниками с различными спектрами.— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 2.
22.46. Кожевников Д. А. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в средах с высоким водородсодержанием.— Промысловые и разведочные геофизические исследования, вып. 31. Гостоптехиздат, 1960.
22.47. Кожевников Д. А. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в однородном замедлителе.— Ат. энергия, 1964, т. 17, вып. 1.
22.48. Кожевников Д. А. Температурная зависимость диффузионных характеристик замедлителя.— Ат. энергия, 1963, т. 14, вып. 6.
22.49. Кожевников Д. А. Температурные эффекты при нейтронных исследованиях глубоких и сверхглубоких скважин.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 12.
22.50. Кожевников Д. А. Возраст нейтронов в углеводородах.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 2.
22.51. Кожевников Д. А., Хавкин В. С., Штейнбрекер Д. П. Применение возрастного приближения к изучению закономерностей распределения нейтронов в горных породах.— Тр. Московского ин-та нефтехим. и газовой пром., вып. 41, 1963.
22.52. Комаров С. Г. Геофизические методы исследования скважин. Гостоптехиздат, 1963.
22.53. Комаров С. Г. К вопросу оценки коллекторских свойств пластов по результатам геофизических исследований скважин.— Прикл. геофиз., вып. 36, 1963.
22.54. Комаров С. Г., Петросян Л. Г., Перьков Н. А. и др. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. Госгеолтехиздат, 1963.
22.55. Крон Ф. Ц., Одиноков В. П., Ованесов М. Г., Щербатский В. Г. Определение пористости пород методом нейтрон-нейтронного каротажа по надтепловым нейтронам (ННК-н).— Геол. нефти, 1957, № 10.
22.56. Кулинкович А. Е. О распределении тепловых нейтронов в условиях буровой скважины.— Прикл. геофиз., вып. 22. Гостоптехиздат, 1959.
22.57. Кухаренко Н. К., Басин Я. Н., Бальвас Ю. П., Тюкаев Ю. В. Новый тип моделей пористых пластов для нейтронного каротажа.— Ат. энергия, 1963, т. 15, вып. 4.
22.58. Кухаренко Н. К., Сердий А. Г., Одиноков В. П. Выделение нефтеносных и водоносных пластов и определение положения водонефтяного контакта в условиях обсаженных скважин методами НГК-ЛС и НК.— В сб. «Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности». Гостоптехиздат, 1957.
22.59. Кастель Ж. Г. Метод нейтрон-нейтронного каротажа.— В сб. «Четвертый Международный нефтяной конгресс. Геофиз. методы разведки», т. II. Гостоптехиздат, 1956.
22.60. Латышова М. Г. Практическое руководство по интерпретации диаграмм геофизических методов исследования нефтяных и газовых скважин. «Недра», 1966.
22.61. Листенгартен Б. М. Радиоактивные методы в нефтепромысловой геологии (опыт НПУ Лениннефть). Баку, 1961.
22.62. Мотт В. Е., Эдигер Н. М. Радиоактивный каротаж при разведке и добыче нефти.— В сб. «Пятый Международный нефтяной конгресс», т. 1. Гостоптехиздат, 1961.
22.63. Новые методы инженерно-геологических и гидрогеологических исследований.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа. М., 1965, № 58 (1).
22.64. Определение влажности формовочного песка по замедлению нейтронов.— Ат. техника за рубежом, 1962, № 4.
22.65. Орлинский Б. М. Влияние вертикальной проницаемости в прискважинной части коллектора на результаты электро- и радиометрических исследований.— Тр. Татарского нефтяного НИИ, вып. 10, 1967.
22.66. Орлинский Б. М., Арбузов В. М. Распределение тепловых нейтронов в песчаном пласте, пересеченном скважиной.— Тр. Татарского нефтяного НИИ, вып. 8, 1965.
22.67. Орлинский Б. М., Арбузов В. М. Влияние скважины на эффективность выделения нефтеносных и водоносных пластов нейтронными методами радиометрии.— Тр. Татарского нефтяного НИИ, вып. 8, 1965.

22.68. Орлинский Б. М., Чаловский Б. М., Свихнушин Н. М., Арбузов В. М. Определение положения ВНК методами промысловой геофизики.— Татарская нефть, 1962, № 12.
22.69. Перьков Н. А. Альбом типовых геолого-геофизических разрезов скважин нефтяных районов Волго-Уральской провинции. Гостоптехиздат, 1961.
22.70. Перьков Н. А. Интерпретация результатов каротажа нефтяных скважин. Гостоптехиздат, 1963.
22.71. Перьков Н. А. Изучение разрезов галогенных толщ методами промысловой геофизики.— В сб. «Вопросы геофизических методов исследования», серия «Геология». М., Гостоптехиздат, 1962.
22.72. Пестриков А. С. Использование нейтронного метода по надтепловым нейтронам для литологического расчленения разреза скважин, выделения коллекторов и оценки их продуктивности.— Тр. Волгоградского НИИ нефтяной и газовой пром., вып. 3, 1965.
22.73. Пестриков А. С. Опыт применения нейтронного каротажа по надтепловым нейтронам при изучении разрезов скважин. Нефтегазовая геология и геофизика. (Науч.-техн. сб. № 1). М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1964.
22.74. Пестриков А. С. Применение радиоактивных методов для решения задач нефтепромысловой геологии в районах Волгоградского Поволжья. Нефтегазовая геология и геофизика. (Науч.-техн. сб. № 2). М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1965.
22.75. Пинкензон Д. Б., Гоев Ю. А. Использование нейтронного метода для определения текущего положения водонефтяного и газонефтяного контакта в фонтанирующих скважинах месторождений Волгоградской области. Вопросы геологии и нефтегазоносности Нижнего Поволжья. (Тр. Волгоградского НИИ нефтяной и газовой пром.). Волгоград, вып. 12, 1967.
22.76. Попов В. К. Комплекс промыслово-геофизических исследований скважин в Западном Предкавказье.— Геол. нефти и газа, 1963, № 11.
22.77. Применение нейтронов для определения влажности формовочного песка.— Изотопы в нар. хоз. СССР, № 3.
22.78. Применение промысловой геофизики при изучении газоносных коллекторов. (Сб.). Гостоптехиздат, 1962.
22.79. Рассел И. Г., Бишоп В. О. Количественная оценка пористости пород нейтрон-нейтронным методом.— В сб. «Вопросы промысловой геофизики». Гостоптехиздат, 1957.
22.80. Скворцова Н. И., Чударс Я. Э. О возможности определения влажности торфа нейтронным методом.— Инж.-физ., ж., 1962, т. 5, № 4.
22.81. Справочник геофизика, т. 2. Гостоптехиздат, 1961.
22.82. Султанов С. А., Свихнушин Н. М. Использование методов промысловой геофизики для изучения нефтеотдачи пластов. «Недра», 1967.
22.83. Тальянский И. И. О распределении нейтронов в средах с заданными свойствами при плоской границе раздела.— Ат. энергия, 1958, т. 4, вып. 4.
22.84. Тальянский И. И. О распределении нейтронов в обсаженной скважине.— В сб. «Питание физики твердого тела». Изд. Львовского ун-та, 1964.
22.85. Тальянский И. И., Биленький Б. Ф., Драган Я. П. К теории нейтронного каротажа.— Прикл. геофиз., вып. 25. Гостоптехиздат, 1960.
22.86. Темкин А. Я. Метод приближенного решения кинетического уравнения для нейтронов.— Прикл. геофиз., вып. 17. Гостоптехиздат, 1957.
22.87. Темкин А. Я. Некоторые методы решения задач теории нейтронного каротажа.— Прикл. геофиз., вып. 23. Гостоптехиздат, 1959.
22.88. Титыл К. В., Аллен Л. С. Теория нейтронного каротажа. Экспресс-информация нефте- и газодобывающей пром., 1966, № 3.
22.89. Урбанец Ян. Нейтронный измеритель влажности почвы.— Материалы Международной конференции в Женеве (август, 1955), т. 14. Гостоптехиздат, 1958.
22.90. Фельдман Б. Е. О рациональном комплексе геофизических исследований скважин Куйбышевской области.— Геол. нефти и газа, 1964, № 11.
22.91. Фельдман И. И. Современное состояние радиоактивных методов исследования скважин. ОНТИ ВИЭМС, 1967.
22.92. Ферронский В. И. Теория и практика применения пенетрационно-каротажных методов при инженерно-геологических исследованиях. Докт. дисс. М., ВСЕГИНГЕО, МГРИ, 1968.
22.93. Ферронский В. И., Бондарик Г. К., Кровопусков Б. П., Шевелев Г. И. Пенетрационно-каротажный комплекс методов для инженерно-геологических исследований без бурения скважин.— Инф. сообщ. ВСЕГИНГЕО, вып. 88. М., 1965.
22.94. Холл Х. Е. Прибор со сцинтилляционным счетчиком с целью проведения нейтронного каротажа для оценки водородсодержания пород. Патент США № 3249230 от 15.09.1964 г.— Реф. Ж., «Геофизика», 1966, № 1, Д294П.
22.95. Цлав Л. З. Разделение нефтеносных и водоносных карбонатных пластов радиоактивными методами в условиях Куйбышевской и Оренбургской областей Канд. дисс. М., ВНИИЯГГ, 1964.
22.96. Цлав Л. З., Лаптев В. В. Использование комплекса радиометрических методов для определения положения водонефтяного раздела в карбонатных кол-

лекторах. Геология, геохимия и геофизика.— Тр. Куйбышевского НИИ нефтяной пром., вып. 27, 1964.
22.97. Цлав Л. З., Лаптев В. В. Об определении нефте-водонасыщенности и положения ВНК в карбонатных коллекторах месторождения Куйбышевского Поволжья радиометрическими методами.— Геол. нефти и газа, 1963, № 11.
22.98. Чударс Я. Э., Максимов Р. Д., Скворцова Н. И. Сравнение возможностей определения влажности строительных материалов по методу нейтронного просвечивания и методу обратного рассеяния нейтронов.— Сб. «Исследования по бетону и железобетону», т. 6. Рига, 1961.
22.99. Шакина В. Определение коллекторских свойств и положения ВНК геофизическими и радиометрическими методами. Геофизические и гидродинамические исследования пластов и скважин. (Тр. Всес. нефтегазового НИИ, вып. 29). Гостоптехиздат, 1960.
22.100. Юманс А. Х., Цимерман К. В. Последние достижения в использовании ядерной физики при исследовании нефтяных скважин.— В сб. «Пятый Международный нефтяной конгресс», т. 1. Гостоптехиздат, 1961.
22.101. Ядерная геофизика. (Сб. ст.). Гостоптехиздат, 1963.
22.102. Ядерная геофизика. (Тр. ВНИИЯГГ). вып 1. «Недра», 1968.
22.103. Ядерная геофизика (сб.). Атомиздат, 1972.
22.104. Якубсон К. И., Губерман Ш. А. Экспериментальное исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов на модели пласта. Промысловые и разведочные геофизические исследования.— Тр. Московского ин-та нефтехимической и газовой пром., вып. 31. Гостоптехиздат, 1960.
22.105. Ярвела Х. А. Оценка точности измерения влажности почвогрунтов нейтронным методом в полевых условиях.— Изв. Тимирязевской академии. 1962, вып. 3.
22.106. Alger R. P. Modern logging programs and interpretation methods.— Oil and gas industries, 1961, v. 14, № 6.
22.107. Allen L. S., Caldwell H. L., Mills W. R. Borehole models for nuclear logging.— Soc. Petrol. Eng. J., 1965, v. 5 ,№ 12. Geophys. abstracts. 1965, № 227.
22.108. Apostol J., Oncescu M. Aparat de suprafata pentru determinarea umiditatii cu ajutorul neutronilor.— Metrologia Aplicata, 1965, 12, № 12.
22.109. Apostol J., Oncescu M. On the metrological parameters in the measurement of moisture.— "Humidity and Moisture": Measurem. and control in sci. and ind., v. 4, New York — London, 1965.
22.110. Bardsley S. R., Algermissen S. T. Evaluating oil shale by log analysis.— J. Petr. Technol., 1963, v. 15, № 1.
22.111. Barrada Y. Application of the neutron moisture meter.— Isotopes and radiation in soil — plant nutrition studies. Vienna, 1965.
22.112. Bavel C. H. M. Neutron scattering measurement of soil moisture development and current status.— Humidity and moisture measurem. and control in Sci. and ind, v. 4. New York — London, 1965.
22.113. de Beer E. E., Goelen E. H. G. Measurement of moisture content of Soil by Radioisotopes.— Humidity and moisture measurement and control in science and ind., v. 4. New York — London, 1965.
22.114. Belknap W. B. Standardization and calibration of nuclear logs.— Petrol Engng., 1959, v. 31, № 13.
22.115. Belknap W. B., Dewan D. T., Kirkpatrick C. V., Mott W. E., Pearson A. J., Rabson W. R. A. P. J. Calibration facility for nuclear logs.— Drilling and product, 1959, Dallas, Texas. Amer. Petrol. Inst., 1960.
22.116. Borowczyk M., Czubek J., Dziunicwski B., Jurkiewicz L., Krzuk J., Niewodniczanski J., Rosinski B., Zuber A. Okreslonie wilgotnosci i ciezaru objetosciowego gruntow sypkich in situ metodami radiometrycznymi.— Archiwun in zynierii ladowej, 1961, t 7, z. 2.
22.117. Bowman D. H., King K. M. Convenient cadmiummetal standard for checking neutron soil moisture probes.— Soil. sci. soc. am. proc., 1965, v. 29.
22.118. Britzins C. W. Nou-destructive testing.— Civil Eng., 1963, v. 33, № 1.
22.119. Brunner G. C/H — Bestimmung in Kohlenwassertoffen mit beta- und neutronenstrahlung. Ein Vergleich der Leistungsdaten.— Isotopenpraxis, 1967, 3, № 6.
22.120. Bryant H. L. Flowing well logs can save you money.— World Oil, 1961, v. 152, № 2.
22.121. Bryant H. L. Production well logging techniques.— Geophys. 1960, v. 25, № 4.
22.122. Burn K. N. Calibration of a neutron soil moisture meter. Humidity and Moisture: Measurem. and control in Sci. and ind., v. 4. New York — London, 1965.
22.123. Burn K. N. Effect in iron on the determination of moisture content by the neutron method.— Canad. J. Earth Sci., 1966., v. 3, № 1.
22.124. Cohen O. P., Todmar N. H. A Comparison of neutron in oderation and gravimatric sampling for soil — moisture determination with emphasis on the cost factor.— Agric. Meteorol, 1966, 3, № 1—2.
22.125. Czubek J. A. Zasieg jadrowych metod pomiaru wilgotnosci i gestosci gruntow.— Nukleonika, 1968, t. 8, № 4—5.

22.126. Czubek J. A. Neutron-neutron well logging theory 1. Epithermal neutron distribution in the cylindrical geometry.— Nukleonika, 1962, 7, № 12.
22.127. Deegan C. J. New logging method.— Oil and Gas. J., 1950, v. 48, № 43.
22.128. Dewan J. T., Stone O. L., Morris R. L. Chlorine logging in cased holes.— J. Petrol. Technol., 1961, v. 13, № 6.
22.129. Fitzgerald D. D. How to find Gulf Coast gas with sonic and neutron logs.— World Oil, 1965, v. 160, № 5.
22.130. Gemmel W., McGregor B., Moss G. F. Estimation of moisture Content by neutron scattering: theory, calculation and experiment.— Internat. J. Appl. Radiat. and Isotop, 1966, v. 17, № 11/12.
22.131. Goode B. H. Interpreting nuclear logs.— Petrol. Engng, 1961, v. 33, № 1.
22.132. Guerrero E. T., Stewart F. M. Development of neutron derived porosity curve.— Oil and Gas. J., 1959, v. 57, № 2.
22.133. Haahr V., Olgard P. L. Comparative experimental and theoretical investigations of the neutronic method for measuring the water content in soil. Isotopes and radiation in soil — plant nutrition studies. Vienna, 1965.
22.134. Holdate M. M. A Study of the microlog as a porosity datum for the neutron log in Swan Hills Alberta.— Oil Canad., 1960, v. 13, № 3.
22.135. Hossin A. Calcul des porosites utiles a partir des diagraphies soniqueet neutron.— Bull. Assoc. franc. techniciens petrole, 1960, № 140.
22.136. Houveau dispositif de controlie on service da la geophysique.— Techn. petrole, 1968, v. 23, № 261.
22.137. Janczyszyn J. e. a. Dodor optymalnego ksztaltu neutronowodu dla absorpciynych metod neutronowych.— Nnkleonika, 1966, 11, № 1.
22.138. Johnnes E. Anwendugsmöglichkeiten der neutronenfeuchtemessung.— Vakutronik. Information, 1965, № 3.
22.139. Kais S. Calculation of neutron flux in hydrogeonous medium round a fast point source for application to moisture measurement by neutron.— Inlk. valtison. tekn. tutkimuslaitos, 1966, № 99.
22.140. Kernfysishe vochtigheids bepaling.— Straling, 1965, 21, № 12.
22.141. Kuhn W. Feuchtigkeitsbestimmung durch elastische Strenung schneller neutronen.— Atompraxis, 1959, 5, H. 4/5.
22.142. Kuhn W. Kontinuierliche Überwachung und Regelung des Feuchtegehaltes von Sintererzen nach dem Neutronenstreuverfahren.— Kerntechnik, 1963, 5, H 5.
22.143. Lebreton F., Voumans A., Oshry H., Wilson B. F. Log — combining refines porosity measurement.— Petrol. Manag., 1963, 35, № 13.
22.144. Lorch S. Messung des Wassergehaltes in Boden mit der neutronensonde.— Zeitschrift für Geophysik, 1963, 29, № 6.
22.145. McPherson G. D. Measuring moisture with neutron.— Instrum. Rev. 1965, № 12, November, Instrument Abstracts, 1966, v. 21, № 1.
22.146. Miyachita V. Measurement of moisture in raw materials for iron moking by neutron sowing down. "Humidity and moisture measurement and control in science and industry, v. 4. New York — London, 1965.
22.147. Milanov T. Tillampning av neutronmethoden for jordinktighetsmatumger vid SMHJ.— Grundforbattring. 1963, 16, № 4.
22.148. Misk A., Poupon A. How to evaluate gas zones with the neutron — density log.— Petrol. manag. 1963, v. 35, № 1.
22.149. Netz G. Anwendung der Feuchtemessung mittels neutronen.— Atomenergie en toepass, 1966, 8, № 5.
22.150. Netz V. Verfahren zur Bestimmung der optimalen Schichtdicke für die C/H Analyse mittels neutronen.— Atompraxis, 1965, 11, № 11/12.
22.151. Olgaard P. L., Haahr V. Comparative experimental and theoretical investigations of the DM neutron moisture probe.— Nucl. eng. and design., 1967, v. 5, № 3.
22.152. Papmehl N., Schwalm D. Zur Berechnung von schnellen Neutronenspektren in wassertoffhaltigen Medien.— Atomkernenergie, 1962, 7, H. 5.
22.153. Patten E. P., Bennett G. D. Application of electrical and radioactive well logging to ground waterhydrology.— Geol. surv. water — supply paper, 1963, № 1544-D, IV.
22.154. Pied B. Etude qualitative ef quantitetive des reservoirs naturels de gaz les diagraphies neutroniques. Compt. rond. 82-e Congr. ind. gar Denville, 1965. Paris, 1966.
22.155. Pierpoint G. Measurement surface soil moisture with the neutron depth probe and a surface shield.— Soil Sci., 1966, 101, March.
22.156. Puzin L. A. Questions answered by well logging.— Petrol. interamer. 1962, v. 20, № 12.
22.157. Radermund C. G., Alger R. P., Tittman J. Logging empty holes.— Oil and Gas. J. 1961, v. 59, № 24.
22.158. Savre W. C. Determination of a more accurate porosity and mineral composition in compless lithologies with the use of the sonic, neutron and density surveys.— J. Petrol. Technol., 1963, v. 15, № 9.
22.159. Schroller R., Stiede H. Feuchtigkeitsmessung mit BF_3— Zahlrohrsonde an Formsand.— Kernenergie, 1963, b. 6, H. 6.

22.160 Schroller R., Stiede H. Einige Probleme der Oberflachenmessung zur Bestimmung der Feuchtigkeit fester Stoffe mittels neutronen.— Kernenergie, 1963, b. 6, H. 11.
22.161. Schuricht V. Messung der Feuchtigkeit ven Rohefeinkohle durch elastische Rückstreuung sehneller Neutronen.— Fruberder Forschungsh, 1965, A, № 279.
22.162. Schuazzlose J. Feuchtigkeitsemessungan des Stückkoks mit neutronen.— Isotopenpraxis, 1967, 3, H. 9.
22.163. Servo K. Calculation of neutron flux in hydrogenous medium round a fast point source for application to moisture measurement by neutrons.— Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos stateus Tekniska Forskningsanstalt, Helsinki, 1966; Kernenergie, 1967, 10, № 1.
22.164. Steinbrecher D. Über die Möglichkeiten einer Porositatsbestimunung des Zechstein — Hauptkarbonats mit Hilfe neutronenphyskalischer Methoden.— Z. angew. Geol. 1963, 9, № 86.
22.165. Tittle G. W., Faul H., Goodman C. Neutron logging of drill holes: the neutron-neutron method.— Geophysics, 1951, v. 16, № 4.
22.166. Tittman J., Shepman H., Nagel W. A., Alger R. P. The sidewall epithermal neutron porosity log.— J. Petrol. Technol., 1966, v. 18, № 10.
22.167. Wagiel E., Szpunar J. Mozliwosci zastosowania metod neutronowych w pomiarach Odwiertowych.— Nafta, 1967, 23, № 3.
22.168. Weber W. G. J. Laboratory and field evaluation of nuclear surface gauges for determining soil moisture and density.— Nuclear Measurements, 1963. Washington, 1965.
22.169. Westmeyer H. Über Feuchtigkeitsmessung vermittels Neutronen.— Kernenergie, 1963, b. 6, H. 6.
22.170. Zuber A., Cameron J. E. Neutron soil moisture gauges.— Atomic energy review, v. 4, № 4. Vienna, JAEA, 1966.
22.171. Синицын В. И., Емельянов В. А., Крейдлин И. И., Боскин Л. И., Правиков А. А. Сцинтилляционный влагомер-плотномер для полевых изысканий.— Ат. энергия, 1968, т. 25, вып. 5.
22.172. Стариков В. Н., Еникеева Ф. Х. Распределение медленных нейтронов в однородном водородсодержащем песчанике.— Ат. энергия, 1969, т. 27, вып. 3.
22.173. Нелепченко О. М., Ахияров В. Х. Портативный эталон для стандартизации показаний нейтронных методов.— Нефть и газ Тюмени. (Науч.-техн. сб.). Тюмень, 1970, вып. 5.
22.174. Новые геофизические исследования на Украине. (Сб.). «Наукова думка», 1969.
22.175. Геология, геофизика и геодезия. Сб. ст. «Недра», 1970.
22.176. Стариков В. Н. Решение основных задач стационарной нейтронометрии нефтяных скважин методом Монте-Карло. Канд. дисс. Уфа, 1971.

Литература к главе 23

23.1. Бакулин В. И. Нейтронно-абсорбционный анализ редких земель и ртути.— В сб. «Геофизическое приборостроение», вып. 12. Гостоптехиздат, 1962.
23.2. Баранов В. И., Христианов В. К., Карасев Б. В., Попов Г. И. Нейтронноборометрическое опробование обнажений и горных выработок.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 3.
23.3. Беломар О. Д. О влиянии распределения бора в горных породах на поглощение медленных нейтронов.— Докл. АН УССР, 1861, № 4.
23.4. Беломар О. Д., Бардовский В. Я. Использование радиоактивного каротажа для выявления и расчленения пластов каменной соли.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1961, № 6 (34).
23.5. Блюминцев А. М. Определение содержания железа в рудах методом нейтронного каротажа.— Прикл. геофиз., вып. 34. Гостоптехиздат, 1962.
23.6. Блюминцев А. М., Фельдман И. И. Вопросы количественной оценки содержания железа в рудах по данным радиоактивного каротажа.— Разв. и пром. геофиз., вып. 46. Гостоптехиздат, 1962.
23.7. Бобер И. А., Драгомощенко Н. И., Кошелев И. П., Старцев Ю. С., Шмонин Л. И. О возможности количественного определения бора в породах с помощью нейтрон-нейтронного каротажа.— Тр. Каз. научн.-иссл. ин-та мин. сырья, вып. 1. Алма-Ата, 1959.
23.8. Вахтин Б. С. Исследования по нейтрон-нейтронному методу определения бора и серебра в горных породах по тепловым и резонансным нейтронам. Канд. дисс. Новосибирск, 1967.
23.9. Вахтин Б. С., Новоселов А. В., Филиппов Е. М. Нейтрон-нейтронный метод на резонансных нейтронах.— Геол. и геофиз., 1967, № 2.
23.10. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. Возможности применения нейтронной спектрометрии в ядерной геофизике.— Геол. и геофиз., 1968, № 2.
23.11 Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. Возможные области применения нейтронно-резонансного метода в геофизике.— Геол. и геофиз., 1970, № 2.
23.12. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. Нейтронно-резонансный метод определения серебра.— Цветные металлы, 1968, № 12.

23.13. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. Нейтрон-нейтронное профилирование при определении бора в коренных выходах пород.— Геол. и геофиз., 1965, № 10.
23.14. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. Определение высоких содержаний бора в порошковых пробах нейтрон-нейтронным методом.— Геол. и геофиз., 1965, № 4.
23.15. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М., Бочкарев В. И. Применение нейтронных источников для определения высоких концентраций бора.— Изотопы в СССР, 1972, вып. 29.
23.16. Вахтин Б. С., Иванов В. С., Новоселов А. В., Филиппов Е. М. Радиационно-резонансный детектор нейтронов для геофизических исследований.— Ат. энергия, 1972, т. 33, вып. 5.
23.17. Гамбарян Р. Г., Рогов Е. В., Штань А. С. Установка для нейтронно-резонансного анализа элементного состава вещества.— Ат. энергия, 1968, т. 25, вып. 3.
23.18. Гамбарян Р. Г., Штань А. С. Нейтронно-резонансный анализ элементного состава вещества.— Ат. энергия, 1968, т. 25, вып. 2.
23.19. Гамбарян Р. Г. Исследование и разработка нейтронно-резонансных методов элементного анализа вещества. Канд. дисс. М., 1969.
23.20. Голубев В. И., Звонарев А. В., Колеганов Ю. Ф., Николаев М. Н., Орлов М. Ю. Применение метода резонансных фильтров для измерения спектра нейтронов в среде.— Ат. энергия, 1967, т. 23, вып. 2.
23.21. Захарченко В. Ф. К теории краевых эффектов нейтронной геофизики.— АН СССР, серия геофиз., 1964, № 12.
23.22. Звонарев А. В. и др. Измерение нейтронных спектров в области энергий до 3 кэВ резонансными индикаторами.— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 6.
23.23. Клевцов П. П., Колчина А. Г., Сальцевич В. Б., Сенько А. К. Перспективы использования нейтронных методов при поисках, разведке и анализах на бериллий и бор.— Вопросы руд. геофиз., вып. 1. Госгеолтехиздат, 1960.
23.24. Козачек И. А. Влияние резонансного захвата на распределение нейтронов в безграничной среде.— Сб. «Строение нефтегазоносных провинций по геофизическим данным», вып. 3 (14). «Наукова думка», 1965.
23.25. Козачек И. А. К вопросу о замедлении нейтронов в поглощающей среде.— Докл. АН УССР, 1961, № 9.
23.26. Козачек И. А. О влиянии резонансного захвата на распределение нейтронов в породах с малым водородсодержанием.— Докл. АН УССР, 1961, № 4.
23.27. Козачек И. А. О приближенном решении одной задачи теории нейтронного каротажа.— Сб. «Некоторые вопросы геофизических исследований на Украине». «Наукова думка», 1962.
23.28. Козачек И. А. О стационарном распределении нейтронов в безграничной среде.— Геофиз. сб. Ин-та геофиз. АН УССР, 1964, вып. 7(9).
23.29. Козачек И. А. Оценка эффекта резонансного захвата нейтронов в породах.— Докл. АН УССР, 1961, № 5.
23.30. Козачек И. А. Приближенная формулировка задачи о замедлении нейтронов.— Докл. АН УССР, 1968, Б, № 4.
23.31. Козачек И. А. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в безграничной поглощающей среде.— Ат. энергия, 1965, т. 18, вып. 4.
23.32. Козачек И. А. Замедление нейтронов в многокомпонентных средах при геофизических исследованиях. Канд. дисс. Киев, 1964.
23.33. Козачек И. А., Кулик В. В. Замедление нейтронов точечного источника в полубесконечной среде.— Ат. энергия, 1968, т. 25, вып. 3.
23.34. Лалетин Н. И. Спектры медленных нейтронов в воде с поглотителями.— Ат. энергия, 1964, т. 14, вып. 5.
23.35. Малышева Н. Г. Возможность применения метода нейтронной абсорбциометрии для определения ртути в продуктах обогащения.— Тр. ИГД им. А. А. Скочинского, вып. 16. Гостортехиздат, 1962.
23.36. Малышева Н. Г. Применение нейтронной абсорбциометрии для определения элементов, имеющих большое сечение захвата тепловых нейтронов, в рудах и продуктах обогащения.— В сб. «Научные сообщения ин-та горного дела им. А. А. Скочинского» вып. XIX. Гостортехиздат, 1963.
23.37. Малышева Н. Г. Ускоренный контроль продуктов обогащения, содержащих элементы с большим сечением захвата тепловых нейтронов. Канд. дисс. М., 1965.
23.38. Малышева Н. Г., Старчик Л. П. Определение содержания некоторых элементов в растворах и флотационных пульпах.— «Науч. сообщ. Ин-та горного дела им. А. А. Скочинского», 1965, вып. 29.
23.39. Малышева Н. Г., Старчик Л. П., Панди И. С., Паушкин Я. М. Применение метода нейтронной абсорбциометрии для определения содержания бора в борорганических соединениях.— Ж. аналит. хим., т. XVIII, вып. 11, 1963.
23.40. Моргунов В. С., Мазанов В. Ф. Полевой индикатор бора.— Уч. зап. Средне-Азиатского ин-та геол. и мин. сырья, вып. 7. Ташкент, 1962.
23.41. Остроумов Г. В. Нейтронно-абсорбционный анализ борных руд с помощью сцинтилляционной установки РАП-2м («Нейтрон»).— Разв. и охрана недр, 1963, № 9.
23.42. Остроумов Г. В. Нейтронный метод анализа на бор руд скарнового типа.— Разв. и охрана недр, 1961.

23.43. Остроумов Г. В. Определение бора в растворах нейтронным методом.— Бюлл. науч.-техн. инф. Мин. геол. и охраны недр. Госгеолтехиздат, 1962, № 3 (37).
23.44. Остроумов Г. В. Определение бора в штуфах нейтронным методом.— Бюлл. науч.-техн. инф., 1961, № 2 (30).
23.45. Остроумов Г. В., Булашов Ф. А. Ускоренный метод при поисковых работах на бор.— Бюлл. науч.-техн. инф., 1963, № 5 (49).
23.46. Плакида К. М. Применение нейтронно-абсорбционного метода для определения суммы редкоземельных элементов в порошковых пробах и штуфах.— Бюлл. науч-техн. инф. ВИМСа; 1963, № 5 (49).
23.47. Плаксин И. Н., Старчик Л. П., Малышева Н. Г. Определение нейтронным абсорбционным методом содержания элементов с большим сечением захвата тепловых нейтронов в продуктах обогащения.— Тр. I Всес. координационного совещ. по активационному анализу. «Наука», Ташкент, 1964.
23.48. Плаксин И. Н., Малышева Н. Г., Старчик Л. П. Определение ртути в продуктах обогащения нейтронным абсорбционным методом.— Зав. лаб., 1964, № 7.
23.49. Фельдман И. И. Влияние и оценка содержания элементов, поглощающих нейтроны, в пересеченных скважинами горных породах. Канд. дисс. М., 1966.
23.50. Фельдман И. И. Выявление и изучение бороносных пластов нейтронными методами исследования скважин.— «Промысловые и разведочные геофизические исследования». Тр. Московского ин-та нефтехимической и газовой пром., вып. 31. Гостоптехиздат, 1960.
23.51. Фельдман И. И. О выявлении марганцевых пластов нейтронными методами исследования скважин.— «Промысловые и разведочные геофизические исследования». Тр. Московского ин-та нефтехимической и газовой пром., вып. 31. Гостоптехиздат, 1960.
23.52. Фельдман И. И. Выделение бороносных горизонтов в соленосных толщах и минералогическое расчленение калийно-магниевых солей методами радиоактивного каротажа — В сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 50. Гостоптехиздат, 1963.
23.53. Филиппов Е. М. Исследования при помощи метода групп распределения плотности нейтронов в сильнопоглощающих горных породах, пересеченных буровой скважиной.— Прикл. геофиз. вып. 27. Гостоптехиздат, 1960.
23.54. Филиппов Е. М. О возможностях исключения влияния влажности горных пород на результаты измерений нейтронными геофизическими методами.— Геол. и геофиз., 1969, № 1.
23.55. Юманс А. Г. Аппаратура для одновременного определения тепловых и надтепловых нейтронов. Патент США № 2920204 от 5.01.1960.— Реф. ж. «Геофизика», 1961, № 8А271П.
23.56. Якубович А. Л., Зайцев Е. И. Ускоренное определение бора, лития, кадмия и некоторых других элементов на установке типа «Нейтрон»,— Зав. лаб., 1962, № 7.
23.57. Dimitriu A. Noi pesibilitati in determinaria elementelor rare din roci prin utilizarea spectroscoier de neutroni.— Studii tehn si econ, 1966, B., № 44.
23.58. Patrovsky V. Stanoveni boru v horninach a mineralech.— Geologicky Pruzkum. 1962, № 8.
23.59. Taylor T. J., Havens W. W. Neutron spectroscopy for chemical analysis — III,— Nucleonics, 1950, v. 6, № 4.
23.60. Tolgyessy J. Neutronova absorpina analyza.— Jaderna Energie, 1966, v. 12, № 3.
23.61. Большаков А. Ю., Егоров Э. В., Соколов Е. А. Нейтрон-нейтронный способ определения содержания элементов.— Бюлл. изобретений и товарных знаков, 1968, № 30.
23.62. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. Определение высоких концентраций бора нейтронно-резонансным методом.— Зав. лаб., 1971, № 4.
23.63. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. О возможности раздельного определения бора и лития нейтронно-резонансным методом.— Ж. аналит., хим., 1972, № 2.
23.64. Вахтин Б. С., Филиппов Е. М. Нейтронно-резонансная установка с центральным расположением источника.— Ат. энергия, 1971, т. 31, вып. 2.

Литература к главе 24

24.1 Аначевский Э. В., Беляков М. А., Крутиков М. Г., Лейпунская Д. И., Рудык Ю. М., Соколов Г. В. К вопросу оценки содержаний фосфора и железа в фосфоритах месторождения Кокоу (Кара-Тау) по радиометрическим измерениям в скважинах.— В сб. «Промышленное горно-химическое сырье и природные соли», вып. 2. М., Изд. НИИ ТЭХИМ, 1967.
24.2. Басин Я. Н. Радиометрический способ оценки зольности угля. Авт. свид. № 142720 от 20 октября 1960 г.— Бюлл. изобретений, 1961, № 22.
24.3. Басин Я. Н., Берман Л. Б., Нейман В. С. О возможности выделения кавернозных и трещиноватых известняков методами промысловой геофизики.— Прикл. геофиз., вып. 39, М., 1964.
24.4. Брагина Л. П., Итенберг С. С., Шнурман Г. А. Изучение коллекторских свойств карбонатных толщ по промыслово-геофизическим данным.— В сб. «Новые

данные по нефтяной геологии, гидрологии, геотермии и геофизике Центрального и Восточного Кавказа».— Тр. Грозненского нефтяного ин-та, № 29, «Недра», 1968.
24.5. Бражников И. С., Ковалев А. И. Определение контакта газ — вода методом НГК.— В сб. «Геология, бурение и разработка газовых и газоконденсатных месторождений Центрального и Восточного Предкавказья».— Тр. Ставропольской комплексной науч.-иссл. лаб. ВНИИ природных газов, 1966, вып. 1.
24.6. Браташ В. П., Жохова Р. М., Забелин В. В. Применение НГМ для выделения газоносных коллекторов на месторождениях Якутии.— Сб. «Нефтегазовая геология и геофизика», № 2, М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1966.
24.7. Берман Л. Б., Басин Я. Н., Нейман В. С. Использование НГК при создании и эксплуатации подземных хранилищ газа.— Сб. «Нефтегазовая геология и геофизика», № 7. М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1964.
24.8. Дворкин И. Л., Стариков В. Н. Основные результаты применения метода Монте-Карло для изучения зависимости показаний НГК от хлорсодержания (нефтеводонасыщенности) коллекторов.— «Нефтегаз. геол. и геофиз.» (Науч.-техн. сб.), 1971, № 6.
24.9. Дортман Н. Б. Методика интерпретации каротажных диаграмм нефтяных скважин для оценки угленосности Прикамья и Поволжья.— Инф. сб. ВНИИ геол. ин-та Л., 1960, № 34.
24.10. Ермакова А. М. Уточнение методики определения пористости карбонатных пород по данным НГМ. Коллекторы нефти и газа Волгоградской области.— Тр. Волгоградского НИИ нефтяной и газовой пром., 1966, вып. 10.
24.11. Жаворонков В. Я., Филиппов Е. М. Определение содержания бора в породах по регистрации гамма-излучения от реакции $B^{10}(n, a)$.— Геол. и геофиз., 1965, № 7.
24.12. Использование нейтронного активационного анализа при поисках и разведке полезных ископаемых. ОНТИ ВИЭМС. М., 1966, № 1.
24.13. Иванкин В. П. Способ радиометрии буровых скважин. Авт. свид. № 113856 от 8 мая 1957 г.— Бюлл. изобретений, 1958, № 6.
24.14. Карапикало В. Ф., Короткова В. А., Блюминцев А. М., Фельдман И. И. Выделение и оценка хромитовых руд в разрезах скважин комплексом ядерно-геофизических методов.— Разв. и охрана недр, 1968, № 2.
24.15. Коваленко В. Д. К вопросу об использовании методов скважинной геофизики для изучения глубинной гидрологии Донецкого бассейна.— Геол. ж., 1965, т. 25, № 5 (укр).
24.16. Колдуэлл Р. Л. Калибровка аппаратуры радиоактивного каротажа. Патент США № 3213279 от 19.10.1965 г.— Реф. ж. «Геофизика», 1966, № 10Д191П.
24.17. Колдуэлл Р. Л. Метод компенсации влияния железной обсадной колонны при радиоактивном каротаже. Патент США № 3246152 от 12.04.1966 г.— Реф. ж. «Геофизика» 1967, № 5Д284П.
24.18. Крутиков М. Г. Разработка метода элементного анализа горных пород и руд по спектрометрии гамма-излучения радиационного захвата нейтронов. Канд. дисс. М., 1968.
24.19. Курганский В. Н., Логинов В. И. Изучение множественных связей между физическими свойствами и геофизическими параметрами горных пород.— Изв. вузов. Нефть и газ, 1967, № 6.
24.20. Мак Кей А., Холл Х. В. Радиоактивный каротаж для выделения водорода и хлора. Патент США № 3219821 от 23.11.1965 г.— Реф. ж. «Геофизика», 1967, № 1Д207П.
24.21. Недоступ Г. А., Якубсон К. И. Радиометрия скважин на месторождениях медно-никелевых руд.— Сб. «Геофизическая разведка», вып. 11. Гостоптехиздат, 1963.
24.22. Нейман В. С., Берман Л. Б., Басин Я. Н. Оценка коэффициента газонасыщенности по данным НГК.— Сб. «Нефтяная геология и геофизика», № 7. М., ВНИИОЭНГ, 1964.
24.23. Омесь С. П., Чуйков А. Ф. Выделение газоносных пластов и зон обводнения по измерениям двумя зондами НГК в условиях газоконденсатных месторождений Краснодарского края.— Разв. геофиз., вып. 27. «Недра», 1968.
24.24 Оуен Д. Д. Нейтронный и гамма-лучевой скважинный прибор. Патент США № 3205356 от 7.09.1965 г.— Реф. ж., «Геофизика», 1966, № 10Д190П.
24.25. Пестриков А. С. О возможности использования промыслово-геофизических данных для определения типа коллекторов.— Геол. нефти и газа, 1964, № 10.
24.26. Пестриков А. С., Ермакова А. М. Опыт использования данных нейтронных гамма-методов для оценки пористости карбонатных пород.— «Вопросы геологии и нефтегазоносности Волгоградской области».— Тр. Волгоградского НИИ нефтяной и газовой пром., 1965, вып. 3.
24.27. Плаксин И. Н., Малышева Н. Г., Старчик Л. П. Применение ядерной реакции (n, γ) для определения содержания кадмия.— Докл. АН СССР, 1966, т. 171, № 2.
24.28. Плаксин И. Н., Малышева Н. Г., Старчик Л. П., Зданович Н. Д. Применение гамма-квантов радиационного захвата нейтронов для определения содержания кадмия и бора в продуктах обогащения.— Зав. лаб., 1967, № 9.
24.29. Попов В. К., Кармазина Т. С. Геофизические методы контроля за разработ-

кой Анастасиевского и Троицкого газо-нефтяного месторождения.— Геол. нефти и газа, 1966, № 7.
24.30. Постельников А. Ф., Зив Л. А., Шумятский Ю. К. Применение спектроскопии радиационного гамма-излучения для решения некоторых задач каротажа скважин на рудных месторождениях.— Тр. ЦНИ горноразведочного ин-та, вып. 58. М., 1964.
24.31. Тарасова Р. И., Куклев Ю. М. Предварительные результаты определения пористости в терригенных отложениях по методу НГК на примере Ольховского месторождения.— «Геология и разработка нефтяных месторождений». Тр. Пермского фил. Гос. ин-та по проектированию и исследовательским работам в нефтедобывающей пром., вып. 2. Пермь, 1966.
24.32. Титков Н. И., Винарский М. С., Кукин А. Н. О рациональных методах исследования поглощающих горизонтов при бурении скважин.— Разв. и охрана недр, 1964, № 7.
24.33. Утегенов С. М. О влиянии минералогического состава гидрохимических осадков на разрешающую способность нейтронного гамма-каротажа и определение в них бора.— Изв. АН КазССР, серия геол., 1964, № 1.
24.34. Федоров А. А. и др. Измерение спектров гамма-излучения радиационного захвата нейтронов в некоторых горных породах.— Ат. энергия, 1960, т. 8, вып. 6.
24.35. Фельдман Б. Е., Никитина З. И. Способ выделения нефтеносных пластов в неоднородных карбонатных коллекторах.— «Геология и геофизика», Тр. Куйбышевского НИИ нефтяной пром., 1965, вып. 29.
24.36. Холл Х. В. Радиоактивный каротаж для выделения водорода и хлора. Патент США № 3219820 от 23.11.1965 г.— Реф. ж. «Геофизика», 1967, № 1Д206П.
24.37. Целищев В. Ф. Исследования и изоляция поглощающих пластов.— В сб. «Совершенствование бурения нефтяных и газовых скважин». «Недра», 1965.
24.38. Шапиро Д. А. Контроль технического состояния скважин методом НГК.— Разв. и пром. геофиз., вып. 40, 1961.
24.39. Эйфе К. Г. Использование спектрометрии нейтронного гамма-излучения для определения вещественного состава горных пород в скважинах. Канд. дисс. М., 1966.
24.40. Юсупов И. Г., Шевалдин И. Е., Ахметзянов Э. К. Оценка кавернозности пород по данным каротажа.— Сб. «Бурение», № 3. М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1965.
24.41. Caldvell R. L. e. a. Gamma-ray spectroscopy in well logging.— Geophys., 1963, v. 28, № 4.
24.42. Christell R., Ljunggren K. Analysis of ore sampls using gamma-rays emmited under irradiation with a low-level neutron source.— Radioochemical methods of analysis, v. 1 JAEA. Vienna, 1965.
24.43. Cojocariu L., Marghitu V. Masuratori geofizice nucleare pentru explora rea zacamintelor de sare gema si saruri de potasin din zona subcarpatica a Cappatilor rasariteni.— Studii. tehn si econ., 1966, D., № 6.
24.44. Crain E. R., Anderson W. B. Quantitative log evaluation of the prairie evaorite formation in Saskatchewan.— J. Can. Petrol. Technol., 1966, v. 5, № 3.
24.45. Diekmann E. Le Neutron-log dans ce stokage souterrain pour la recherche des contacts gaz-eau.— Rev. Inst. franc. petrole, 1965, v. 20, № 3.
24.46. Dziunikowski B., Krzuk J., Niewodniczanski J., Przewlocki K., Zuber A., Czubek J., Jurkiwicz L., Werner Z. Zastosowanie karotazu radiomethycznego do ilosciowej analizy na sole potosowe w kierunkowych odwiertach w kopalni soli w Klodawie. Pierwsze krajowe sympoz zastosowan izotopow techn. Rodow. 8—12 czer. 1960. Warzawa, 1961, № 40.
24.47. Egerer F. Radioactiv karottazs alkalmazasa a barnakoszen kutatasban.— Nehezipari musz egyet Korl. 1964, 9, 83—94.
24.48. Eife K. Anwendung der Neutroneinfang-γ-Spektrometrie zur Untersuchung von Braunkohlenflözen im Bohrlöchern.— Z. für angew. Geol., 1966, b. 12. № 89, 1966, b. 12, № 10.
24.49. Gerstenberger W., Lotzsh W. Eine Apparatur zur gamma-Spectrometrie in Bohrlöchern und erste Ergebnisse.— Isotopenpraxis, 1967, b. 3, № 9.
24.50. Hall H. E. Scintillation-type well logging device with two crystals responding separately to thermal neutrons and gamma-rays. Patent USA, № 3247377.— Реф. ж. «Геофизика», 1967, № 7Д274П.
24.51. Kapasne T. Z. Geofizikai vizgalatok vaserckutato furasokban.— Geofizikai kozlemenyek, 1966, 15, № 1—4.
24.52. Kovalczuk J. Methody badan geofizyki Wiertniczej za weglem kamiennym woda i gazem.— Probl. geol. i surovc. Gornoslask Okregn. Przemysl. Cz. l. Katowica, 1964.
24.53. Lotzsch W. Ein Beitrag zur Anwendung der Neutroneinfang-γ-Spektrometerie für analytische Zwecke, insbesondere zur Bohrlöcherkundung von Eisenerz.— "Freiberger Forschungen". 1966, № 205.
24.54. Lotzsch W. Neutroneinfong-gamma-Spektrometrie zur Eisenerzerkundung (Bohrlochmodellversuche).— Z. für Angew. Geol., 1965, b. 11, № 6.
24.55. Lotzsch W. Neutron befogasos-gamma-spektrometriai vizsgalatok furolyukmodellen es nehany vaserolepen.— Magyar geofiz, 1965, v. 6, № 3—4.

24.56. Lovan T. E., McCluskey L. D. Logging observation wells in gas storage.— J. Petrol. Technol., 1964, v. 16, № 7.
24.57. Owen J. D. Hydrolen index and gamma-ray well logging. Patent USA, № 3211909.— Реф. ж. «Геофизика», 1966, № 10Д189П.
24.58. Owen J. D. Neutron and gamma-ray well logging for chlorine content. Patent USA № 3244880.— Реф. ж. «Геофизика», 1967, № 7Д271П.
24.59. Pickett G. R. A review of current techniques for determination of water saturation from Logs.— J. Petrol. Technol., 1966, v. 18, № 11.
24.60. Pontecorvo B. Neutron well logging.— Oil and Gas J. 1941, v. 40, № 18.
24.61. Sokolowski J. Wazniejsze wyniki zastosowania pomiarow radiometrycznych w glebokich otworach wiertniczych.— Nukleonika, 1968, t. 13, № 4—5.
24.62. Voronca A. Progrese realizatein explorarea zacamintelor decarbumprin carotaj geofisic in RPR.— Asoc. geol. Carpato-Balcan Congr. 5 lea, 1961. Bucuresti, vol. 6. Bucuresti, 1963.
24.63. Дядькин И. Г., Стариков В. Н., Еникеева Ф. Х. Решение задач теории нейтронного гамма-каротажа методом Монте-Карло.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1969, № 5.
24.64. Дядькин И. Г., Стариков В. Н., Еникеева Ф. Х. Решение прямой задачи НГК методом Монте-Карло.— «Нефтегазовая геология и геофизика». (Науч.-техн. сб. № 10). М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1968.
24.65. Зив Л. А., Костин В. Л., Постельников А. Ф., Рязанов Н. П. Влияние свойств среды и параметров скважины на интенсивность жесткого гамма-излучения при нейтронном гамма-каротаже.— Тр. НИГРИ, 1968, вып. 74.
24.66. Зив Л. А., Костин В. Л., Постельников А. Ф., Шуметский Ю. К. Эталонные аппаратурные спектры гамма-лучей радиационного захвата нейтронов и влияние на них свойств среды и условий измерений в скважинах.— Тр. НИГРИ. 1968, вып. 74.
24.67. Утегенов С. М. Определение минералогического состава солей по каротажу.— Изв. АН КазССР, серия геол., 1969, № 4.
24.68. Senftle F. E., Duffey D., Wigginns P. F. Mineral exploration of the ocean floor by in situ neution absorption using californium-252 source.— Marine technol. soc. j., 1969, v. 3, № 5.
24.69. Allan D. L., Armitage B. H., Spenser W. Analysis with a Po — Be source: the measurement of prompt gamma-rays.— Anal Chem., Acta, 1971, v. 53, p. 401—414.
24.70. Зив Л. А. Разработка метода спектрометрии гамма-лучей захвата нейтронов для количественного определения рудных элементов группы железа непосредственно в скважинах. Канд. дисс. М., 1971.

Литература к главе 25

25.1. Абдулаев А. А., Лобанов Е. М., Новиков А. П., Хайдаров А. А., Романов М. М. Анализ активированных образцов горных пород с помощью сцинтилляционных гамма-спектрометров.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, 1960, № 5.
25.2. Абдулаев А. А., Лобанов Е. М., Новиков А. П., Хайдаров А. А. Радиоактивационный анализ скарнов Ингичкинского месторождения.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, 1960, № 4.
25.3. Активационный анализ горных пород и других объектов. (Сб), Ташкент, 1966.
25.4. Активационный анализ элементного состава геологических объектов. (Сб.). Ташкент, 1967.
25.5. Анчевский Э. В., Беляков М. А. Применение нейтронного активационного анализа для определения алюминия в нефелиновых концентратах.— Изотопы в СССР, 1968, № 11.
25.6. Баранов В. И., Заборенко К. Б., Несмеянов Н. Н. Методы работы с радиоактивными элементами.— В сб. «Радиохимия». Изд. МГУ, 1952.
25.7. Бардовский В. Я. Метод непрерывного активационного каротажа скважин на месторождениях флюорита.— Уч. зап. Среднеазиатского НИИ геол. и мин. сырья. Ташкент, 1962, вып. 7.
25.8. Бардовский В. Я. Количественное определение плавикового шпата методом наведенной активности.— Разв. геофиз., вып. 1. «Недра», 1964.
25.9 Бардовский В. Я., Колпаков А. В. Применение метода наведенной активности для выделения рудных зон в скважинах флюоритового месторождения.— Вопросы руд. геофиз., вып. 3, 1961.
25.10. Беленький В. В., Лейпунская Д. И., Соколов Г. В., Спиридонов В. П., Тихомирова Н. Л. Спектральный активационный каротаж в осадочных породах.— В сб. «Материалы по методике разведки полезных ископаемых». Гостоптехиздат, 1962.
25.11. Белых В. А., Сенько-Булатный И. Н., Шулятьев С. Л., Якуб Л. И. О влиянии активации кремния быстрыми нейтронами при активационном каротаже на месторождениях бокситов.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 6.
25.12. Берзин А. К., Блюменцев А. М. Ядерные методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых и исследования минерального сырья.— Изотопы в СССР, 1965, № 1.

25.13. Бланков Е. Б., Бланкова Т. Н., Русяев В. Г., Якубсон К. И. Нейтронный активационный анализ в геологии и геофизике. «Наука», 1972.
25.14. Бланков Е. Б., Бланкова Т. Н., Русяев В. Г. Определение активностей изотопов при активационном анализе с использованием специальных систем и координат.— Зав. лаб., 1968, № 3.
25.15. Бланкова Т. Н., Русяев В. Г., Варварина Е. К. Активационный анализ образцов горных пород на содержание алюминия и кремния.— Изотопы в СССР, 1966, № 4.
25.16. Бланкова Т. Н., Русяев В. Г., Варварина Е. К. Определение содержания алюминия и кремния методом активационного анализа в малых навесках проб горных пород.— Геол. и геофиз., 1966, № 4.
25.17. Блюменцев А. М. и др. Нейтронно-активационные исследования вещественного состава горных пород и руд в условиях скважин.— Докл. на совещ. специалистов стран членов СЭВ. Краков, 1966.
25.18. Булашевич Ю. П., Шулятьев С. А. Оптимальные условия непрерывного активационного каротажа.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1960, № 2.
25.19. Булашевич Ю. П., Сенько-Булатный И. Н. Экспериментальная проверка условий оптимальности непрерывного активационного каротажа.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 4.
25.20. Булашевич Ю. П., Сенько-Булатный И. Н., Деев Л. Л. Гамма-спектрометрический активационный каротаж.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 9.
25.21. Бушков А. П., Прокопчик В. И. К вопросу об активационном методе определения флюорита.— Ат. энергия, 1966, т. 21, вып. 3.
25.22. Возженников Г. С. Активационный анализ в рудной геофизике. «Недра», 1965.
25.23. Возженников Г. С., Бреднев И. И., Трофимов В. П. О возможности экспрессной оценки, зольности углей активационным анализом.— Изв. вузов. Горн. ж., 1968, № 10.
25.24. Вязников Е. П., Глассон В. В. Возможности определения незначительных содержаний золота нейтронным активационным анализом с использованием ампульных полоний-бериллиевых источников нейтронов.— В сб. «Геофизические исследования при решении геологических задач в Восточной Сибири», вып. 3. Иркутск, 1964.
25.25. Глассон В. В. Разработка и применение метода нейтронной активации для количественного определения алюминия и кремния в осадочных породах. Канд. дисс. М., 1969.
25.26. Глассон В. В., Тимохин Е. В., Вязников Е. П. Опыт применения экспрессного активационного анализа для определения алюминия, кремния и марганца в образцах горных пород.— В сб. «Геофизические работы при решении геологических задач в Восточной Сибири». Гостоптехиздат, 1961.
25.27. Глассон В. В., Мандельбаум М. М., Турицын К. С. Возможности нейтронно-активационного анализа на алюминий и кремний.— Геол. и геофиз., 1969, № 5.
25.28. Горбачев А. Н., Карпухин А. М., Матуканис Л. Ф. Нейтронно-активационная съемка — метод выявления апатитовой и другой фторсодержащей минерализации по ореолам рассеяния фтора.— Геол. и геофиз., 1970, № 3.
25.29. Дрынкин В. И. Экспрессный нейтронный активационный анализ образцов горных пород с помощью полоний-бериллиевых нейтронных источников и нейтронного размножителя НР-1. Канд. дисс. М., 1962.
25.30. Дрынкин В. И., Лейпунская Д. И. Нейтронный активационный анализ образцов горных пород с помощью изотопных нейтронных источников. ОНТИ ВИЭМС, серия «Регион. разв. и пром. геофиз.», М., 1968, № 9.
25.31. Дубинский С. А. Состояние и перспективы развития физического нейтронно-активационного метода анализа полезных ископаемых.— Материалы 8-го совещ. работников геол. организаций», вып. 5. М., Изд. ВИМСа, 1961.
25.32. Дубинский С. А., Муравьев В. В. Использование спектрометрии наведенной активности для количественных определений содержания меди в колчеданных и ковелиновых рудах и продуктах их обогащения.— Тр. НИГРИ, 1967, вып. 77.
25.33. Егиазаров Б. Г., Зюбко В. А., Новиков А. И. Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 5.
25.34. Жаворонков В. Я., Филиппов Е. М. К вопросу сортировки пород и руд, слабо отличающихся по обычным физическим свойствам.— Цветные металлы, 1965, № 5.
25.35. Ингерман В. Г. Выделение флюоритового оруденения в разрезе скважин методом активационного гамма-каротажа.— Разв. геофиз., вып. 7. «Недра», 1965.
25.36. Каипов Р. Л. Исследование возможностей нейтронного активационного каротажа в условиях осадочных пород. Канд. дисс. Ташкент, 1964.
25.37. Каипов Р. Л., Лейпунская Д. И. Одновременное определение содержаний алюминия и кремния в алюмосиликатных породах методом активационного каротажа.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1964, № 1 (51).

25.38. Кайпов Р. Л., Лейпунская Д. И. О моделировании задачи активационного каротажа.— Прикл. геофиз., вып. 41, 1965.
25.39. Котова А. И., Широкий И. И. О применении метода нейтронно-активационного анализа при опробовании флюоритовых жил в наземных горных выработках.— В сб. «Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья», вып. 2 (4). Чита, 1967.
25.40. Кузнецов К. Ф., Лейпунская Д. И., Рогушин И. И., Соколов Г. В., Савосин С. И., Шимелевич Ю. С. Нейтронный активационный анализ в условиях естественного залегания горных пород с многокапельной спектрометрией.— «Радиохимические методы анализа», т. 1, Вена. МАГАТЭ, 1965 (англ.).
25.41. Лейпунская Д. И. Нейтронный активационный анализ горных пород. Докт. дисс. М., 1969.
25.42. Лобанов Е. М., Зиновьев Н. В. Определение необходимой статистики при бескорреляционной расшифровке данных активационного анализа.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 5.
25.43. Лобанов Е. М., Новиков А. Н., Хайдаров А. А. Активационный анализ в условиях геологических скважин. Ташкент, 1963.
25.44. Малахов С. Г. Графический способ анализа радиоактивного распада смеси материнского и дочернего изотопов.— Ат. энергия, 1964, т. 17, вып. 3.
25.45. Материалы 9-го совещания лабораторий геологических организаций, вып. 4 (ядерно-физическая секция). М., Изд. ВИМС, 1965.
25.46. Мендис И. В. Справочные таблицы для нейтронного активационного анализа. Рига, изд-во «Зинатие», 1969.
25.47. Микшевич В. Н., Трубов Э. А., Егорченко Н. Е. О возможности активационного анализа на шлакообразующие элементы и ванадий в рудах и концентрате Качканарского горнообогатительного комбината.— Изв. вузов, Горн. ж., 1968, № 1.
25.48. Остапов И. Т., Филиппов Е. М. Применение ядерных методов для автоматизации процесса сортировки руд золоторудных месторождений.— Цветные металлы, 1964, № 8.
25.49. Плаксин И. Н., Анчевский Э. В., Беляков М. А. Применение полоний-борного излучателя нейтронов для анализа руд и продуктов обогащения на алюминий.— Докл. АН СССР, 1965, т. 163, № 5.
25.50. Плаксин И. Н., Слепченко И. П., Старчик Л. П. Применение нейтронного активационного анализа для определения содержания вольфрама в минеральных продуктах обогащения.— Докл. АН СССР, 1961, т. 137, № 4.
25.51. Попов С. Графический метод определения активности облучаемых образцов.— Ат. энергия, 1961, т. 11, вып. 1.
25.52. Приборы активационного анализа и их применение в промысловой геофизике. Киев, 1965.
25.53. Прокопчик В. И., Субботина Т. И. Об активационном методе определения флюорита в пробах руд и продуктов обогащения.— Ат. энергия, 1966, т. 21, вып. 5.
25.54. Радиационные эффекты в конденсированных средах. (Сб.). Ташкент, 1964.
25.55. Сенько-Булатный И. Н. Активационный каротаж бокситов. Закономерности формирования и размещения полезных ископаемых на Урале. Тр. Ин-та геологии УФАН СССР, 1964, вып. 64.
25.56. Сенько-Булатный И. Н. Гамма-спектрометрический непрерывный активационный каротаж на месторождениях бокситов.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 7.
25.57. Слепченко И. Ф. Применение нейтронного активационного анализа для определения содержания вольфрама, марганца и алюминия в продуктах обогащения. Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского, 1964, вып. 14.
25.58. Труды Первого Всесоюзного координационного совещания по активационному анализу. Ташкент, «Наука», 1964.
25.59. Установка нейтронно-активационная (каталог геофизической аппаратуры). «Недра», 1968.
25.60. Хайдаров А. А. Ядерно-геофизические методы анализа горных пород и руд. Ташкент, «Наука», 1969.
25.61. Ядерная физика и ее применение. Сб., ч. 1. Ташкент, «Наука», 1966.
25.62. Ядерно-физические константы для нейтронного активационного анализа. (Справочник). Атомиздат, 1969.
25.63. Якубсон К. И. Исследование наведенной активности горных пород под действием быстрых нейтронов.— Пром. геофиз., вып. 4. Гостоптехиздат, 1963.
25.64. Якубсон К. И. Повышение эффективности нейтронных методов исследования элементного состава горных пород в скважинах. Канд. дисс. М., 1964.
25.65. Якубсон К. И. Использование метода наведенной активности для количественной оценки содержания алюминия в бокситах.— «Ядерная геофизика», Гостоптехиздат, 1962.
25.66. Bakes J. M., Jeffery P. G. Determination of fluorine by neutron activation.— Analyst, 1966, v. 91, № 1080.
25.67. Beress M. Application of neutron activation analysis for the investigation of

rocks of manganese content.— Geofizikai kozlemenyck, 1966, v. 15, № 1—4.
25.68. Jeffery P. G., Bakes J. M. Determination of fluorine in fluorite ores and concentrates by isotope — source fast — neutron activation analyses.— Analyst, 1967, v. 92, № 1092.
25.69. Kusaka Y. Activation analysis of silver using radium neutron source.— Japan Analyst, 1959, v. 8, № 2.
25.70. Szpunar J., Wagiel E. Ilosciowe oznalzanie aluminium i Krzemu w materiale skalnym metoda aktywacji neutronowej.— Nafta, 1967, v. 23, N 4.
25.71. Tatar J. Anwendung der Neutronen in durierten Reaktion zur Schnellanalyse von Bauxit.— Acta techn. Acad. scient. Hung, 1964, № 7, № 3—4.
25.72. Tatar J. Application of nuclear geophysics for quality determination of brown coals.— Acta geol. Acad. scient. Hung, 1964, v. 8, № 1—4.
25.73. Tatar J. Bauxitmintak aluminiumes sziliciumtartalmanek qyors meghatarozasa neutronaktivalasos analizissel.— Geofizikai kozlemenyek, 1964, 13, № 4.
25.74. Tatar J. Nuklearis geofizika alkalma zasa barnakokoszenek minosegenek meghatarozasara.— Geofizikai kozlemenyek, 1964, v. 13, № 4.
25.75. Wing J., Wahlgren M. A. Detection sensitivities in nuclear activation with an an isotope fast neutron source.— Analytical chem., 1967, v. 39, № 1.
25.76. Красноперов В. А. Гамма-спектрометрический активационный каротаж на фтор и некоторые вопросы опробования фторсодержащих руд и пород. Канд. дисс. Новосибирск, 1969.
25.77. Прокопчик В. И. Исследование и разработка комплекса методик нейтронно-активационного анализа для определения флюорита в процессе добычи и обогащения руд. Канд. дисс. М., 1969.
25.78. Межиборская Х. Б., Красикова М. И. Нейтронно-активационный метод определения макроколичеств вольфрама с помощью ампульных источников.— Ж. анал. хим., 1970, т. 25, вып. 3.
25.79. Старцев Ю. С., Каменев Е. А., Кошелев И. П., Шварцман М. М., Михеичев А. С. Применение активационного каротажа для определения P_2O_5 в апатитовых рудах Кольского полуострова.— Разв. и охрана недр, 1970, № 5.
25.80. Вязников Е. П., Глассон В. В. 1. Палетка для определения содержаний алюминия и кремния при проведении нейтронного активационного анализа. 2. Определение алюминия и кремния в пробах с малой навеской методом нейтронной активации.— В сб. «Геофизические исследования при решении геологических задач в Восточной Сибири», вып. 4. «Недра», 1970.
25.81. Беленко Р. Д., Камыщев Б. С., Кошелев И. П. и др. Нейтронный активационный каротаж на фтор с использованием гамма-спектрометрической аппаратуры. Алма-Ата, Изд. ВИРГа, 1971.
25.82. Маслов И. А., Лукницкий В. Ф. Справочник по нейтронному активационному анализу. Л., «Наука», 1971.
25.83. Джелепов Б. С., Кокшарова С. Ф. Таблицы энергий гамма-лучей, возникающих при распаде радиоактивных ядер. Л., «Наука», 1970.
25.84. Бахтерев В. В. Количественный гамма-спектрометрический каротаж на медь на колчеданных месторождениях Урала и Башкирии. Автореф. канд. дисс. Свердловск, 1971.

Литература к главе 26

26.1. Айдаркин Б. С., Горшков Г. В., Граммаков А. Г., Жадин В. С., Колчина А. Г. К методике определения содержания бериллия по фотонейтронам.— Тр. Радиевого ин-та АН СССР, 1957, т. 5, № 2.
26.2. Баранов В. И., Христианов В. К., Карасев Б. В. Фотонейтронный метод определения концентраций дейтерия в природной воде.— Докл. АН СССР, 1959, т. 129, № 5.
26.3. Баранов В. И., Христианов В. К., Карасев Б. В. Изотопный анализ водорода воды фотонейтронным методом.— Изотопы в народном хозяйстве СССР. Инф. бюлл., № 1, 1961.
26.4. Браунелл Г. М. Прибор для определения бериллия в полевых условиях.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1959, № 7 (24).
26.5. Брезгунов В. С., Власова Л. С., Сойфер В. Н. Изучение изотопного состава поверхностных и подземных вод фотонейтронным методом.— В сб. «Проблема геохимических поисков нефтяных и газовых месторождений и вопросы ядерной геологии». Тр. ВНИИЯГГа, вып. 4, «Недра», 1968.
26.6. Вопросы разведочной радиометрии.— Инф. сб. ВИРГа МГи ОН СССР, 1960, № 2.
26.7. Геофизическая аппаратура, вып. 36. Л., «Недра», 1968.
26.8. Горев А. В. и др. Фотонейтронное опробование бериллиевых руд в естественном залегании. Л., ВИРГ, 1972.
26.9. Двореченский Ф. И., Кошелев И. П., Найденов Б. М., Неучесов С. Н., Шишакин О. В., Шмонин Л. И. Опыт внедрения фотонейтронного метода определения бериллия в рудах.— Тр. Каз. науч.-иссл. ин-та мин. сырья, вып. 1. Алма-Ата, 1959.

26.10. Егоров Э. В. Сцинтилляционный датчик для опробования бериллиевых руд фотонейтронным методом.— Сб. «Вопросы разведочной геофизики», вып. 1. Л., Госгеолтехиздат, 1962.
26.11. Егоров Э. В., Поляков Б. И. Учет самопоглощения фотонейтронов при количественных определениях содержания бериллия в рудах.— Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 4. Л., «Недра», 1964.
26.12. Жевлаков И. С., Шишакин О. В. Эффективность фотонейтронного метода определения содержаний бериллия в пробах руд.— Тр. Каз. науч.-иссл. ин-та мин. сырья, вып. 2. Алма-Ата. 1960.
26.13. Зайцев Е. И., Смирнов В. Н. Определение бериллия в пробах большого объема фотонейтронным методом.— Зав. лаб., 1964, № 2.
26.14. Камышев Б. С., Сальцевич В. Б. Применение коллимированного в плоскости пучка гамма-квантов при гамма-нейтронном каротаже.— Сб. «Геофизическая аппаратура», вып. 28. Л., «Недра», 1966.
26.15. Камышев Б. С., Сальцевич В. Б., Суворов А. Д. О преимуществах применения аппаратуры на сцинтилляционных счетчиках в гамма-нейтронном каротаже.— Сб. «Геофизическая аппаратура», вып. 28. Л., «Недра», 1966.
26.16. Кошелев И. П., Шмонин Л. И., Шишакин О. В., Найденов Б. М., Дворецкий Ф. И., Сайбеков Т., Неучесов С. Н. Метод определения содержания бериллия в рудах на фотонейтронной установке.— Сб. «Металлургическая и химическая промышленность Казахстана». № 1. Алма-Ата, 1959.
26.17. Кошелев И. П., Шишакин О. В., Мухаметгалиев А. Х., Шмонин Л. И. О применении фотонейтронного метода исследования скважин (ГНК) при поисково-разведочных работах на бериллий.— Тр. Каз. науч.-иссл. ин-та мин. сырья, вып. 1. Алма-Ата, 1959.
26.18. Кошелев И. П., Шишакин О. В., Дворецкий Ф. И., Неучесов С. Н., Беленко Р. Д., Якушев Е. М., Шварцман М. М. Фотонейтронный метод исследования скважин (ГНК) редкометальных месторождений.— Тр. Каз. науч.-иссл. ин-та мин. сырья, вып. 2. Алма-Ата, 1960.
26.19. Кошелев И. П., Шишакин О. В., Неучесов С. Н., Шварцман М. М., Якушев Е. М., Дворецкий Ф. И. О фотонейтронном методе исследования скважин на бериллий.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1961, № 4 (32).
26.20. Межиборская Х. Б. Радиоактивное определение бериллия.— Ат. энергия, 1959, т. 6, вып. 5.
26.21. Межиборская Х. Б. Радиоактивный метод определения бериллия в минеральном сырье и продуктах гидрометаллургии.— Ж. аналит. хим., 1960, т. 15, вып. 3.
26.22. Межиборская Х. Б. Фотонейтронный метод определения бериллия. Госатомиздат, 1961.
26.23. Методика гамма-нейтронного каротажа (сб.), серия «Региональная, промысловая и разведочная геофизика», 1968, № 13.
26.24. Методы определения и анализа редких элементов. (Сб.). Изд-во АН СССР, 1961.
26.25. Новый прибор — бериллометр (реферат).— Ат. энергия, 1960, т. 9, вып. 4.
26.26. Плаксин И. Н., Малышева Н. Г., Старчик Л. П. Применение тормозного излучения бета-препаратов для возбуждения фотоядерных реакций.— Докл. АН СССР, 1964, т. 156, № 4.
26.27. Плаксин И. Н., Беляков М. А., Малышева Н. Г., Старчик Л. П. Применение ядерной реакции (γ, n) для определения бериллия в растворах и твердой фазе суспензий.— Докл. АН СССР, 1961, т. 141, № 5.
26.28. Сенько А. К., Суворов А. Л., Бак М. А., Егоров Э. В., Поляков Б. И., Потехин В. К. Временное руководство по фотонейтронному методу определения бериллия в рудных порошковых пробах. Госгеолтехиздат, 1963.
26.29. Сенько А. К., Клевцов П. П., Сальцевич В. Б., Хитеев П. П. Фотонейтронный метод каротажа на бериллий.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1959, № 6 (23).
26.30. Сойфер В. Н., Егоров А. В. Определение концентраций дейтерия в природных водах фотонейтронным методом.— В сб. «Вопросы изотопов геологии». М., ОНТИ ВИЭМС, 1966.
26.31. Смирнов В. Н. Определение содержания бериллия фотонейтронным методом в продуктах обогащения без предварительной их подготовки.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1962, № 3 (37).
26.32. Смирнов В. Н., Зайцев Е. И., Кудряш Е. С. Определение содержания бериллия в штуфных образцах и порошковых пробах с помощью прибора «Берилл».— Разв. и охрана недр, 1963, № 8.
26.33. Смирнов В. Н., Токарева Д. В. Некоторые вопросы теории лабораторного фотонейтронного метода определения бериллия.— Ат. энергия, 1963, т. 15, вып. 4.
26.34. Токарева Д. В. Опыт определения бериллия по фотонейтронам на многосчетчиковой установке.— Бюлл. науч.-техн. инфор. ВИМСа, 1961, № 6 (34).
26.35. Филиппов Е. М. Основы теории фотонейтронных методов исследования горных пород и руд.— Геол. и геофиз., 1960, № 6.
26.36. Фотонейтронный метод определения бериллия. (Сб. переводов ВИРГа). Л., 1961.
26.37. Шишакин О. В. Фотонейтронный метод опробования руд на бериллий. Канд. дисс. Алма-Ата, 1964.

26.38. Шмонин Л. И., Сергеева Г. А. О фотонейтронной методике анализа руд на бериллий. Оптика, ядерные процессы. Сб. работ Каз. гос. ун-та Алма-Ата, 1959.
26.39. Beryllium hole logging used first time at Topaz — Spors mountains.— Mining World, 1963, 25, № 10.
26.40. Brownell G. M. A beryllium detector for field exploration.— Economic geol., 1958, v. 53, № 7.
26.41. Der J. Nuklearis berenderes kozetmintak berillium tartalmank qyors meghatarozasara.— Magyar geofiz., 1967, v. 8, № 5—6.
26.42. Derkser G. Berylium detector developed by Winniped scientists.— Precambrian. 1960, v. 33, № 4.
26.43. Dumesnil P. Detection du beryllium par une reaction (γ, n).— Industries atomiques, 1961, v. 5, № 11—12.
26.44. Fauci A., Meloni S. Produzione di fotoneutroni da berillio guale metode per la sua de terminaziona quantitativa usando sorgenti gamma di radioantimonio.— Chimica et industria, 1962, v. 44, № 9.
26.45. Gaudin A., Pannel J. Determination of beryllium by photodisintegration.— Analit. Chem., 1951, v. 23, № 9.
26.46. Haigh C. P. An analysis for deuterium based on the photoneutron effect.— Nature. London, 1953, 172 p. 359.
26.47. Haigh C. P. A photoneutron method for measuring deuterium.— Radioisotope Conference, 1954, v. 2. London, 1954.
26.48. Juliano J. O. Activation analysis by photoneutron counting.— Sci. Rev., 1965, v. 6, februar.
26.49. Laboratory berrylium analyser.— Mining World, 1962, v. 24, № 7.
26.50. Бериллометр фотонейтронный полевой портативный («Берилл-3»). Каталог геофизической аппаратуры. «Недра», 1969.

Литература к главе 27

27.1. Александрович Э.— Г. В., Соковишин В. А. Низковольтные нейтронные генераторы.— Приборы и техника эксперимента, 1961, № 5.
27.2. Алексеев А. Г., Барковский В. Н., Басаргин Ю. В. и др. Секторный циклотрон с диаметром полюсов электромагнита 685 мм.— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 5.
27.3. Ананьев Л. М., Воробьев А. А., Горбунов В. И. Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. Госатомиздат, 1961.
27.4. Артемьев Ю. М., Баранов И. А., Блинов М. В. и др. Низковольтный генератор нейтронов.— Тр. Радиевого ин-та АН СССР, 1959, т. 9.
27.5. Бабат Г. И. Ускорители. «Молодая гвардия», 1957.
27.6. Беловинцев К. А., Беляк А. Я., Громов А. В., Мороз Е. М., Черенков П. А. Микротрон на 6,5 МэВ для инжекции электронов в синхротрон.— Ат. энергия, 1963, т. 14, вып. 4.
27.7. Беловинцев К. А., Беляк А. Я., Гридасов В. И., Черенков П. А. О новых возможностях повышения эффективности микротрона.— Ат. энергия, 1963, т. 15, вып. 1.
27.8. Булкин Ю. М., Жирнов А. Д., Константинов Л. В., Николаев В. А., Стенбок И. А., Лобанов В. С., Бенневоленский А. М. Реактор для геологических исследований РГ-1.— Ат. энергия, 1966, т. 21, вып. 4.
27.9. Булкин Ю. М., Жирнов А. Д., Константинов Л. В., Николаев В. А., Ганев И. Х., Лобанов В. С., Поппель Б. С. Нейтронный размножитель СО-1.— Ат. энергия, 1966, т. 21, вып. 4.
27.10. Вальднер О. А. Линейные ускорители электронов. Атомиздат, 1966.
27.11. Вальтер А. К., Железняков Ф. Г., Малышев И. Ф., Рошаль Г. Я., Сербинов А. Н., Цыгикало А. А., Цытко С. П. Электростатические ускорители заряженных частиц. Госатомиздат, 1963.
27.12. Векслер В. И. Ускорители атомных частиц. Изд-во АН СССР, 1956.
27.13. Воробьев А. А. Ускорители заряженных частиц. Госэнергоиздат, 1949.
27.14. Воробьев А. А., Москалев В. А. Сильноточный бетатрон и стереобетатрон. Атомиздат, 1969.
27.15. Гохберг Б. М., Яньков Г. Б. Электростатические ускорители заряженных частиц. Атомиздат, 1960.
27.16. Гринберг А. П. Методы ускорения заряженных частиц. Гостехтеоретиздат, 1950.
27.17. Джелепов В. П., Дмитриевский В. П., Замолодчиков Б. И., Кольга В. В. Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой для многозарядных ионов.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 4.
27.18. Дьячков Б. А., Опарин Е. М. Низковольтный нейтронный генератор монохроматических нейтронов.— Приборы и техника эксперимента, № 1, 1963.
27.19. Егиазаров Б. Г., Карпухин О. А., Матвеев В. В. Аппаратура для нейтронного активационного анализа.— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 3.

27.20. Жилейко Г. И. Линейный электронный ускоритель.— Ат. энергия, 1962, т. 12, № 2.
27.21. Калганов А. Ф., Щербинин В. П. Самовозбуждающийся роторный ЗСГ с заданной полярностью выходного напряжения.— Приборы и техника эксперимента, 1961, № 1.
27.22. Капица С. П. Новый эффективный источник быстрых электронов.— Вестн. АН СССР, 1961, т. 31, № 10.
27.23. Капица С. П., Мелехин В. Н. Микротрон. «Наука», 1969.
27.24. Каретников Д. Н., Сливков И. Н., Тепляков В. А., Федотов А. П., Шембель Б. К. Линейные ускорители ионов. Госатомиздат, 1962.
27.25. Левин В. М., Румянцев В. В., Мунтян В. И. Линейный ускоритель электронов для использования в промышленности.— Ат. энергия, 1969, т. 26, вып. 1.
27.26. Ливингстон М. С. Ускорители. ИЛ, 1956.
27.27. Линейные ускорители. (Сб. ст.). Госатомиздат, 1959.
27.28. Линейный ускоритель электронов на энергию 6 МэВ с постоянной фазовой скоростью волны.— Ат. энергия, 1958, т. 5, вып. 5.
27.29. Линейный ускоритель электронов У-27 на энергию 10 МэВ.— Ат. энергия, 1967, т. 23, вып. 5.
27.30. Лопавок Т. А. Передвижной нейтронный размножитель.— Ат. энергия, 1960, т. 8, № 2.
27.31. Малкиэль Г. С., Суханов Б. И. Нейтронный импульсный источник.— Приборы и техника эксперимента, 1960, № 4.
27.32. Мартин Д. Циклотрон с разделенными орбитами.— Ат. техника за рубежом, 1966, № 5.
27.33. Микротрон. (Сб. ст. 1944—1965 гг.). М., ВИНИТИ, 1965.
27.34. Мургулия Г. Е., Плютто А. А. Генератор нейтронов с искровым источником ионов.— Приборы и техника эксперимента, 1961, № 5.
27.35. Мургулия Г. Е., Плютто А. А. Импульсный генератор нейтронов.— Ат. энергия, 1965, т. 18, вып. 4.
27.36. Окулов Б. В. О зависимости интенсивности тормозного излучения от энергии ускоренных электронов.— Ат. энергия, 1968, т. 25, вып. 5.
27.37. Орлов В. И. Малые ускорители. «Знание», 1961.
27.38. Пастор Э., Клондер Э. Портативный малогабаритный генератор нейтронов для активационного анализа.— Приборы и техника эксперимента, 1965, № 4.
27.39. Петренко Л., Никешичев Ю. Ускорители электронов для промышленности и радиационных исследований.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 3.
27.40. Петров В. И. Интенсивный генератор нейтронов с энергиями 14 и 2,5 МэВ.— Ат. энергия, 1961, т. 10, вып. 2.
27.41. Петухов В. А., Кротов В. И. Современные ускорители частиц. «Наука», 1965.
27.42. Рабинович М. С. Ускорители заряженных частиц. «Знание», 1957.
27.43. Ратнер Б. С. Ускорители заряженных частиц. Госфизматиздат. 1960.
27.44. Ратнер Б. С. Ускорители заряженных частиц. «Наука», 1966.
27.45. Сербинов А. Н., Якушев В. П., Резвых К. А., Марин Н. И., Повстень В. А., Лутиков В. К., Докторова В. К. Импульсный нейтронный генератор.— Приборы и техника эксперимента, 1965, № 6.
27.46. Срапенянц Р. А. Английское оборудование для нейтронного активационного анализа.— Ат. энергия, 1966, т. 21, вып. 2.
27.47. Стрижак В. И., Назаров Н. С. Нейтронные генераторы.— Приборы и техника эксперимента, 1961, № 2.
27.48. Тейхман Ю. Об ускорителях с вертикально растущим полем.— Ат. энергия, 1962, т. 12, № 6.
27.49. Ускорители. (Сб.). Атомиздат, 1960.
27.50. Ускорители. (Сб. переводов с англ.). Госатомиздат, 1962.
27.51. Ускорители. (Сб., вып. 3). Госатомиздат, 1962.
27.52. Ускорители. (Сб., вып. 5). Госатомиздат, 1963.
27.53. Ускорители. (Сб. вып. 7). Атомиздат, 1965.
27.54. Федоров Н. Д. Циклотрон. Атомиздат, 1960.
27.55. Филимонова Т. Н., Шмыгов А. М. Линейный ускоритель электронов на 15 МэВ.— Ж. техн. физ., 1962, т. 32, вып. 12.
27.56. Цыгикало А. А., Цытко С. П. Электростатический ускоритель физико-технического института АН УССР на 4,5 МэВ и его использование в ядерных экспериментах.— Ат. энергия, 1968, т. 25, вып. 2.
27.57. Экспериментальная ядерная физика. (Сб. под ред. Э. Сегре, т. 3). ИЛ, 1961.
27.58. Электронные ускорители. (Тр. 3-й Межвуз. конф.). Изд. Томского ун-та, 1961.
27.59. Электронные ускорители. (Тр. 4-й Межвуз. конф.). Изд-во «Высшая школа», 1964.
27.60. Электронные ускорители. (Тр. 5-й Межвуз. конф.). Атомиздат, 1966.
27.61. Электронные ускорители. (Тр. 6-й Межвуз. конф.). «Энергия», 1968.
27.62. Электронные циркулярные ускорители. (Сб. докл. ТПИ). Томск, 1957.
27.63. Электрофизическая аппаратура промышленного изготовления. (Справочник). Госатомиздат, 1963.
27.64. Ананьев Л. М., Чахлов В. Л., Штейн М. М., Ярушкин Ю. Н. Малогабаритные бетатроны и их применение в дефектоскопии.— Дефектоскопия, 1968, № 5.
27.65. Атомная энергия, 1970, т. 28, вып. 1.

28.1. Аббосов О., Бабаев А., Лобанов Е. М., Курматов Д., Умаров У. Использование радиоактивационного анализа для определения редкоземельных элементов в минералах дивидита и эвксенита.— Докл. АН ТаджССР, 1967, т. 10, № 1.
28.2. Аббосов О., Деев Ю. С., Кодири С., Круглый М. С., Старчик Л. П. Определение индия по (γ, γ') — реакции на линейном ускорителе с энергией электронов 5 МэВ.— Ат. энергия 1968, т. 24, вып. 3.
28.3. Аббосов О., Деев Ю. С., Кодири С., Старчик Л. П. Определение ртути в рудах и продуктах их переработки по реакции резонансного возбуждения.— Зав. лаб., 1968, № 11.
28.4. Азимов С. А., Масагутов В. С., Касымов А., Хакимов М. Гамма-активационный метод определения содержания углерода в угле.— Докл. АН УзССР, 1966, № 2.
28.5. Акбаров У. Нейтронно-активационный метод определения некоторых элементов с применением магнитной сепарации бета-излучения. Канд. дисс. Ташкент, 1967.
28.6. Амиел С., Пейсах М. Использование запаздывающих нейтронов в активационном анализе.— Ат. энергия, 1963, т. 14, вып. 6.
28.7. Анализ образцов горных пород на алюминий и кремний с помощью нейтронных генераторов (временные методические указания, составленные В. Т. Дубинчиком, В. А. Касаткиным и Ю. Г. Чулановым). М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1969.
28.8. Арифов Г. А. Исследование спектров гамма-лучей радиационного захвата нейтронов образцов некоторых многокомпонентных систем. Канд. дисс. Ташкент, 1966.
28.9. Бабаев А. Разработка активационных методов определения содержания редкоземельных элементов в минералах. Канд. дисс. Ташкент, 1965.
28.10. Берзин А. К. Фотоядерные методы анализа горных пород.— Докт. дисс. М., 1969.
28.11. Билибин Л. П., Лбов А. А., Наумова И. И. Определение изотопного состава лития методом активационного анализа.— Ат. энергия, 1961, т. 10, вып. 5.
28.12. Бланкова Т. Н., Русяев В. Г., Бочкарев Б. Н. Опробование ванадия в нефти активационным методом с генератором нейтронов.— Геол. и геофиз., 1968, № 12.
28.13. Борисов Г. И., Демидов А. М., Захаров Е. А. Применение спектрометров с германиевым детектором для активационного анализа.— Ат. энергия, 1969, т. 26, вып. 1.
28.14. Боуэн Г., Гиббонс Д. Радиоактивационный анализ.— Атомиздат, 1968.
28.15. Васильев С. С., Михалева Т. Н., Воробьев Ю. А., Чупрунов Д. Л. Анализ состава материалов с помощью неупругого рассеяния быстрых заряженных частиц.— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 5.
28.16. Васильев С. С., Михайлов Г. И., Старчик Л. П., Кононыкин Л. В. Определение лития по выходу реакции $Li^7(p, \gamma)Be^8$.— Ат. энергия, 1968, т. 25, вып. 4.
28.17. Васильев С. С., Михайлов Г. И., Старчик Л. П., Кононыкин Л. В. Применение реакции $B^{11}(p, \gamma)C^{12}$ для определения бора.— Зав. лаб., 1969, № 3.
28.18. Гамбарян Р. Г., Казаченков Ю. Н., Штань А. С. Спектрально-резонансный анализ по времени замедления нейтронов.— Ат. энергия, 1968, т. 25.
28.19. Гольбек Г. Р., Дрынкин В. И., Лейпунская Д. И., Лоповок Т. А., Резванов Р. А., Флеров Г. Н. Нейтронный активационный анализ горных пород по короткоживущим изотопам.— Изотопы в народном хозяйстве СССР, 1962, № 2.
28.20. Дутов А. Г., Лобанов Е. М. Определение примесей в ферритовых гранитах и в окиси иттрия методом активационного анализа.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, 1967, № 1.
28.21. Егоров Э. В. О возможности применения электронных ускорителей для фотонейтронного определения бериллия.— Вопросы рудной геофизики, вып. 3. Госгеолтехиздат, 1961.
28.22. Казакевич Г. М., Пономарчук В. А., Филиппов Е. М., Шестель С. Т. Плоский сцинтилляционный детектор медленных нейтронов с гнутым световодом.— Приборы и техника эксперимента, 1972, № 4.
28.23. Карамян С. А., Шукуров Я. Химический анализ методом рассеяния тяжелых ионов на большие углы.— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 1.
28.24. Кесельман В. С. Аналитические соотношения для расчета глубины проникновения ионов в вещество.— Ат. энергия, 1966, т. 24, вып. 6.
28.25. Ким А. П. Нейтронно-активационное определение редкоземельных элементов (лантана, диспрозия, европия, самария) в природных водах. Канд. дисс. Ташкент, 1969.
28.26. Кодири С., Старчик Л. П. Определение кадмия в присутствии индия в рудах и продуктах их переработки.— Докл. АН ТаджССР, 1968, т. 11, № 9.
28.27. Краснов Н. Н. Физические основы активационного анализа на заряженных частицах.— Ат. энергия, 1969, т. 26, вып. 3.

28.28. Кузнецов Р. А. Активационный анализ. Атомиздат, 1967.
28.29. Лбов А. А., Наумова И. И. Определение примесей золота радиоактивационным методом.— Зав. лаб., 1962, т. 12.
28.30. Лбов А. А., Наумова И. И. Радиоактивационный анализ с применением нейтронов с энергией 14 МэВ.— Ат. энергия, 1959, т. 6, вып. 74.
28.31. Левин В. И., Малинин А. В., Новоселов В. С., Петрина Р. В., Завьялова Л. В. О возможности получения радиоактивационных изотопов в реакторе на протонах отдачи.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 3.
28.32. Лейпунская Д. И., Путятина Н. Д. Экспрессное определение содержания натрия и калия в малых порошковых пробах алюмосиликатных пород методом нейтронного активационного анализа.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1963, № 6(50).
28.33. Лемберг И. Х., Гиршин А. Б., Гусинский Г. М. Определение содержания кислорода-18 с помощью детектирования гамма-квантов, испускаемых по реакции $O^{18}(\alpha, n\gamma)Ne^{21}$.— Зав. лаб., 1966, т. 32, № 12.
28.34. Леушкина Г. В. Активационный анализ по короткоживущим изотопам. Канд. дисс. М., 1970.
28.35. Леушкина Г. В., Лобанов Е. М., Дутов А. Г., Матвеева Н. П. О чувствительности активационного анализа по короткоживущим изотопам.— Ат. энергия, 1969, т. 26, вып. 4.
28.36. Лобанов Е. М. Исследования по активационному анализу. Докт. дисс. Ташкент, 1967.
28.37. Лобанов Е. М., Акбаров У. Радиоактивационный метод определения калия в горных породах с помощью магнитного бета-сепаратора.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, 1966, № 1.
28.38. Лобанов Е. М., Арипов Г. Определение хрома и некоторых других элементов путем анализа спектров гамма-лучей из реакции n, γ.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, 1965, № 6.
28.39. Лобанов Е. М., Хатамов Ш., Талипов Р. М. Эффективность применения нейтронно-активационного анализа при биологических поисках золоторудных месторождений (на примере Центральных Кызылкумов).— Изб. геол., ж., 1966, № 6.
28.40. Лобанов Е. М., Акбаров У., Худайбергенов А. Определение меди в образцах руд радиоактивационным методом с помощью магнитного бета-сепаратора.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат., 1965, № 6.
28.41. Лобанов Е. М., Хуснутдинов Р. И. Нейтронно-активационный метод определения циркония в минералах циркония и продуктах их переработки.— Докл. АН УзССР, 1965, № 10.
28.42. Лобанов Е. М., Хуснутдинов Р. И. Определение иридия в медных, никелевых шламах и платиновых концентратах методом нейтронного активационного анализа с помощью спектрометрии совпадений.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, 1965, № 6.
28.43. Лобанов Е. М., Исабаев Е. А., Янковский А. В., Абильдаев А. Х., Васильев В. С. Определение содержания урана и тория в пробах горных пород и руд по счету осколков деления.— Ат. энергия. 1967, т. 23, вып. 6.
28.44. Лобанов Е. М., Чалов П. И., Мамыров У. Двухканальная схема синхронной регистрации осколков деления ядер эталона и анализируемого образца.— Ат. энергия, 1966, т. 21, вып. 3.
28.45. Лобанов Е. М., Янковский А. В. Нейтронно-активационный метод определения висмута в образцах горных пород и руд.— Изв. АН УзССР, серия физ.-мат. наук, 1965, № 3.
28.46. Лобанов Е. М., Янковский А. В. Радиоактивационное определение висмута в минеральном сырье.— Ж. аналит. хим., 1966, т. 21, № 12.
28.47. Лобанов Е. М., Гуреев Г. С., Дутов А. Г., Кист А. А. Радиоактивационный метод определения редкоземельных элементов в некоторых минералах и горных породах.— Ж. аналит. хим. 1966, т. 21, вып. 3.
28.48. Мещеряков Р. П., Скуратов Н. А., Столбов Ю. М. О повышении воспроизводимости при активационном анализе.— Изв. ТПИ, 1967, № 162.
28.49. Насыров Ф., Линев С. В. Прохождение осколков деления урана-235 через H_2, D_2, He, N_2, Ar, Kr, Xe,— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 6.
28.50. Никотин О. П., Петржак К. А. Запаздывающие нейтроны при фотоделении тяжелых ядер.— Ат. энергия, 1966, т. 20, вып. 5.
28.51. Орифхотжаев У. Активационное определение рассеянных редких элементов брома и стронция в рудах и продуктах обогащения на нейтронах с энергией 14 МэВ. Канд. дисс. М., 1969.
28.52. Парлаг А. М., Суворов А. Д., Шкода-Ульянов В. А., Шабалина Л. А. Расчет выходов фотонейтронов из смесей кремнезема с небольшими количествами бериллия, воды, лития, углерода, урана и тория.— Ат. энергия, 1963, т. 15, вып. 2.
28.53. Петржак К. А., Кондратько М. Я., Никотин О. Н., Теплых В. Ф. Запаздывающие нейтроны при фотоделении урана-238.— Ат. энергия, 1963, т. 15, вып. 2.

28.54. Плаксин И. Н., Старчик Л. П., Тустановский В. Т. Применение спектрометра с защитой антисовпадениями для активационного анализа.— Изв. вузов. Горн. ж., 1966, № 7.
28.55. Прусин С. и др. Применение германиево-литиевых детекторов в нейтронном активационном анализе.— Ат. техника за рубежом, 1966, № 7.
28.56. Развитие активационного анализа в Японии.— Ат. техника за рубежом, 1963, № 1.
28.57. Савосин С. И. Исследование возможностей массового активационного анализа образцов горных пород и руд с использованием генераторов нейтронов и растворных атомных реакторов. Канд. дисс. М., 1968.
28.58. Слоуэй Д. Ф., Худ Д. У. Исследование распределения меди, марганца и цинка в океанах посредством нейтронного активационного анализа.— В сб. «Второй Международный океанографический конгресс». «Наука», 1966.
28.59. Современные тенденции в активационном анализе.— Ат. энергия, 1965, т. 19, вып. 6.
28.60. Старчик Л. П. Ядерно-физические методы контроля содержания элементов в рудах и продуктах обогащения. Докт. дисс. М., 1969.
28.61. Старчик Л. П., Деев Ю. С., Кодири С., Аббосов О., Круглый М. С. Определение индия по (γ, γ')-реакции на линейном ускорителе с энергией электронов 5 МэВ.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 3.
28.62. Старчик Л. П., Кодири С., Аббосов О., Деев Ю. С. Определение ртути в рудах и продуктах их переработки по реакции резонансного возбуждения.— Зав. лаб., 1968, № 11.
28.63. Столбов Ю. М. Исследование возможностей активационных методов измерений изотопного состава кальция (дейтронно-активационный анализ). Канд. дисс. Томск, 1969.
28.64. Сулин В. В. Состояние работ в области создания и применения способов гамма-активационного элементного анализа различных веществ. (Обзорный докл. на Симпозиуме по использованию методов меченых атомов для совершенствования технологических процессов производства и применения ядерно-физических методов анализа вещества, ПНР, г. Познань, ноябрь 1968 г.). М., 1968.
28.65. Тезисы докладов Второго Всесоюзного совещания по активационному анализу. Ташкент, 1968.
28.66. Тейлор Д. Нейтронные излучения и активационный анализ. Атомиздат, 1965.
28.67. Тустановский В. Т. Определение редкоземельных элементов в продуктах обогащения по реакции $(n, 2n)$ на спектрометре комптоновских антисовпадений, Канд. дисс. М., 1966.
28.68. Тустановский В. Т., Орифходжаев У. Активационное определение селена на быстрых нейтронах.— Ат. энергия, 1969, т. 26, вып. 4.
28.69. Установка для нейтронно-активационного анализа на кислород.— Ат. энергия, 1967, т. 23, вып. 5.
28.70. Фотоядерные методы анализа вещественного состава горных пород и руд с применением бетатрона.— Бюлл. науч.-техн. инф. МГ СССР, серия «Региональная, разведочная и промысловая геофизика», 1967, № 6.
28.71. Хатамов Ш. Разработка нейтронно-активационных методов анализа для биогеохимических поисков золоторудных месторождений. Канд. дисс. Ташкент, 1968.
28.72. Чанышев А. И. Экспрессные и массовые методы активационного анализа некоторых элементов в рудном сырье и концентратах. Канд. дисс. Ташкент, 1966.
28.73. Чердынцев В. В., Шмонин Л. И., Остапенко В. Ф. Определение малых количеств тория с помощью облучения нейтронами.— Сб. работ кафедры эксп. физ. Казах. ун-та, 1960, вып. 2.
28.74. Шведчиков А. П. Нейтронный активационный анализ.— Ат. техника за рубежом, 1962, № 1.
28.75. Ширяева М. Б. Определение тантала нейтронным активационным анализом.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа МГ ОН СССР, 1962, № 4 (38).
28.76. Шорников С. И. Гамма-активационный анализ образцов циркониевых и комплексных титано-циркониевых руд и продуктов их технологической переработки на цирконий и титан. Канд. дисс. М., 1966.
28.77. Шукуров Я. Разработка методов элементного анализа веществ с помощью тяжелых ионов. Канд. дисс. Дубна, 1967.
28.78. Ядерная спектроскопия и нейтронно-активационный анализ. (Сб. ст.). Рига, 1965.
28.79. Ядерно-физические методы контроля руд и продуктов обогащения. (Сб. аннотированных докл. на X сессии НТС по применению изотопов в горном деле. Душанбе, сентябрь, 1966 г.). М., Изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1969.
28.80. Adams F., Hoste J. Non-destructive activation analysis.— Atomic Energy Review, 1966, v. 4, № 2.
28.81. Adamski L., Bonzyk J., Jozefowicz K. Oznaczanie malych ilosci sodu i potasu metoda aktywacji neutronowej.— Nukleonika, 1960, v. 6, № 6.
28.82. Albert Ph. L'analyse par activation aux photons gamma et particules chargess.— Chimia, 1967, v. 21, № 3.
28.83. Armstrong R. L. K-Ar dating using neutron activation for Ar analysis granitic plutons of the eastern Great Basin, Nevada — Geochim, and cosmochim, acta, 1966, v. 30, № 6.

28.84. Barbier M. La radioactivite induite dans les materiaux par les protons, neutrons et photons de haute energie.— Industries atomiques, 1963, v. 7, № 5, 6.
28.85. Brunfelt A. O., Steinnes E. Instrumental neutron — activation analysis of standart rocks.— Geochim. and cosmochim. acta, 1966, v. 30, № 9.
28.86. Caldwel R. L., Mills W. R., Hickman J. B. Gamma-radiation from inelastic scattering of 14 Mev neutrons by the common earth elements.— Nucl. Sci. and Eng., 1960, v. 8, № 3.
28.87. Cobb T. C. Determination of lanthanide distribution and direct-gamma counting.— Analytical Chem., 1967, v. 39, № 1.
28.88. Gaudin A. M., Dasher J., Pannel J. H., Freiberger W. Use of an induced nuclear reaction for the concentration of beryl.— Mining Engineering, 1950, v. 183, № 4.
28.89. Gillespie A., Hill W. Sensitivities for Activation analysis with 14 Mev neutrons.— Nucleonics. 1961, v. 19, № 11.
28.90. Gloss M. B. Activation analysis ready for routine use.— Nucleonics, 1965, v. 23, № 6.
28.91. Hamilton E. J. The determination of uranium in rocks and minerals by the delayed neutron method.— Earth and Planet Sci. Letters, 1966, v. 1, № 2.
28.92. Jukens H. R., Graber F. Neutron activation — analysis determination of rare — earth elements in silicate ores.— Trans, amer, nucl. soc., 1965, v. 8. № 2.
28.93. L'analyse par activation.— Bureau Eurisdop — Euratom, 1965.
28.94. Levine C. A., Surls J. P. Rapid non — destructive determination of beryllium using Van de Graaff X-rays.— Analytical Chem., 1962, v. 34, № 12 (T-11).
28.95. Lux F., Köhler W. Rolle des Resonanz — Aktivierungs — Integrals bei der Aktiviernungsanalyse der Silberbestimmung.— Nukleonik, 1965, Bd. 7, № 8.
28.96. Mastalka A. Stanoveni tantalu v horninach.— Chem. listy, 1965, v. 59, № 12.
28.97. Nenov N., Popov X., Tomov T., Stefanov G., Tolgyessy I. Non-destructive determination of Arsenic in ores and rocks with high manganese concentration by neutron activation analysis.— Chemicke Zvesti, 1965, v. 19.
28.98. Niewodniczanski I., Sulin V. V., Vitozhenc G. Ch. Determination of zinc content in uppersilesian lead — zinc ores by means of photon activation analysis.— Nukleonika, 1967, v. 12, № 12.
28.99. Ore analysis by high — power radioactivaction technique.— "Internat. mining Equipm.", 1964, v. 15, № 8.
28.100. Peisach M., Poole D. O. Analysis of surfaces by scattering of accelerated alpha — particles.— Analytical Chem., 1966, v. 38, № 10.
28.101. Perdijon I. Experimental sensitivities in neutron activation and gamma-spectrometry with a 150-kv accelerator.— Analytical Chem., 1967, v. 39, № 4.
28.102. Radiochemical methods of analysis.— Proc. Sympos. Salzburg, October, 1964, v. 1 Vienna, JAEA, 1965.
28.103. Ramdor H. Anwendung der Aktivierungsanalyse zur Kupfererzsortierung.— Kerntechnik, 1963, Bd. 5, № 5.
28.104. Rieci E., Hahn R. L. Theory and experiment in rapid, sensitive helium-3 activation analysis.— Analytical Chem., 1965, v. 37, № 6.
28.105. Schroeder G. L., Evans R. D. Determination of silver in minerals and ores by neutron activation analysis and high resolution gamma-spectrometry.— Analytical Chem., 1966, v. 38, № 3.
28.106. Sippel R. F., Glover E. D. Sedimentary rock analysis by charged particle bombardment.— Nuclear instruments and methods, 1960, v. 9, № 1.
28.107. Slater. Gamma-rays of radionuclides in order of increasing energy, London, 1962.
28.108. Smales A. A., Wager L. R. e. a. Methods in geochemistry. New-York — London, 1960.
28.109. Stark H., Turkowsky C. Zur Bestimmung von Spurengehalten an Th^{232} in Besteinen und Mineralien durch Neutronenaktivierung.— Radiochimica Acta, 1966, Bd. 5, № 1.
28.110. Taylor T. J., Havens W. W. Neutron spectroscopy for chemical analysis — I, II — Nucleonics, 1949, v. 5, № 6 and 1950, v. 6, № 2.
28.111. Tilbury R. S. Activation analysis with charged particles.— Union Carbide Corp. Tuxedo, 1960, 43 p.
28.112. Tilbury R. S., Wahl W. H. Activation analysis by high energy particles.— Nucleonics, 1965, v. 23, № 9.
28.113. Turkowsky C., Staerk H. Trace analysis of uranium in rocks with the help of neutron activation.— Z. Anal. Chem., 1966, pp. 221, 205.
28.114. Volborth A., Vincent H. A. Accurate determination of total oxygen in six new US Geological Survey rock standards by fast neutron activation.— Trans. amer. nucl. soc., 1967, v. 10, № 1.
28.115. Wainerdi R. E., Fite L. E. Automatic and Computer, coupled nuclear activation analysis.— Acta chim. acad. scient. Hung., 1966, v. 50, № 1—4.
28.116. Weal D. J. Non-destructive activation analysis of crude oils for arsenic to one part permillion, and simultaneous determination of five other trace elements.— Analytical Chem., 1966, v. 38, № 8.

28.117. Garbrah B. W., Whitley J. E. Assessment of neutron capture gamma-ray analysis.— The intern. j of appl. radiation and isotopes, 1968, v. 19, № 8.
28.118. Атомная энергия. 1970, т. 28, вып. 2.
28.119. Шуколюков Ю. А. Деление ядер урана в природе. Атомиздат, 1970.
28.120. Активационный анализ. (Сб.). Ташкент, Изд. «ФАН» АН УзССР, 1971.
28.121. Нейтронно-активационный анализ. (Сб.). Ташкент, Изд. «ФАН» АН УзССР, 1971.
28.122. Ядерно-физические методы анализа вещества. (Сб.). Атомиздат, 1971.

Литература к главе 29

29.1. Абрамян С. Л., Аксельрод С. М., Алексеев Ф. А., Альтшель С. А., Беспалов Д. Ф., Гаджи-Касимов А. С., Жилин К. А. и др. Импульсный нейтрон-нейтронный метод исследования скважин и опыт применения его на Балаханы-Сабунчи-Раманинском месторождении.— Азерб. нефтяное хоз., 1960, № 11.
29.2. Арбузов В. М. Влияние зоны проникновения на показания импульсных нейтронных методов применительно к условиям Ромашкинского нефтеносного месторождения. Канд. дисс. М., 1968.
29.3. Арбузов В. М. Влияние проникновения в пласт неминерализованной жидкости на показания импульсного нейтрон-нейтронного метода при исследовании нефтенасыщенных коллекторов.— Геол. и геофиз., 1966, № 4.
29.4. Арбузов В. М. Возможности ИННМ при оценке насыщенности песчаных коллекторов в условиях соляного проникновения.— Тр. Татарского нефтяного науч.-иссл. ин-та, 1967, вып. 10.
29.5. Арбузов В. М. 1. О влиянии ширины «окна» регистрации при исследовании ИННМ-т на эффективность разделения нефтенасыщенных коллекторов. 2. К расчету коэффициента диффузии тепловых нейтронов.— Тр. Татарского нефтяного науч.-иссл. ин-та, 1967, вып. 10.
29.6. Арбузов В. М. Оценка влияния зоны проникновения на показания импульсных нейтронных методов.— Тр. Татарского нефтяного науч.-иссл. ин-та, вып. 12, 1968.
29.7. Белый Г. П., Потушанский А. А., Трум А. Д. Применение импульсного нейтрон-нейтронного каротажа на нефтяных и газовых месторождениях Украины.— Разв. геофиз., вып. 19. «Недра», 1967.
29.8. Беспалов Д. Ф., Коноплев Ю. В., Киценко Ю. А. Исследование скважин в условиях низкой минерализации пластовых вод методом импульсного нейтрон-нейтронного каротажа.— Сб. «Нефтегазовая геология и геофизика», № 1. (Науч.-техн. сб.). М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1966.
29.9. Беспалов Д. Ф., Горюнова Г. Г., Гришаев А. И., Киценко А. И., Коноплев Ю. В., Романовский В. Ф., Сибуров В. К. Термостойкий скважинный импульсный генератор нейтронов.— Разв. геофиз., вып. 15. «Недра», 1966.
29.10. Геофизическая аппаратура. Л., «Недра», вып. 38, 1968; вып. 39, 1969.
29.11. Геофизические исследования на Украине. (Сб.). Киев, изд-во «Техника», 1968.
29.12. Дорош М. М., Костю Я. Э., Шкода-Ульянов В. А., Парлаг А. М., Берзин А. К. Способ разграничения нефтеносных пластов от водоносных, основанный на регистрации запаздывающих нейтронов.— Ат. энергия, 1966, т. 21, вып. 1.
29.13. Дядькин И. Г., Баталина Э. П. Изменение во времени пространственно-энергетического распределения нейтронов от импульсного источника.— Ат. энергия, 1961, т. 10, вып. 1.
29.14. Жувагин И. Г., Бродский П. А., Гулин Ю. А., Труфанов В. В., Черный В. Б., Бернштейн Д. А. Геофизические исследования нефтяных эксплуатационных скважин.— Разв. геофиз., вып. 31. «Недра», 1969.
29.15. Запорожец В. М. Методы каротажа нефтяных и газовых скважин с использованием ускорителей заряженных частиц. Докт. дисс. М., 1967.
29.16. Запорожец В. М., Кантор С. А. Импульсный нейтронный каротаж.— Изв. ТПИ, 1959, т. 96, вып. 1.
29.17. Захарченко В. Ф. Влияние переноса на временное распределение замедляющихся нейтронов и импульсный нейтронный каротаж.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 10.
29.18. Захарченко В. Ф. Некоторые вопросы теории нейтронного каротажа с применением импульсного генератора нейтронов.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1961, № 6.
29.19. Захарченко В. Ф. Распределение тепловых нейтронов с учетом замедления применительно к импульсной нейтронометрии в геофизике.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 10.
29.20. Игумнов С. А. Об использовании запаздывающих нейтронов для бескернового определения содержания урана в скважинах.— Изв. вузов. Горн. ж., 1966, № 2.

29.21. Игумнов С. А. Об оптимальном времени измерений при определении содержания урана по запаздывающим нейтронам.— Тр. Свердловского горного ин-та, 1957, вып. 50.
29.22. Импульсный метод в нейтронной физике. Атомиздат, 1969.
29.23. Импульсный нейтронный каротаж (вопросы методики исследования). М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1968.
29.24. Кантор С. А. Глубинность исследования горных пород импульсным нейтронным каротажем с источником тепловых нейтронов.— Прикл. геофиз., вып. 29, 1961.
29.25. Кедров А. И. Определение содержания серы в пласте методом активационного каротажа.— В сб. «Геология месторождений самородной серы». «Наука», 1969.
29.26. Кильдеева Ф. Ф. О некоторых факторах, искажающих показания импульсного нейтронного каротажа.— Геол. нефти и газа, 1968, № 4.
29.27. Кильдеева Ф. Ф. О применении импульсного нейтрон-нейтронного метода на нефтяных промыслах Татарии.— Геол. нефти и газа, 1964, № 2.
29.28. Кирьянов Г. И., Козма А. С., Коневец Б. Г., Косоротов Н. А. Импульсный нейтронный каротажный радиометр.— В сб. «Радиационная техника», вып. 2. Атомиздат, 1968.
29.29. Киценко Ю. А., Коноплев Ю. В. Внедрение скважинного импульсного генератора нейтронов ИГН-1.— Сб. «Геофизическая аппаратура», вып. 27. Л., «Недра», 1966.
29.30. Кожевников Д. А. О замедлении нейтронов в поглощающей среде.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 2.
29.31. Коноплев Ю. В. Разработка методики ядерно-геофизических исследований с целью определения параметров выработки пластов. Канд. дисс. М., 1969.
29.32. Коноплев Ю. В., Киценко Ю. А., Каличенко Б. В. Исследования возможности определения ВНК в условиях четвертого горизонта Анастасиевско-Троицкого месторождения нефти методом импульсного нейтрон-нейтронного каротажа.— Геол. нефти и газа, 1965, № 4.
29.33. Коноплев Ю. В., Покидько Л. П. Применение импульсного нейтрон-нейтронного каротажа в условиях низкой минерализации пластовых вод.— Прикл. геофиз., 1965, вып. 45.
29.34. Кошляк В. А. Применение импульсного нейтрон-нейтронного метода (ИННМ) при контроле разработки нефтяных месторождений.— Геол. нефти и газа, 1968, № 7.
29.35. Лаптев В. В. Разработка методики интерпретации данных ИННК для разделения нефтеносных и водоносных карбонатных коллекторов. Канд. дисс. М., 1967.
29.36. Лаптев В. В., Прокофьев Л. Н., Цлав Л. З., Яшин А. П. Определение границ пластов при машинной обработке диаграмм радиоактивных методов. «Нефтегазовая геология и геофизика». М., ВНИИОЭНГ, 1967.
29.37. Лаптев В. В., Цлав Л. З. Возможности использования ИННК для изучения нефте-водонасыщенности карбонатных коллекторов.— Тр. Куйбышевского науч.-иссл. ин-та нефтяной пром., вып. 31, 1965.
29.38. Лебедев В. Е. Результаты расчета комплексом численных методов нестационарной диффузии нейтронов в многопластовых средах со скважиной. Канд. дисс. М., 1968.
29.39. Материалы Второй и Третьей научно-технической конференции молодых геофизиков Украины. 1966—1968 гг. «Наукова думка», 1968.
29.40. Миллер В. В. Методы экспериментального исследования нейтронных диффузионных параметров горных пород и флюидов на небольших образцах вещества. Канд. дисс. М., 1966.
29.41. Новое в методике и технике промыслово-геофизических исследований на нефть и газ. М., Изд. ЦНИИТЭнергогаз, 1963.
29.42. Новые методы и аппаратура ядерной геофизики и геохимии. М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1970.
29.43. Опыт применения импульсного нейтронного каротажа на месторождениях полезных ископаемых.— Бюлл. науч.-техн. инф. МГ СССР, серия «Региональная разведочная и промысловая геофизика», 1968, № 8.
29.44. Основы импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (методическое пособие), т. 1. М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1965.
29.45. Основы импульсных нейтронных методов каротажа (методическое пособие). М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1969.
29.46. Поляченко А. Л. Изучение влияния скважины на показания импульсного нейтронного каротажа.— Нефтегазовая геология и геофизика (инф. ЦНИИТЭН, вып. 19). М., Нефтегаз, 1963.
29.47. Поляченко А. Л. Пространственно-временное распределение тепловых нейтронов при импульсном нейтронном каротаже на асимптотике по времени. Нефтегазовая геология и геофизика (инф. ЦНИИТЭИ, вып. 24). М., Нефтегаз, 1963.
29.48. Поляченко А. Л. Теория метода нестационарной диффузии в приложении к задачам импульсного нейтронного каротажа.— Канд. дисс. М., 1964.
29.49. Поляченко А. Л. Теория нестационарной диффузии тепловых нейтронов в двухслойной бесконечной среде с цилиндрической границей.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, 6, № 4.

29.50. Портативные генераторы нейтронов в ядерной геофизике. (Сб. ст.). Госатомиздат, 1962.
29.51. Резванов Р. А. Расчет методом статистических испытаний некоторых задач импульсного нейтрон-нейтронного метода изучения горных пород.— Прикл. геофиз., вып. 39, 1964.
29.52. Резванов Р. А., Денисик С. А., Лебедев В. Е. Результаты математического моделирования задачи о пространственно-временном распределении тепловых нейтронов в двухслойной среде с цилиндрической границей раздела.— Прикл. геофиз., вып. 51, 1968.
29.53. Соколов Ю. И. Измерение диффузионных нейтронных параметров крепленых скважин импульсным методом.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1967, № 7.
29.54. Соколов Ю. И. Экспериментальные исследования нестационарной диффузии тепловых нейтронов в пласте, пересеченном крепленой скважиной.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1966, № 1.
29.55. Тальянский И. И. Основы теории импульсного нейтронного каротажа.— Прикл. геофиз., вып. 26, 1960.
29.56. Цлав Л. З. Разработка радиометрических методов контроля за обводнением продуктивных карбонатных пластов.— Тр. Куйбышевского науч.-иссл. ин-та нефтяной пром., вып. 40, 1968.
29.57. Шимелевич Ю. С. Физические основы нейтронных методов исследования скважин с использованием временного анализа излучений.— Докт. дисс. М., 1968.
29.58. Школьников А. С. Применение импульсного нейтрон-нейтронного каротажа для отбивки водонефтяного контакта в обсаженных скважинах.— Нефтяное хоз., 1960, № 8.
29.59. Ядерно-геофизические геохимические и изотопные методы в геологии. (Сб. ст.). М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1968.
29.60. Allen L. S., Mills W. R., Caldwell R. L. The effects of fluid in vasion in pulsed neutron logging.— Geophysics. 1965, v. 30, № 3.
29.61. Hearst J. R. Effects of medium variations on the measurement of in — situ hydrogen content.— Geophysics, 1968, v. 33, № 4.
29.62. Hoyer W. A. Induced nuclear reaction logging.— J. Petrol.— Technol., 1961, v. 13, № 8.
29.63. Hoyer W. A., Rumble R. C. Field experience in measuring oil content, lithology and porosity with a high — energy neutron-induced spectral logging system.— J. Petrol. Technol., 1965, v. 17, № 7.
29.64. Little J. W., Youmans A. H. The neutron lifetime log — a performance reporpt.— Oil and Gas. J., 1964, v. 62, № 36.
29.65. Marquis G. L., Wichmann P. A., Millis C. W. Studies of producting reservoirs with the neutron lifetime log.— Journal Petrol. Technol., 1966, v. 18, № 4.
29.66. Mills W. R., Allen L. S., Selig F., Caldwell R. L. Neutron and gamma-ray die — away in a Leterogenous system.— Nucl. Applic., 1965, v. l, № 4.
29.67. Simon L. Impulsni neutronovy generator v rudnem hornictvi.— Rudy, 1966, v. 14, № 8.
29.68. Smith W. D. M. Lifetime log finds oil traigh casing.— Can. Petrol., 1967, v. 8, № 8.
29.69. Wainerdi R. E. The neutron die — away log.— Producers Monthly, 1966, v. 30, № 8, 9.
29.70. Wichman P. A., Youmans A. H., Hopkinson E. C. Advances in neutron lifetime logging.— J. Petrol. Technol., 1967, v. 19, № 4.
29.71. Youmans A. H., Hopkinson E. C. Field results of neutron lifetime logs.— Drilling, 1964, v. 25, № 9.
29.72. Youmans A. H., Hopkinson E. C. Neutron lifetime logging in the Gulf Coast area.— J. Can. Petrol. Technol., 1965, v. 4, № 2.
29.73. Youmans A. H., Hopkinson E. C. Neutron lifetime logging in the Gulf Coast area.— J. Petrol. Technol., 1965, v. 5, № 2.
29.74. Youmans A. H., Hopkinson E. C., Bergen R., Oshry H. Neutron lifetime, a new nuclear log.— J. Petrol. Technol., 1964, v. 16, № 3.
29.75. Воронков Л. Н., Куриленко Ф. А., Паклинов В. А., Хуснулин М. Х. Способ определения рода жидкости, насыщающей горный пласт.— Авт. свид. № 234546, от 17 января 1967 г.— «Геофизика», 1969, № 12Д374П.
29.76. Вопросы интерпретации результатов исследования скважин импульсными нейтронными методами.— Бюлл. науч.-техн. инф., серия «Региональная разведочная и промысловая геофизика», вып. 17. М., ВИЭМО, 1969.
29.77. Юдин В. А. Теоретическое исследование временного, пространственного и энергетического распределения гамма-излучения при импульсном нейтронном гамма-каротаже.— Автореферат канд. дисс. М., ВНИИЯГГ, 1971 г.
29.78. Ядерная геофизика, вып. 9 (труды ВНИИЯГГ). М., Недра, 1971.
29.79. Резванов Р. А. Об ограничениях способа определения содержания водорода в горных породах при помощи двухзондовой модификации ИННК.— Прикладная геофизика, вып. 63. М., Недра, 1971.

30.1. Абдуллаев А. А., Бибинов С. А. Лобанов Е. М., Хаитов Б. К., Хайдаров А. А. Применение радиоактивных изотопов в качестве индикаторов для изучения динамики подземных вод.— Узб. геол. ж., 1962, № 1.
30.2. Блажевич В. А. Практическое руководство по гидроразрыву пласта. Гостоптехиздат, 1961.
30.3. Булатов В. П., Серебренников И. Я. Влияние скорости взаимного перемещения источник — контролируемая среда при измерении рельефа поверхности с помощью обратно рассеянного гамма-излучения.— Изотопы в СССР, 1968, № 11.
30.4. Горшков Г. В., Цветков О. С. О пространственном распределении нейтронов космического излучения вблизи поверхности раздела атмосфера — Земля.— Ат. энергия, 1969, т. 27, вып. 4.
30.5. Жувагин И. Г., Акчасьянов Ю. А. Новый способ контроля результатов гидравлического разрыва пласта при помощи радиоактивных изотопов.— Нефтяное хоз., 1960, № 6.
30.6. Жувагин И. Г., Акчасьянов Ю. А., Хайруллин Р. В. О возможности применения ионообменных смол в качестве носителя радиоактивных изотопов.— Разв. и пром. геофиз., вып. 45, 1962.
30.7. Исследования по ядерной метеорологии и химии атмосферы. (Сб. докл.). Л., Гидрометеоиздат, 1969.
30.8. Канлыбаева Ж. М., Жукова С. Г., Клиновицкий Ф. И., Сарсембаев А. А. Некоторые результаты наблюдений за сдвижением горных пород в толще массива с помощью радиоактивных изотопов.— Тр. ИГД АН КазССР, 1962, т. 9.
30.9. Коннолли Э. Л. Справочник по каротажу эксплуатационных скважин. «Недра», 1969.
30.10. Лесик И. Г., Усачев П. М. Определение местоположения трещин гидроразрыва при помощи шариков-реперов.— Нефтяное хоз., 1960, № 10.
30.11. Морозов А. А., Хисамутдинов А. И. Численное исследование возможности аэропоисков бериллия.— В сб. «Проблемы региональной геологии и петрографии и методы геохимических исследований». «Наука», Сиб. отд., 1969.
30.12. Нифонтов Б. И., Протопопов Д. Д., Ситников И. Н., Куликов А. В. Подземные ядерные взрывы. Атомиздат, 1965.
30.13. Применение атомных взрывов при сооружении подземных газохранилищ. Экспресс-информация.— Нефте- и газодобывающая пром., 1966, № 43.
30.14. Соколовский Э. В. Применение радиоактивных изотопов для контроля за разработкой нефтяных месторождений. «Недра», 1968.
30.15. Соколовский Э. В., Зайцев В. М. Применение изотопов на нефтяных промыслах. М., «Недра», 1971.
30.16. Ферронский В. И. Использование изотопов в гидрологии и гидрогеологии.— Ат. энергия, 1968, т. 24, вып. 2.
30.17. Филиппов Е. М. О возможностях аэропоисков полезных ископаемых с генератором нейтронов.— Геол. и геофиз. 1965, № 2.
30.18. Филиппов Е. М., Жаворонков В. Я. О возможности применения электронных ускорителей в автомобильной и вертолетной съемке.— Геол. и геофиз., 1966, № 9.
30.19. Флексер Н. Я. Радиоактивные изотопы как индикаторы для контроля фильтрационных потоков.— Ат. энергия, 1961, т. 10, вып. 5.
30.20. Флексер Н. Я., Шипенко О. П. Аппаратура для контроля грунтовых потоков методом радиоактивных индикаторов.— Разв. и охрана недр, 1961, № 6.
30.21. Хаитов Б. К. Расчет дозы радиоактивных изотопов, применяемых в качестве индикаторов для изучения движения подземных вод.— Докл. АН УзССР, 1962, № 5.
30.22. Хисамутдинов А. И. Решение некоторых вопросов теории метода Монте-Карло и двух задач ядерной геофизики. Канд. дисс. Новосибирск, 1969.
30.23. Чураев Н. В., Ильин Н. И. Радиоактивные методы исследования движения подземных вод. Атомиздат, 1967.
30.24. Шредер К. Д., Вэгоннер Д. А., Зенгер Д. Х., Стиннер Р. Д. Нейтронно-гамма-лучевой прибор для анализа состава лунной поверхности.— Ракетная техника, 1962, № 4.
30.25. Шредер К. Д., Стиннер Р. Д. Дистанционный анализ горных пород с помощью метода неупругого рассеяния нейтрон-гамма-лучей.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1963, № 1 (45).
30.26. Экспериментальный подземный ядерный взрыв с целью воздействия на газоносный пласт. Экспресс-информация.— Нефте- и газодобывающая пром., 1966, № 22.
30.27. Ядерная геофизика. (Сб. под ред. Х. Израэля и А. К. Кребса). «Мир», 1964.
30.28. Atomic silver-detecting device.— Mining J. 1965, v. 265, № 6794.
30.29. Caldwell R. L., Mills W. R., Allen L. S., Bell P. R., Heath R. L. Combination neutron experiment for remote analysis. Sci., 1966, 152.

30.30. Crotowicz J. Zagadnienia geologii naftowei na Sympozium "Zastosowanie izotopow w geofizyce, hydrogeologii i geologii inzynierskiej".— Wiadom naft, 1968, № 3.
30.31. Czubek J. A. Zastosowanie izotopow i metod techniki jadrowej w geologii, geofizyce, hidrologii i gornictwe (Rept).— Just. badan. jadrow PAN, 1968, № 918.
30.32. Dolak E. Erfahung und Entwicklung bei der Anwendung radioaktiver.— Isotope. OWV — Werkzeitung, 1968, 11, № 6, 7.
30.33. Fontaine J. H., Flora D. H. Radioactive material handling problems in oil and gas well logging.— Radiol. Health Data and Repts, 1967, v. 8, № 8.
30.34. Gaspar E., Oncescu M., Bisir D. Soil permeability determinations with radioactive tracers.— Rev. roumaine phys., 1969, v. 14, № 1.
30.35. Gerber C. R., Voress H. E. A selected, annotated bibliography of teh civil, industrial and scientific uses for nuclear explosives — U. S. Atomic Energy Commission Division of Technical Information Extension, Oak Ridge, Tennessee 37830, May 1966.
30.36. Holzer F. Gasbuggy preshot summary report. Plowshare U. S. Atomic Energy Commission.— Civil, industrial and scientific uses for nuclear exposives, November, 1967.
30.37. Isotopes Hydrology. Vienna, 1967.
30.38. Krotowicz J. Jzotopy w geologii i geofizyce.— Techn. poszuk., 1968, v. 6, № 26.
30.39. Milde G. Die Anwendung von radioaktiven Isotopen bei montanhydrogeologischen Untersuchungen.— Isotopentechnik, 1962, 2, № 11.
30.40. Peteu G. Utilizarea titeiului marcat cu iod benzen (^{131}J) la investigarea sondelor petroere in scopul determinarii continutului in apa sau titei al colectoarelor.— Petrolsi Gaze, 1968, v. 19, № 5.
30.41. Project "Bronco" (the Bronco oil shale study). A joint gaverment-industry stady of nuclear fracturing end in situ retorting of oilshale. October 13, 1967.
30.42. Project "Gasbuggy", El PASO, Texas, May 14, 1965.
30.43. Project "Ketch". Columbia gas system. U. S. Atomic Energy Commission, U. S. Bureau of Mines, Lawrence Radiation Laboratory, July, 1967.
30.44. Radioisotope tracers in Industry and Geophisics. Menn Vienna, 1967.
30.45. Rawson D. E. Industrial applications of Contained nuclear exploration.— UCRL — 14 756. University of California. Livermore, July, 1966.
30.46. Rodean H. C. Research for understanding and construchively using ungerground nuclear explosions.— UCRL — 50 276. Uneversity of California. Livermore, June 6, 1967.
30.47. Shrader C. D., Waggoner J. A., Metzker A. E., Zenger J. H. Analyzing the moon's surface.— Nucleonics 1962, v. 20, № 10.
30.48. Senftle F. E. Mineral exploration by nuclear techniques.— Mining congress Journal, January 1970.
30.49. Senftle F. E., Hoyte A. F. Mineral exploration and soil analysis using in situ neutron activation.— Nuclear instrument and methods, 1966, v. 42, № 1.
30.50. Sloop (project) Kennecott Copper Corporation, U. S. Atomic Energy Commission, U. S. Bureau of Mines, Lawrence Radiation Laboratory. June 1, 1967.
30.51. Szasz S. E. Adaptation of well logging methods to planetary exploration.— Ann. N. Y. Acad. Sci. 1966, v. 140, № 1.
30.52. Trombka J. J., Metzger A. E. Neutron methods for lunar and planetary surface compositional studies.— Analysis instruments. 1963. Pittsburgh, ISA, 1963, p. 237—250.
30.53. Андреев В. К., Егиазаров Б. Г. и др. Портативная нейтронно-радиационная установка.— Атомная энергия, 1971, т. 31, вып. 2.
30.54. Справочное руководство по применению ядерных методов в гидрологии и гидрогеологии (сб.). М., «Недра», 1971.

Литература к главе 31

31.1. Агамирзоев Р. А., Золотовицкая Т. А. Радиоактивность в зонах тектонических нарушений Бинагданинского поднятия (Апшеронский полуостров.)— В сб. «Материалы по тектонике и региональной геологии Азербайджана». Баку, 1968.
31.2. Амшинский Н. Н. Возможности применения радиометрических методов исследования в геологии.— Бюлл. науч.-техн. инф. МГ и ОН СССР, 1957, № 3 (8).
31.3. Асадов И. Г., Куликов В. И. Возможности изучения геологического строения банок и подводных грязевых вулканов методом радиометрической съемки.— Азербайджанское нефтяное хоз., 1967, № 12.
31.4. Аэрометоды при геологической съемке и поисках полезных ископаемых. (Сб.), т. 1. «Наука», 1964.
31.5. Аэросъемка и ее применение. (Сб.). Л., «Наука», 1967.
31.6. Балясный Н. Д. и др. Обнаружение ореолов рассеяния радия по спектру гамма-лучей.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 4.
31.7. Балясный Н. Д. и др. Определение содержания радия, тория и калия в горных породах с самолета.— Ат. энергия, 1961, т. 10, вып. 6.

31.8. Балясный Н. Д. Опыт определения содержания радия, тория и калия в однородных гранитоидах по энергетическому составу гамма-квантов.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1962, № 5.
31.9. Балясный Н. Д. и др. Радиоизотопный анализ горных пород и почв по энергетическому составу гамма-лучей в приземной атмосфере.— Докл. АН СССР, 1961, т. 140, № 4.
31.10. Болтнева Л. И. Опыт изучения радиоактивности гранитоидных интрузий методом самолетной гамма-спектрометрии.— Изв. АН СССР, серия геофиз., 1964, № 6.
31.11. Болтнева Л. И. и др. Опыт определения радия, тория и калия в горных породах с самолета с датчиком на кристалле NaJ(Tl).— Ат. эн., 1962, т. 13, № 3.
31.12. Болтышев Н. Н. Современное состояние и задачи геологического и геофизического изучения зон тектонических разрывов нефтегазоносных районов.— Тр. Грозненского нефтяного науч.-иссл. ин-та, вып. 8, 1960.
31.13. Булашевич Ю. П. О картировании графитизированных пород.— Разв. и охрана, 1957, № 2.
31.14. Булашевич Ю. П. Применение радиоактивного метода для поисков пегматитов в полосе щелочных пород Урала.— Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз., 1941, № 3.
31.15. Василенко В. Н. и др. Применение гамма-спектральной съемки в геологии.— Сов. геол., 1963, № 10.
31.16. Вачнадзе Ю. А. К вопросу о зависимости содержания радиоактивных эманаций в воздухе от геологических условий места наблюдений.— Тр. Ин-та геофиз. АН Груз.ССР, 1963, т. 21.
31.17. Герасимов Ю. Г. Отражение современных тектонических движений в рельефе и эманационных аномалиях криворожской части ЦКЩ.— Геофиз. сб. Ин-та геофиз. АН УССР, 1963, вып. 5(7).
31.18. Гурский Г. В., Тихонов С. А. О применении гамма-съемки при картировании поверхностных отложений и поисках некоторых видов полезных ископаемых в условиях Припятского Полесья.— Сб. «Геология и гидрология Припятского прогиба». Минск, 1963.
31.19. Гусейнов А. М. и др. Опыт применения морской радиометрической съемки в Азербайджанской ССР.— Сов. геол., 1963, № 3.
31.20. Дюков А. И. Использование геофизических методов при крупномасштабном геологическом картировании и изучении структур рудных полей и месторождений.— В сб. «Основные вопросы и методы изучения структур рудных полей и месторождений». Госгеолтехиздат, 1960.
31.21. Коган Р. М. и др. К вопросу об определении содержания калия в почвах по гамма-лучам.— Почвоведение, 1961, № 8.
31.22. Колчина А. Г., Устинов Е. П. и др. Методические указания по применению радиометрических методов для поисков и разведки руд нерадиоактивных элементов и геологического картирования, вып. I. Госгеолтехиздат, 1963.
31.23. Комсток С. Сцинтилляционный каротаж.— Матер. Междун. конф. по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). Госгеолтехиздат, 1958, т. 6.
31.24. Кондратенко А. Ф. Применение радиометрических методов для геологического картирования.— Сб. «Разведка и разработка полезных ископаемых». Гостоптехиздат, 1958.
31.25. Краснов А. И., Тарутин В. А. Некоторые вопросы использования аэромагнитных и аэрогамма-спектрометрических данных при изучении малых интрузий щелочного состава.— В сб. «Разведочная геофизика», вып. 9. «Недра», 1965.
31.26. Лискович А. Л., Фридман Ш. Д. Использование материалов аэрогаммасъемки для геологического картирования.— Сов. геол., 1958, № 11.
31.27. Пейсиков Ю. В., Шацов А. Н. Применение подводной радиометрической съемки морского дна.— Геол. нефти и газа, 1962, № 3.
31.28. Смирнов В. А. Аэрогамма-спектрометрическая съемка при поисках и геологическом картировании.— В сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 3. Госгеолтехиздат, 1961.
31.29. Соколова А. И. Возможности радиометрических методов при геологическом картировании в Учалинском районе Башкирской АССР.— Тр. Свердловского горного ин-та, 1963, вып. 4.
31.30. Федоренко Я. Д. Применение геофизических методов для расчленения гранитоидов в Восточном Забайкалье.— Сов. геол., 1962, № 10.
31.31. Шевченко Н. Ф. Эманационная съемка при трассировании нарушений.— Тр. аспирантов Среднеазиатского ун-та, 1958, вып. 5.
31.32. Giret M. R. La radiometrie aeroportee, ontil d'exploration geologique structur.— Geophys. Prospect., 1961, v. 9, № 4.
31.33. Guillon R. B., Schmidt R. G. Correlation of aeroradioactivity data and areal geology.— Geol. surv. profess. paper, 1960, № 400 — B.
31.34. Jirkovsky R. e. a. Radiologicky prazkum poruchoyych ploch a zlomu stredoces keho permokarbonu.— Sb. vede praci Vysoke skcly. Banske Ostrave, 1958, v. 4, № 6.
31.35. Loser G. Radioaktive Bodenluftmessungen als Beitrag zur Klarung tektonischer Probleme am Sudwestrand des Thüringer Waldes.— Geoph. Geol., 1961, № 1.

31.36. Schoeneich K. Radiogeologiczne metody rozpoznawania z powierchni nieciaglosci tektonicznych nad nie rozcietymi zlozami kopaliny.— Przegl Geol.. 1960. v. 8, № 12.
31.37. Sikka D. B. Aero-gamma-ray spectrometer aids in the detection of faults.— Res. Bull. Panjab Univ., 1962, v. 13, № 1.
31.38. Surface radiometric surveys in the Republic of Soufth Africa.— Geol. survey, bulletin 49, 1967.
31.39. Williams W. I. Gamma-rays reveal subsurface faulting.— Spec. Pube Kentucky Geol. Surv., 1957, 11, 53—58.
31.40. Williams W. I., Lorenz P. I. Detecting subsurface faults by radioactive measurements.— World Oil, 1957, v. 144, № 5, 126—128.

Литература к главе 32

32.1. Авров П. Я. Применение промысловой геофизики при бурении скважин на воду.— Изв. АН КазССР, серия геол., 1953, вып. 2/31.
32.2. Басин Я. Н., Кухаренко Н. К., Тюкаев Ю. В. Методика определения пористости карбонатных пластов по данным нейтронного каротажа с серийной аппаратурой радиоактивного каротажа (временное наставление). М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1968.
32.3. Горбачев А. Н., Карпунин А. М., Матуканис Л. Ф. Использование плотности различных образований в качестве поискового и геокартировочного признака (на примере Ошурковского месторождения апатита).— Сов. геол., 1968, № 8.
32.4. Гулин Ю. А. Эффективность определения пористости песчано-глинистых отложений по результатам гамма-гамма и нейтронного каротажа в комплексе с ГК и ПС.— Сб. «Нефтегазовая геология и геофизика». (Науч.-техн. сб. № 9). М., Изд. ВНИИОЭНГ, 1968.
32.5. Дмитриев А. В., Коган Р. М., Никифоров М. В., Фридман Ш. Д. Определение влажности почв по их гамма-излучению.— Метеорология и гидрология, 1965, № 7.
32.6. Емельянов В. А., Синицын В. И., Бескин Л. И., Евсеев Ю. К. Нейтронометрия влажности пахотного слоя почв.— Ат. энергия, 1969, т. 26, вып. 1.
32.7. Коган Р. М., Фридман Ш. Д. Влияние влажности горных пород и почв на структуру гамма-поля в приземной атмосфере.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1967, № 3.
32.8. Ряполова В. А. Опыт применения ядерных методов при исследовании разрезов скважин, бурящихся на воду.— Сб. «Разведка и разработка полезных ископаемых». Гостоптехиздат, 1958.
32.9. Состояние и перспективы ядерно-геофизических методов поисков и разведки полезных ископаемых.— Тр. ВНИИЯГГа, вып. 5. «Недра», 1969.

Литература к главе 33

33.1. Алексеев Ф. А., Готтих Р. П. К вопросу о механизме образования радиометрических аномалий над нефтяными месторождениями.— Сов. геол., 1965, № 12.
33.2. Алексеев Ф. А., Тихомирова Н. Л. Изучение природы зон слияния продуктивных отложений $Д_1$ и $Д_2$ Ромашковского месторождения методом скважинной гамма-спектрометрии (ГКС).— Геол. нефти и газа., 1968, № 12.
33.3. Бреднев И. И. Определение зольности углей в скважинах нейтронно-активационным методом. Канд. дисс. Свердловск, 1970.
33.4. Бурдуков В. М. Гамма-каротаж на угольных месторождениях.— Тр. Каз. горно-металлургического ин-та, 1959, № 18.
33.5. Вендельштейн Б. Ю., Ларионов В. В. Использование данных промысловой геофизики при подсчете запасов нефти и газа. «Недра», 1964.
33.6. Гречухин В. В. Геофизические методы исследования угольных скважин, «Недра», 1965.
33.7. Демьянова Е. И. Применение радиоактивных методов при исследовании угленосных толщ (на примере Львовско-Волынского угленосного бассейна).— Геол. ж., 1961, т. 21 (укр.).
33.8. Доржиев В. С. Из опыта применения каротажа для изучения разреза угленосных отложений Тугнуйской депрессии.— Тр. Бурятского компл. науч.-иссл. ин-та, вып. 7, 1961.
33.9. Макаров А. Н. и др. Новая методика каротажа скважин на буроугольных месторождениях. Новое в методике и технике геолого-разведочных работ. Гостоптехиздат, 1953.
33.10. Макаров А. Н., Ильин А. А., Перцов П. Ф. Выделение пластов горючего сланца и определение их мощности и строения методами каротажа на Ленинградском месторождении.— Уч. зап. ЛГУ, № 340, 1968.
33.11. Методы корреляции угленосных толщ и синонимики угольных пластов. Л., «Наука», 1968.

33.12. Гаркаленко И. А. и др. Методика геофизических исследований скважин Донбасса. Киев, «Наукова думка», 1971.
33.13. Проблема геохимических поисков нефтяных и газовых месторождений и вопросы ядерной геологии.— Тр. ВНИИЯГГа, вып. 4, «Недра», 1968.
33.14. Радиометрия нефтегазоносных областей.— Тр. ВНИИЯГГа, вып. 2. «Недра», 1968.
33.15. Романова Т. Ф. К вопросу определения глинистости газоносных и нефтеносных коллекторов западного Узбекистана по данным радиометрии.— В сб. «Применение методов промысловой геофизики при изучении газоносных коллекторов». Гостоптехиздат, 1962.
33.16. Слепков С. А. Выделение зон тектонического дробления горных пород геофизическими методами в углеразведочных скважинах Кузбасса.— Разв. и охрана недр, 1968, № 5.
33.17. Соколов Д. А., Коржев А. А. Радиоактивные методы предупредительного контроля при бурении наклонных скважин по угольному пласту.— Подземная газификация каменного угля, 1957, № 3.
33.18. Элланский М. М. и др. Изучение коллекторов Ленинградской области методами промысловой геофизики при разведке площадей для подземного хранения газа.— В сб. «Применение методов промысловой геофизики при изучении газоносных коллекторов». Гостоптехиздат, 1962.
33.19. Дунченко И. А., Козельский И. Т. Опыт определения плотности и зольности углей методом рассеянного гамма-излучения на буроугольных месторождениях Подмосковного бассейна.— Изв. вузов. Геол. и разв., 1971, № 2.
33.20. Трум А. Д., Чуркин В. П. Применение методов ИННК, НГК и ГК для выделения нефтегазоносных пластов.— В сб. «Геофизические исследования на Украине». Киев, изд-во «Тектоника», 1971.

Литература к главе 34

34.1. Анчевский Э. В. и др. Определение содержания фосфора методом спектрометрического гамма-каротажа.— Разв. и охрана недр, 1966, № 10.
34.2. Барыгин В. М. Методика и техника поисков коренных месторождений алмазов.— Изд-во АН СССР, 1960.
34.3. Высоцкий Э. А., Беляцкий Е. И., Зыков И. А. О расчленении соленосных толщ, выделении и корреляции калийных горизонтов по каротажу в нефтепоисковых скважинах.— Сб. «Геология и петрология калийных солей Белоруссии».— Минск, изд-во «Наука и техника», 1969.
34.4. Евстрахин В. А. Значение радиометрических методов для поисков нерадиоактивных полезных ископаемых.— Разв. и охрана недр, 1961, № 10.
34.5. Ермаков В. И. и др. О применении радиометрической съемки для изучения соляно-купольных поднятий.— Новости нефт. техники, серия «Геология», 1958, № 10.
34.6. Зыков И. А. Геологическая интерпретация результатов геофизических исследований в скважинах по калийным солям.— Сб. «Геология и петрология калийных солей Белоруссии». Минск, изд-во «Наука и техника», 1969.
34.7. Зыков И. А. Влияние радиоактивности нерастворенного (в воде) остатка при количественной оценке содержаний калия в калиевых рудах по гамма-каротажу.— Бюлл. науч.-техн. инф. МГ СССР. Региональная разведочная и промысловая геофиз., 1967, № 10,
34.8. Зыков И. А. Корреляция калийных горизонтов Старобинского месторождения по каротажу.— Бюлл. науч.-техн. инф. МГ СССР. Региональная, разведочная и промысловая геофиз, 1967, № 10.
34.9. Зыков И. А., Лушкович Ю. И. К вопросу о геофизических исследованиях в скважинах при поисках и разведке месторождений калийных солей.— Бюлл. науч.-техн. инф. МГ СССР. Региональная разведочная и промысловая геофиз., 1967, № 10.
34.10. Киселева П. И. Методы поисков кимберлитовых трубок.— Разв. и охрана недр, 1958, № 11.
34.11. Колчина А. Г. Радиометрические методы исследований при поисках и разведке агрономических руд.— Разв. и охрана недр, 1963, № 12.
34.12. Лизанец В. Г. Применение методов разведки для поисков залежей калийной соли.— Науч. зап. Львовского политехн. ин-та, вып. 75, 1960.
34.13. Опыт применения радиоактивных и других физико-технических методов при поисках и разведке руд нерадиоактивных элементов. (Сб.). Л., «Недра», 1967.
34.14. Пшевлоцкий К. С. Первые данные по радиоактивному каротажу в горизонтальных скважинах при поисках солей в соляных рудниках в Кловаде.— Бюлл. науч.-техн. инф., 1959, № 2 (9).
34.15. Пшевлоцкий К. С. Поиски калийных солей в Польше радиометрическими методами.— Сб. «Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых». Гостоптехиздат, 1960.
34.16. Пшевлоцкий К. С. и др. Поиски калийных солей радиоактивными методами.— «Разведка и разработка полезных ископаемых».— Тр. Всес. конф. по применению изотопов и ядерных излучений. Гостоптехиздат, 1958.

34.17. Рудык Ю. М. Радиометрический метод анализа фосфоритов. Канд. дисс. М., 1968.
34.18. Смилкстын А. О. Использование данных аэрорадиометрических съемок при поисках нерадиоактивных полезных ископаемых и для целей геологического картирования.— Тр. СНИИГГиМСа, вып. 25. Новосибирск, 1962.
34.19. Смилкстын А. О. Применение радиометрических методов при поисках фосфоритов.— В сб. «Закономерности размещения главнейших осадочных полезных ископаемых Сибири (фосфатное сырье), ч. 1. Тр. СНИИГГиМСа, вып. 68. Новосибирск, 1968.
34.20. Спандерошвили Г. И., Рубаха Ф. И. Опыт применения литохимической и радиометрической съемок при поисках фосфоритов в Горной Шории.— Разв. и охрана недр, 1962, № 4.
34.21. Сухарина А. Н., Рубаха Ф. И. Рациональный комплекс геофизических работ при поисках фосфоритов (из опыта изучения Горно-Шорского фосфоритоносного района). Материалы по методике разведки полезных ископаемых. Госгеолтехиздат, 1962.
34.22. Сучков В. П. Геофизические методы при поисках и разведке фосфоритов в Горной Шории.— В сб. «Материалы по геологии Западной Сибири», № 65. «Недра», 1965.
34.23. Тер-Оганесов Я. Г. и др. Применение аэрорадиометрических методов для поисков различных полезных ископаемых.— Ат. энергия, 1958, т. 4, вып. 1.
34.24. Airborne geophysical exploration for phosphates.— Mining J., 1962, 259. № 6636.
34.25. Atomic instrument in diamond prospecting.— Atomics, 1955, v. 6, № 1, p. 9.
34.26. Atomic instrument locates gold, oil, diamonds.— Rhodesian Industrialist, 1956, 17, № 12.
34.27. Bollo R., Jacquemin M. La recherche de phosphates par radiometre aeroportee.— Geophys. Prospect., 1963, v. 11, № 4.
34.28. Boyer R. Occurence of Radioactive Fluoritic Sandstone, Wet Mountains, Colorado.— Econ. Geol., 1961, v. 56, № 4.
34.29. Czubek J. et al. Kompleksowe profilowanie radiometryczne kierunkowych odwiertow kopalnianych za solami potasowymi — Acta geophys. polon., 1960, 8, № 2.
34.30. Georgel J. M. e. a. Essais de recherche de phosphates par scintillametre aeroporte effectues au djebel Onk (Algerie).— Bull. Bureau rech. geol. et minerals, 1962, № 4.
34.31. Kimrey J. O. Delineation of phosphorite deposits with gamma-ray logs in Beaufort Country, North Carolina.— Geol. Soc. America Spec. Paper, 1963, № 73.
34.32. Olewicz Z. R. Wstepna interpretacja geologiczna rozkladu promieniowania gamma nad wysadem solnym Inowraclawia.— Nafta (Polska), 1958, № 5—9, 10.
34.33. Zmyslowska S., Brocas J. La spectrometrie gamma-comme methode d'analyse quantitative du Potassium dans les sols.— Nukleonika, 1961, v. 6, № 12.

Литература к главе 35

35.1. Апельцин Ф. Р., Лугов С. Ф., Островский С. Я. Аэрогамма-спектрометрия при поисках оловорудных месторождений.— Сов. геол., 1967, № 12.
35.2. Арцыбашев В. А., Иванюкович Г. А. Плотностной каротаж на сульфидных медно-никелевых месторождениях.— В сб. «Опыт применения геофизических методов исследования скважин при разведке медно-никелевых месторождений.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИЭМСа. Региональная, разведочная и промысловая геофиз., 1969, № 18.
35.3. Арцыбашев В. А., Иванюкович Г. А., Поспелов С. Г. Комплексирование радиоактивных и электрических методов при каротаже скважин на медно-никелевых месторождениях Печенги.— Изв. вузов. Геол. и разв., 1969, № 2.
35.4. Березин Д. А. Применение радиометрических методов для решения некоторых геологических задач.— В сб. «Геофизическая разведка», вып. 9, 1962.
35.5 Березина Л. А. Радиометрические методы при изучении карбонатитовых месторождений.— Разв. и охрана недр, 1965, № 10.
35.6. Блюминцев А. М., Фельдман И. И. Временные методические рекомендации по применению ядерно-геофизических методов исследования скважин на месторождениях железных руд и хромитов. М., ОНТИ ВНИИЯГГ, 1968.
35.7. Блюммер Г. Н. и др. Опыт применения геофизических работ на одном из массивов щелочных пород и карбонатитов.— В сб. «Геофизические работы при решении геологических задач в Восточной Сибири». Госторгтехиздат, 1961.
35.8. Боровко Н. Н. О применении геофизических методов при поисках редкометальных карбонатитов.— Сб. «Геофизика», вып. 3. Л., Изд. ВНИГИ, 1961.
35.9. Бреднев И. И., Соколова А. И. Радиоактивность горных пород и медноколчеданных руд Кировоградского района.— Тр. Свердловского горного ин-та, вып. 44, 1963.
35.10. Бузлов Г. А. и др. Радиометрическое опробование на полиметаллическом руднике.— Бюлл. науч.-техн. инф., 1962, № 3 (37).
35.11. Вахромеев Г. С. Возможности геофизических методов при поисках и разведке редкометальных карбонатитов.— Разв. и охрана недр, 1960, № 10.

35.12. Гвайта Т. И., Тер-Оганесов Я. Г. О поисках редких и рассеянных элементов радиоактивными методами.— Изв. АН АрмССР, геол. и геогр. науки, 1960, т. 13, № 3, 4.
35.13. Гинзбург А. И., Корчагин В. И. Месторождения редких элементов и особенности связанных с ними аэрогеографических аномалий.— В сб. «Геология месторождений редких элементов», вып. 20. Госгеолтехиздат, 1963.
35.14. Гинзбург А. И. и др. Наземные исследования на аэроаномалиях, характерных для некоторых типов редкоземельных месторождений.— В сб. «Геология месторождений редких элементов», вып. 20. Госгеолтехиздат, 1963.
35.15. Доронин А. Я. Опыт применения радиоактивных методов для установления тектонических зон.— Разв. и охрана недр, 1961, № 3.
35.16. Дубов Р. И. О методике геофизических поисков полиметаллических месторождений в Забайкалье.— Сов. геол., 1960, № 8.
35.17. Дубов Р. И. Радиометрические методы поисков.— Тр. Всес. науч.-иссл. ин-та методики и техники разведки, сб. 4, 1961.
35.18. Дубов Р. И. и др. Возможности применения радиометрии при поисках некоторых типов месторождений редких и цветных металлов.— Сб. «Новое в методике и технике геологоразведочных работ», вып. 2. Л., Гостоптехиздат, 1959.
35.19. Естественная радиоактивность медных руд из месторождения Нижне-Силезского бассейна.— Ат. энергия, 1962, № 10.
35.20. Иващенко Т. Ф. Возможности использования гамма-каротажа для подсчета запасов лопарита на примере одного месторождения.— В сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 4, «Недра», 1964.
35.21. Корчагин В. И. и др. Аэрогеографические методы поисков месторождений редких элементов.— В сб. «Геология месторождений редких элементов», вып. 20. Госгеолтехиздат, 1963.
35.22. Корчагин В. И. и др. Методика проведения аэрогеофизических поисков месторождений редких элементов.— В сб. «Геология месторождений редких элементов», вып. 20. Госгеолтехиздат, 1953.
35.23. Крутиховская З. А., Шмидт Н. Е. Геофизические методы поисков и разведки железорудных месторождений. Госгеолтехиздат, 1961.
35.24. Леман Е. П. и др. Опыты применения геофизических исследований в скважинах при разведке золоторудных месторождений в Южной Якутии.— Разв. и охрана недр, 1963, № 1.
35.25. Миллер С. Д. Геофизические работы на редкие и цветные металлы в Центральном Казахстане.— В сб. «Производительные силы Центрального Казахстана», т. 2. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1959.
35.26. Миллер С. Д., Соколов А. П. Геофизические поиски рудных месторождений в Казахстане.— В сб. «Геология, методика и техника разведки, лабораторные работы». Алма-Ата, 1961.
35.27. Михельсон И. С. Каротажный комплекс при разведке месторождений боксита Амагельдинского района.— Тр. Каз. горнометаллургического ин-та, 1959, № 16.
35.28. Мокхем Р. М. Аэрорадиометрические съемки при геологических исследованиях. М., ОНТИ ВИМС, вып. 21, 1962.
35.29. Мочульский Н. В. Возможности полевого гамма-спектрометрического метода при геолого-геофизических исследованиях.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1963, № 1 (45).
35.30. Мочульский Н. В. Применение радиометрических методов при поисках, разведке и изучении карбонатитовых месторождений.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1963, № 3 (47).
35.31. Островский Э. Я., Корчагин В. И. Аэрогеофизические методы и возможности их применения при поисках месторождений полезных ископаемых.— В сб. «Геологические месторождения редких элементов», вып. 20. Госгеолтехиздат, 1963.
35.32. Рыбаков Л. А. Опыт использования материалов аэрогеофизических съемок для поисков редкометальных месторождений.— Бюлл. науч.-техн. инф. ВИМСа, 1962, № 2 (36).
35.33. Рыбаков Л. А. Применение аэрогеофизических методов при поисках карбонатитовых месторождений.— Бюлл. науч.-техн. инф., 1961, № 4 (32).
35.34. Смирнов Б. В., Герасимов В. А. Использование эманационной съемки для поисков медноколчеданных месторождений.— Разв. и охрана недр, 1960, № 5.
35.35. Ушакова А. М. Использование данных гамма-каротажа при литологическом расчленении пород Кременчугской железорудной полосы.— Геофизич. сб. Ин-та геофизики АН УССР, 1963, вып. 6 (8).
35.36. Федоров А. А., Очкур А. П., Митов А. Н., Яншевский Ю. П. К использованию полупроводниковых детекторов в радиоизотопном рентгенофлюоресцентном методе.— Ат. энергия, 1970, т. 28, вып. 5.
35.37. Хесин Б. Э. Рудная геофизика в горных областях. «Недра», 1969.
35.38. Хесин Б. Э., Саттаров И. Х. Эффективность гамма-каротажа на Филизчайском и Дашкесанском рудных полях.— Изв. АН АзССР. Наука о Земле, 1967, № 6.

35.39. Цигельман И. С. Опыт применения радоновой съемки при поисках полиметаллического оруденения.— Зап. Ленинградского горного ин-та, 1959, т. 36, № 2.
35.40. Шейдин Я. Г. и др. Применение шпуровой радиометрической съемки при поисках типов редкометальных месторождений.— Разв. и охрана недр, 1960, № 7.
35.41. Шкворов В. А., Ковалева К. В. Протерозойские радиоактивные конгломераты.— В сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 3. Госгеолтехиздат, 1961.
35.42. Щукин Б. Н. Опыт применения радиогидрогеологического метода поисков редкоземельных месторождений.— В сб. «Материалы по геологии и полезным ископаемым Бурятской АССР», вып. 8. Улан-Удэ, 1962.
35.43. Adams J., Richordson K. Thorium, uranium and zirconium concentration in bouxite.— Economic Geology, 1960, v. 55, № 8.
35.44. Beress B. Spectralis gamma-karottazs lehetosgeirol.— Magyar geofiz., 1967, v. 8, № 4.
35.45. Постельников А. Ф., Зив Л. А., Костин В. Л., Куренко Е. Я. Ядерный метод опробования скважин и горных выработок на месторождениях никеля и меди. ЦНИИГРИ, вып. 80, 1969.

Литература к главе 36

36.1. Бондарев В. М., Губанов В. Г., Коровин П. К., Овчинников А. К., Хайкович И. М. Гамма-опробование урановых руд в естественном залегании. «Недра», 1964.
36.2. Козлов Ф. В., Тененбаум И. М. Систематические ошибки гамма-опробования и возможные пути их устранения.— Ат. энергия, 1962, т. 12, вып. 6.
36.3. Методы поисков урановых месторождений. «Недра», 1969.
36.4. Петров Г. И., Кутенков М. В., Тененбаум И. М., Евсеева Л. С. Методы геолого-геофизического обслуживания урановых рудников. Атомиздат, 1960.
36.5. Посик Л. Н., Кошелев И. В., Бовин В. П. Радиометрический экспресс-анализ добытых руд. Атомиздат, 1960.
36.7. Пухальский Л. Н. Теория контрастности урановых руд. Атомиздат, 1963.
36.7. Сердюкова А. С., Дощечкин В. П. О возможности гамма-спектрометрии в каротаже скважин при наличии в них радона.— Изв. вузов. Геол. и разв., 1969, № 12.
36.8. Тененбаум И. М. Основы рудничной радиометрии. Атомиздат, 1961.
36.9. Методы рудной геофизики, вып. 9. Л., «Недра», 1970.
36.10. Токарев А. Н., Щербаков А. В. Радиогидрогеология. Госгеолтехиздат, 1956.
36.11. Шашкин В. Л. Опробование радиоактивных руд по гамма-излучению. Атомиздат, 1972.
36.12. Лучин И. А. Способ предсказывания времени землетрясений в сейсмоактивном районе. Авт. свид. № 284331.— Реф. ж. «Геофизика», 1971, № 9 Г84П.
36.13. Уломов В. И. На пути к прогнозу землетрясений.— Земля и Вселенная, 1968, № 3.
36.14. Уломов В. И., Мавашев Б. З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения.— Доклады АН СССР, 1967, т. 176, № 2.
36.15. Применение ядерных излучений в геофизических исследованиях. Сб. науч. тр. ИГИГ СО АН СССР, 1973.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютная радиоактивность I:15
Автомобильные методы (съемки) I: 225, 226, 316, 349, 368—370, 408; II: 28—29, 63—65, 120, 152—153, 271—280
Азот I: 6, 54 61, 62, 104, 262, 268; II: 8, 80, 187, 189, 195, 218, 302, 344
Активационные детекторы (индикаторы) I: 101—104, II: 45—57, 75, 197, 198
Активность источника (препарата) I: 15, 16, 183, 184
Актиний (актиноуран или уран-235) I: 19, 20, 98, 100, 103; II: 215, 216, 229
Алмазы II: 309
Альбедо
— альфа-частиц I: 259
— бета-частиц I: 272
— гамма-квантов I: 423—427
— нейтронов II: 273
Альфа-излучение (частицы) I: 6, 200
— взаимодействие с веществом I: 29—32, 260—262
— детектирование (измерение) I: 79—81, 85, 86, 91, 92, 100, 259
— излучатели I: 19, 27, 103, 262; II: 177
— область применения I: 259—269, 292, 294, 309, 310; II: 185—188
— пробег I: 30, 262, 263
— реакции I: 6, 25, 26, 29, 31, 204, 262—269; II: 186—188
— экранирование I: 62, 262
Альфа-активационный анализ (АА) I: 268, II: 186—188
Альфа-альфа-метод (ААМ) I: 259—263; II: 185, 186
Альфа-гамма-метод (АГМ) I: 265—268; II: 186
Альфа-метод (АМ) I: 205
— ионизационный (АМи) I: 269
— поглощения (АМп) I: 269
Альфа-нейтронный метод (АНМ) I: 263—265; II: 185
Альфа-протонный метод (АПМ) I: 259, 262, 263
Альфа-распад I: 14
Алюминий I: 24, 26, 35, 38, 51, 52, 85, 104, 192, 206, 262, 263, 268, 269, 276, 286, 310; II: 78, 80, 98, 99, 111—114, 127—129, 187, 189, 200, 193—194, 208, 212, 217, 218, 221, 224, 225, 226, 227, 268, 276—278, 294, 295, 314, 315, 344
Америций I: 26, 414
Амплитуда импульса (сигнала) I: 81, 83, 90, 99
Амплитудное разрешение детекторов, см. разрешающая способность
Амплитудно-временные анализаторы I: 113, 126—129, 170—172
Амплитудные анализаторы I: 113, 115—123, 164—170
— лабораторные I: 165, 166, 168—170
— полевые (переносные) I: 164, 165, 222
— скважинные I: 166—168, 316
Анализ излучений, см. спектрометрия I: 81, 83, 84, 88, 98—100
Анализаторы, см. амплитудные анализаторы
Аннигиляция пар I: 110
Аргон I: 83, 264; II: 223
Атомные ядра I: 29—32; II: 182—196
— ослабление потока I: 32
— потери энергии I: 30
— применение в анализе II: 182—196
— пробеги I: 19, 30, 31, 262
— процессы взаимодействия с веществом I: 29
— сечения взаимодействия I: 31, 32
Аэросъемка I: 195, 226—229; II: 271—276, 278—280, 329

Б

База I: 361
Барий I, 289, 310, 314, 315, 320, 323, 324, 416, 451—454; II: 203, 207, 208, 225, 227, 326, 344
Барн I: 18
Бериллий I: 25, 26, 27, 47, 83, 105, 204, 253, 263—265, 266—268, 304, 318; II: 138—145, 148—163, 185, 187, 192, 193, 197—200, 269, 271, 278, 280
Бериллометры I: 105; II: 140—142; 148—163
Бета-бета-метод I: 269—289
— многократных отражений (ББМ′) I: 276, 281—283
— однократных отражений (ББМ) I: 269—281, 283—289
Бета-, гамма-каротаж (Б, ГК) I: 250, 251
Бета-, гамма-метод (Б, ГМ) I: 205, 208—210
Бета-гамма-метод (БГМ) I: 290—292
Бета-излучение (β-частицы, электроны) I: 6
— взаимодействие с веществом I: 32—38
— влияние состава среды I: 278, 279
— структуры среды I: 278
— фильтров I: 276—278, 285
— детектирование (измерение) I: 77, 80, 81, 85, 86, 92, 100, 279—283
— диффузия I: 33, 34, 270
— излучатели I: 22, 27, 274, 306; II: 167
— коэффициент ослабления I: 18, 38, 271

— критическая энергия I: 35
— область применения I: 206, 208—210, 269—292, 303—306; II: 176
— ослабление в веществе I: 38
— потери энергии I: 34, 35
— пробег I: 19, 33, 37, 38
— процессы взаимодействия I: 32—34, 270
— радиационные потери I: 34, 35
— рассеяние I: 32—34, 269—289
— спектры отражения I: 274—276, 277
— первичные I: 22, 275
— толщина насыщения обратного рассеяния I: 33, 34, 270, 271
— торможение I: 22—24, 27, 34—36, 39
— угловые характеристики обратного рассеяния I: 271, 272
— эффективный атомный номер I: 36, 286
Бета-метод (каротаж), БМ(БК) I: 206, 211, 222, 250, 251
— поглощения (БМп) I: 289—290
Бета-нейтронный метод (БНМ) I: 192, 193, 291, 292
Бета-распад I: 6, 14
Бетатрон II: 174, 175
Бетон I: 193, 194
Биогеохимическая съемка II: 332
Ближняя (промежуточная) зона I: 357, 396—408
Бор I: 25, 26, 54, 66, 71, 73, 81, 82, 84, 88, 95—98, 100, 101, 110, 111, 113, 193, 194, 262, 264, 266—268; II: 9—11, 14, 39—44, 55—57, 61—77, 79, 80, 87, 93, 185, 186, 187, 189, 193, 195, 218, 250, 272, 308, 309, 345
Бром II: 203, 220, 221, 227, 345

В

Ванадий I: 310; II: 114, 115, 224, 225, 226, 227, 345
Весовые методы определения
— влажности I: 342
— плотности I: 335
Висмут I: 24; II: 227, 345
Влагомеры
— автомобильные II: 28, 29, 272
— зондовые I: 350; II: 29—31
— лабораторные I: 342, 343; II: 8—9, 13—16
— пенетрационно-каротажные, см. зондовые
— приставные (поверхностные) I: 22—24
— скважинные II: 30, 31, 88, 89
Влажность пород (грунтов) I: 342, 343, 350, 354, 355; II: 8, 9, 13—16, 22, 26—31, 88, 89, 211, 272, 298, 299
— весовая I: 342; II: 26
— объемная, см. насыщенность
Влияние изменений
— — вещественного (химического) состава горных пород I: 205, 206, 212, 219, 220, 286—288, 300—303, 329, 330, 359, 360, 419; II: 18—20, 28, 43, 44, 58—60, 87, 143, 144, 150
— — влажности пород I: 206, 212, 234, 235, 236, 288, 334; II: 11, 25, 43, 150
— — глинистой корки I: 357, 391—396, 421, 453; II: 24, 34, 90
— — диаметра скважин I: 242—245, 378—380, 427; II: 33—35, 66, 76, 90, 124, 160—161
— — заполнителя скважин I: 242—245, 380; II: 33—35, 64, 141, 161, 304
— — краевых эффектов I: 366; II: 151
— — кристаллизационной (связанной) воды II: 19
— — неоднородностей I: 74—76, 314, 421
— — неровностей облучаемой поверхности I: 303, 314, 315, 365, 366, 369, 421; II: 28
— — плотности пород I: 302, 422; II: 150
— — пористости пород I: 382
— — эксцентриситета прибора I: 244, 245; II: 24, 34, 244
Внешнее облучение I: 189—191
Внутреннее облучение I: 191
Внутренняя конверсия, см. гамма-излучение
Вода I: 28, 49, 51, 58, 64, 70, 73, 193, 194; II: 8, 9, 301
Водонефтегазонасыщенность II: 91, 92, 247, 303—306
Водонефтяной контакт (ВНК) II: 38, 94, 101, 133—137, 246—248, 258—263, 266, 269, 270, 303—306
Водород I: 28, 54, 55, 57, 193, 290; II: 7—8, 9, 14, 15, 38, 211, 213
Возраст нейтронов, см. нейтроны
Вольфрам I: 27, 289, 310, 314, 320, 323, 327—437, 438; II: 102, 118, 197, 201, 220, 222, 224, 225, 227, 260, 333, 345
Временные анализаторы I: 113, 123—126; II: 232, 246
Временное окно II: 234, 246
Время восстановления счетчика, см. мертвое время
Время задержки II: 233
Вторичные реакции II: 182, 188, 229, 230

Г

Гадолиний I: 214, 327; II: 44, 215, 227, 260
Газожидкостный контакт (ГЖК) II: 92, 247, 248, 258, 303—306
Газоразрядные счетчики Гейгера — Мюллера I: 80, 84—88, 325; II: 233
Гамма-активационные методы (ГА) II: 201—210, 269, 270
Гамма-бета-метод (ГБМ) I: 321—325
Гамма-гамма-метод плотностной (ГГМ-п) I: 356—412
— двухзондовый (ДГГМ^1-п) I: 388—396
— двухлучевой (ДГГМ-п) I: 396—408; II: 296—298
— диффузный (ГГМ-п) I: 372—384
— импульсный (ИГГМ-п) I: 408, 409
— компенсационный (КГГМ-п) I: 391—396
— однозондовый (ГГМ-п) I: 361—384, 410—412
— однолучевой (ОГГМ-п) I: 362, 384—388
Гамма-гамма-метод резонансного поглощения (ГГМрп) I: 321, 331, 334
Гамма-гамма-метод селективный (ГГМ-с) I: 412—458
— — интенсиметрический (ГГМ-с)
— — — двухисточниковый (ДГГМ-с) I: 427—429, 431, 432, 444, 445
— — — — многократного рассеяния (ГГМ-с) I: 413—415, 416—422, 431, 433, 434—441
— — — обратного рассеяния (ГГМО) I: 423—427, 431, 432, 441—444
— — спектрометрический (СГГМ-с)
— — — комбинированных измерений (ГГМ-ск) I: 453—455

Гамма-гамма-метод селективный интенсиметрический одноканальной спектрометрии (СГГМ-с) I: 419—422, 446.
— — — релеевского рассеяния (ГГМрр) I: 413
— — — спектральных отношений (ГГМ¹-с) I: 416, 422, 446—453
Гамма-гамма-метод селективно-плотностной (ГГМ-сп) I: 455—458
Гамма-гамма-цементомеры (ГГЦ) I: 410—412
Гамма-излучение и рентгеновское излучение I: 6, 14, 39
— альбедо I: 423
— взаимодействие с веществом I: 39—53
— внутренняя конверсия I: 42, 325
— детектирование (измерение) I: 77, 81, 82, 83, 86—88, 92—95, 100, 105—110
— излучатели I: 22—25, 27, 294, 322, 329
— комптоновское рассеяние I: 44—46, 87, 92, 105, 106, 356, 412
— коэффициент ослабления I: 18, 40—42, 44, 46, 47, 48—53
— область применения I: 206—210, 217—253, 292—458; II: 138—163, 196—210
— образование пар I: 47, 92, 106, 107, 110
— ослабление излучения I: 52, 53
— пробеги I: 19, 53
— резонансное поглощение I: 42, 325—331
— — рассеяние I: 42, 48, 321, 331—334
— релеевское рассеяние I: 43, 44, 413
— реакции с ядрами атомов I: 25, 47, 104, 105; II: 138—163, 196—210
— сечения I: 18, 41, 43, 44, 45, 46
— скачки поглощения I: 40, 50, 52, 94, 106, 251, 252, 293, 301, 414, 420
— спектр I: 105—107, 207, 220, 221, 230—233, 420
— томсоновское рассеяние I: 44
— флуоресценция I: 40, 106, 292—333
— фотоэлектрический эффект (фотоэффект) I: 39—42, 48—50, 52, 87, 89, 92, 94, 105—109, 293, 321, 322, 357, 412
— фотоядерный эффект I: 47, 48, 104, 105; II: 138—163, 196—210
— экранирование I: 176, 177, 192, 223, 224, 228, 300, 301, 326, 336, 357, 359, 360; II: 85
— эффект Мессбауэра I: 42, 43, 325—334
— эффект Оже I: 40
— эффективный атомный номер вещества I: 49—52
Гамма-каротаж (ГК) I: 240—250; II: 37, 162, 257—259, 294, 306, 310, 311, 330
— градиентометрический (ГКг) I: 248
Гамма-метод (ГМ) I: 206—208, 210; II: 313, 323, 329, 330
Гамма-метод просвечивания (ГМп) I: 335—356
— — плотностной (ГМп-п) I: 335—351; II—28
— — селективный (ГМп-с) I: 351—356
Гамма-метод рассеянного излучения (ГМр) I: 251—253
— — — плотностной (ГМр-п) I: 252
— — — селективный (ГМр-с) I: 251, 252; II: 333
— — — спектральных отношений (ГМ¹р) I: 252
Гамма-метод резонансного поглощения (ГМрп) I: 325-331.
Гамма-нейтронный (фотонейтронный) метод (ГНМ) I: 253; II: 138—163, 197—201, 313
Гамма-постояннная I: 16
Гамма-спектрометры I: 109, 110, 164—172, 222, 230
Гафний I: 69, 199, 203, 204, 207, 216, 217, 223, 256
Гелионный анализ I: 184
Гелионы (гелий-3) I: 27; II: 188
Геологическое картирование II: 289—294
Германий II: 202, 215, 223
Гидравлический разрыв пластов II: 281, 282
Глубинность исследования
— альфа-методов I: 263
— бета-методов I: 206, 211, 222, 270, 271
— гамма-методов I: 218, 245, 315, 333, 364, 365, 374, 375, 421, 425—427, 429; II: 151, 156
— импульсных нейтронных методов II: 243, 244, 255, 261, 262
— ионных методов II: 183
— нейтронных методов II: 20, 21, 28, 61, 64, 86, 88, 124, 265, 275
— эманационных методов I: 236
Глубинный гамма-метод (съемка) I: 238—240
Гольмий I: 214; II: 46, 227, 260
Градуирование приборов, см. эталонирование
Грамм-эквивалент радия (г·экв·радия) I: 15, 16
Графит I: 288
Грубые ошибки I: 173

Д

Деление ядер I: 7, 14, 26, 54; II: 210, 211, 215, 216
Дейтерий I: 6, 27, 28, 47, 105; II: 145—148, 200, 201, 230
Дейтериометры I: 105; II: 146—147
Дейтронные методы II: 188—191
Дейтроны дейтоны I: 27, 28, 30; II: 167, 168, 177, 188, 229
Детекторы (счетчики) излучений I: 78—113
Дешифраторы I: 156, 157
Дискриминаторы I: 116, 117, 136—140, 148, 165, 168
Диспрозий I: 214; II: 44, 46, 54, 198, 215, 225, 227, 260
Дифференциальное эффективное сечение I: 18
Дифференциальные фильтры I: 300, 301, 319, 329
Диффузионное уравнение I: 235
Диффузия
— бета-частиц I: 33, 270
— гамма-квантов I: 416—418
— нейтронов, см. нейтроны
— эманаций I: 234
Длина диффузии
— гамма-квантов I: 417
— тепловых нейтронов, см. нейтроны
— эманаций I: 235
— замедления нейтронов, см. нейтроны
Доза I: 15, 16, 189, 190
Дозиметрия I: 188—192
Дозиметры I: 114, 191, 192

Е

Европий I: 214; II: 44, 46, 225, 227, 260
Единица заряда I: 14
— массы I: 13
Единицы радиоактивности I: 15, 16
Естественная радиоактивность I: 6, 19
— атмосферы I: 198
— вод I: 198
— горных пород I: 198
— земной коры I: 197—199
— лунных пород I: 199
— метеоритов I: 197

Ж

Железо I: 24, 95, 104, 177, 194, 260, 263, 289, 291, 310, 315, 316, 317, 321, 323, 327, 330, 331, 341, 354, 359, 368, 382, 435, 436, 441, 442—449; II: 44, 68, 78, 79, 81, 82, 98, 206, 208, 212, 215, 219—221, 225, 227—251, 278, 317—319, 346

З

Закон накопления радиоактивных ядер I: 101; II: 102, 103, 122
— нормального распределения I: 174
— ослабления бета-излучения I: 38
— — гамма-излучения I: 52, 53
— — заряженных частиц I: 32
— Пуассона I: 174
— радиоактивного распада I: 14
Замедление нейтронов, см. нейтроны
Запаздывающие нейтроны I: 54; II: 209, 210, 228, 229, 268, 269
Защита от излучения I: 192—194
Золото I: 27, 37, 102, 104, 262, 312, 313; II: 46, 54, 55, 99, 119, 204, 211, 223—225, 227
Зольность углей I: 217, 285—288, 341, 353, 354, 381, 413—415, 441, 442, 446, 447; II: 95—97, 100, 101, 129, 306—308
Зона проникновения II: 243, 303
Зонд инверсии I: 357, 358, 422, 454; II: 25
— насыщения I: 419

И

Измерение отношения скорости счета I: 152
Измерители скоростей счета I: 149—151
Изобары I: 14
Изотоны I: 14
Изотопный анализ II: 190, 191, 228, 230
Изотопы I: 6, 14
Изучение движения вод II: 137, 138, 256, 267, 281, 282, 283
Импульсный генератор II: 172
— гамма-нейтронный метод (ИГНМ) II: 198, 199, 270
— нейтронно-активационный+гамма-нейтронный метод [И (НА+ГН)М] II: 269
— нейтронный гамма-метод (каротаж) неупругого рассеяния нейтронов (ИНГМ[1]) II: 231, 233, 260—264, 271, 272
— — — — — — радиационного захвата нейтронов (ИНГМ) II: 231, 233, 253—260, 271, 280, 299, 300, 304
— — — на мгновенных нейтронах (ИННМ-м) II: 268, 269, 334
— — — на резонансных нейтронах (ИННМ-р) II: 211
— — — (каротаж) на тепловых нейтронах (ИННМ) II: 211, 231, 233, 234—253, 271, 277, 299, 300, 303, 304
Инверсия I: 357, 358, 422, 454; II: 21
Индий I: 102, 112, 314; II: 44, 46, 52—54, 75—117, 203, 211, 224, 225, 227, 260, 346
Инжектор II: 281
Интенсивность излучения, см. поток
Интенсиметры I: 113, 114, 115, 149—151
Иод I: 104, 306; II: 224, 283, 346
Ионизационные детекторы I: 80—88
— камеры I: 81—83, 280, 288
Ионные методы II: 183—185
Иридий II: 50, 204, 213
Исключение (ослабление) влияния изменений
— — — — аппаратурных факторов I: 303, II: 97
— — — — — ближней зоны I: 396—408
— — — — — вещественного (элементного) состава пород I: 287, 288, 302, 303, 315, 329, 359, 360, 451—454; II: 43, 44, 52, 97, 121—143, 144
— — — — — влажности I: 39, 54—56; II: 93, 97, 121, 259
— — — — — геометрических условий I: 303
— — — — — глинистой корки I: 391—396
— — — — — диаметра скважин I: 303, 378—380, 390, 391, 428; II: 96, 97
— — — — — заполнителя скважины II: 34, 35
— — — — — неровностей облучаемой поверхности I: 302, 303, 314, 315, 318, 365, 366, 428, 429
— — — — — плотности пород I: 302, 315, 318, 353, 425, 451; II: 97
— — — — — радиоактивности пород I: 388—390
— — — — — толщины проб (образцов) I: 353
Искусственная (наведенная) радиоактивность I: 6, 14, 268, 269; II: 102—138, 184, 186—190, 195, 196, 201—210, 216, 230, 264—270
Испускание гамма-лучей I: 14
Источники, соответствующий вид излучений
— ионов I: 27; II: 177
— электронов I: 27, 304; II: 176
Иттербий I: 215; II: 227
Иттрий I: 22, 23, 24, 214, 306; II: 146, 203, 220

К

Кадмий I: 25, 29, 82, 103, 104, 110—113, 414; II: 44, 68, 69, 76, 84, 85, 203, 206, 215, 227, 250, 260, 347
Калий I: 19, 98, 177, 197—199, 204, 206, 207, 209, 210, 211, 212, 221, 223—225, 229, 250, 269, 324; II: 114, 205, 208, 219, 224—226, 278, 311, 312, 347
Калифорний I: 26
Кальций I: 286, 310, 315; II: 78, 80, 84, 95, 127, 190, 212, 224, 225, 228, 278, 347
Камеры деления I: 103; II: 216
Керномер I: 360, 361, 414, 415; II: 41, 145, 245
Кислород I: 204, 260, 263, 264; II: 9, 78, 100, 101, 187, 188, 189, 195, 197, 200,

205, 208, 209, 212, 217, 218, 230, 263, 265—267, 278, 347
Кобальт I: 24—26, 336; II: 115, 116, 224, 225, 227, 250, 347
Коллимация I: 88, 106, 109, 110, 176, 318, 319, 336, 339, 351, 361, 362, 384—388, 390, 393, 396—405, 414
Комптон-эффект, см. гамма-излучение
Конвекция эманации I: 235
Кондуктор для ввода зондов I: 344, 345, 356
Контейнер I: 194, 339, 286; II: 27, 30
Корреляционная связь I: 212—217, 341, 368, 435; II: 68, 129, 245, 252, 310
Корреляция разрезов II: 295
Космическое излучение I: 82, 175—177, 200—204, 222, 223, 228, 229—234, 254, 255; II: 153
Коэффициент
— — внутренней конверсии I: 42, 325
— — диффузии нейтронов, см. нейтроны
— диффузии эманации I: 235
— заполнения пор I: 342
— надежности I: 174, 186
— нарастания (накопления) рассеянного гамма-излучения I: 53, 193, 363
— насыщенности, см. насыщенность
— пористости, см. пористость
— эманирования I: 234
Кремниевый модуль II: 128
Кремний I: 204, 260, 262, 263, 264; II: 78, 80, 84, 94, 95, 111—113, 129, 130, 195, 205, 208, 212, 217, 218, 221, 222, 225—227, 263, 267, 278, 347
Кристаллические счетчики I: 98, 99
Кристаллическая энергия I: 229, 419, 420
Кулоновский барьер I: 31
Кюри (единица) и ее производные I: 15
Кюрий I: 26, 262; II: 110, 180, 181

Л

Лантан I: 214; II: 227
Линейный коэффициент ослабления гамма-излучения I: 18, 40, 53, 219, 222, 227, 241, 298, 335, 387, 417; II: 124, 140, 253, 255, 261
Литий I: 7, 27, 28, 29, 82, 96, 97, 100, 191, 253, 261, 265, 266; II: 9—11, 44, 55—57, 188, 192, 193, 200, 230, 347
Литологическое расчленение пород II: 294
Логарифматоры I: 152—156
Луна (излучение) I: 230—234, 264, 321
Люминесценция I: 31, 79, 88
Люминофоры I: 88, 89, 91, 92, 93, 94—98
Лютеций I: 214; II: 46, 203, 227, 348

М

Магний I: 104, 260, 262—264, 269; II: 78, 193, 194, 205, 212, 218, 221, 225, 227, 263, 278, 348
Макроскопическое сечение I: 18, 56; II: 8, 256
Марганец I: 24, 101, 102, 289, 310; II: 44, 67, 68, 80, 98, 99, 115, 130, 131, 133, 137, 211, 219, 221, 224—227, 252, 259, 317, 348
Масса ядра I: 13, 54
Массовое макроскопическое сечение I: 18
Массовый коэффициент ослабления гамма-излучения I: 19, 40—42, 44, 46—48, 50, 298, 326, 336, 363, 387, 397; II: 152, 279
— — — — кобальтового источника I: 336
— — — — цезиевого источника I: 336
Массовый эффективный коэффициент I: 337, 338
Медь I: 105, 294, 306, 310, 323; II: 84, 85, 98, 116, 120, 131—133, 188, 206, 208, 219, 224, 225, 227, 320, 321, 348
Мертвое время I: 79, 84, 88, 99, 181
Методы
— меченых атомов II: 280—283
— радиоизотопные I: 7, 8, 257, 458; II: 7—163, 222, 223, 225—230
— радиометрические I: 7, 8, 195, 204—255
— ускорительные I: 7, 8: II: 133—225, 231—280
— ядерно-геофизические I: 8
Микротрон II: 175, 176
Многокристальные гамма-спектрометры I: 108—110
Многомерные анализаторы I: 126—129, 171, 172
Моделирование задач II: 23
Молибден I: 24, 294, 307, 310, 312, 314: 320, 323; II: 206, 216, 223, 324
Мониторирование I: 104; II: 198, 233
Морская съемка I: 226, 407, 408; II: 99
Мощность дозы I: 16, 189, 190
Мышьяк I: 306; II: 75, 223, 225, 227
Мюонный I: 254

Н

Насыщенность I: 58, 72, 342; II: 26, 248, 301
Натрий I: 24—26, 263, 264, 269, 507; II: 114, 133, 135—137, 189, 190, 194, 217, 225—227, 278, 312
Нейтрино I: 14, 53, 54
Нейтроновод II: 13
Нейтронно-осколочный метод (НОМ) II: 215—216
Нейтронные
— генераторы II: 177—179, 232
— размножители II: 179—180
— трубки II: 178, 179, 232
Нейтронные методы с регистрацией заряженных частиц по активирующимся изотопам II: 229, 230
Нейтронный активационный метод (НА) II: 51, 101—137, 216—228, 264—270, 277, 278
— — — на запаздывающих нейтронах (НАн) II: 228, 229, 268, 269, 332
— — — — совпадениях (НАзс) II: 101—102
Нейтронный альфа-метод (НАМ) II: 9—11
— гамма-метод (НГГМ) II: 77, 78, 86
— гамма-метод неупругого рассеяния нейтронов (НГМ) II: 77—79, 100, 101, 272
— — просвечивания (НГМп) II: 82
— — радиационного захвата нейтронов (НГМ) II: 77, 79—99, 212, 213, 275
— — с кадмиевым радиатором (НГМ-Cd) II: 77, 86, 88, 91, 92
— метод пропускания нейтронов (НМп) II: 31
Нейтрон-нейтронный метод (ННМ) II: 11—101

— быстрых нейтронов (ННМ-б) II: 15—16, 32
— двухзондовый (ДННМ) II: 32—35, 60, 69
— двухисточниковый (ДННМ) II: 60
— комплексный (ННМ-т, н) II: 58, 59
— надтепловых нейтронов (ННМ-н) II: 16, 43, 67—273
— отношений тепловых и надтепловых нейтронов (ННМ-т/н) II: 59, 60
— — резонансных нейтронов (ННМ-р) II: 44—57, 73—76
— — тепловых нейтронов (ННМ-т) II: 13—15, 40, 274, 275
Нейтрон-протонный метод (НПМ) II: 7—9, 211
Нейтроны I: 6
— атмосферы I: 202—204
— быстрые I: 28, 53, 54, 190, 191
— взаимодействие с веществом I: 53—57, II: 16—18, 57, 58, 234—244
— взаимодействие с ядрами I: 55, 56; II: 8, 9
— влияние неоднородностей I: 74, 75
— возраст нейтронов I: 59—63
— время замедления I: 63, 64, 70—72
— время термализации I: 67, 70—72
— горных пород и руд I: 204
— декремент затухания потока II: 244, 257
— детектирование (измерение) I: 81—84, 87, 88, 95—97, 100—104, 105, 110—112
— диффузия I: 68—76
— длина диффузии I: 69, 70, 73; II: 18
— длина замедления I: 58, 63; II: 18
— длина миграции I: 70—72
— длина термализации I: 67
— замедление I: 29, 56—64, 106, 263, 264; II: 12, 14, 223
— источники I: 25—28, 31, 32, 202—204; II: 164
— кажущееся время жизни I: 75
— кажущееся макроскопическое сечение I: 75, 76
— коэффициент диффузии I: 68, 69, 73; II: 18, 22
— коэффициент замедления I: 58
— логарифмическая энергия I: 57, 63
— макроскопическое сечение I: 56, 61, 75; II: 8
— массовые сечения I: 56, 61
— медленные I: 28, 53, 54, 110, 190
— мера эффективности замедления I: 58
— неупругое рассеяние (реакции n, $n'\gamma$) I: 54, 55, 61; II: 78, 79, 102
— область применения II: 7—137, 210—269, 267—277
— параметр замедления I: 58
— парциальная вероятность I: 57, 61
— радиационный захват (реакция n, γ) I: 55, 101; II: 50, 73, 79, 102
— рассеяние I: 53, 54; II: 7—8, 11—12
— реакция (n, p) I: 54, 62, 101, 104; II: 9, 102, 216
— реакция (n, α) I: 54, 62, 81, 84, 95, 96, 101, 104; II: 6, 11, 32, 102, 216
— реакция (n, $n'\gamma$) см. неупругое рассеяние
— реакция (n, $2n$) I: 48, 54, 62, 101, 104; II: 102, 216
— реакция (n, γ), см. радиационный захват
— реакция (n, 0) I: 54, 96, 100
— резонансные I: 28, 29, 53, 54, 111, 112
— символический возраст нейтронов II: 236
— спектр I: 27, 65—67, 111
— среднее время жизни тепловых нейтронов I: 68, 69, 72, 73; II: 236—238, 244, 245, 264
— среднее число столкновений I: 57
— средние длины свободных пробегов I: 56, 59, 61, 68, 73
— средний квадрат расстояния I: 58
— средний косинус рассеяния I: 57, 59, 70
— средняя логарифмическая потеря энергии I: 57—59, 61
— тепловые I: 28, 29, 54, 190
— транспортная длина I: 57, 70
— упругое рассеяние I: 53, 54
— холодные I: 54
— экранирование I: 101, 110, 111; II: 27, 29, 73, 85, 86
— экстраполированная длина свободного пробега II: 273
— эффективная температура I: 65, 66
— эффективная энергия I: 65—67
— эффективное сечение I: 66
Нейтронный каротаж I: 253, 254
Нейтронный метод I: 253
Неодим I: 214, 306; II: 207, 221, 227
Нефть II: 8, 14, 285, 301
Никель I: 104, 310, 387, 507; II: 79, 82—84, 98, 214, 227, 229, 319, 320
Ниобий I: 215, 306, 310, 311

О

Образование пар, см. гамма-излучение
Образцовые спектрометрические гамма-источники I: 24, 25
Объем исследованной породы I: 366, 381; II: 26
Одновременная регистрация гамма-лучей нейтронов I: 112, 113
Олово I: 23, 106, 294, 310, 314, 315, 320, 323, 328—331, 334, 437; II: 203, 221—227, 321, 322
Определение мощностей пластов I: 180, 242, 243, 247, 379—381; II: 156—160
Оптимальная скорость НАК-т II: 123
Оптимальный размер зонда I: 363, 364, 378, 421, 422; II: 24, 255
Осколки-деления I: 103; II: 216, 267
Осмий II: 227
Ошибки измерений, см. погрешности
Ошибки отношений I: 175

П

Палладий II: 212, 227
Парафин I: 29, 193, 194
Пенетрационно-каротажные методы, см. глубинный гамма-метод I: 238
Пенетрационно-каротажная станция I: 238—240
Пересчетные схемы I: 140—149
Период полураспада I: 14; II: 105
Пешеходные методы: I: 221—224, 314—316, 361—368, 431, 435, 442, 444; II: 26—28, 61—63, 119, 120, 148—152
Пик обратного рассеяния I: 105—107, 372
Платина II: 204, 212
Плотномеры

— автомобильные и т. п. I: 349, 368—370
— донные I: 408
— зондовые I: 342, 344, 349, 372—364; II: 30
— лабораторные I: 339, 340, 360
— приставные (поверхностные) I: 361, 362, 370—372; II: 27
— скважинные I: 351, 373—376, 388—391, 402—405, 455—458; II: 32
— торцовые I: 371
Плотность буровой жидкости I: 351
— пород I: 17, 72, 73, 336, 338, 340—342, 348—350, 354, 355, 367, 368, 370, 383—388, 390, 405—408, 455—458; II: 296—298, 300
Плужная съемка I: 226
Плутоний I: 19, 22, 26, 103, 263, 266
Погрешности аппаратуры I: 177—180
— (ошибки) измерений I: 173, 186, 338, 339, 348, 352, 399, 400; II: 106, 248
Позитрон I: 6, 14, 47, 106, 110, 200
Полевые исследования (съемка)
— автомобильными приборами; см. автомобильные методы
— переносными зондовыми приборами I: 343, 344, 349, 356
— переносными приставными приборами, см. пешеходные методы
— самолетными (вертолетными) приборами, см. аэросъемка
— скважинными приборами, см. соответствующие методы каротажа
— эманометрами, см. эманационный метод
Полоний I: 19, 22, 25—27, 168
Полуимпульсные нейтронные методы II: 11, 101, 139
Полупроводниковые счетчики I: 98—101, 312
Пористость I: 58, 72, 75, 361, 385, 387, 390; II: 32, 36—38; 89—91, 248, 249, 299—301
Порог чувствительности I: 186—188, 284, 315; II: 106
Постоянная распада I: 14, 101, 103; II: 105
Поток частиц I: 15, 16, 103, 190, 200, 203, 204, 416—419; II: 109, 110
Празеодим I: 104; II: 207, 221, 227
Предельно допустимые концентрации радиоактивных изотопов I: 191; II: 284
Предельные ошибки I: 184
Принцип подобия I: 349, 363, 364
Прогнозирование землетрясений I: 291
Прометий I: 22; II: 46
Пропорциональные счетчики I: 83—84, 309
Протон I: 6, 14, 27, 28, 30, 53, 200, 260, 262, 263, 507; II: 7
Протонные методы II: 190—196

Р

Радиационные пояса Земли I: 200
Радий I: 19, 25—27, 195—199, 204, 220, 221, 226, 229
Радиоактивность I: 5, 13—15, II: 102
Радиоактивные изотопы (элементы) I: 13, 14, 19—22, 24—26
Радиогеология I: 7
Радиогеохимия I: 7
Радиогидрогеология II: 331, 332
Радиометрия I: 7
Радиометры
— лабораторные I: 161
— полевые I: 132, 161—164
— скважинные I: 114, 115, 189
Радиус ядерных частиц I: 13
Разрешающая способность прибора I: 181, 182; II: 183
— энергетическая способность детекторов I: 79, 83, 91, 100, 109, 110
Рассеяние
— альфа-частиц I: 31
— бета-частиц (электронов) I: 32, 33
— гамма-квантов I: 43—46, 298—300, 377, 378
— нейтронов I: 54; II: 7, 8, 12
Редкие земли I: 214, 215, 312; II: 72, 73, 259, 323, 324
— и рассеянные элементы II: 327—329
Рений I: 102; II: 227
Рентген (единица) и его производные I: 16
Рентгеновские трубки I: 303—305, 414
Рентгено-радиометрические методы (РРМ) I: 292—320
— альфа-характеристический (АХМ) I: 292, 294
— бета-характеристический (БХМ) I: 292, 294, 306
— гамма-характеристический (ГРМ) I: 292, 294, 307—309, 312, 315; II: 332
— рентгено-характеристический (РХМ) I: 292, 303, 414, 415
— характеристический метод поглощения (ХМп) I: 292, 313, 314
— характеристический-характеристический (ХХМ) I: 292, 306—312
Родий I: 102; II: 45, 146, 203, 214, 224, 227
Ртуть I: 24, 25, 177, 288, 289, 294, 320, 323, 354, 356, 434, 438, 443, 445, II: 44, 63, 69—73, 98, 201, 204, 214, 222, 227, 250, 259, 324, 325
Рубидий II: 224, 227
Рудничная радиометрия II: 332, 333
Рутений II: 146, 227

С

Самарий I: 113, 214; II: 44, 46, 75, 215, 222, 227, 259
Свинец I: 22, 26, 50, 106, 177, 194, 222, 288, 289, 294, 300, 305, 306, 310, 313—315, 320, 323, 354, 356, 415, 416, 434, 435—440, 442, 445, 453—455; II: 184, 207, 325—327
Селен I: 55, 306; II: 116, 117, 203, 206, 221, 227
Сера I: 288, 289; II: 8, 78—81
Серебро I: 102, 104, 105, 313; II: 45, 50—52, 99, 117, 198, 203, 206, 213, 214, 224, 227, 259, 278, 326
Систематические ошибки I: 172, 181, 182
Системы питания радиометров I: 130—133
Скандий I: 24, 223
Скважинный генератор нейтронов II: 231, 232
Скорость счета I: 119, 174
Случайные ошибки I: 173, 174, 175, 182
Состав ткани человека I: 188
Спектр рассеянного гамма-излучения I: 218—221, 251, 252, 419—422, 445, 446
Спектральные отношения

— гамма-гамма-метода селективного I: 413, 414, 416, 422, 423
— гамма-метода рассеянного излучения I: 252
— нейтронно-активационных методов II: 82, 87, 96, 101
— рентгено-радиометрических методов I: 301—303, 315, 316, 318, 319
Спектрометрия гамма-излучения I: 79, 83, 88, 90—92, 94, 105—110, 206—208, 220, 221, 229, 230
—нейтронов I: 104, 111, 112
Сталь I: 177
Статистические погрешности I: 174, 175, 177—179, 430
Стронций I: 22; II: 199, 202, 217, 223
Сурьма I: 25, 104, 288, 289, 294, 305, 310, 315, 320, 323, 387, 434, 436, 437, 442, 443, 445, II: 75, 139, 207, 259, 322, 323
Схемы
— антисовпадений I: 110, 148
— дифференциальные I: 352
— запуска ЭМСа I: 149
— компенсационные I: 280, 287, 288, 290, 352
— прямого действия I: 352
— совпадений I: 91, 102, 123, 146, 147, 156
Сцинтиблок I: 88
Сцинтилляционные счетчики I: 88—98, 112, 113
Счетчики излучения, см. детекторы

Т

Таллий I: 22; II: 220, 227
Тантал I: 215, 310, 314; II: 46, 75, 211, 227, 259
Теллур II: 221, 227
Тербий I: 214; II: 221, 227
Термализация нейтронов, см. нейтроны
Титан I: 24, 104, 310, 315; II: 77, 98, 206, 208, 259, 315, 316
Ториевый ряд I: 13, 19, 197
Торий I: 19, 103, 197—199, 204, 205, 214, 215, 221, 223—226, 328, 329; II: 201, 209, 215, 227—229
Тормозное рентгеновское излучение I: 6, 22, 23, 27, 32, 26, 37, 105, 106, 200, 290, 291, 307, 309
Точность метода I: 183—186, 283—285; II: 26
Транспортировка излучателей I: 194
Триада I: 106, 107
Тритий I: 22, 27, 28
Тритонный анализ II: 188
Тритоны I: 28
Тулий I: 25, 214; II: 46, 227, 259

У

Углерод I: 22; 263, 289, 290, 310, 507; II: 60, 78, 100, 187, 189, 190, 193, 195, 206, 205, 208, 212, 262, 270
Угольные пласты I: 384, 405, 406, 441, 447; II: 38, 39, 92, 250, 258, 264, 306, 308
Уран I: 5, 19, 103, 197, 204, 205—211, 214, 215, 220, 222—224, 319, 387; II: 201, 209, 213, 215, 225, 228, 229, 269, 329—334
Урановые эквиваленты I: 16, 209
Уранометрическая съемка II: 331
Урано-радиевый ряд I: 13, 19, 197—200, 204, 220
Усилители сигналов I: 133
Ускорители заряженных частиц II: 168—179
— импульсные II: 172—174
— линейные II: 168—174
— резонансные II: 173—174
— циклические II: 174—177
— электростатические II: 168—172
Ускорительная трубка II: 171—172
Устройство памяти I: 157—161

Ф

Фиктивные эталоны I: 359; II: 24, 25
Фильтры
— альфа-излучения I: 81, 92
— бета-излучения I: 81, 276, 285
— гамма-излучения I: 300—302, 321, 359, 368, 391; II: 85, 86
— нейтронов I: 101, 110, 111
— тяжелых заряженных частиц I: 263
Флуктуации I: 14, 174
Фон
— активный (прямой, рассеяния и т. п.) I: 175, 176, 184, 300, 306; II: 14, 86
— комптоновского распределения (в детекторе) I: 105, 109, 110.
— пассивный (натуральный) I: 80, 98, 175—177, 184, 186, 222, 223, 228, 231
— темновой (шумы) I: 90, 91
Фосфор I: 104, 213; II: 98, 190, 205, 208, 212, 220, 227, 310, 311
Фотовклад I: 107, 108
Фотовозбуждение ядер (реакция γ, γ') I: 104, 197
Фотопик I: 105, 107, 108
Фоточасть I: 108
Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) I: 88—91
Фотоэлектрический эффект, см. гамма-излучение
Фотоядерное деление I: 103
Фотоядерный порог I: 25, 47, 48, 62
— эффект, см. гамма-излучение
Фтор I: 26, 27, 104, 204, 253, 264, 266—268, 288; II: 110, 111, 119, 120, 124, 127, 194, 205, 208, 217, 225, 226, 268, 309

Х

Характеристическое излучение I: 23, 24, 34, 106, 107, 293—298, 309—312
Хлор I: 264; II: 44, 135, 137, 138, 220, 226, 227, 259
Хранение источников I: 194
Хром I: 104; II: 79, 98, 214, 221, 227, 259, 316—317

Ц

Цезий I: 25, 306, 377; II: 118, 227, 259
Церий I: 214; II: 221, 227
Циклотрон II: 177
Цинк I: 25, 288, 294, 306, 310, 314, 319, 320, 323, 335; II: 69, 206, 208, 225, 227, 228, 326, 327
Цирконий I: 214, 316; II: 206, 208, 227

Ч

Число
— Авогадро I: 17
— актов рассеяния

— гамма-квантов I: 46
— — — нейтронов I: 57
— Лошмидта I: 17
— радиоактивных ядер в веществе II: 102
— электронов в веществе I: 17
— ядер в веществе I: 17
Чувствительность метода I: 183
Чугун I: 194

Э

Экономическая эффективность методов I: 335, 458
Экранирование от излучения, см. соответствующий вид излучения
Экраны-контейнеры I: 325, 362
Электрон, см. бета-излучение
Электронный захват I: 14
Электростатические генераторы (ЭСГ)
— Ван-де-Граафа II: 168, 169
— высоковольтные трансформаторы II: 171, 172
— Иоффе II: 170, 171
— Кокрофта — Уолтона II: 169, 170
Эман I: 16
Эманации I: 205, 210, 211, 228, 234
Эманационный метод (съемка) I: 210, 211, 234—237; II: 290—293
Эманирующая способность I: 234
Эманометры I: 211, 236, 237
Эмиссия электронов I: 89, 106, 321
Эрбий I: 214; II: 46, 203, 205, 215, 221, 227, 259, 260
Эталонирование аппаратуры I: 182, 183, 339, 340, 348, 349, 357—359, 363, 370, 403; II: 21—26, 155
Эффект Мессбауэра, см. гамма-излучение
Эффективность детекторов I: 80, 174
— активационных I: 103
— ионизационных I: 81, 82, 84, 87; II: 199
— полупроводниковых I: 99
— сцинтилляционных I: 88, 89, 92, 94, 100, 108
Эффективное сечение I: 18
Эффективный атомный вес вещества I: 30
Эффективный атомный номер вещества
— для бета-излучения I: 35, 278
— для гамма-излучения I: 49—51

Я

Ядерная геология I: 7
— геохронология I: 7
— гидрология I: 7
— метеорология I: 7
Ядерные взрывы II: 283—286
— реакция в природе I: 200, 204, 233
Ядерный реактор I: 8, 9, 27; II: 181

ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел 5. Радиоизотопные нейтронные методы

Глава 21. Нейтронные методы с регистрацией заряженных частиц . . 7
§ 1. Нейтрон-протонный метод 7
§ 2. Нейтронный альфа-метод 9

Глава 22. Нейтрон-нейтронный метод и его применение для изучения водородсодержащих сред 11
§ 1. Лабораторные методы определения влажности 13
§ 2. Физические основы метода применительно к исследованию коренных пород 16
§ 3. Приставные влагомеры и их применение 26
§ 4. Определение влажности пород в процессе движения . . . 28
§ 5. Устройство зондовых и скважинных приборов 29
§ 6. Влияние скважины на результаты измерений 33
§ 7. Области применения зондовых и скважинных приборов . . . 35

Глава 23. Применение нейтрон-нейтронного метода для определения поглощающих элементов 39
§ 1. Методика определения бора в пробах по регистрации тепловых и надтепловых нейтронов 39
§ 2. Определение других поглощающих элементов в пробах . . 44
§ 3. Нейтронно-резонансный анализ проб 44
§ 4. Физические основы метода применительно к исследованию коренных пород 57
§ 5. Приставные приборы и их применение 61
§ 6. Автомобильный метод 63
§ 7. Методы исследования скважин и шпуров с регистрацией тепловых и надтепловых нейтронов 64
§ 8. Методика, основанная на измерении резонансных потоков нейтронов в скважинах 73

Глава 24. Нейтронный гамма-метод 77
§ 1. Лабораторные методы анализа 78
§ 2. Общеметодические вопросы применительно к изучению разрезов скважин 85
§ 3. Области применения интенсиметрической методики при изучении коренных пород 88
§ 4. Области применения спектрометрической методики при изучении коренных пород 93
§ 5. Нейтронный гамма-каротаж неупругого рассеяния быстрых нейтронов 100

Глава 25. Нейтронный активационный метод 101
§ 1. Физические основы метода 102
§ 2. Методика анализа проб 107
§ 3. Методика пешеходных исследований 119
§ 4. Автомобильная съемка 120
§ 5. Общеметодические вопросы применительно к исследованию разрезов скважин 122
§ 6. Основы теории метода применительно к исследованию скважин и шпуров 124
§ 7. Исследование рудных скважин 133
§ 8. Исследование нефтяных скважин 138

Глава 26. Фотонейтронный метод 139
§ 1. Лабораторный анализ на бериллий 145
§ 2. Лабораторный анализ на дейтерий 148
§ 3. Полевые переносные бериллометры и их применение 152
§ 4. Автомобильный метод определения бериллия в породах . . . 153
§ 5. Определение бериллия по разрезам скважин 153

Раздел 6. Методы, основанные на применении ускорителей и других мощных ядерных установок и приборов

Глава 27. Устройство ускорителей и других ядерных установок . . . 163
§ 1. Линейные ускорители 168
§ 2. Циклические ускорители 174
§ 3. Нейтронные установки 177

Глава 28. Методы ядерного анализа 182
§ 1. Анализ на заряженных частицах 183
§ 2. Гамма-методы анализа 196
§ 3. Нейтронные методы анализа 210

Глава 29. Методы ядерного каротажа, основанные на применении ускорителей 231
§ 1. Особенности импульсных методов 231
§ 2. Импульсный нейтрон-нейтронный каротаж 234
§ 3. Импульсный нейтронный гамма-каротаж радиационного захвата медленных нейтронов 253
§ 4. Импульсный нейтронный гамма-каротаж неупругого рассеяния быстрых нейтронов 260
§ 5. Нейтронный активационный каротаж 264
§ 6. Другие нейтронные методы 268
§ 7. О возможности реализации гамма-методов с ускорителями . . 269

Глава 30. Другие ядерные методы 271
§ 1. Методы, основанные на применении нейтронных генераторов, для изучения горных пород на месте их выхода 271
§ 2. Возможности применения электронных ускорителей в полевой съемке 278
§ 3. Метод меченых атомов 280
§ 4. Использование ядерных взрывов 283

Раздел 7. Применение комплекса радиометрических и ядерно-геофизических методов

Глава 31. Литологическое расчленение пород на поверхности и в скважинах и другие вопросы 289
§ 1. Геологическое картирование 289
§ 2. Составление геологических разрезов 294
§ 3. О возможности прогнозирования землетрясений 295

Глава 32. Определение плотности, влажности и пористости горных пород 296
§ 1. Определение плотности 296
§ 2. Определение влажности 298
§ 3. Определение пористости 299

Глава 33. Поиски и разведка месторождений горючих полезных ископаемых 301
§ 1. Поиски месторождений нефти и газа 301
§ 2. Методика анализа проб нефтей 302
§ 3. Разделение коллекторов по их водонефтегазонасыщению . . . 303
§ 4. Выявление угольных пластов и оценка их зольности . . . 306

Глава 34. Поиски и разведка месторождений неметаллических полезных ископаемых 308
§ 1. Поиски и разведка месторождений борного сырья 308
§ 2. Поиски кимберлитовых трубок 309
§ 3. Поиски и разведка месторождений флюорита 309
§ 4. Поиски и разведка месторождений фосфоритов и апатитов . 310
§ 5. Поиски и разведка месторождений калиевых и натриевых солей 311
§ 6. Возможности выявления других полезных ископаемых . . . 313

Глава 35. Поиски и разведка месторождений металлических полезных ископаемых 313
§ 1. Бериллий 313
§ 2. Алюминий 314
§ 3. Титан 315
§ 4. Хром 316
§ 5. Марганец 317
§ 6. Железо 317
§ 7. Никель 319
§ 8. Медь 320
§ 9. Олово 321
§ 10. Сурьма 322
§ 11. Барий 323
§ 12. Редкоземельные элементы 323

§ 13. Вольфрам и молибден 324
§ 14. Ртуть 324
§ 15. Полиметаллические месторождения 325
§ 16. Редкие и рассеянные элементы 327

Глава 36. Поиски, разведка и разработка месторождений радиоактивных руд 329
§ 1. Применение радиометрических методов для поисков радиоактивных руд 329
§ 2. Поиски месторождений урана по их солевым ореолам . . . 330
§ 3. Разведка и разработка радиоактивных руд (рудничная радиометрия) 332
§ 4. Другие ядерные методы определения урана в горных породах и рудах 333
Приложение 1. Методы, основанные на применении радиоизотопных источников 335
Приложение 2. Методы, основанные на использовании мощных ядерных установок 337
Приложение 3. Нейтронные и фотонейтронные радиоизотопные лабораторные приборы 339
Приложение 4. Нейтронные и фотонейтронные переносные и перевозные радиоизотопные приборы 341
Приложение 5. Некоторые нейтронные и фотонейтронные скважинные радиоизотопные приборы 343
Приложение 6. Некоторые сведения о химических элементах и определении их ядерными методами 344
Литература 353
Предметный указатель 386

CONTENTS

SECTION 5. Radioisotope neutron methods

Chapter 21. Neutron methods with recording of charged particles . . 7
§ 1. Neutron-proton method 7
§ 2. Neutron-alpha method 9
Chapter 22. Neutron-neutron method and its application for investigation of mediums containing hydrogen 11
§ 1. Laboratory methods of humidity determination 13
§ 2. Physical principles of method conformably to investigation of rocks in situ 16
§ 3. Attached humiditometer and its application 26
§ 4. Determination of rock humidity in motion 28
§ 5. Structure of sound and borehole devices 29
§ 6. Borehole influence on results of measurement 33
§ 7 Application fields of sound and borehole devices 35
Chapter 23. Neutron-neutron method application for determination of absorbing elements 39
§ 1. Boron determination method in samples by thermal and epithermal neutron recording 39
§ 2. Determination of other absorbing elements in samples . . . 44
§ 3 Neutron resonance analysis of samples 44
§ 4. Physical principles of method conformably to investigation of rocks in situ 57
§ 5. Attached devices and their application 61
§ 6. Motor-car method 63
§ 7. Investigation methods of wells and blastholes by thermal and epithermal neutron recording 64
§ 8. Method based on measurement of resonance neutron fluxes in boreholes 73
Chapter 24. Neutron-gamma method 77
§ 1. Laboratory methods of analysis 78
§ 2. General method questions conformably to vertical sections in wells 85
§ 3. Application fields of ratemeter method by investigtion of rocks in situ 88
§ 4. Application fields of spectrometric method by investigation of rocks in situ 93
§ 5. Neutron-gamma logging of inelastic scattering of fast neutrons . 100
Chapter 25. Neutron activation method 101
§ 1. Physical principles of method 102
§ 2. Method of sample analysis 107
§ 3. Method of pedestrian investigation 119
§ 4. Motor-car survey 120
§ 5. General method questions conformably to vertical section of boreholes 120
§ 6. Theoretical bases of method conformably to investigation wells and blastholes 122
§ 7. Investigation of ore wells 124
§ 8. Investigation of oil wells 133
Chapter 26. Photo-neutron method 138
§ 1. Laboratory analysis of content of berillium 139
§ 2. Laboratory analysis of content of deuterium 145
§ 3. Field portable berillometers and their application 148
§ 4. Motor-car method of berillium determination in rocks 152
§ 5. Berillium determination in well sections 153

Section 6. Methods based on application of accelerators and other nuclear power plants and apparatus

Chapter 27. Structure of accelerators and other nuclear plants . . . 163
§ 1. Linear accelerators 168
§ 2. Cyclic accelerators 174
§ 3. Neutron devices 177

Chapter 28. Methods of nuclear analysis 182
§ 1. Analysis of charged particles 183
§ 2. Gamma methods of analysis 196
§ 3. Neutron methods of analysis 210

Chapter 29. Methods of nuclear logging based on application of acceierators 231
§ 1. Features of pulse accelerators 231
§ 2. Pulsed neutron-neutron logging 234
§ 3. Pulsed neutron-gamma logging of radiation capture if slow neutrons 253
§ 4. Pulsed neutron-gamma logging inelastic scattering of fast neutrons 260
§ 5. Neutron activation logging 264
§ 6. Other neutron methods 268
§ 7. Realization possibility of gamma methods in accelerators . . . 269

Chapter 30. Other nuclear methods 271
§ 1. Methods based on application neutron generators for investigation of rocks in situ 271
§ 2. Possibility of electron accelerator application in field survey . . 278
§ 3. Method of labelled atoms 280
§ 4. Use of nuclear explosions 283

Section 7. Application complexis of radiometric and nuclear geophysical methods

Chapter 31. Lithogical dismemberment of rocks on surface and in wells and other questions 289
§ 1. Geological drawing of map 289
§ 2. Compiling of geological sections 294
§ 3. Possibility of earthquake prognosis 295

Chapter 32. Determination of density, humidity and porosity of rocks . . 296
§ 1. Density determination 296
§ 2. Humidity determination 298
§ 3. Stratum porosity determination 299

Chapter 33. Search and exploration for fuel mineral deposits 301
§ 1. Search for oil and gas layers 301
§ 2. Method of oil sample analysis 302
§ 3. Separation of traps by their oil and gas saturation 303
§ 4. Exposure of coal bed and evaluation their ash content . . . 306

Chapter 34. Search and exploration of non-metal usefus mineral deposits
§ 1. Search and exploration of or useful boron raw material . . . 308
§ 2. Search for kimberlite pipes 308
§ 3. Search and exploration of fluorite deposits 309
§ 4. Search and exploration of phosphorite and apatite deposits . . 309
§ 5. Search and exploration of potassium and sodium salts . . . 310
§ 6. Possibilities of exposure of other useful minerals 311

Chapter 35. Search and exploration of metal useful minerals . . . 313
§ 1. Berillium 313
§ 2. Aluminium 314
§ 3. Titanium 315
§ 4. Chromium 316
§ 5. Manganese 317
§ 6. Iron 317
§ 7. Nickel 319
§ 8. Copper 320
§ 9. Tin 321
§ 10. Antimony 322
§ 11. Barium 323
§ 12. Rare-earth elements 323
§ 13. Tungsten and molybdenium 324
§ 14. Mercury 324
§ 15. Polymetallic deposits 325
§ 16. Rare and scattered elements 327

Chapter 36. Search, exploration and exploitation of radioactive ore deposits 329
§ 1. Application radiometric methods for radioactive ore search . . 329
§ 2. Search for uranium minerals by salts aureoles 330
§ 3. Search and exploitation of radioactive ores (mine radiometry) 332
§ 4. Other nuclear methods of uranium determination in rocks and ores 333

Appendix 1. Methods based on application if radioisotope sourse . . 335
Appendix 2. Methods based on use power nuclear plants 337
Appendix 3. Neutron and photoneutron radioisotope laboratory devices 339
Appendix 4. Neutron and photoneutron portable and transportable radioisotope devices 341
Appendix 5. Some neutron and photoneutron borehole radioisotope devices 343
Appendix 6. Some information on chemical elements and their determination by nuclear methods 344
Beferences 353
Index 386

Евгений Михайлович Филиппов

ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

II

Нейтронометрия
и комплексирование методов
ядерной геофизики

Ответственный редактор
Владимир Ильич Баранов

Редактор Н. Г. Рязанова
Обложка художника Е. Ф. Зайцева
Художественный редактор В. И. Шумаков
Технический редактор Т. К. Овчинникова
Корректоры Н. Н. Тясто, Н. Г. Примогенова

Сдано в набор 20 сентября 1972 г. Подписано в печать 2 ноября 1973 г. МН 01101. Бумага машинномелованная 70×108¹/₁₆. 25 печ. л., 35 усл.-печ. л., 37,0 уч.-изд. л. Тираж 1200 экз. Заказ № 920. Цена 3 р. 70 к.

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

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Набрано	Следует читать
33	19-я снизу	моделировались	моделировалась
143	12-я сверху		..к занижению искомого содержания бериллия...
176	формула (27-2)	$i_{ср} = i_{и} \cdot \nu \cdot t$	$i_{ср} = i_{и} \cdot \nu \cdot t_{и}$,
179	21-я сверху	...цирконит- и титано-три-тиевые...	..цирконий- и титано-тритие-вые...
189	6-я, 7-я сверху	считчиком	счетчиком
388	Правый столбец, 27-я снизу	Дейтроны дейтоны	Дейтроны (дейтоны)
390	Правый столбец, 18-я сверху	133—225	183—225