

Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Другое	0,05

Изменение эквивалентной (H) (эффективной E) дозы излучения в единицу времени называется мощностью эквивалентной (H) (эффективной (E)) дозы.

Доза эффективная коллективная (S) — мера коллективного риска, возникновения стохастических эффектов облучения. Она равняется сумме индивидуальных эффективных доз облучения E_i у конкретной группы лиц N_i за определенный период времени и характеризует радиационную опасность источника

$$S = \sum_i E_i N_i \quad \text{или} \quad S = \int_0^{\infty} N(E) E dE$$

где $N(E) d$ — количество лиц, которые получили эффективную дозу в пределах от E до $E+de$. Единица эффективной коллективной дозы — человеко-зиверт (чел.Зв).

Коллективная эффективная доза используется для вычисления расходной составляющей, связанной с убытком, который возникает при проявлении суммарного стохастического эффекта при облучении большой группы людей. На основе беспороговой линейной зависимости и определения индивидуального риска определим количество проявлений стохастических эффектов (n).

$$n = r \cdot S.$$

Это соотношение позволяет осуществить статистический прогноз количества n соматических и генетических эффектов в результате действия конкретного ИИИ. В соответствии с возможным характером эффекта отдаленных последствий полученный результат не является оценкой для конкретных лиц, поскольку они не могут быть идентифицированы.

1.3. РАДОН И ВЕЛИЧИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЕГО РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Эквивалентная равновесная концентрация (ЭРК) радона (торона) в воздухе — это такая концентрация радона (торона) в единицах активности, которая находится в радиоактивном равновесии со своими короткоживущими продуктами распада (полоний — 218, висмут — 214, свинец — 214 и полоний — 214), которые имеют ту же «скрытую энергию» альфа — излучение, что и фактическая неравновесная смесь.

Коэффициент радиоактивного равновесия (F) определяется отношением эффективной равновесной концентрации радона (торона) к фактической концентрации радона (торона).

За единицу ЭРК принят рабочий уровень (РР). РР любая комбинация продуктов распада радона или торона в одном литре воздуха, в результате которой излучаются альфа-частицы с суммарной энергией $1,3 \cdot 10^5$ MeV/л. 1 РР соответствует эквивалентной равновесной концентрации радона $3,7 \cdot 10^3$ Бк/м³.

«Скрытой энергией» любой смеси короткоживущих дочерних продуктов распада радона (торона) является сумма скрытой энергии всех атомов дочерних продуктов, которые содержатся в смеси. «Скрытая энергия» на один атом — это полная энергия альфа-частиц, которые выпускаются за время распада этого атома. На один атом распада радона выделяется 19,2 MeV энергии альфа-частиц. На один атом распада торона выделяется 20,9 MeV энергии альфа-частиц. «Скрытая энергия» на единицу активности равняется $E_{\alpha m} / \lambda$, где $E_{\alpha m}$ — скрытая энергия на атом; λ — постоянная распада. Для радона «скрытая энергия» на единицу распада равняется 34500 MeV/Бк. Для торона «скрытая энергия» на единицу распада равняется 472000 MeV/Бк.

Облучение дочерними продуктами радона или торона выражается как облучение за счет скрытой энергии альфа-излучения и вычисляется интегралом по времени концентрации смеси дочерних продуктов. Облучение за счет скрытой энергии радона или торона часом выражается в единицах «рабочий уровень за месяц» (РРМ). 1 РРМ соответствует $3,7 \cdot 10^3$ Бк/м³ · 170 часов = $6,3 \cdot 10^5$ Бк/м³ · час.

Коэффициенты перехода (K_m) от концентрации радона (1 0,4), при которой происходит облучение индивидуума до годовой дозы [15].

$$K_m = 4 \text{ мЗв/РРМ} = 0,0445 \text{ мЗв/год/Бк/м}^3, \text{ для населения}$$

(время облучения 7000 часов);

$$K_m = 5 \text{ мЗв/РРМ} = 0,0556 \text{ мЗв/год/Бк/м}^3, \text{ для персонала}$$

(время облучения 2000 часов).

Доза на единицу вдыхаемой активности для продуктов распада радона внутри помещений равняется для населения:

$$D_{Rn} = 0,0445 \text{ мЗв/год/Бк/м}^3 / 5475 \text{ м}^3/\text{год} = 0,81 \cdot 10^{-9} \text{ Зв/Бк}$$

(внутри помещения)

$$D_{Rn} = 0,0445 \text{ мЗв/год/Бк/м}^3 / 1825 \text{ м}^3/\text{год} = 2,43 \cdot 10^{-8} \text{ Зв/Бк}$$

(вне помещения)

а для персонала:

$$D_{Rn} = 0,0556 \text{ мЗв/год/Бк/м}^3 / 2400 \text{ м}^3/\text{год} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Зв/Бк}$$

ВОПРОСЫ:

1. Как определяется активность радионуклида?
2. Что такое поглощенная доза? Единицы измерения.
3. Что такое экспозиционная доза? Единицы измерения.
4. Дать формулировку понятия эффективной дозы. Единицы измерения.
5. Что такое коллективная доза? Единицы измерения.
6. Назвать величины, которые используются для определения радиационных характеристик радона.
7. Что имеет название удельной, объемной, поверхностной активности источника излучения?
8. Объяснить, что такое закон радиоактивного распада. Формулировка закона.
9. Системные и внесистемные единицы измерения экспозиционной дозы.
10. В чем измеряется активность радионуклида?
11. Что измеряется в единицах «рабочий уровень за месяц»?

ТЕМА 4. ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ФОНА

Природный радиационный фон состоит из двух компонентов:

- космического излучения;
- излучение от рассеянных в земной коре, почве, воздухе, воде и других объектах внешней среды естественных радионуклидов.

Следует отметить, что кроме этих два компонента, которые определяют природный радиационный фон, выделяют, так называемый, технологически измененный природный радиационный фон. Он определяется как излучение от естественных источников ионизирующего излучения (естественных радионуклидов и космического излучения), которое не имело бы местного происхождения, если не использовался некоторый технологический процесс, не предназначенный непосредственно для генерирования ионизирующего излучения. Причинами такого измененного фона могут быть, например, выбросы тепловых электростанций, которые работают на ископаемом топливе (угле, нефти, природном газе), которое содержит естественные радионуклиды; использование природного газа и угля для приготовления еды и обогрева помещений; герметизация помещений с целью экономии тепла; использование в строительстве материалов с повышенным содержанием естественных радионуклидов; использование удобрений, которые содержат естественные радионуклиды и тому подобное.

Важной особенностью естественного облучения является то обстоятельство, что оно действует на все население земного шара, а также тот факт, что оно действует и действовало в прошлом на относительно постоянном уровне в течение очень длительного времени. По отмеченным причинам естественное излучение может использоваться в качестве эталонного уровня для сравнения с искусственными источниками ионизирующего излучения [16].

Облучение от естественных источников является важным фактором мутагенеза, существенного для эволюции живых организмов в биосфере.

4.1. КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Космическое излучение подразделяют на галактическое и солнечное. Галактическое излучение приходит к нам из галактики Вселенной. Солнечное космическое излучение связано с солнечными вспышками. Необходимо различать первичное космическое излучение и вторичное. К первичному космическому излучению принято относить излучение, которое попадает в верхние слои атмосферы Земли из космического пространства. При его взаимодействии с ядрами атомов атмосферы, образуются вторичные частицы и электромагнитное излучение. Первичное космическое излучение в основном состоит из протонов высокой энергии (около 90%), которые попадают в солнечную систему из межзвездного пространства, ионов ${}^4\text{He}$, что составляют 10% первичного галактического излучения, и, в значительно меньшем количестве, из более тяжелых частиц, а также электронов, фотонов и нейтронов. Максимальная интенсивность вторичного космического излучения наблюдается на высоте 25-30 км. На высотах 40-50 км преобладает первичное излучение. На уровне моря первичное излучение составляет всего 0,05% суммарного числа частиц, которые попали на верхний предел земной атмосферы.

На плотность потока первичного излучения влияет магнитное поле Земли, отклоняющее низкоэнергетические заряженные частицы назад в космическое пространство. Этот эффект зависит от геомагнитной широты, в результате чего плотность потока низкоэнергетических протонов в верхних слоях атмосферы больше на полюсах, чем в экваториальных районах.

Плотность потока галактических низкоэнергетических протонов в верхних слоях атмосферы Земли изменяется в соответствии с соответствием с 11-летним солнечным циклом. Плотность потока этого излучения достигает минимального значения в период наибольшей солнечной активности.

Во время солнечных вспышек выпускается большое количество заряженных частиц, главным образом протонов и альфа-частиц. Однако эти частицы имеют сравнительно низкие энергии.

Часть космического излучения, которое попадает в атмосферу Земли, характеризуется высокими энергиями и при взаимодействии с ней образует вторичное космическое излучение, которое состоит из нейтронов, протонов, р-мезонов и к-мезонов, а также большого количества космических радионуклидов, таких как ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{22}\text{Na}$ и ${}^{24}\text{Na}$. Высокоэнергетические вторичные протоны, нейтроны и пионы, в свою очередь взаимодействуют с ядрами атмосферного воздуха, образуя новые частицы. Такой процесс называется ливнем и в данном случае зовется широким атмосферным ливнем (ШАЛ). На уровне моря атмосферный ливень может иметь поперечные размеры порядка нескольких километров. Состав частиц вторичного излучения зависит от высоты над уровнем моря. Поскольку нуклиды быстро теряют свою энергию в результате ионизации и ядерных взаимодействий, плотность потока нуклидов в нижних слоях атмосферы значительно уменьшается. В нижних слоях поток частиц состоит в основном из мезонов, которые образовались при распаде заряженных пионов на больших высотах, и электронов, которые образуются во время ионизации. На уровне моря поток вторичного космического излучения состоит из мезонов, фотонов, электронов, нейтронов и протонов. Средняя плотность потока космических частиц порядка $2,5 \text{ частиц}/\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, и в зависимости от 11-летнего цикла солнечной активности она меняется от 2 до $4,5 \text{ частиц}/\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [17]. Скорость образования нейтронов от космического излучения на больших высотах, усредненная по всему солнечному циклу, приблизительно равняется $4,0 \text{ нейтр.}/\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [18]. Плотность потока достигает максимума на высоте 12-20 км и быстро уменьшается с уменьшением высоты над уровнем моря. Нейтроны, теряющие энергию в процессе упругих столкновений и после замедления, схватываются ядрами ${}^{14}\text{N}$ с образованием ${}^{14}\text{C}$. На уровне моря плотность их потока равняется $8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

4.2. РОЛЬ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ФОРМИРОВАНИИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

Из известных на данное время 106 химических элементов 81 имеет стабильные изотопы, для других 25 элементов известны только радиоактивные изотопы. Естественные радионуклиды, которые содержатся в биосфере Земли, можно разделить на две категории: примордиальные и космогенные.

4.2.1. Примордиальные радионуклиды

Примордиальные радионуклиды — это радионуклиды, которые содержатся в разных объектах окружающей среды с момента образования Земли, а также их дочерние продукты распада. Примордиальные радионуклиды подразделены на две группы: радионуклиды уранорадиевого и ториевого рядов и радионуклиды, которые находятся вне этих радиоактивных рядов. В первую группу входит 45 радионуклидов — продуктов распада урана и тория; в другую — 42 радиоактивных изотопа и 32 химических элемента, не связанных с радиоактивными семействами. Радиоактивные элементы широко распространены в природе. В таблице 4.1 показано содержание некоторых примордиальных радионуклидов в земной коре [19].

Содержание радионуклида в земной коре	Период полураспада года	Активность радионуклида в 1 т земной коры, Бк	Масса радионуклида в 1 т земной коры, г	Содержание в природной смеси	Радио-нуклид	Химический элемент	Содержание радионуклида в земной коре	
							Масса, т	Активность, Бк
			3,1	$1,2 \cdot 10^{-2}$	^{40}K	Калий	$1,31 \cdot 10^9$	$12,4 \cdot 10^{19}$
			66	0,19	^{48}Ca	Кальций	$2,1 \cdot 10^5$	$2,64 \cdot 10^{22}$
			84	27,85	^{87}Rb	Рубидий	$2,1 \cdot 10^5$	$3,36 \cdot 10^{22}$
			7,8	2,8	^{96}Zr	Цирконий	$1,8 \cdot 10^2$	$3,12 \cdot 10^{20}$
			0,1	95,77	^{115}In	Индий	$1,9 \cdot 10^1$	$4,0 \cdot 10^{14}$
			1,42	6,0	^{124}Sn	Олово	$1,0 \cdot 10^3$	$5,18 \cdot 10^{19}$
			$3 \cdot 10^{-3}$	34,5	^{130}Te	Теллур	$2,4 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^{21}$
			0,016	0,09	^{135}La	Лантан	$1,4 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^{11}$
			4,8	23,87	^{144}Ce	Неолим	$2,6 \cdot 10^1$	$1,5 \cdot 10^{15}$
			1,2	15,07	^{147}Sm	Самарий	$9,7 \cdot 10^1$	$4,8 \cdot 10^{11}$
			0,03	2,6	^{176}Lu	Лютеций	$2,4 \cdot 10^1$	$1,0 \cdot 10^{10}$
			$6 \cdot 10^{-4}$	62,9	^{167}Re	Рений	$1,0 \cdot 10^7$	$2,52 \cdot 10^{12}$
			8	100	^{209}Bi	Висмут	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{17}$
			0,022	100	^{232}Th	Торий	$3,2 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^{20}$
			3,0	99,28	^{238}U	Уран	$1,8 \cdot 10^3$	$8,8 \cdot 10^{15}$
				0,71	^{235}U	Уран	$3,7 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^{20}$
					^{238}U	Уран	$4,5 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{30}$

Уран. Природный уран представляет собой смесь трех изотопов. В таблице 4.2 показаны радиологические характеристики естественных изотопов урана [20].

Таблица 4.2. Естественные изотопы урана

Радионуклид	Содержание в природном уране %	Характер распада, энергия (MeV) и квантовый выход	Период полураспада, годы
^{234}U	0,006	а - 4,763 (74 %) а - 4,716 (26 %)	$2,47 \cdot 10^5$
^{235}U	0,7	а - 4,58 (10 %) а - 4,47 (3 %) а - 4,40 (83 %) а - 4,20 (4 %)	$7,1 \cdot 10^8$
^{238}U	99,3	а - 4,15 (25 %) а - 4,20 (75 %)	$4,51 \cdot 10^9$

Распад изотопов ^{235}U и ^{238}U дает начало двум рядам радиоактивных изотопов. Потому что содержание ^{235}U в природном уране мало в сравнении с содержанием ^{238}U и вклад продуктов распада ^{235}U в формирование радиационного фона также мал, ограничимся рассмотрением семейства ^{238}U . Уран — широко распространенный в природе элемент. Среднее содержание его в земной коре — $3,0 \cdot 10^{-6}$ г/г породы. Содержание урана-234, 238 в атмосферном воздухе $2,0 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, урана-235 — $2,0 \cdot 10^{-8}$ Бк/м³, количество выпадений урана-234, 238 — $3,0 \cdot 10^{-1}$ Бк/(м²·год), урана-235 — $2,0 \cdot 10^{-3}$ Бк/(м²·год). Содержание урана в морской воде колеблется от $0,35 \cdot 10^{-6}$ до $2,3 \cdot 10^{-6}$ г/л.

Вертикальное распределение естественных радионуклидов в атмосфере [21], как правило, обусловлено двумя факторами: непрерывным поднятием частиц из поверхности земли; короткодействующим, но очень сильным фактором — извержением вулканов. Комбинированный эффект от двух факторов приводит к характерной зависимости концентрации ^{226}Ra от высоты (рис. 4.1). Зависимость концентрации ^{210}Pb от высоты (рис. 4.1)

инки другой характер, который обуславливает поступление ^{210}Pb в верхние слои атмосферы в результате поднятия газообразного ^{222}Rn из почвы и последующего ее распада. Среднегодовые активности ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra уравни 462±41, 29,0±3,3, 4,0±0,2 мкБк/м³ соответственно. Диапазон изменений средних годовых активностей равен: для ^{210}Pb — 122-2412 мкБк/м³, для ^{226}Ra — 2,7-548,4 мкБк/м³ и ^{228}Ra — 0,4-23 мкБк/м³. Средняя активность ^{210}Pb в дождевых осадках равняется 0,1 Бк/л, в естественной воде — 0,005 Бк/л, в почве 37-1001 Бк/кг. В отделимых случаях, удельная активность ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra может существенно отличаться от усредненных величин. Зависимость содержания ^{226}Ra в колонне атмосферного воздуха площадью 1 м² для разных высот до 15 км приведена на рис. 4.2. На этом же рисунке показаны времена извержения наибольших вулканов Земли. Как следует из рис. 4.2, между увеличением содержания ^{226}Ra и атмосферном воздухе и временами извержения вулканов наблюдается корреляция.

Торий. Торий был открыт в 1828 г. Берцелиусом в минерале, который позже был назван торитом и сразу привлек внимание ученых. Интерес к этому элементу значительно вырос после открытия радиоактивности, в связи с применением тория для производства ядерной энергии. В конце 50-х и начале 60-х годов были опубликованы ряд обзорных работ и монографий, посвященных торью.

По распространенности в земной коре торий занимает приблизительно 35-ое место. Среднее содержание его в земной коре, по данным разных авторов, составляет от $0,8 \cdot 10^{-5}$ до $1,5 \cdot 10^{-5}$ г/г [22] в значительных концентрациях торий встречается достаточно редко.

Торий — естественный радиоактивный элемент, родоначальник радиоактивного семейства, названного его именем.

Естественный торий состоит из одного изотопа ^{232}Th с периодом полураспада $T_{1/2}=1,41 \cdot 10^{10}$ лет, если не учитывать изотоп ^{230}Th , который находится с ним в равновесии, торий ^{232}Th с периодом полураспада $T_{1/2}=1,91$ лет, концентрация которого в естественном тории при радиоактивном равновесии относительно тория составляет всего $1,35 \cdot 10^{-8}$ %. Кроме основного изотопа тория ^{232}Th и ^{230}Th , известно еще 4 естественных изотопа тория,

которые являются членами семейств урана-238 и урана-235. В таблице 4.3 приведены некоторые данные о естественных изотопах тория.

Таблица 4.3. Естественные изотопы тория

Символ	Семейство	Период полураспада	Характеристическое излучение (энергия, МэВ)	Следующий член семейства
^{232}Th	Тория	$1,41 \cdot 10^{10}$ лет	α (3,95-24%) (4,01-76%)	^{228}Ra
^{228}Th	Тория	1,91 лет	α (5,43-71%) (5,34-28%) γ (0,084-1,6%)	^{224}Ra
^{234}Th	Урана-238	24,1 сутки	β (0,191) g (0,063-3,5%) (0,093-4%)	^{234}Pa
^{230}Th	Урана-238	$8,0 \cdot 10^{10}$ лет	α (4,68-76%) (4,62-24%) g (0,068-0,6%)	^{226}Ra
^{231}Th	Урана-235	25,52 часов	β (0,30) γ (0,026-2%) (0,084-10%)	^{231}Pa
^{227}Th	Урана-235	18,2 сутки	α (6,04-23%) (5,98-24%) (5,76-21%) (5,72-14%) γ (0,050-8%) (0,237-15%) (0,31-8%)	^{223}Ra

Основными минералами, которые содержат торий, являются монацит, торит и ториацит. Независимо от того, что в монацитах содержится всего лишь 1,4-28% тория, монацитовые месторождения являются наиболее богатыми источниками тория.

растворения имеют наибольшее практическое значение как основной источник получения тория. В торите и ториаците главный компонент — торий. Однако эти минералы достаточно жидки и практически значения не имеют. Основным источником тория и промышленности служат монацитовые пески. Монацитовые пески образуются на берегах морей и рек вместе с морскими и речными песками. Месторождения монацитовых песков находятся в Бразилии, Индии, на Цейлоне, в Нигерии, на Скандинавском полуострове и в США [23]. В Украине монацитовые пески и значительной степени распространены на побережье Азовского моря. В естественных водах торий содержится в сравнительно малых количествах, потому что его естественные соединения плохо растворимы в воде. Содержание тория в речной воде составляет всего $2 \cdot 10^{-9}$ %, а в морской — $4 \cdot 10^{-8}$ %.

Радон. Радон представляет радиоактивный бесцветный благородный газ, который не имеет вкуса и запаха, в 7,5 раз тяжелее воздуха. Радон растворим в воде, но при кипячении полностью из нее удаляется. Широко распространены 3 естественных изотопа радона: актиний (^{219}Rn), торон (^{220}Rn), радон (^{222}Rn). Все они — члены естественных радиоактивных рядов: ^{235}U — семейства ^{235}U , ^{238}U — семейства ^{238}U , ^{232}Th — семейства ^{232}Th и являются дочерними продуктами распада радия. После распада изотопы радона образуют продукты распада радия. Поскольку радон является продуктом распада урана и радия, его больше в местах с повышенной радиоактивностью почвы. Содержание радона в почве показывает количество в ней урана, и это может быть использовано для прогноза уровня радона в атмосфере. Содержание радона в атмосфере зависит от скорости выхода этого газа из почвы и метеорологических условий. Величина эксхалации (выхода радона на поверхность) существенно зависит от типа и состояния поверхности почвы.

Содержание радона в земной коре составляет $4 \cdot 10^{-13}$ мг/кг и через пористость грунтовой среды, радон может мигрировать в атмосферу [22]. Средняя концентрация радона на открытом воздухе зависит от многих факторов, таких как температура, скорость ветра, давление и др. Среднесуточное значение концентрации радона в атмосферном воздухе зимой в 3-4 раза ниже, чем летом. Отмечается связь содержания радона с локальными

землетрясениями. С распадом радона связано появление нескольких дочерних радиоактивных изотопов, которые образуют так называемый радоновый активный осадок: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po . Эти радионуклиды легко связываются с пылевыми частицами, в результате чего могут поступать в дыхательные пути человека, создавая внутреннее облучение. Источниками поступления дочерних продуктов радона в организм может быть вода из скважин глубокой закладки в породах с повышенным содержанием урана.

В последнее время радон и его продукты распада рассматриваются как один из основных источников облучения человека естественного происхождения, при этом серьезную опасность представляет радон в жилищных помещениях. В закрытых помещениях концентрация радона существенно превышает его концентрацию в атмосферном воздухе. Концентрация радона на первых этажах и в подвалах может значительно превышать концентрацию радона в воздухе вне помещений, и его активность может достигать нескольких тысяч Бк/м³. Основные источники поступления Rn в воздух помещений: почвы, которые составляют геологическую основу; подсыпания, которые делаются вокруг дома или под ним; ураносодержащие строительные материалы.

Рубидий. Естественный рубидий состоит из двух изотопов ^{85}Rb (72,15 %) и ^{87}Rb (27,85 %). ^{87}Rb — радиоактивный изотоп с периодом полураспада $4,8 \cdot 10^{10}$ лет. Распад ^{87}Rb сопровождается испусканием бета-частиц со средней энергией 78,8 кеВ (максимальная энергия 0,274 МеВ) [30]. ^{87}Rb является распространенным радионуклидом, содержание его в земной коре составляет 0,003 % по массе, удельная активность в горных породах изменяется от 1,0 до 200 Бк/кг [24].

Калий. Естественный калий состоит из трех изотопов: двух стабильных — ^{39}K (93,08 %) и ^{41}K (6,91 %) и одного радиоактивного — ^{40}K (0,012 %). Известно 9 радиоактивных изотопов калия. Наибольшее практическое значение имеет ^{40}K . Он является, вместе с ураном и торием, одним из основных естественных радионуклидов, которые в рассеянном состоянии содержатся во всех естественных образованиях, в том числе, в

почве и растениях. Калий-40 бета-излучатель, его период полураспада составляет $1,29 \cdot 10^9$ лет, кроме того, 11 % распад его ядер сопровождается испусканием гамма-квантов с энергией 1,460 МеВ. При его распаде образуется стабильный кальций-40.

Калий-40 относится к источникам внешнего и внутреннего облучения и поступает в организм, как правило, с едой и водой. Он практически полностью всасывается из желудочно-кишечного тракта и равномерно распределяется по всему организму. В воздухе ^{40}K содержится в пылевых частицах. Среднегодовая объемная активность ^{40}K в атмосферном воздухе равняется $32,4 \text{ мкБк/м}^3$. Длиннозон изменения средненедельных объемных активностей ^{40}K $1,8 \text{ мкБк/м}^3$. Поэтому содержание калия-40 в дождевых осадках обычно рассматривается в связи с загрязненностью воздуха. Удельная активность осадков, обусловленная короткоживущими продуктами распада радона, превышает активность калия-40 иногда в миллионы раз.

В водах, которые глубоко залегают и сильно минерализованы, содержание ^{40}K , как правило, повышено. Радиоактивность речной воды, в основном, обуславливается содержанием ^{40}K и зависит от минерального состава пород, а также от ряда метеорологических факторов. Радиоактивность речной воды по ^{40}K составляет приблизительно 10^1 Бк/л. Почти вся естественная бета-радиоактивность морской воды обусловлена ^{40}K . Среднее содержание ^{40}K в океанической воде и донных отложениях составляет 12,0 Бк/л и $7,4 \cdot 10^2$ Бк/л соответственно. Одним из основных элементов, от которых зависит радиоактивность почв, вместе с ураном и торием, является калий. Содержание калия в почве составляет от 0,1 до 0,74 Бк/г [21].

4.2.2. Космогенные радионуклиды

Космогенные радионуклиды образуются в основном в атмосфере в результате взаимодействия протонов и нейтронов с ядрами N, O, Ar, а затем поступают на поверхность земли с атмосферными осадками. К ним относятся ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na и др. Основными космогенными радионуклидами — источниками внутреннего облучения являются ^3H , ^{14}C , а источниками внешнего облучения — ^7Be , ^{22}Na .

В таблице 4.4 приведены основные характеристики естественных радионуклидов, индуцируемых космическим излучением.

Таблица 4.4. Основные характеристики космогенных радионуклидов

Изотоп	Характер распада	Период полураспада	Дочерний продукт распада
^3H	Бета—	12,33 лет	^3He - стаб.
^7Be	Eз*	53,3 суток	^7Li - стаб.
^{10}Be	Бета—	$1,6 \cdot 10^6$ лет	^{10}B - стаб.
^{14}C	Бета—	5730 лет	^{14}N - стаб.
^{22}Na	Бета+ Eз	2,62 лет	^{22}Ne - стаб.
^{24}Na	Бета—	14,96 часов	^{24}Mg - стаб.
^{26}Al	Бета—	$7,16 \cdot 10^5$ лет	^{26}Mg - стаб.
^{31}Si	Бета—	2,62 часов	^{31}P - стаб.
^{32}Si	Бета—	450 лет	$^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S}$ - стаб.
^{32}P	Бета—	14,28 дней	^{32}S - стаб.
^{33}P	Бета—	25,4 дней	^{33}S - стаб.
^{35}S	Бета—	87,4 дней	^{35}Cl - стаб.
^{38}S	Бета—	2,87 часов	$^{38}\text{Cl} \rightarrow ^{38}\text{Ar}$ - стаб.
$^{34\text{m}}\text{Cl}$	Бета—	31,99 минут	^{34}S - стаб.
^{36}Cl	Бета— Бета+ Eз	$3,01 \cdot 10^5$ лет	^{36}Ar - стаб.
^{38}Cl	Бета— Бета+	37,29 минуты	^{38}Ar - стаб.

*Eз — захват орбитального электрона.

Тритий. Тритий — радиоактивный изотоп водорода является чистым бета-излучателем со средней энергией 5,7 кеВ (максимальная энергия излучения 18,5 кеВ) и периодом полураспада 12,33 года [25]. Он встречается в природе в естественном виде и образуется в стратосфере на высоте 15-17 км в результате ядерных реакций, вызванных космическим излучением. Естественная распространенность атомов водорода ^3H —

$99,985\%$, ^3H (дейтерий) — 0,015% и ^3H (тритий) — 10-15%. Общее количество естественного трития определяется величиной равновесия $1,3 \cdot 10^{18}$ Бк, а скорость его образования равняется $3,7 \cdot 10^{16}$ Бк/год. Около 99% общей активности трития превращается в триневую воду и принимает участие в нормальном круговороте воды. Активность трития, измеряемая к началу ядерных испытаний в воздухе, колебалась в диапазоне 200-900 Бк/м³ для внутренних водоемов и около 100 Бк/м³ для морской воды. По окислению ядерных испытаний характерные фоновые активности воды внутренних водоемов около 300 Бк/м³, количество выходящий порядка 1000 Бк/м³ в год [26]. По данным Госкомгидрометцентра среднегодовая объемная активность трития в основных реках Украины в 1993 году находилась в диапазоне 1100-6000 Бк/м³, при средней величине 4000 Бк/м³. Максимальная величина объемной активности трития наблюдалась для р. Дунай, минимальная — для р. Десна. Среднегодовая объемная активность трития в атмосферных осадках в 1992 и 1993 годах в Украине составляла 4000 Бк/м³ и 4400 Бк/м³ соответственно. В г. Киеве в 1992 и 1993 годах наблюдалась среднегодовая объемная активность трития 14000 Бк/м³ и 1710 Бк/м³ соответственно. Сохранение трития в пробах снега, отобранных на территории Украины, приблизительно такое же, как и в атмосферных осадках.

Зависимости концентрации трития в атмосферном воздухе, измеряемые в районах Оттавы и Каитоке за период 1953-1993 года, показаны на рис. 4.3 [27]. В результате испытаний ядерного оружия в атмосфере в период между 1953-1962 годами уровень содержания трития в атмосфере резко вырос до 40 Т.Е. в районе Каитоке и до 4000 Т.Е. в районе Оттавы. После завершения испытаний содержание трития в атмосфере уменьшилось до 3 Т.Е. в районе Каитоке и до 30 Т.О. в районе Оттавы. Т.Е. — тритиевая единица, равняется одному атому трития на 10^{18} атомов водорода и эквивалентна активности 120,6 мБк/л. При абсолютной влажности воздуха 17 г/м³, 1 Т.Е. приблизительно равняется $2 \cdot 10^3$ Бк/м³. По данным работы [26], фоновая активность трития в атмосферном воздухе приблизительно равняется 1-10-2 Бк/м³.

Бериллий. Естественный бериллий состоит из одного стабильного изотопа ^9Be . Известны радиоактивные изотопы ^7Be , ^{10}Be , ^{11}Be и ^{12}Be . Наибольший интерес с точки зрения формиро-

вания радиационной обстановки представляет ${}^7\text{Be}$ с периодом полураспада 53,3 суток, который является чистым гамма-излучателем. Суммарная активность в атмосферном воздухе равняется $3,7 \cdot 10^{16}$ Бк. Количество атомов, которые образуются за единицу времени на единицу земной поверхности, равняется $8,1 \cdot 10^{-2}$ атом/см 2 ·с $^{-1}$.

Среднемесячные данные объемной активности ${}^7\text{Be}$, измеренные за период с июня 1986 г. по декабрь 1993 г. в Праге (Чешская республика), приведены на рис. 4.4 [28]. В измерениях величина наблюдается характерная закономерность — увеличение объемной активности к середине года (май, июнь, июль), а затем ее снижению, на исходе года. Максимальное значение объемной активности ${}^7\text{Be}$ — 5000 мкБк/м 3 , а среднегодовое значение — 2500 мкБк/м 3 .

Аналогичные измерения среднемесячной объемной активности ${}^7\text{Be}$ были проведены на территории Польши в 1993 и 1995 годах. Их результаты приведены на рис. 4.5, 4.6 [29]. Максимальная объемная активность бериллия наблюдалась в мае — 7560 мкБк/м 3 . Среднегодовая концентрация ${}^7\text{Be}$, измераемая на территории Польши — 2730 ± 80 мкБк/м 3 , хорошо согласовывается с результатом работы. Содержание бериллия-7 в дождевой воде около 700 Бк/м 3 .

Для Украины (г. Энергодар, Запорожская область) среднегодовая объемная активность ${}^7\text{Be}$ в атмосферном воздухе за период 1987-1993 г.г. равняется 3 мБк/м 3 [30].

Углерод. Естественный углерод состоит из смеси двух стабильных изотопов ${}^{12}\text{C}$ — 98,992% и ${}^{13}\text{C}$ — 1,108%. Известны шесть радиоактивных изотопов. Наибольший интерес, с точки зрения радиационной опасности, представляет долгоживущий изотоп ${}^{14}\text{C}$, количество которого в смеси изотопов углерода составляет $1 \cdot 10^{-10}$ %. Углерод-14 чистый бета-излучатель со средней энергией 49,5 кеВ (максимальная энергия 156 кеВ) и периодом полураспада 5370 лет. Он образуется в нижних слоях атмосферы в результате взаимодействия нейтронов с ядрами азота. Скорость образования равняется $2,2 \cdot 2,3$ атом/см 2 ·с $^{-1}$, что приводит к образованию 4,1 Тбк углерода-14 в сутки $1,5 \cdot 10^{15}$ Бк или в год [17]. Эта величина близка к величине $1 \cdot 10^{15}$ Бк/год, приведенной в работе [24]. Общее количество углерода-14 естествен-

ного происхождения оценено в $8,5 \cdot 10^{18}$ Бк (в атмосфере $1,4 \cdot 10^{17}$ Бк). Основная часть углерода-14 (около 92%) находится в глубоких слоях океана. Удельная активность ${}^{14}\text{C}$ в биосфере на поверхности Земли к проведению ядерных испытаний достигала $2,7$ Бк/кг ${}^{12}\text{C}$. При объемной плотности углерода $0,15$ г/м 3 , объемная активность углерода-14 в атмосферном воздухе будет равняться приблизительно $3 \cdot 10^{-2}$ Бк/м 3 .

Натрий. Естественный натрий состоит только из одного изотопа с массовым числом 23. Из радиоактивных изотопов наибольший интерес представляет ${}^{22}\text{Na}$. Он является гамма-излучателем с периодами гамма-излучения 0,511 и 1,275 МеВ, с периодом полураспада 2,62 лет. Суммарная активность натрия-22 оценена в $0,4 \cdot 10^{15}$ Бк, скорость образования равняется $8,6 \cdot 10^{-5}$ атом/см 2 ·с. Средняя объемная активность натрия-22 возле поверхности Земли приблизительно равняется $3 \cdot 10^{-7}$ Бк/м 3 . Максимальные суточные объемные активности натрия-22 в воздухе около поверхности Земли, которые наблюдаются в районе г. Вильнюс, указаны в таблице 4.5. Содержание радионуклида натрия-22 в атмосферном воздухе увеличивается после проведения ядерных испытаний [31].

Таблица 4.5. Максимальные суточные объемные активности ${}^{22}\text{Na}$ (мкБк/м 3) в атмосферном воздухе в г. Вильнюс

Год	Объемная активность натрия-22	Год	Объемная активность натрия-22
1963	44,75	1971	8,5
1964	39,15	1972	1,72
1965	11,70	1973	0,68
1966	6,32	1974	7,13
1968	1,86	1975	3,40
1969	4,21	1976	0,75
1970	0,76	1977	4,71

4.3. ОБЛУЧЕНИЕ ОТ ЕСТЕСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Доза облучения является мерой влияния радиационного фона и техногенных источников на человека. Это влияние может происходить разными способами. Принято различать внешнее и внутреннее облучение. Внешнее облучение человека обусловлено источниками, которые находятся вне человека. Внутреннее облучение человека или его органов обусловлено радионуклидами, которые находятся внутри организма. Пути поступления радионуклидов в организм человека могут быть разными:

- вдыхание загрязненного воздуха;
- употребление продуктов питания и воды, которые содержат радионуклиды;

- поступление радионуклидов через поверхность кожи.

Основной вклад в среднегодовые дозы, которые получает население Украины, обусловлен источниками излучений естественного происхождения, такими как космическое излучение, радиоактивные вещества в почве и строительных материалах, пероральное поступление естественных радионуклидов, которые содержатся в воздухе, продуктах питания и воде. Вдыхание является наиболее важным путем поступления радионуклидов, которые формируют основную часть эффективной дозы, за ним идет внешнее облучение и потребление продуктов питания, которые содержат радионуклиды. Основная часть эффективной дозы, обусловленной вдыханием, связана с радоном.

Для большинства населения Украины диапазон индивидуальных доз от источников естественного происхождения достаточно узок. Однако, когда рассматривается фон от естественных источников для индивидуума, то оказывается, что некоторые лица могут подвергаться облучению в дозах, которые значительно превышают среднюю величину. Примером таких контингентов являются группы, которые проживают в регионах, где почва или горные породы содержат большое количество естественных радионуклидов, лица, которые проживают в домах с высоким содержанием радона, а также группы, население, которое употребляет в еду продукты с высоким содержанием радиоактивных веществ.

Дополнительно облучению от источников естественного происхождения некоторая часть населения поддается от техно-

генных источников. В отличие от уровней облучения за счет источников естественного происхождения, которые в течение многих лет влияют на население приблизительно в одинаковой мере, влияние от искусственных источников может значительно изменяться со временем. Поэтому с целью защиты человека от естественного влияния ионизирующих излучений, обусловленного практической деятельностью, в Украине принят закон "О защите человека от влияния ионизирующих излучений", которое ограничивает индивидуальную дозу облучения от техногенных источников на уровне 1 мЗв/год.

Вместе с индивидуальными дозами, которые указывают на относительную значимость соответствующего вида деятельности, важной характеристикой является коллективная доза. Она является суммой индивидуальных доз, обусловленных каждым либо конкретным источником, и дает показатель общего влияния источника на здоровье населения. Использование коллективных доз позволяет проводить сравнение влияния на здоровье населения разных источников или технологий, в результате которых возникают ионизирующие излучения.

4.3.1. Внешнее облучение от космического излучения

Измерение мощности поглощенной дозы космического излучения около поверхности Земли затруднено из-за наличия большого излучения земных пород, поэтому дозу космического излучения обычно определяют по выполненным измерениям на различных высотах и широтах с экстраполяцией полученных результатов к поверхности Земли. Доза, создаваемая космическим излучением, существенно зависит от высоты над уровнем моря и мало зависит от геомагнитной широты.

Годовые эквивалентные дозы H (мкЗв/год) космического излучения, средние для периодов с максимальной и минимальной солнечной активностью, могут быть вычислены по форму-

$$H(h, Q) = H(43) + (Q - 43) \cdot \Delta H,$$

где ΔH — значение поправочных коэффициентов на широтный эффект в зависимости от высоты, Q — широта, h — высота над уровнем моря. Высота территории Украины над уровнем

моря варьируется от 0 до 2 км, а широта от 44° к 52° N(43)=278 мкЗв на уровне моря.

Здесь и далее предусматривается, что индекс мощности поглощенной дозы космического излучения в воздухе достаточно хорошо отображает поглощенную дозу во всех органах и тканях тела. Индекс мощности поглощенной дозы в рассмотренной точке поля излучения равняется значению мощности поглощенной дозы в сфере из тканезквивалентного вещества диаметром 30 см, центр которого размещен в этой точке.

При использовании данных по интенсивности ионизирования на уровне моря (среднее значение этой величины равняется $2,1 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) и, принимая энергию образования каждой пары ионов в воздухе равной 33,7 эВ, мощность поглощенной дозы в воздухе будет равняться $3,2 \cdot 10^{-8}$ Гр/год. Около 75 % этой величины обусловлено электронами, которые образуются при распаде мюонов, 15 % – электронами, которые образуются при взаимодействии мюонов, и 10 % – за счет других процессов. Ввиду того, что значение коэффициента качества равняется единице, годовая эквивалентная доза от космического излучения будет равняться 280 мкЗв.

Используя коэффициент перехода от плотности потока нейтронов к поглощенной дозе, равный $5 \cdot 10^{-8}$ Гр·час⁻¹·см²·с, и коэффициент качества, равный 6, годовая эффективная доза для потока нейтронов $8 \cdot 10^{-3}$ см⁻²·с⁻¹ на уровне моря будет равняться 21 мкЗв. Тогда, величина годовой эквивалентной дозы внешнего облучения за счет космического излучения, полученная в работе [6], приблизительно равняется 300 мкЗв.

В работе Bennett величина годовой эквивалентной дозы за счет космического излучения определена в 380 мкЗв. Таким образом, диапазон величин годовой эквивалентной дозы от космического излучения на уровне моря составляет 280–380 мкЗв. Для Украины можно выбрать среднюю величину, равную 330 мкЗв.

Приведенные значения дозы космического излучения относятся к открытой местности. В домах они ниже за счет экранирования космического излучения междуэтажными перекрытиями. Для Украины можно принять средний коэффициент ослабления равным 0,9 (учитывая количество деревянных и каменных домов и их поверхность). Дозы космического излу-

чения внутри помещений показаны в таблице 4.6. Там же представлены средние дозы космического излучения для регионов, рассчитанные в предположении, что 80 % времени человек проводит внутри домов, а 20 % на открытой местности (согласно данным НКДАР ООН для стран с умеренным климатом).

Таблица 4.6. Средние годовые эквивалентные дозы Н космического излучения для разных регионов Украины

Регион	h _{ср} , км	Q _{ср} , °с.ш	Н, мкЗв		
			вне помещений	в помещениях	среднее значение
Крымские горы	0,6	45	371	334	341
Крым и Керченский п-ов	0,0	45	332	299	305
Причерноморская низина	0,0	47	334	301	307
Приазовская возвышенность и Донецкий кряж	0,2	48	345	311	317
Кариатские горы	0,6	49	376	338	346
Прикарпатье и Подольские изгорье	0,3	49	352	317	324
Приднепровская возвышенность	0,2	49	346	311	318
Приднепровская низина	0,1	50	342	308	315
Полтавская равнина	0,2	50	347	312	319
Украинское полестье	0,2	51	348	313	320

Учитывая особенности географического расположения территории Украины, тип жилых домов, можно считать, что в среднем годовая эквивалентная доза за счет космического излучения равняется 320 мкЗв [21].

4.1.2. Внешнее облучение от естественных радионуклидов

На уровне земли космогенные радионуклиды не оказывают существенного воздействия на дозу внешнего гамма-

излучения. Из нуклидов земного происхождения основной вклад во внешнее излучение вносят калий-40 и радионуклиды семейств урана-238 и тория-232.

Основными источниками внешнего гамма-облучения для радионуклидов ториевого ряда являются ^{228}Th и ^{228}Ac , а для уранового ряда 99% дозы гамма-облучения обусловлено ^{214}Pb и ^{214}Bi . Мощность поглощенной дозы в воздухе (на высоте 1 м от поверхности) от радионуклидов, которые находятся во внешней среде, в зависимости от разных условий местности, колеблется в пределах от $3,7 \cdot 10^{-8}$ до $9,4 \cdot 10^{-8}$ Г/год. В некоторых районах Индии, Бразилии, Франции, Ирана и др. с повышенным содержанием ^{232}Th или ^{226}Ra в почве эта мощность дозы достигает $2,0 \cdot 10^{-6}$ и $5,0 \cdot 10^{-5}$ Гр/год. В таблице 4.7 приведены средние концентрации активности калия-40, урана-238 и тория-232, в почве и мощность поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м от земли.

Таблица 4.7. Средние удельные активности калия-40, урана-238 и тория-232 в почве разных типов и соответствующая мощность поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м от поверхности Земли

Радионуклид	Мощность дозы на единицу удельной активности в почве, 10^{-10} Гр/год ⁻¹ на Бк/кг	Средняя удельная активность, Бк/кг	Мощность поглощенной дозы в воздухе, 10^{-8} Гр/год
^{40}K	0,417	400	1,7
^{238}U	4,62	33	1,6
^{232}Th	6,04	30	1,8

Содержание нуклидов земного происхождения в почве определяется как активностью исходных горных пород, так и характером процессов почвообразования. В таблице 4.8 приведены данные о средней удельной активности основных естественных радионуклидов в почве разных типов и о сформиро-

ванной ими мощности поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м от поверхности земли. Эти дозы рассчитывались в предположении, что все продукты распада урана-238 и тория-232 находятся в равновесии со своими продуктами распада.

Таблица 4.8. Средняя удельная активность калия-40, урана-238 и тория-232 в почвах разных типов и соответствующая мощность поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м от поверхности Земли

Тип почвы	Средняя удельная активность, Бк/кг			Мощность поглощенной дозы в воздухе, нГр/год
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	
С/срозем	670	31	48	71
Бури	700	28	41	67
Каштановые	550	27	37	58
Черноземы	410	22	36	49
С/срые лесные	370	18	27	40
Дерново-луговые	300	15	22	33
Подзолистые	150	9	12	18
Горные	90	6	6	10
Среднемировое значение	370	26	26	51

По данным НКДАР ООН наиболее пригодное среднее значение отношения мощности эффективной дозы к мощности поглощенной дозы в воздухе для случаев облучения в окружающей среде гамма-излучением средних энергий на данное время представляется равным 0,7 Зв/Гр. Эта величина одинакова для мужчин и женщин, и для условий облучения внутри и вне помещений.

По почвенному составу территории Украины можно условно разбить на четыре региона: Причерноморская низина и северная часть Крымского полуострова, где преобладают каш-

тановые почвы; Карпаты и Крымские горы — горные (в основном бурые) почвы; Прикарпатье и Украинское полесье — дерново-подзолистые почвы; другие — черноземы. В таблице 4.9 приведены годовые эффективные дозы вне и внутри домов для этих регионов, а также средние годовые дозы [21].

Таблица 4.9. Годовые эффективные дозы внешнего гамма-излучения H для разных регионов Украины

Регион	Тип почв	H, мЗв		Средне-годовая доза
		вне помещения	в помещениях	
Причерноморская низина и Северный Крым	каштановые	0,36	0,44	0,42
Южный Крым и Керченский п-ов	черноземы	0,3	0,37	0,36
Крымские и Карпатские горы	бури	0,41	0,51	0,5
Прикарпатье и Украинское полесье	дерново-подзолистые	0,11	0,13	0,13
Остальные	черноземы	0,3	0,37	0,36

Если считать, что удельные активности естественных радионуклидов в строительных материалах и почвах равны, то отношение мощности дозы в помещении и на открытой местности составляет 1,35 для типичных кирпичных домов и 1,48 для бетонных домов. Для деревянных домов это отношение приблизительно равняется 0,75. В среднем в кирпичных, каменных, бетонных домах мощность дозы в 2-3 раза больше, чем в деревянных домах и в домах из синтетических материалов, где она обычно составляет $(4-5) \cdot 10^{-8}$ Гр/год. Для Украины можно считать, что 80 % населения живет в кирпич-

ных домах и 20 % — в деревянных. Поэтому среднее значение отношения мощности в помещениях к мощности дозы вне помещений составит 1,23. Рассчитанные таким способом эффективные дозы внутри помещений для разных регионов представлены в таблице 4.9. Там же приведены и средние значения эффективных доз, которые рассчитаны в предположении, что 80 % времени население проводит в помещениях, а 20 % — на открытой местности.

Ввиду того, что Крымские и Карпатские горы, Прикарпатье и Украинское полесье занимают относительно небольшую часть территории Украины, а плотность населения там небольшая, можно считать, что средняя для Украины годовая эффективная доза внешнего облучения за счет активности естественных радионуклидов в почвах составляет 360 мкЗв, а суммарная средняя эффективная доза внешнего облучения с учетом экранирования домами — 680 мкЗв.

4.3.3. Внутреннее облучение от естественных радионуклидов

Из биосферы радионуклиды поступают в тело человека при вдыхании или через пищеварительный тракт. НКДАР ООН [24] привел оценки поглощенных доз, а также эффективных доз за счет внутреннего облучения органов и тканей человека инкорпорированными нуклидами естественного происхождения. Для всех рассмотренных нуклидов, кроме бериллия-7 и натрия-22, поглощенные дозы получены на основании измерений концентраций рассмотренного нуклида или наиболее распространенного стабильного изотопа соответствующего элемента в органах или тканях организма. Переход от концентраций активности в тканях к мощности поглощенной дозой основывался на моделях, рекомендованных МКРЗ.

Полная эффективная доза за счет инкорпорированных в теле человека естественных радионуклидов рассчитывалась в соответствии с рекомендациями МКРЗ по формуле:

$$H = W_T \cdot H_T$$

$$H_T = D \cdot Q$$

где H_T — эквивалентная доза в ткани или органе T , W_T — весовой коэффициент для ткани T . Значения решающих факторов приведены в таблице 3.2. D — поглощенная доза в ткани или органе, Q — коэффициент качества. Для бета- и гамма-излучений $Q = 1$, для альфа-излучения $Q = 20$.

4.3.3.1. Космогенные радионуклиды

Космогенные радионуклиды в целом вносят очень небольшую часть в дозу внутреннего облучения. Среди радионуклидов, образованных космическим излучением, только ^3H , ^7Be , ^{14}C и ^{22}Na вносят реальный вклад в эту дозу.

Эффективные дозы для трития, бериллия-7, углерода-14 и натрия-22, соответственно равны 0,01, 3, 12 и 0,2 мкЗв, а суммарная эффективная доза составляет приблизительно 15 мкЗв.

4.3.3.2. Примордиальные радионуклиды

К примордиальным радионуклидам относятся радионуклиды, которые входят в состав радиоактивных рядов ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th и некоторые другие радионуклиды, из которых только ^{40}K и ^{87}Rb являются заметными источниками излучения.

Годовая эффективная доза внутреннего облучения человека за счет калия-40 и рубидия-87 равняется 180 и 6 мкЗв соответственно.

Ряд урана-238 (без радона и продуктов его распада) дает годовую эквивалентную дозу ~154 мкЗв (^{238}U — 10 мкЗв, ^{230}Th — 7 мкЗв, подсемейство ^{226}Ra — 7 мкЗв и ^{210}Pb — ^{210}Po — 130 мкЗв).

Ряд тория-232 (без торона и продуктов его распада) дает годовую эквивалентную дозу ~16 мкЗв (^{232}Th — 3 мкЗв и подсемейство ^{228}Ra — 13 мкЗв).

4.3.3.3. Внутреннее облучение за счет радона, торона и продуктов их распада

Радон (^{222}Rn), торон (^{220}Rn) и продукты их распада, которые вдыхают с воздухом, — главные источники фонового облучения человека. Относительная значимость их вноса обусловлена высоким коэффициентом качества, который равняется 20 для альфа-частиц. Чтобы рассчитать эквивалентную дозу для легких, необходимо умножить поглощенную дозу на решающий фактор 0,12. Таким образом, общий коэффициент перехода от поглощенной к эффективной дозе для легких при облучении альфа-частицами составляет 2,4 Зв/гр, что существенно выше коэффициентов перехода для других естественных источников излучения.

Содержание радона в континентальном и океаническом воздухе составляет в среднем 3 и 0,1 Бк/м³ соответственно. В результате нарушения метеорологических процессами радиоактивного равновесия продуктов распада (средний коэффициент равновесия — 0,6), эквивалентная равновесная объемная активность радона над континентальной суши равняется 1,8 Бк/м³. Этому содержанию радона при 20 % времени пребывания на открытом воздухе отвечает годовая эквивалентная доза облучения за счет продуктов его распада — $5,6 \cdot 10^{-2}$ мЗв.

Через меньший период полураспада торона по сравнению с радонном содержании продуктов распада торона в атмосферном воздухе в среднем в 10 раз ниже, чем продуктов распада радона. Скрытая энергия альфа-излучения на единицу активности продуктов распада торона приблизительно в 3 раза выше, чем для радона. С учетом этих двух факторов годовая эквивалентная доза облучения за счет продуктов распада торона при 20 % времени пребывания на открытом воздухе составляет $1,8 \cdot 10^{-2}$ мЗв.

Внутри помещений продукты распада радона и торона накапливаются в основном за счет выделения радона и торона из почвы под домом, строительных материалов, используемой ирригационской воды и природного газа. В результате малого периода полураспада торон может поступать в воздух лишь из тонкого поверхностного слоя, тогда как радон успевает продиффундировать со значительной глубиной вещества. Эти обстоятельства, вместе с длительным пребыванием людей в помещениях делают продукты распада радона в воздухе главным компонентом фонового облучения человека.

Распределение объемных активностей дочерних продуктов радона в домах в целом является логнормальным. Причиной понижения содержания радона в домах может служить уменьшение интенсивности вентиляции в домах, которые являются результатом осуществления программ по сохранению энергии, высокая концентрация радия в почве или строительном материале.

Среднегодовая эффективная доза радона для Украины с учетом численности населения в областях равняется 3,2 мЗв.

В сравнении с данными о дочерних продуктах ^{222}Rn , есть очень немного сообщений об измерении концентраций дочер-

них продуктов ^{226}Rn . Однако, исследования, проведенные в Германии и Великобритании, позволяют сделать вывод о том, что для районов Земли с умеренным климатом стоит ожидать среднюю величину около $0,7 \text{ Бк/м}^3$. Это отвечает среднегодовой эффективной дозе, обусловленной вдыханием дочерних продуктов торона, около $0,2 \text{ мЗв}$ для 80 % времени пребывания в домах. В работе для ряда жилищных помещений Киевской и Житомирской областей была определена средняя величина объемной активности торона (^{226}Rn). Эта величина равняется $5,4 \pm 4,5 \text{ Бк/м}^3$.

Доза облучения, обусловленная радоном в воде, создается частично за счет поступления воды через органы пищеварения, а частично за счет поступления через органы дыхания продуктов распада радона. Из-за отсутствия литературных данных по Украине можно принять среднюю в стране концентрацию радона в воде равной 3 кБк/м^3 и соответствующую годовую эффективную дозу – 20 мкЗв [21].

Дозы облучения, обусловленные непосредственно радонном и торонном, существенно меньше доз, обусловленных продуктами их распада.

4.3.3.4. Полная доза от естественных источников облучения

Полная эффективная доза получается суммированием всех эффективных доз внутреннего и внешнего облучения от естественных источников. Для Украины эта величина составляет приблизительно $4,5 \text{ мЗв}$.

Полученная величина годовой эффективной дозы от естественных источников немного меньше величины, приведенной в других работах, и равна $5,2 \text{ мЗв}$, но существенно больше средней, которая равняется $2,4 \text{ мЗв}$.

Распределение годовой эффективной дозы для Украины от естественных радиоактивных источников указано в таблице 4.10.

Таблица 4.10. Годовые эффективные дозы от естественных источников облучения

Источник	Годовые эффективные дозы, мкЗв (% от суммарной дозы)		
	Внешнее облучение	Внутреннее облучение	Суммарная доза
Космическое облучение	320 (7,1)		320 (7,1)
Космогенные радионуклиды:		15 (0,30)	15 (0,3)
цезий		$0,01 (2 \cdot 10^{-4})$	$0,01 (2 \cdot 10^{-4})$
бериллий		3 (0,07)	3 (0,07)
углерод		12 (0,27)	12 (0,27)
итрий		$0,2 (4 \cdot 10^{-3})$	$0,2 (4 \cdot 10^{-3})$
Примордиальные радионуклиды:	360 (8,1)	356 (8,0)	716 (16,1)
калий-40	125 (2,8)	180 (4,0)	305 (6,8)
рубий-87		6 (0,1)	6 (0,1)
уран-238 (всг радона)	75 (1,7)	154 (3,5)	229 (5,2)
уран-232 (всг торона)	160 (3,6)	16 (0,4)	176 (4,0)
Продукты распада радона		3200 (71,6)	3200 (71,6)
Продукты распада торона		220 (4,9)	220 (4,9)
Из естественных источников	680 (15,2)	3791 (84,8)	4471 (100)

8. Каковы наиболее серьезные последствия облучения для организма при малых дозах?
9. Дать определение латентного периода. Минимальные и максимальные латентные периоды при разных видах поражения раком.
10. Назовите наиболее значимые радиационные факторы для населения Украины и регионов.

ТЕМА 10. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ

10.1 КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ

Подлежат контролю только те продукты, потребление которых дает существенный вклад в общее облучение населения. Необходимость контролировать содержание радионуклидов в тех или иных продуктах питания основывается как на учете сельскохозяйственной деятельности, при которой производятся продукты, так особенностях рациона в том или ином районе. Например, для жителей севера России важным продуктом является оленина и продукты из нее, в то время как для центральных районов России учитывать вклад в общее облучение от потребления оленины нет необходимости.

Международная практика рекомендует определять содержание радионуклидов в отдельных продуктах, а не в совокупной диете групп населения [112, 113]. Только анализ содержания радионуклидов в отдельных продуктах питания может показать, где и какие меры рационально применять, чтобы уменьшить дозы облучения. Анализ содержания радионуклидов необходимо производить на самой последней стадии перед потреблением продуктов, т.е. после изготовления и хранения, на так называемом уровне потребления.

Молоко

Молоко и молочные продукты являются важной составной частью диеты во многих странах. Они производятся на большей части территории Земли, их потребление практически идентично по всему миру. Это продукт производится в течение очень короткого времени — порядка одного дня.

Молоко очень легко и быстро может быть загрязнено радиоактивными йодом (^{131}I) и цезием (^{134}Cs и ^{137}Cs) сразу же после аварии, сопровождающейся их выбросом. Загрязнение молока может быть очень большим, если коровы находятся на пастбищах во время выпадения радионуклидов. Даже если в это время коровы находятся в помешениях, молоко может быть загрязнено радионуклидами при дыхании животных, потребления

загрязненной воды и пищи. Особое внимание должно быть уделено контролю загрязненности молока коз и овец, так как они животные, в основном, питаются на пастбищах.

Пробы молока для измерений можно отбирать как в жидкой, так и в сухой форме.

Зерно и рис

После сбора урожая зерно и рис могут подвергнуться загрязнению только в течение хранения, причем загрязнение внешние стои. Если выпадения происходят в течение вегетационного периода, радионуклиды переходят в зерно и рис в процессе роста растений. Сравнительно легко отобрать предельно высокие пробы зерна и риса во время уборки урожая. Если выпадения происходят в течение зимы, зерно будет загрязнено только за счет корневого поглощения в следующем вегетационном периоде.

Мясо

После выпадения радиоактивных изотопов цезия мясо становится одним из главных источников потребления радио нуклидов с пищей. Загрязнение мяса - главным образом происходит при питании животных на пастбищах, но загрязнением питьевой вода также может служить важным путем попадания радионуклидов в мясо. Дыхание в загрязненном воздухе играет малую роль в загрязнении мяса. Обычно пробу надо готовить, так, чтобы она представляла большое число животных.

Рыба

После аварии загрязнение рыбы в озерах, служащих основными источниками рыбы для питания населения, может приводить к потреблению человеком значительной доли радиоактивного цезия. Получение предельно высокой пробы от множества рек и озер может потребовать некоторого комиссионного решения, так как отбор проб из большого количества водоемов крайне затруднителен.

Океанская рыба не может содержать больше радиоактивного цезия, чем пресноводная, из-за разбавления в слое океанской воды и эффективного разбавления, связанного с высоким содержанием калия в воде, но некоторые радионуклиды, выпадающие с аэрозолями воздуха, могут в ней присутствовать в значительных количествах. Мидии, некоторая разновидность

морских водорослей и других фильтрующих организмов быстро поглощают радионуклиды из морской воды и могут использоваться как биологические индикаторы степени загрязненности.

Овощи

Зеленые листовые овощи очень сильно загрязняются в течение вегетационного периода. Могут быть загрязнены также и корнеплоды. Важно получить предельно высокие пробы овощей, поэтому пробоотбор должен быть тщательно спланирован. На ранних стадиях выпадения радионуклидов зеленые овощи могут служить очень важным путем поступления радионуклидов, особенно короткоживущих.

Некоторые другие продукты

Дичь и такие продукты как грибы и ягоды могут быть загрязнены, хотя в очень редких случаях они могут дать заметную дозу при глотании. Рекомендуется проводить измерения и этих продуктов на предмет соответствия международным экспортным ограничениям.

10.2. КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Воздух

Измерение спектрального состава аэрозолей воздуха дает возможность самого быстрого определения радиоактивных изотопов, содержащихся в загрязненном воздухе, и выяснения природы загрязнения. Например, в первые дни после аварии на ЧАЭС шведские специалисты определили по спектру выпавших аэрозолей, что это продукты ядерного топлива, которое больше года выгорало в реакторе. Сразу были отброшены предположения, что это продукты ядерного топлива или взрыва хранилища ядерных материалов. А вот еще пример из недалекого прошлого. После взрыва советской водородной бомбы и анализа пробы воздуха, отобранного самолетом-разведчиком, американские ученые пришли к выводу, что изобретена ими схема водородной бомбы уступает советской и ее надо модернизировать.

Радионуклиды в атмосферном воздухе приводят к облучению человека при дыхании, при потреблении загрязненных овощей или продуктов питания животного происхождения, которые были загрязнены при дыхании или питании животных.

Вода

Дождевая вода и снег, также, являются ранними индикаторами радиоактивного загрязнения. В некоторых районах пища и дождевая вода являются одним из весомых путей загрязнения короткоживущими радионуклидами, такими как изотопы йода, человека и животных. Вода, используемая в домашнем хозяйстве, прямо или косвенно через процесс приготовления пищи, является потенциально важным путем переноса радионуклидов в организм человека. Вода, идущая на водопой скота или на полив, также, может служить источником поступления радионуклидов в пищу. Морская вода может быть источником загрязнения для моллюсков, рыбы, водорослей и др. Любые поверхностные воды: ручьи, реки, озера и пруды, - могут быть источником загрязнения.

Почва

Загрязненная почва служит источником радионуклидов, приводящим к загрязнению всех сельскохозяйственных культур. Загрязненная почва, используемая в овощеводах, может давать дополнительный вклад в загрязнение овощей.

Трава

Загрязненная трава - прямой путь переноса радионуклидов к животным и затем и к человеку через мясомолочные продукты. Знание активности травы может дать основу для решения, разрешить ли скоту пастись на данной площади.

Донные отложения

Донные отложения во всех водных объектах: моря, озера, пруды, реки, - могут быть источником загрязнения водных организмов. Загрязненные донные отложения, использованные как удобрения, могут увеличивать уровни радиоактивности почвы.

10.3. ОТБОР ПРОБ И ПРОВЕДЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

Пробы, переданные в лабораторию на анализ, как правило, не соответствуют требованиям методик анализа. Обычно пробы должны быть уменьшены по размерам и весу, они должны быть высушены до требуемой влажности, размолоты (гомогенизированы). Чтобы избежать загрязнения аппаратуры и помещения для

анализа, пробы с высокими активностями должны обрабатываться в отдельных помещениях(местах) от проб с низкой активностью.

10.3.1 Общие положения

Независимо от вида объектов и характера контролируемой среды, отбираемые пробы должны быть представительными, т.е. в полной мере отражать свойства этой среды в данный период времени. Соблюдение указанного требования обеспечивают правильным выбором пунктов и способов отбора проб.

Количество пунктов отбора и число отбираемых в них проб должно быть достаточным для достоверной характеристики уровней содержания радиоактивных веществ в данной среде.

Частота отбора проб должна обеспечивать получение сведений о динамике уровней загрязнения изучаемых объектов во времени. Ее устанавливают в зависимости от решаемой задачи и конкретных условий (характера источника, ритма поступления радиоактивных веществ в данную среду, их радионуклидного состава, сезонных особенностей верховного воздействия на человека и др.).

Объем отбираемых проб зависит от состава и концентрации радионуклидов, применяемых методов обработки и измерения проб, а также от необходимой степени точности получаемых результатов [114].

При отборе проб необходимо отбирать двойную по массе или объему пробу. Паспорт пробы должен быть заполнен со всей возможной полнотой. Желательно иметь стандартный образец паспорта. Необходимо убедиться, что пробы соответствуют методике контроля.

После отбора пробы должны быть так сохранены, чтобы избежать разложения, повреждения или загрязнения. Необходимо принять меры, чтобы избежать потери летучих радионуклидов, если таковы присутствуют в пробе или подлежат дальнейшему анализу. Пробы, хранящиеся перед анализом небольшое время, должны быть охлаждены (заморожены) или обработаны консервирующим раствором типа кислого сернистокислото натрия, спирта или формалина (как в случае молока). Если же после отбора пробы ее необходимо длительное время хранить, то

желательно пробу перевести в устойчивую форму сразу после отбора. После сушки или озонления пробы можно хранить длительное время, но в этих случаях необходимо тщательно контролировать температуру, дабы избежать потери летучих радионуклидов.

Сосуды для образцов не должны разрушаться (различными кислотами, добавленными к жидким пробам при концентрировании). Адсорбция большинства радионуклидов из раствора на ионообменную оболочку меньше, чем на стеклянную. За исключением исключенных потери на сорбцию могут быть исключены добавлением кислоты, что сохраняет стабильными комплексные реагенты.

Пробоподготовное оборудование, контейнеры для проб, материалы пробоподготовки необходимо сохранять в чистоте, чтобы не внести дополнительное загрязнение в пробы. Необходимо воздерживаться от использования одноразовых емкостей или контейнеров (полиэтиленовые пакеты, алюминиевые лотки, и т.д.).

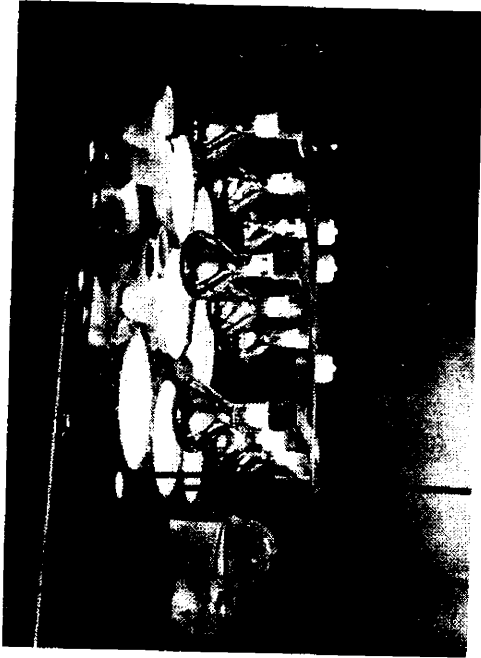


Рис. 10.1 Установка с лампами для выпаривания

Сушка уменьшает вес и объем проб и позволяет более длительное хранение. Сушка в низкотемпературном сушильном шкафу или при комнатной температуре проходит без значитель-

ной потери любых радионуклидов, за исключением изотопов мода. Пробы должны быть высушены в течение достаточного периода времени при установленной температуре, чтобы приобрести постоянный сухой вес. Необходимо провести измерения веса проб до и после сушки. Надо избегать возможного загрязнения во время сушки. В случае необходимости, сушка проводится при отрицательных температурах, чтобы избежать потери летучих радионуклидов.

Выпаривание - обычный метод концентрирования жидких проб. При использовании электрических плиток необходимо следить за тем, чтобы не произошло разбрызгивание и потеря пробы (особенно это относится к пробам молока). Использование ламп для выпаривания устраняет проблему разбрызгивания.

В качестве примера на рис. 10.1 приведена установка для выпаривания с лампами [112]. Чашки для выпаривания должны быть изготовлены из материала, который не абсорбирует радионуклиды. Некоторые радионуклиды, такие как йод, цезий и цезий, могут быть потеряны в течение процесса выпаривания. Очень хорошо быстрое выпаривание с вращающейся системой, которая функционирует под низким давлением.

Для озонления хороши низкоуглеродистые подложки из никеля. Могут использоваться и другие материалы для одноразовых подложек, например, тонколистовой алюминий. Подложки легко очищаются моющими средствами или раствором неорганической кислоты (обычно HCL). Температура для сухого озонления может варьироваться, но верхний предел выше 450°C не рекомендуется. Влажную пробу предварительно необходимо высушить при температуре 105°C. Время озонления зависит от типа и количества материала, большие пробы могут требовать 16-24 часов. Сухое озонление должно использоваться только для радионуклидов, которые не испаряются при температуре озонления. Значительные потери радионуклидов цезия происходят при температуре выше 400°C. Измерение веса золь необходимо для вычисления удельной активности радионуклида.

Пробы обычно гомогенизируются после сушки и/или озонления. Этот процесс может быть осуществлен разными методами: мешалками, смесителями, шаровыми мельницами, и т.д.

Очень важно, чтобы пробы были полностью гомогенизированы к моменту, когда из них делается выборка для проведения их следований.

10.3.2 Отбор проб

Воздух

Аэрозоли воздуха обычно отбираются на фильтр при помощи воздушного насоса. В случае возможного присутствия радонуклида ^{222}Rn , пакет (каптридж) с активированным углем или иной предназначенный для поглощения йода сорбент расположен между фильтром и насосом. Воздушный пробоотборник должен иметь вакуумметр и измеритель скорости потока (пробочной конструкции, см. пример на рис. 10.2 [112]).

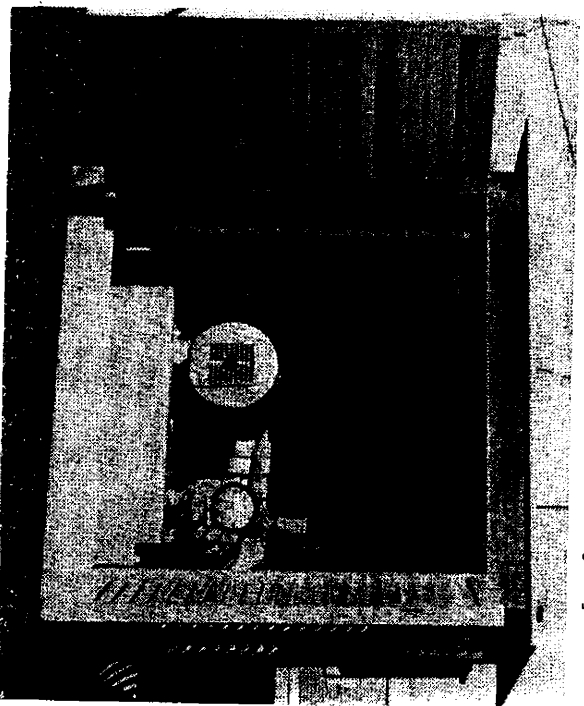


Рис. 5.2 Станция отбора проб воздуха

Входной и выходной раструбы должны размещаться так, чтобы предотвратить рециркуляцию воздушного потока. Воздух должен протгиваться через фильтр с известной скоростью в

течение известного периода времени с измерением полного про-
ченного известного периода времени с измерением полного про-
каченного объема.

При отборе проб воздуха используются фильтры АФА, см. рис. 10.3 [115]. Они предназначены для отделения дисперсных примесей от газовой фазы. В комплект фильтров АФА входят: фильтрующий элемент из материала ФП нескольких типов (АФА-РМП, АФА-РМА, АФА-РСЦ, АФА-РТЦ, АФА-ДП), бумажное защитное кольцо. Площадь рабочей поверхности фильтра - 3,10, 20, 40 см².

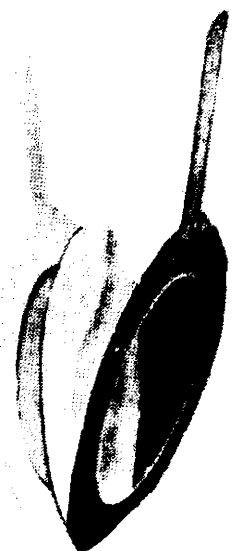


Рис. 10.3 Фильтр АФА

Для определения объемной активности аэрозолей предна-
значены аналитические аэрозольные радиометрические фильтры АФА-РМП и АФА-РМА. Они изготавливаются из фильтрующе-
щих материалов ФПП-15-1,5 на основе перхлорвиниловых во-
локон и ФПП-15-2,0 на основе ацетицеллюлозы. АФА-РМП
работает при температурах от -200 до +60 °С, не боится кислот,
но боится влаги. АФА-РМА работает при температурах от -200
до +150 °С, боится кислот, но не боится влаги.

После отбора пробы фильтр обычно прессуется (сжимает-
ся) для обеспечения стандартной геометрии при анализе на
спектрометрической аппаратуре, после чего они могут быть
озолены для проведения радиохимического анализа.

Трава

При отборе пастбищной травы или других видов корма
для животных существенно, чтобы отбор производился со зна-
чительной площади дабы гарантировать представительность

пробы. В этом случае необходимо проявлять осторожность, чтобы избежать загрязнения с почвы. Следует избегать отбора проб с наклонных поверхностей, с которых может быть не стандартный срыв. Не рекомендуется использовать грабли или скрепки. Отбираемую растительность необходимо держать в руке при ручной обрезке или собирать в примный мешок при механической обрезке. Растительность должна быть срезана на высоте 5 см от земли. В сухом климате срез можно проводить ближе к земле. Большие пробы могут быть сокращены делением на четыре равные части.

В лаборатории растительность может быть проанализирована во влажном состоянии или, если время позволяет, и потери радиоактивного йода не имеет значения, в высушенном состоянии. Трава высушивается при температуре, не превышающей 105°C в течение 24 часов. Высушенная проба должна быть измельчена, чтобы пройти через сито 2 мм. Пробы могут быть высушены и озолены.

Активность травы можно выражают одновременно в единицах удельной активности - Бк/кг (сухая или влажная масса) и в единицах поверхностной активности - Бк/м².

Почва

Пробы почвы обычно отбирают для исследования радиоактивных выпадений или для изучения коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в растения.

При исследовании выпадений пробы отбираются на нетронутых местах на глубину 25-50 см колонковым буром. Место отбора должно быть широким и открытым, покрытым травой, без кустов и деревьев. Не должно быть дождевых промыв. Не должно быть следов червей или грызунов, которые могут привести к перемешиванию почвы. Проба должна включать произрастающую траву и дерн.

Для изучения коэффициентов перехода из почвы в растительность пробы почвы на пахотных землях отбираются буром на глубину 5 см или на глубину вешалки.

Проботборник может быть любым, но он должен вырезать керн с вертикальными стенками. Для обеспечения представительности отбора берется 10 проб (или одна с площади не менее 200 см²).

Пробы с относительно высокими уровнями активности должны храниться и обрабатываться отдельно от других проб с меньшей активностью. В лаборатории пробы почвы должны быть разложены лотках или пластмассовых ковчехах и высушены при комнатной температуре в течение нескольких дней. С малым воздушным потоком при низкой температуре (50°C) в сушильном шкафу процесс сушки проходит без потери радионуклидов из образцов почвы.

Сухая масса пробы должна быть взвешена. В зависимости от целей анализа необходимо либо удалить растительность и органические остатки из проб почвы, либо оставить. Если они удалены, то корни, дерн и растительность должны быть измельчены и равномерно распределены по всему объему пробы. Если же они удалены, тогда их необходимо собрать и взвесить. Камни должны быть собраны, взвешены и удалены. Масса бракованного материала должна быть принята во внимание, но не при вычислении удельной активности почвы. Эта выбранная масса дает дополнительную информацию о структуре исследуемой площади. Для некоторых целей вся проба должна быть измельчена на частицы требуемых для последующего анализа размеров. Вообще говоря, пробы должны быть измельчена так, чтобы пройти через сетку с ячейками 2 мм.

Активность проб почвы выражают одновременно как в удельной активности - Бк/кг сухого веса, так и в единицах поверхностной активности - Бк/м².

Молоко

Пробы молока необходимо отбирать в центрах его переработки. Хотя пробы также могут быть отобраны и в отдельных фермах и даже от отдельных животных. В течение коротких промежутков времени молоко можно хранить в холодильном устройстве (рефрижераторе, холодильнике). Консервирующее средство типа формалина или азида натрия (3.5 мл 5% водного раствора на литр), может быть добавлено, чтобы предотвратить свертывание при более длительных сроках хранения.

Важно записать дату отбора пробы. В больших центрах переработки молока оно собирается из нескольких источников с разными датами удоя. В этом случае необходимо использовать дату отбора пробы.

Другие пищевые продукты

Должны быть отобраны для исследований пищевые продукты, дающие более 5 % вклада в общую диету. Информация относительно того, какие пищевые продукты относятся к этой категории, невлекается из статистических сборников. Для исследований предпочтительны пробы отдельных продуктов, нежели проба суммарного продукта. Если, однако, используется такая смешанная проба, то она должна исследоваться для диеты взрослых и детей отдельно.

Пищевые продукты, которые сильно загрязнены, но свойственны лишь для населения конкретного региона, могут давать значительный вклад в полную дозу, даже если их потребление относительно мало. Эти пищевые продукты обычно известны местным ортам здравоохранения по предыдущему опыту. Если же таких данных нет, то такие продукты необходимо идентифицировать на основании косвенных данных, чтобы исследовать в случае аварийной ситуации.

Отбор проб необходимо производить вначале на перерабатывающих центрах, а затем на рынках. Вообще, производственные продукты должны быть подготовлены как для домашнего применения. Пробы должны быть очищены и пищевые части сохранены для исследований. Масса определяется, вычитая несъедобную часть. Для проб рыбы, домашней птицы и мяса кости легко удаляются после нагревания в течение одного часа при 150°C. Весом пробы является вес съедобной части продукта после вычитания массы костей (несъедобной части). Для прямых измерений 1 кг свежей пробы вполне достаточен.

При озонлении пищевых продуктов температура должна подниматься медленно, пока не будет достигнута температура воспламенения.

Когда верхний предел достигнут температура может быть поднята более быстро до 450°C, и пробы могут быть озонены за примерно 16 часов. Температура выше, чем 450°C, могут приводить к потерям летучих радионуклидов, например, изотопов цезия. Принимая меры предосторожности можно избежать воспламенения всех продуктов, в которых не очень много жира.

Обычно, 10-25 г озоненной пробы достаточно для исследований.

Вода

Пробы воды должны отбираться на предпритяжных водоподготовки (фильтрации / очистки) только до разгрузки в распределительную систему. Если проба воды отбирается в месте локального потребления, то труба должна быть промыта в течение 2-3 минут до отбора. Сборник (коллектор) дождевой воды площадью от 0,1 до 1 м² может обеспечить необходимое количество воды для пробы. Типичный коллектор дождевой воды показан на рис. 10.4 [112].

Существуют многочисленные автоматические пробоотборники. Некоторая потеря малорастворимых радионуклидов возможна на стенках коллектора, но эта потеря может быть в значительной степени компенсирована при промывании стенок и дна разбавленной соляной кислотой.

Загрязнение проб дождевой воды грунтом и приповерхностной пылью может быть уменьшено, размещая коллекторы на крышах домов. Необходимо избегать цветения воды. Размер коллектора зависит от количества и частоты выпадений дождя и частоты отбора. Для региона с выпадением 5-25 см осадков в месяц, рекомендуется собирать площадь 0,1-0,2 м². Стороны и дно коллектора должны очиститься несколько раз резиновым шпательем и ополаскиваться дистиллированной водой.

Если коллектор используется многократно, необходимо принять меры, чтобы не допустить накопления активности в нем, которое будет влиять на последующие пробы. В регионах, где выпадает много снега, проводится отбор проб снега. Это можно сделать, собирая снег с площади одного квадратного метра. При отборе проб с поверхности рек необходимо избегать застойных зон. Пробы озерной воды не должны отбираться около береговой линии.

Если пробы воды должны быть сохранены в течение некоторого промежутка времени, в них добавляется концентрированная соляная кислота в количестве 10 мл на литр пробы как можно скорее после осуществления отбора, чтобы избежать адсорбции радионуклидов на стенах емкости.

10.4 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Особое внимание необходимо уделить проблеме загрязнения, когда малоактивные и высокоактивные пробы должны быть проанализированы на одном и том же оборудовании.

Прямые измерения без предварительной обработки (концентрирования) могут выполняться на высоко активных пробах и на всех пробах для определения радионуклидов по гамма-излучению.

Хорошо оборудованная лаборатория должна в прямых измерениях определять содержание, к примеру, такого радионуклида как ^{137}Cs , на уровне 5-10 Бк/кг (Бк/л). Для всех региональных лабораторий рекомендуется использовать идентичную счетную геометрию, хотя на практике это трудно достичь. Все лаборатории низшего уровня должны быть калиброваны по центральной лаборатории высшего уровня, например, лаборатория областного уровня должны быть откалиброваны по государственной (центральной) лаборатории должен быть намного ниже, к примеру, по ^{137}Cs , на уровне 0,1-1 Бк/кг из-за более сложного оборудования, большее время счета и лучшее приготовление образцов. Вообще говоря, предел чувствительности должен составлять малую часть от зарегистрированной активности, на уровне 1-10% и ниже для каждого радионуклида.

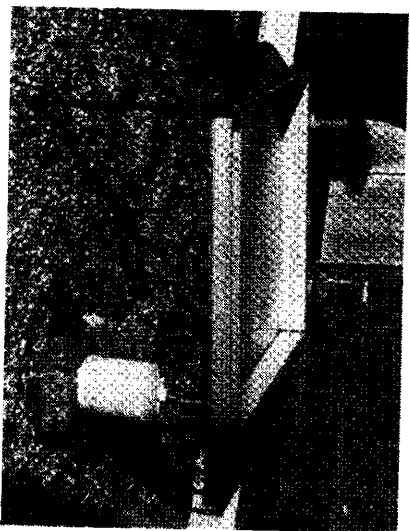


Рис. 10.4 Коллектор дождевой воды

256

Контролируемые активности в пробах должны позволять оценить возможные дозы облучения человека. Сравнение измеренных уровней (величин активностей) с установленными контрольными уровнями и уровнями вмешательства позволит своевременно принять необходимые меры по защите населения от необоснованного облучения. Эти уровни для населения страны даны в Нормах радиационной безопасности [10]. Международная организация здравоохранения и др. международные организации устанавливают допустимые уровни активности в товарах и продуктах, которые попадают на международный рынок, и за превышением которых обязаны следить производители товаров и продуктов.

10.4.1 Гамма-спектрометрия

Главное преимущество гамма-спектрометрии - способность измерять активность гамма-нуклидов прямо в первоначальной пробе без необходимости использовать методы концентрирования или химического обогащения. Гамма-спектрометрия позволяет качественно и количественно определить наличие радионуклидов в пробе и их активности. Список более важных гамма-излучателей с точки зрения облучения человека приведен в таблице 10.1.

Форма, в которой пробы помещаются в гамма-детектор, зависит от типа пробы, имеющегося оборудования, композиции радионуклидов и их уровней активности. Это могут быть планшеты из нейлона, алюминизованные подложки, сосуды Марионелли и др.

Время измерений зависит от типа пробы, необходимых пределов детектирования, эффективности регистрации и предельных интересов радионуклидов.

Некоторые рекомендации для эффективного использования гамма-спектрометрии при анализе проб можно сформулировать в следующем виде:

- необходимо выбрать типовые геометрии измерений воздушных фильтров, воды, растительности, свежих овощей и других пищевых продуктов;

257

- в каждой геометрии необходимо откалибровать аппаратуру по энергии и эффективности на контрольных источниках той же плотности, что и подлежащие измерению пробы;

- калибровочные кривые для материалов измеренно пробы;ности, таких как молоко и мясо, можно проводить на водных растворах с добавлением известной активности требуемых радионуклидов, для материалов другой плотностью при калибровке необходимо использовать метод дозавок, применяя подобные по плотности калибровочные материалы;

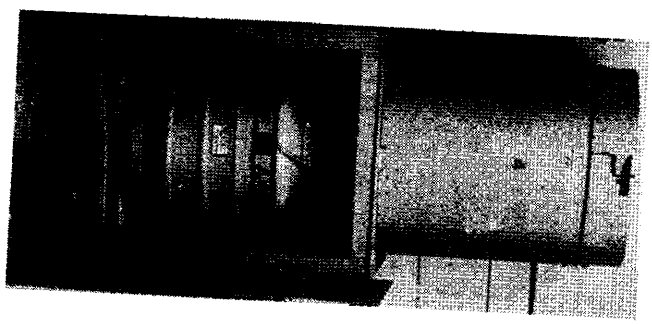


Рис. 10.5 Германиевый детектор в защите с системой охлаждения

Измерения гамма-излучений на местности и контроля поступающих на спектральный анализ проб. Обычно приборы такого класса могут одновременно измерять и бета-активность. Эти приборы используют как счетчики Гейгера - Мюллера, так и датчики на основе германия.

Стационарная система для проведения измерений спектров гамма-излучений состоит из:

- активность стандартных источников, таких как ^{137}Cs и ^{60}Co , необходимо ежедневно рассчитывать для коррекции на радиоактивный распад.

Новую гамма-спектрометрическую установку желательно приобретать совместно с программным обеспечением, чтобы анализировать площади фотопиков и получать результаты в терминах активности. Программы необходимо проверять вручную вначале работы и изредка в течении последующей работы.

Переносные приборы для измерения гамма-излучений на местности и контроля поступающих на спектральный анализ проб. Обычно приборы такого класса могут одновременно измерять и бета-активность. Эти приборы используют как счетчики Гейгера - Мюллера, так и датчики на основе германия.

детектора на основе германия, системы защиты от фона, многоканального анализатора, принтера и, возможно, графопостроителя. Система должна иметь германиевый полупроводниковый датчик (ППД) с эффективностью до 20 % и разрешающей способностью примерно 2.0-2.2 кэВ при энергии 1 МэВ.

Датчик должен иметь защиту с толщиной стенки из свинца (или композиционную) до 10 см. Германиевый полупроводниковый датчик при измерении должен быть охлажден до температуры жидкого азота. На рис. 10.5 [112] показан детектор в защите с сосудом Дьюара для охлаждения жидким азотом;

источника питания, предусилителя, усилителя и аналого-цифрового преобразователя - АЦП;

многоканального анализатора с принтером.

и/или спектрометра, оборудованного 7.62 см x 7.62 см детектором на основе сингиллитоора на базе NaI с разрешением до 8 %, защитой и многоканальным анализатором. Описанный ниже метод [112] определения активности радионуклидов применим для энергий от 60 кэВ до 2 МэВ и разнообразных по плотности образцов.

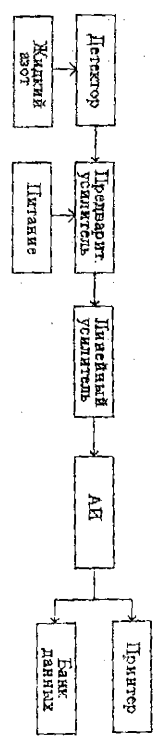


Рис. 10.6 Блок-схема измерительного тракта

Этот метод можно использовать при анализе проб воздуха, воды, почвы, донных отложений, разнообразных продуктов питания и их смесей, загрязненных в результате выбросов атомных станций, испытаний ядерного оружия и радиационных аварий.

Пробы желательно упаковывать в компактные с плотно закрывающейся крышкой полиэтиленовые контейнеры, такие, которые использовались при калибровке.

Блок-схема спектрометрического тракта приведена на рис. 10.6. Обычно детектор изготавливается из сверхчистого германия или германий-литиевого дрейфового кристалла. Предварительный усилитель необходим для уменьшения шумов. Его пер-

Вый каскад, как и детектор, охлаждается жидким азотом. Высоковольтное питание должно позволять плавно поднимать напряжение от нуля до, примерно, 2000 – 5000 вольт. Питание подается на детектор через предварительный усилитель. Линейный усилитель усиливает сигнал до уровня, необходимого на входе амплитудного анализатора (АМ). Данные из анализатора выводятся на принтер и записываются на магнитный носитель в банк данных.

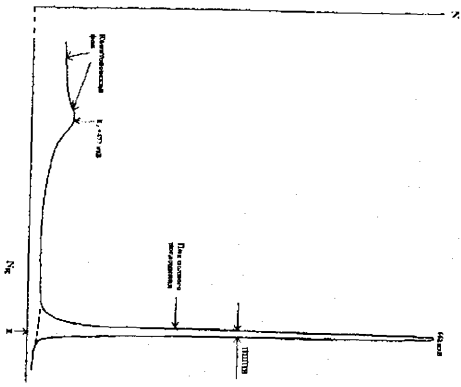


Рис. 10.7 Распределение импульсов по амплитудам при регистрации источника Cs-137

Памяти и добавляет к числу, записанному в данном канале, единицу. После заданного промежутка времени в анализаторе формируется спектр сигналов, представляющий собой зависимость количества поступивших импульсов от энергии (номера канала).

На рис. 10.7 показан спектр импульсов, возникающий при регистрации излучения от источника Cs-137. По оси абсцисс отложен номер канала, по оси ординат – число зарегистрированных импульсов в канале. При поглощении всей энергии гамма-квантов в детекторе образуется пик полного поглощения (фотопик) – показан в правой части рисунка. При частичном поглощении гамма-

Принцип определения активности радионуклидов в пробе кратко

можно описать следующим образом. Гамма-квант, вылетевший из пробы и попавший в детектор, производит в нем ионизацию. Собранный заряд преобразуется в предварительном усилителе в сигнал, пропорциональный величине ионизации. Далее сигнал усиливается и подается на вход анализатора импульсов. Анализатор импульсов по величине поступившего сигнала определяет номер канала в свой

канала регистрируется меньшая энергия, и появляется непрерывное распределение в меньших каналах. Этот фон вызван комptonовским рассеянием гамма-кванта и уходом рассеянного гамма-кванта за пределы детектора. Это обычно происходит при попадании первичного гамма-кванта вблизи границ детектора. Максимальная энергия, переданная при однократном рассеянии для Cs-137 – $E_s = 477$ кэВ. Разрешение детектора определяется полной шириной на полувысоте (ПШВ) пика полного поглощения, см. рис. 10.7. Центр тяжести фотопика определяет энергию гамма-кванта, на рис. 10.7 он показан стрелкой с буквой E. На рис. 10.8 [102] показан спектр аэрозолей воздуха, отобранных в первых числах мая 1986 г. сразу после аварии на ЧАЭС. На рисунке хорошо видны многочисленные фотопики, соответствующие излучению разных радионуклидов. По положению пика в спектре определена энергия, соответствующая данному пику, и по таблицам определен радионуклид, испускающий ту или иную гамма-линию.

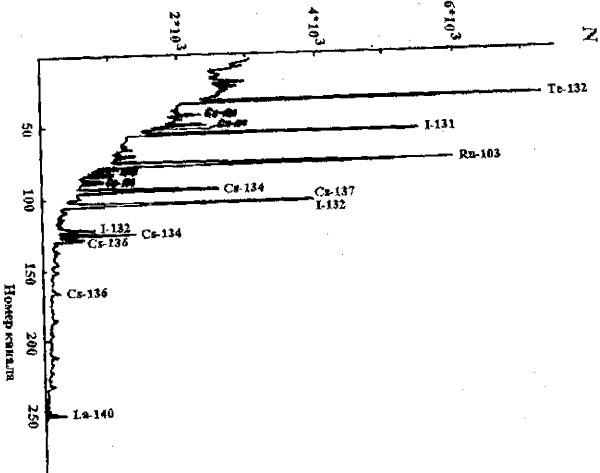


Рис. 10.8 Спектр аэрозолей воздуха в г. Харьков сразу после аварии на ЧАЭС

Связь канала анализатора с энергией определена процедурой нахождения энергии калибровки. Энергетическая калибровка проводится нахождения связи между номером канала анализатора и энергией гамма-кванта, центр фотопика которого находится в данном канале. Эта процедура может быть выполнена или вручную или компьютерной программой. Энергетическая калибровка датчика делается, измеряя энергию в спектре калибровочных источников с хорошо разделяемыми пиками в спектре в пределах энергетического диапазона, представляющего интерес, обычно от 60 кэВ до 2 МэВ. Список радионуклидов, используемых для калибровки, приведен в табл. 10.1.

Таблица 10.1 Радионуклиды, используемые при калибровке

Радионуклид	E, кэВ
Am-241	59.54
Cd-109	88.03
Co-57	122.06, 136.47
Ce-139	165.85
Cr-51	320.08
Na-22	511.00, 1274.54
Cs-137	661.66
Mn-54	834.84
Co-60	1173.24, 1332.50

Калибровочный источник должен измеряться достаточно долго, чтобы фотопики в спектре хорошо проявились. Номер канала, который соответствует центру тяжести каждого фотопика, должен быть записан. Строится график, по шкале ординат которого откладываются энергии, соответствующего радионуклида, а по оси абсцисс — номер канала анализатора, см. рис. 10.9. Для хорошо работающей системы получится линейная зависимость. Компьютеризированные системы обычно делают это автоматически, если включен режим калибровки.

Калибровка по эффективности — процедура нахождения связи между количеством гамма-квантов, испущенных в пробе и

числом зарегистрированных импульсов в канале, соответствующих фотопику данного радионуклида.

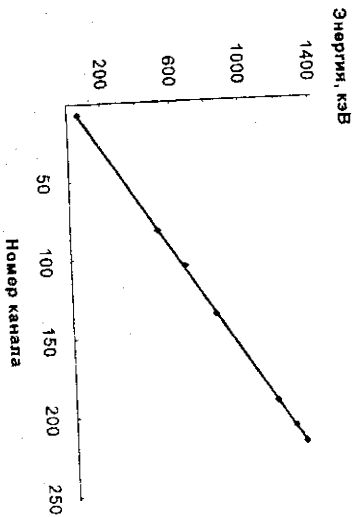


Рис. 10.9 Калибровка по энергии

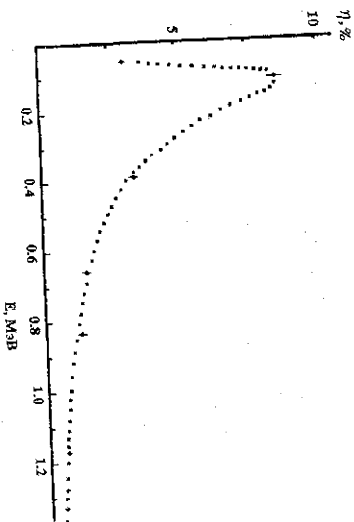


Рис. 10.10 Зависимость эффективности от энергии

Очень важно, чтобы эта калибровка была выполнена тщательно, потому что от нее зависит точность всех результатов. На рис. 10.10 приведена зависимость калибровочной кривой по эффективности от энергии [102]. Зависимость приведена для германевого диффузионно-дрейфового полупроводникового детектора ДГДК-50А1.

Калибровочная кривая сильно зависит от геометрии измерений, поэтому ее надо определять для каждой используемой геометрии.

Хотя можно использовать и графическое представление зависимости эффективности от энергии, как на рис. 5.10, но для автоматизации измерений необходимо аппроксимировать эту зависимость гладкой кривой.

Широко используется простое выражение для заданной зависимости эффективности от энергии следующего вида:

$$\ln(\epsilon) = a + b\epsilon \ln(E) \quad (10.11)$$

где: ϵ - абсолютная эффективность, а и b - подгоночные параметры, определяемые методом наименьших квадратов, E - энергия, кэВ.

Обработка спектров довольно трудоемкая процедура и обычно она проводится компьютерными программами. Эти программы должны выполнять следующие операции:

- автоматический поиск пиков в спектре;
- определение положения пика по энергии;
- определение радионуклида, который дал соответствующий пик, используя библиотеку радионуклидов;
- вычисление площади пика и вычитание фона;
- определение активности соответствующего радионуклида в образце;
- определение ошибок измерения (пределов детектирования).

Но каждая программа нуждается в периодической ручной проверке, особенно при первом использовании. Опшем метод обработки спектров вручную. На рис. 10.11 показан типичный пик в спектре. Пик с фоном расположен в каналах от a_2 до b_1 . В каналах от a_1 до a_2-1 и от b_1+1 до b_2 - чистый фон, величина которого используется для определения фона в каналах от a_2 до b_1 . Число отсчетов пик+фон:

$$n_t = \sum_{i=a_2}^{b_1} n_i \quad (10.2)$$

Фон под пиком определяется как фон вне пика, умноженный на отношение ширины пика к суммарной ширине фона вне пика:

$$n_b = \left(\sum_{i=a_1}^{a_2-1} n_i + \sum_{i=b_1+1}^{b_2} n_i \right) \frac{b_1 - a_2 + 1}{a_2 - a_1 + b_2 - b_1} \quad (10.3)$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 - номера соответствующих каналов или величин энергии. Скорость счета в пике: $R_n = (n_t - n_b)/t$, t - время набора спектра.

Удельная активность радионуклида n , который образует данный пик в спектре, определяется по формуле:

$$A_m = \frac{R_n}{\eta \cdot m \cdot P_\gamma} \quad (10.4)$$

где: A_m - удельная активность, Бк/кг,

R_n - скорость счета радионуклида n в пике за вычетом фона,

η - абсолютная эффективность регистрации гамма-кванта на имп/с,

m - абсолютная эффективность регистрации гамма-кванта для данной энергии,

P_γ - квантовый выход данного радионуклида.

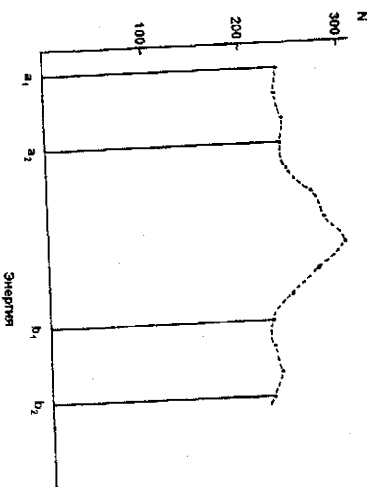


Рис. 10.11 Типичный пик в спектре

Если перед измерением проводилась некоторая подготовка готовка, например высушивание или озолнение, то в знаменателе формулы (10.4) необходимо поставить коэффициент (меньший

единицы), показывающий во сколько раз уменьшился вес пробы при прободоподготовке.

Если же измеряется объемная активность, то вместо величины массы m в знаменателе формулы (10.4) необходимо поставить величину объема V в m^3 , и тогда вместо удельной активности получим объемную активность A_v , Bq/m^3 .

10.4.2 Измерение альфа-излучателей

Как и всякое специальное оборудование приборы данного класса делятся на переносные и стационарные.

Переносные приборы используются для проведения измерений на местности и входного контроля поступающих в лабораторию проб, с целью разделения их на группы по общей альфа-активности.

Стационарная система с альфа-спектрометром включает:

- кремниевый поверхностно-барьерный датчик в вакуумной камере со всей необходимой электроникой (источник питания, предусилитель, усилитель и аналого-цифровой преобразователь - АЦП, эффективность детектора альфа-излучений может достигать 25 %, а его активная площадь поверхности примерно 3-5 cm^2 ;

- многоканальный анализатор с разрешением более 400 каналов и принтером.

Типичная система состоит из 4096-канального анализатора с четырех и большим количеством отдельных входов для четырех и более датчиков.

В природе встречаются как естественные альфа-излучатели, так и образованные в результате деятельности человека (антропогенные). К наиболее распространенным естественным альфа-излучателям относятся изотопы урана (234,235,238), изотопы тория (230,232), изотопы радия (224,226) и изотопы радона (220,222). Кроме упомянутых выше многие дочерние продукты радиоактивных цепочек испускают альфа-частицы. Из наиболее распространенных антропогенных альфа-излучателей отметим изотопы урана (232,236), плутония (238,239,240,242), изотопы амерция (241,243) и изотопы кюрия (242,244).

Все альфа-излучатели испускают альфа-частицы. Альфа-частицы (масса 4 а.е.м., заряд + 2) проиькоуют интенсивную ионизацию и, следовательно, имеют малый пробег в веществе. Для сравнения с другими излучателями в таблице 10.2 приведены свойства нескольких типов ионизирующего излучения. Одна атомная единица массы (а.е.м.) равна одной двенадцатой массы изотопа углерода с массовым числом 12. Приближенно эта единица равна массе одного нуклона, протона или нейтрона, если считать, что их массы также приближенно равны.

Табл. 10.2 Свойства ионизирующей радиации

	Альфа-частицы	Бета-частицы	Гамма-кванты
Масса, а.е.м.	4	1/1836	0
Заряд	+2	± 1	0
Энергетический диапазон, МэВ	4-7	0-3	0,005-3
Удельная ионизация, пар ионов/мм воздуха	5500	4-8	1.5
Пробег в воздухе	30 мм	200 мм	до 10 м

Чтобы ионизировать молекулу кислорода или азота необходимо им передать приблизительно 32.5 эВ. Потому альфа-частица с энергией 4 МэВ производит приблизительно 130 000 пар ионов в воздухе до остановки, пробегая примерно 3 см в воздухе при нормальных атмосферных условиях или 0.01 мм алюминия. Альфа-частицы имеют дискретный спектр энергий. При распаде ядра из основного состояния с испусканием альфа-частицы дочернее ядро может оказаться в нескольких возбужденных состояниях, поэтому в спектре наблюдаются несколько различных групп альфа-частиц, каждая со своей определенной энергией.

Альфа-излучение поглощается полностью очень тонкими слоями вещества. Поэтому важно принять меры против значительного самопоглощения альфа-частиц в пробе. Для этих целей используются очень тонкие слои пробы, полученные путем электроосаждения, между пробой и детектором создается ваку-

ум или проба непосредственно граничит со счетчиком, как и проточных счетчиках и жидкостных спинтилляционных.

В табл. 10.3 приведены основные приборы измерения альфа-частиц. Как следует из приведенных данных, наилучшим разрешением при малом уровне шумов имеют поверхностно-барьерные детекторы и проволочные ионизационные камеры. Имея лучшее разрешение, поверхностно-барьерный детектор имеет меньшую эффективность регистрации. Диаметр поверхностно-барьерного детектора редко превышает 10 мм.

Блок-схема спектрометрического тракта приведена на рис. 10.12

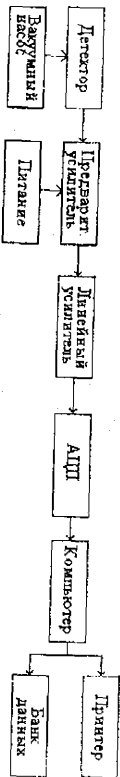


Рис. 5.12 Блок-схема измерительного тракта

Детектор изготавливается из кремниевого кристалла р-типа. Одна сторона, обращенная наружу – рабочая поверхность, покрыта тонким слоем золота ($< 0,1 \text{ мкм}$). Толщина обедненного чувствительного слоя менее 2 мм, что достаточно для поглощения альфа-частиц с энергией 80 МэВ. Между детектором и пробой насосом поддерживается вакуум ($< 10^{-3} \text{ мм. рт. ст.}$). Пределительный усилитель необходим для уменьшения шумов. Высоковольтное питание должно позволять плавно поднимать напряжение от нуля до, примерно, 200 вольт. Питание подается на детектор через предварительный усилитель. Линейный усилитель усиливает сигнал и подает его на амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), находящийся в компьютере. Данные из компьютера выводятся на принтер и записываются на магнитный носитель в банк данных. По сравнению со схемой на рис. 10.6 на данной блок-схеме вместо амплитудного анализатора показаны АЦП+компьютер, что эквивалентно. В последнее время более распространенной становится схема с АЦП и компьютером.

Табл. 10.3 Сравнительные характеристики приборов для альфа-измерений

	Эффективность, %	Фон, имп/мин	Энергетическое разрешение, кэВ
Пропорциональный счетчик	50	2	—
Поверхностно-барьерный детектор	15	0.01	< 20
Проволочная ионизационная камера	50	0.01	50
Жидкий спинтилляционный счетчик	100	5	до 500

Для количественных спектрометрических измерений детектор должен быть калиброван по энергии и эффективно-сти на контрольных источниках. Методы калибровки подобны тем, какие используются для калибровки аппаратуры по измерению гамма-квантов, см. вышеизложенное. На рис. 10.13, в качестве примера, показана линейная зависимость между номером канала компьютера и энергией альфа-частиц.

Определение актинидов, таких как плутоний, негтуний и уран в пробах окружающей среды представляет несомненный интерес. При их определении первичные пробы минерализуются, актиниды переходят в анионы солянокислых комплексов, а извлекаются из них жидкостным ионно-обменным способом с использованием триэзооктиламينا. Далее разной для каждого актинида смесью кислот можно извлечь тот или иной радионуклид.

На рис. 10.14 приведен спектр альфа-частиц от источника с несколькими актинидами [116]. Спектр состоит из нескольких хорошо разделенных линий, которые образованы альфа-частичами, испущенными изотопами урана, плутония, америция, тория и калифорния. Как уже отмечалось, спектр

каждого радионуклида содержит несколько групп альфа-частиц определенной энергии.

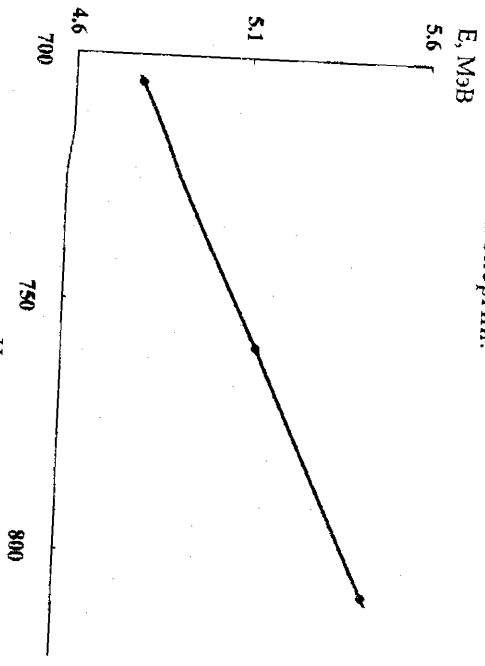


Рис. 10.13 Энергетическая калибровка

Каждая группа соответствует переходу на разные уровни возбуждения дочернего ядра. Энергия, соответствующая переходу на основной уровень, является максимальной и имеет самую большую вероятность. Связанный с ней ^{220}Th при переходах на основной уровень дочернего ядра ^{220}Pb испускаются альфа-частицы с максимальной энергией 4,824 МэВ (вероятность этого перехода равна 84,5%), а при переходах на более высокие уровни испускаются альфа-частицы с меньшими энергиями — 4,784 и 4,729 МэВ (соответствующие вероятности равны 13,2 и 16%). У изотопа Ам-241 на рис. 10.14 имеется небольшая примесь Pu-238, а сами 250 и 252 а.е.м.

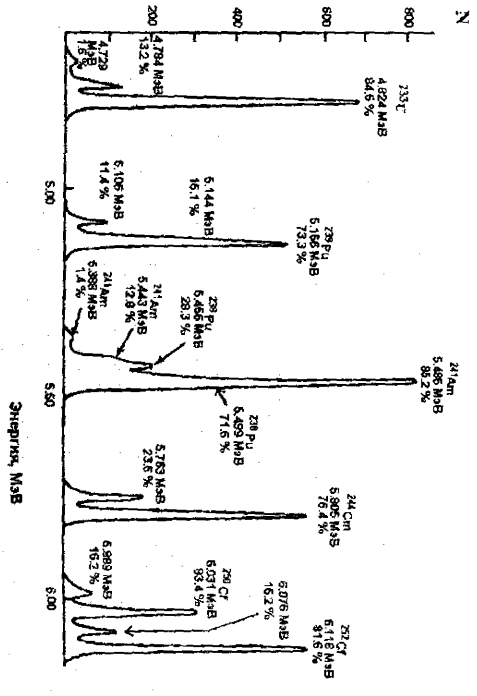


Рис. 10.14 Спектр альфа-частиц от источника с несколькими радионуклидами

10.4.3 Измерение бета-излучателей

Разработаны переносные приборы с тонким окном, счетчиком Гейгера - Муллера, измеряющие одновременно бета-, гамма-излучение и только гамма-излучение (отсекая бета-излучение) для проведения измерений на местности и для разделения на группы по величине бета-активности поступающие в лабораторию пробы.

- Стационарная система с бета-датчиком состоит из:
 - иллектонового проточного газового счетчика с системой антисовпадений. Некоторые системы этого типа могут одновременно измерять более 16 проб.
 - и/или жидкостного спинтиллиационного датчика. Охлаждаемый, низкофоновый жидкостной спинтиллиационный счетчик рекомендуется при измерении бета-спектров с малой верхней граничной энергией, например, как у трития;
 - многоканальный анализатор, с разрешением более 400 каналов и принтером.

К важнейшим бета-излучателями, которые дают заметный вклад в облучение человека, относятся изотопы стронция и цезия. Внутреннее облучение этими радионуклидами происходит при потреблении пищи и воды.

Стронций

Наиболее опасными радионуклидами стронция являются ^{89}Sr и ^{90}Sr . Они образуются при спонтанном делении ^{238}U . ^{89}Sr — чистый бета-излучатель с максимальной энергией в бета-спектре 1.46 МэВ, с периодом полураспада 50.5 сут распадается в ^{89}Y . ^{90}Sr — чистый бета-излучатель с максимальной энергией в бета-спектре 0.54 МэВ, с периодом полураспада 28 лет распадается в ^{90}Y , который также является чистым бета-излучателем с периодом полураспада 65 час и максимальной энергией в бета-спектре 2.27 МэВ. Эти изотопы попадают в атмосферу после испытаний ядерного оружия, после радиационных аварий на ядерных установках или при выбросах с ядерных реакторов.

Как химические аналоги кальция радионуклиды стронция могут заменять кальций в биосфере и попадать в организм человека через пищевые цепочки. Радионуклиды стронция в организме человека накапливаются на поверхности кости.

Табл. 10.4 Активности ^{90}Sr в объектах окружающей среды

Объект	Диапазон
Почва, Бк/кг сухой вес	0.3 - 19
Поверхностные воды, Бк/л	0.002-0.052
Воздух, Бк/м ³	0.0001-0.08
Трава, Бк/кг сырая	0.3-110
Молоко, Бк/л	0.01-2
Листовые овощи, Бк/кг сырые	0.04-25
Фрукты, Бк/кг сырые	0.02-1.55
Другие продукты, Бк/кг сырые	0.02-3

В таблице 10.4 приведены ориентировочные активности ^{90}Sr в объектах окружающей среды в Европе [117]. Значения активности, указанные в этой таблице, позволяют оценить объем пробы, необходимый для проведения анализа.

Если используется низкофоновый пропорциональный счетчик с уровнем фона 0.3 имп/мин, то при 50 % извлечении стронция из пробы и 50 % эффективности счетчика для 95% достоверного интэрвала минимальный предел регистрации составит 0.007 Бк/пробу. Для уверенной регистрации в пробе должно быть примерно в 10 раз больше активности. Деля величину 0.07 Бк/пробу на данные в таблице, находим необходимый объем (вес) пробы. Например, при объемной активности воздуха 0.0001-0.08 Бк/м³ необходимо отобрать (прокачать через фильтр) 700 - 0.9 м³ воздуха соответственно.

Основной метод контроля активности радионуклидов стронция в объектах окружающей среды — это радиометрическое измерение радионуклидов стронция после их радиохимического выделения из проб. Радиохимическое выделение необходимо, чтобы избавиться от других мешающих бета-излучателей.

Из нерастворимых солей стронция в химическом анализе используются сульфат, карбонат и оксалат.

Отношение активности ^{89}Sr и ^{90}Sr в пробах зависит от времени, прошедшего после взрыва ядерного оружия. При возрасте продуктов деления два года ^{89}Sr во внешней среде практически отсутствует [114]. Определить вклад ^{89}Sr в смеси с ^{90}Sr можно следующим образом. После установления радиоактивного равновесия между ^{90}Sr и ^{90}Y измерят общую активность смеси ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{90}Y . В этом случае активности ^{90}Sr и ^{90}Y равны. После выделения итрия измерят его активность, а потом находят активность ^{89}Sr , вычитая из общей активности смеси активности ^{90}Sr и ^{90}Y .

Радиоактивный стронций определяют по дочернему ^{90}Y . Из озоненной и растворенной пробы после установления радиоактивного равновесия между стронцием и итрием радионуклиды итрия вместе с носителем осаждают в виде оксалатов. При наличии в растворе других радионуклидов, особенно ^{14}Ce , который соосаждается с итрием как оксалат, необходима предварительная очистка. Церий отделяют от итрия в виде йодата.

Для полной очистки итрия от примесей его осаждают в виде гидроокиси, а затем оксалата, используемого для измерения активности и определения выхода носителя весовым методом. Предельный метод применим для проб, с момента заражения которых радионуклидами прошло не менее одного года.

Радиометрирование оксалата проводят в пропорциональном счетчике или в жидком сцинтилляционном счетчике, предварительно растворив осадок.

Тритий

Тритий, присутствующий в окружающей среде, имеет естественное и искусственное происхождение. В результате ядерных испытаний в атмосфере, выбросов (бросов) предприятий ядерной энергетики и промышленности по производству изотопов значительная активность трития попала в окружающую среду.

В результате распада тритий превращается в гелий, испуская бета-спектр с максимальной энергией 18,6 кэВ. Период его полураспада 12,33 года.

Метод определения трития основан на определении активности тритиевой воды (НТО) с помощью жидкостного сцинтилляционного метода. Метод применим ко всем типам воды при использовании 20-мл счетных виал.

При активностях выше примерно $2 \cdot 10^4$ Бк/м³ применим прямой метод измерения с помощью стандартных жидкостных сцинтилляционных счетчиков.

При меньших активностях необходимо электролитическое обогащение и/или измерение больших объемов.

При активностях больше 10^6 Бк/м³ пробы необходимо разбавить дистиллированной водой с гарантированно малой активностью трития.

Пробу воды дистиллируют для удаления нелетучих газовых веществ и нелетучих радионуклидов. До перегонки к пробе добавляют углекислый натрий (Na_2CO_3) и тиосульфат натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). При этом большая часть мешающих измерению веществ остается в осадке вместе с любым радиоактивным йодидом и бикарбонатом, которые могли бы присутствовать в пробе. Если необходимо измерить активность трития в твердых пробах, их растворяют. Перегонка выполняется до степени сухости, чтобы гарантировать полный переход трития в дистиллят. Доля дистиллята смешивается со сцинтиллятором в счетной виале. Смесь охлаждается и измеряется в жидкостном сцинтилляционном спектрометре.

В порции смеси (обычно эмульсия) кинетическая энергия бета-частиц трития частично преобразуется в световые кванты. Эти фотоны подсчитываются счетной аппаратурой.

Для определения эффективности стандартные тритиевые растворы и фоновые образцы измеряются одновременно, чтобы минимизировать погрешности, обусловленные старением сцинтиллятора и инструментальным дрейфом аппаратуры. Чувствительность имеет порядок 20-200 Бк/л при времени счета 100 минут.

10.4.4 Методы радиационного контроля

По применяемой классификации приборы, измеряющие дозовые характеристики ионизирующих излучений, делятся на дозиметры, радиометры и спектрометры. К дозиметрам относятся приборы, измеряющие дозовые характеристики (дозы и их мощность). К радиометрам и спектрометрам относятся приборы и установки, измеряющие активность радионуклида в источнике и их производные величины такие, как объемная и удельная активность и др. Спектрометры в свою очередь делятся на альфа-, бета- и гамма-спектрометры.

Здесь мы рассмотрим только основные принципы измерения ионизирующих излучений, которые нашли применение в системе радиационного контроля в рабочих помещениях, окружающей среды и облучения человека.

Измерение мощности дозы гамма-излучения

Для обнаружения радиоактивного загрязнения гамма-активными радионуклидами и количественного измерения эффективности (экспозиционной) дозы как правило используют детекторы на базе цилиндрического счетчика Гейгера-Мюллера [118] (хотя в последнее время достаточно широко используются и полупроводниковые детекторы). Схема включения счетчика Гейгера-Мюллера показана на рис. 10.15. Счетчик заполняется инертным газом (неоном или аргоном).

При попадании в счетчик ионизирующей частицы, если напряжение питания $V_0 > V_{\text{зажигания}}$ происходит коронарный газовый разряд. Электроны, образованные регистрируемой частицей, через некоторое время t_{cp} создадут в области ударной ионизации

защиты электронно-ионные линии. В результате, через очень малый промежуток времени ($\sim 10^{-7}$ сек), весь счетчик окажется охваченным газовым разрядом.

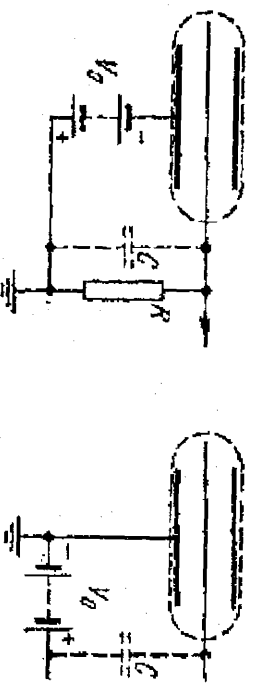


Рис. 10.15 Схемы включения счетчика Гейгера Мюллера

Во время развития активной стадии разряда, в области ударной ионизации образуется большое количество ионов, которые, накапливаясь вблизи нити счетчика, создают положительный пространственный заряд. Он снижает напряженность поля вблизи нити до такого значения, что дальнейшее образование льня становится невозможным.

В течение активной стадии разряда через счетчик идет большой электронный ток, обуславливающий быстрое нарастание напряжения на эквивалентной емкости С. Для того, чтобы погасить коронный разряд в счетчике, достаточно снизить напряжение между электродами до $V_0 - V_{\text{зажигания}}$, т.е. снять со счетчика напряжение ($V_0 - V_{\text{зажигания}}$). При определенных условиях величина импультса, образовавшегося на емкости С, при протекании в цепи коронного разряда могла бы достигнуть значения ($V_0 - V_{\text{зажигания}}$). Для этого необходимо, чтобы внешнее сопротивление R было существенно больше $R_{\text{внутр}}$.

Величина $R_{\text{внутр}} \approx 10^7$ ом, тогда сопротивление утечки R должно быть не менее $10^8 - 10^9$ ом. Если бы сопротивление утечки было бесконечно велико, то емкость С сохранила бы заряд, а счетчик сколько угодно долго оставался нечувствительным к последующим ионизирующим частицам. На самом деле сопротивление R хотя и велико, но конечно. С течением времени емкость С разряжается и чувствительность счетчика восстанавли-

вается. Поэтому импульс, обладая сравнительно небольшим временем нарастания ($\sim 10^{-4}$ сек), имеет длинный экспоненциальный спад, определяемый постоянной времени RC ($\sim 10^{-2}$ сек).

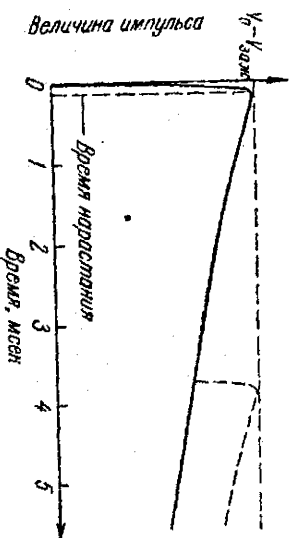


Рис. 10.16 Форма импульса счетчика Гейгера.

Типичная форма импульса изображена на рис. 10.16. Неудобно видеть, что счетчик будет чувствителен и к частицам, попавшим в него раньше, чем емкость С полностью потеряет свой заряд. Такой импульс изображен на рис. 10.16 пунктиром. Очевидно то, что чем меньше интервал времени, разделяющий две следующие друг за другом частицы, тем меньше амплитуда второго импульса.

Поскольку значения амплитуд импульсов от счетчика Гейгера достаточно велики (десятки вольт), то используемые электронные устройства имеют достаточно высокие пороги срабатывания. Поэтому время разрешения счетчиков Гейгера составляет обычно несколько миллисекунд.

Временную разрешающую способность счетчиков Гейгера можно увеличить на порядок и более, используя принцип придуления гашения разряда. В настоящее время для этого используются различные добавки (несколько процентов) к ос-

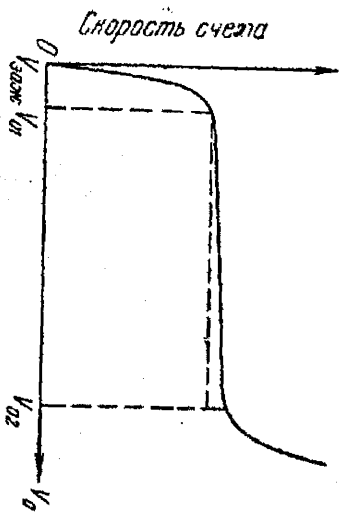


Рис.10.17. Счетная характеристика счетчика Гейгера.

Счетной характеристикой счетчика Гейгера называют зависимость скорости счета частиц от величины напряжения V_0 . Приложенного к счетчику. На рис.10.17 приведена типичная счетная характеристика счетчика Гейгера. При напряжениях V_0 меньше потенциала зажигания газового разряда $V_{заж\ газ}$ скорость счета частиц практически равна нулю. В области напряжений несколько превышающих $V_{заж\ газ}$, хотя газовое усиление достаточно велико, амплитуда импульсов еще мала. В этой области напряжений имеет место значительный разброс амплитуд импульсов. По мере увеличения напряжения V_0 , разброс амплитуд уменьшается, что приводит к быстрому росту скорости счета n при $V=V_{01}$. Скорость счета n равна числу частиц попадавших в рабочий объем счетчика за 1 сек. При дальнейшем изменении напряжения скорость счета практически не меняется. При напряжениях, превышающих V_{02} , скорость счета ложных импульсов быстро нарастает и в счетчике возникает непрерывный разряд, не поддающийся гашению.

Для счетчика Гейгера, наполненного газом и смесью газов, образования одной пары ионов достаточно для возникновения разряда, следовательно, если частица, прошедшая через счетчик Гейгера, образует одну пару ионов, то она будет зарегистрирована. Эффективность регистрации заряженных частиц (электронов) близка к 100%. Для фотонов, благодаря их большой проникающей способности, эффективность регистрации составляет единицы процентов. Для рентгеновского излучения до 100 кэВ,

эффективность регистрации может составлять десятки процентов.

Важной характеристикой счетчика является зависимость эффективности регистрации гамма-излучения от энергии излучения. С помощью специально рассчитанных фильтров добиваются, чтобы эффективность регистрации в широком диапазоне энергий не зависела от энергии регистрируемой частицы.

Измерение нейтронного излучения

Для регистрации нейтронов используют процессы взаимодействия нейтронов с ядрами атомов. Захват нейтрона приводит к образованию возбужденного ядра, которое либо расщепляется с испусканием заряженной частицы, либо возвращается в основное состояние с испусканием фотона.

Тепловые и надтепловые нейтроны регистрируют, используя реакции типа $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, $^7\text{Li}(n, \alpha)^3\text{He}$, а также деление тяжелых ядер ^{235}U и ^{239}Pu . В ионизационных камерах или пропорциональных счетчиках применяют бор в виде газа высокой чистоты (трифторид бора BF_3 , высокообогащенный ^{10}B) или B_4C в виде твердого вещества, наносимого тонким слоем на поверхность электродов.

Счетчики, заполненные BF_3 , применяют также и для регистрации быстрых нейтронов. Для этого борный счетчик помещают в замедлитель. Для регистрации нейтронов промежуточных энергий используют всеволновой детектор, выполненный из двух — трех водородосодержащих коаксиальных цилиндрических слоев, с внутренним расположением борного счетчика.

Поток нейтронов регистрируют и сцинтилляционными методами, с использованием $\text{LiF}(\text{Eu})$, стибьбена и антрацена, $\text{ZnS}(\text{Ag})$ и др. Быстрые нейтроны после ряда столкновений с ядрами водорода теряют свою скорость и становятся тепловыми.

В результате сцинтилляционный счетчик фиксирует два импульса: один импульс от протона отдачи, возникшего вследствие взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами водорода; второй от альфа-частиц и ядер лития, появившихся в ядерной реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ в результате взаимодействия тепловых нейтронов с бором. Тепловые нейтроны регистрируют также сцинтиллятором $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с V_2O_5 или сцинтиллятором из смеси $^6\text{Li}(\text{Eu})$ или ^7LiF [119].

Измерение индивидуальных доз облучения

Для измерения индивидуальных доз внешнего облучения используются как активные (прямопоказывающие) так и пассивные дозиметры. В прямопоказывающих индивидуальных дозиметрах используются в качестве детекторов газоразрядные или полупроводниковые детекторы.

К пассивным дозиметрам относятся термолуминесцентные и фотодозиметры. В термолуминесцентных дозиметрах преобразование поглощенной энергии ионизирующего излучения в люминесценцию происходит под действием теплового нагрева. Интенсивность вывешивания пропорциональна дозе облучения. Диапазон измерения доз $10^{-3} - 10^5$ рад.

В фотодозиметрах в результате поглощения излучения в кристаллах брома серебра образуются центры проявления, состоящие из групп атомов металлического серебра. Совокупность этих центров создает скрытое изображение. В дальнейшем под действием проявителя они способны восстановить металлического серебра из зерен бромистого серебра. Метод фотодозиметрии основан на том, что степень почернения дозиметрической пленки зависит от экспозиционной дозы. Так как фотозумульсия невоздухоэквивалентная, то плотность почернения зависит и от энергии регистрируемого ионизирующего излучения, достигаемая максимумом в области 40 – 50 кэВ. Для устранения этой зависимости «хода с жесткостью» применяют сглаживающие фильтры, которые снижают зависимость плотности почернения пленки от энергии гамма-квантов. В результате ход с жесткостью в диапазоне энергий 0,5 – 3 МэВ не превышает $\pm 20\%$. Диапазон регистрации доз облучения с помощью фотодозиметрического метода обычно составляет 0,05 – 50 рад [119].

ВОПРОСЫ:

1. Какие продукты подлежат контролю содержания радионуклидов?
2. Какие объекты окружающей среды дают возможность самого быстрого определения радиоактивных изотопов и являются источниками радионуклидов?

3. Основные требования при отборе проб для определения и характеристики уровня содержания радиоактивных веществ в контролируемой среде.
4. Методы отбора проб воздуха, травы, почвы, воды и некоторых пищевых продуктов.
5. Охарактеризуйте метод гамма-спектрометрии.
6. Охарактеризуйте метод измерения альфа- и бета-активности.
7. Охарактеризуйте метод нейтронного излучения.
8. Назовите приборы, измеряющие дозовые характеристики ионизирующих излучений.
9. Дозиметры для измерения индивидуальных доз.