

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

М. В. ГОЛЬЦЕВ, И. Ф. МЕДВЕДЕВА, В. А. МАНСУРОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ МАССОВОЙ
АКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ПОМОЩЬЮ РАДИОМЕТРА**

Учебно-методическое пособие



Минск БГМУ 2021

УДК 539.1.074(075.8)

ББК 31.42-5я73

Г63

Рекомендовано Научно-методическим советом университета в качестве учебно-методического пособия 29.05.2020 г., протокол № 9

Р е ц е н з е н т ы: д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. физики твердого тела Белорусского государственного университета В. В. Углов; канд. физ.-мат. наук, доц. каф. «Физика» Белорусского национального технического университета Н. П. Юркевич

Гольцев, М. В.

Г63 Определение удельной массовой активности различных материалов с помощью радиометра : учебно-методическое пособие / М. В. Гольцев, И. Ф. Медведева, В. А. Мансуров. – Минск : БГМУ, 2021. – 46 с.

ISBN 978-985-21-0818-8.

Рассматриваются основные вопросы дозиметрии и методика проведения лабораторной работы «Определение удельной массовой активности различных материалов с помощью радиометра».

Предназначено для студентов 1–2-го курсов всех факультетов.

УДК 539.1.074(075.8)

ББК 31.42-5я73

ISBN 978-985-21-0818-8

© Гольцев М. В., Медведева И. Ф., Мансуров В. А., 2021

© УО «Белорусский государственный медицинский университет», 2021

ВВЕДЕНИЕ

Использование ядерной энергии существенно изменило экологическую обстановку вследствие поступления в природную среду радиоактивных продуктов искусственного происхождения. В Республике Беларусь имеется более 1000 радиационно-опасных объектов, представляющих важное значение для экономики страны и социальной сферы. Явление радиоактивности используется в медицине, в промышленности и в научных лабораториях. В результате деятельности различных отраслей ежегодно образуется около 8 т радиоактивных отходов, что является основной причиной радиоактивного загрязнения территории, изменения состояния биосферы и негативного влияния на здоровье людей. Радиационное воздействие ядерно-топливного цикла как в условиях нормальной эксплуатации объектов из-за накопления радиоактивных отходов, так и в результате аварийных ситуаций также оказывает влияние на окружающую среду.

Эффективная реализация широкомасштабных реабилитационных мероприятий в республике в значительной мере зависит от формирования радиоэкологической культуры поведения населения в изменившихся условиях жизнедеятельности и природопользования. В связи с этим приоритетными являются знание и понимание физической природы радиоактивности, механизмов воздействия ионизирующих излучений на организм и осознанная необходимость безопасного поведения, исключающего необоснованное облучение.

Учебно-методическое пособие подготовлено в соответствии с типовой программой «Медицинская и биологическая физика», тема 7 — «Ионизирующие излучения, основы дозиметрии». Пособие содержит теоретические основы в разделах (1–4): радиоактивность, дозиметрия ионизирующих излучений, взаимодействие ионизирующих излучений с веществом, влияние радиоактивности на человека. В разделе 5 рассмотрена тема «Приборы регистрации ионизирующих излучений» и в разделе 6 — техническое описание лабораторной работы «Определение удельной массовой активности продуктов питания и строительных материалов с помощью радиометра».

РАДИОАКТИВНОСТЬ. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

АТОМНОЕ ЯДРО И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ядро атома состоит из положительно заряженных протонов (p) и не имеющих заряда нейтронов (n).

Протон (p) — это атомное ядро самого легкого изотопа атома водорода ${}^1_1\text{H}$. Протон обладает единичным электрическим зарядом, который по величине ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) равен заряду электрона, но **противоположен по знаку**.

Заряд ядра, или число протонов в нем, определяют **атомный номер** или порядковый номер Z элемента в таблице Менделеева и называется **зарядовым числом**. Именно величина Z и обуславливает отличие одного химического элемента от другого.

Массы нейтрона и протона приблизительно одинаковы. Масса электрона в 1836 раз меньше массы протона. Поэтому общее число протонов и нейтронов в ядре A характеризует массу атома элемента и его называют **массовым числом**.

Массы атома, ядра и его составных частей измеряются в атомных единицах массы — **АЕМ**.

1 АЕМ равна $1/12$ массы атома ${}^{12}\text{C}$, что составляет $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Каждый химический элемент (нуклид) можно записать следующим образом: ${}^A_Z\text{X}$, где A — массовое число, Z — заряд ядра или порядковый номер элемента. Число нейтронов в ядре $n = A - Z$. Например, запись ${}^{235}_{92}\text{U}$ означает, что в ядре атома урана 92 протона, 143 нейтрона и 92 электрона на орбитах вокруг ядра (в таблице Менделеева он находится под номером 92).

Ядра, содержащие одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называют **изотопами**. Почти каждый элемент периодической системы Менделеева состоит из нескольких изотопов. Например, **изотопы I**: ${}^{131}_{53}\text{I}$, ${}^{133}_{53}\text{I}$, ${}^{135}_{53}\text{I}$. **Изотопы K** представлены рядом изотопов, число протонов в которых равно 19, а число нейтронов изменяется от 14 до 40, массовые числа изменяются, соответственно, от 33 до 59.

Изотопы могут быть как **стабильными**, сохраняющимися неизменными, так и **нестабильными**, превращающимися в ядра других элементов. Примером является природный K, представленный двумя стабильными изотопами: (${}^{39}_{19}\text{K}$, ${}^{41}_{19}\text{K}$) и одним нестабильным (${}^{40}_{19}\text{K}$). Всего в природе найдено 272 стабильных атомных ядра химических элементов. Все остальные ядра, называемые **радиоизотопами**, обладают радиоактивностью в различной степени.

ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ И РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД

Радиоактивность — это самопроизвольный процесс превращения одних атомных ядер в другие, сопровождающийся испусканием одной или нескольких частиц. При этом обязательно ядром выделяется определенное количество энергии.

В процессе радиоактивного распада у ядра могут изменяться как массовое число A , так и атомный номер Z , а также нуклоны одного вида превращаться в нуклоны другого вида (протоны в нейтроны и наоборот).

Процесс радиоактивного распада может быть представлен в виде:

$${}^A_Z X = {}^{A_1}_{Z_1} Y + a + E_a, \quad (1)$$

где ${}^A_Z X$ — начальный радионуклид или материнское ядро, ${}^{A_1}_{Z_1} Y$ — дочернее ядро, получаемое при распаде, a — испускаемые частицы (α -частицы, β -частицы-протоны и электроны, γ -кванты), E_a — энергия продуктов распада.

Приведенные формулы распада (2–6) характеризуют различные типы реакций распадов радиоактивных ядер:

$$\alpha\text{-распад:} \quad {}^A_Z X = {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}; \quad (2)$$

$$\beta^- \text{-распад:} \quad {}^A_Z X = {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} \beta + \bar{\nu}; \quad (3)$$

$$\beta^+ \text{-распад:} \quad {}^A_Z X = {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 \beta + \nu; \quad (4)$$

$$\beta\text{- (электронный) захват:} \quad {}^A_Z X + {}^0_{-1} \beta \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu; \quad (5)$$

$$\gamma\text{-распад:} \quad \left({}^A_Z X \right)^* \rightarrow {}^A_Z Y + \gamma. \quad (6)$$

В формулах (3–4) обозначены специфические элементарные частицы: ν — нейтрино, $\bar{\nu}$ — антинейтрино с очень маленькой массой, в формуле (6) ${}^A_Z Y$ — ядро, находящееся в возбужденном состоянии. Переход ядра из возбужденного в основное состояние ${}^A_Z X$ сопровождается испусканием γ -квантов.

Для системы, включающей атом с распадающимся ядром и продукты распада, выполняются законы сохранения энергии (энергия материнского ядра равна энергии продуктов распада), импульса, электрического заряда. Явление радиоактивности обусловлено только внутренним строением ядра атома и не зависит от таких внешних факторов, как давление, температура, магнитные и электрические поля, химические реагенты.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Различают **3 основных вида радиоактивных излучений**: альфа-излучение, бета-излучение и гамма-излучение.

Альфа-излучение возникает при α -распаде и характеризуется формулой (2). Альфа-распад — это испускание ядром частицы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов, т. е. ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$, получившей название *альфа-частицы* (*α -частицы*). В результате *α -распада* номер элемента уменьшается на 2, а масса на 4 АЕМ. Альфа-распад характерен для *тяжелых радионуклидов*, у которых массовое число $A > 200$, а $Z \geq 82$, и для ядер редкоземельной группы элементов с массовым числом $A = 140\text{--}160$.

Альфа-излучение — это поток положительно заряженных частиц, имеющих скорость порядка $(1,4\text{--}2,0) \cdot 10^7$ м/с. Энергия α -излучения велика и может изменяться в диапазоне от 2 до 9 МэВ (мегаэлектронвольт)¹ ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж). Ионизирующая способность α -частиц огромна, но с учетом затраты энергии на каждый акт ионизации проникающая способность незначительна: длина пробега в воздухе составляет 3–11 см, в жидких и твердых средах в биологических тканях — 10–100 мкм. Альфа-излучение поглощается алюминиевой пластинкой толщиной до 0,05 мм или листом бумаги. Надежной защитой от α -частиц является одежда человека. Поскольку α -излучение имеет наибольшую ионизирующую, но наименьшую проникающую способность, внешнее облучение α -частицами практически безвредно. Попадание же α -активного вещества внутрь организма весьма опасно. Альфа-частицы испускаются при радиоактивном распаде радона (${}^{222}\text{Rn}$) и торона (${}^{220}\text{Tn}$), которые являются продуктами распада урана-238 (${}^{238}\text{U}$) и тория-232 (${}^{232}\text{Th}$).

Бета-излучение — это поток отрицательно заряженных электронов (${}_{-1}^0\beta$ -частиц) или положительно заряженных позитронов (${}_{+1}^0\beta$ -частиц), возникающих при β -распадах и представленных формулами (3, 4). Энергия данных частиц находится в интервале от 20 кэВ до 1–2 МэВ. Заряд и масса β -частиц меньше, а скорость больше, чем у α -частиц. В связи с этим β -частицы обладают меньшей ионизирующей, но большей проникающей способностью. Длина пробега этих частиц с высокой энергией в воздухе составляет до 20 м, воде и живых тканях — до 3 см, металле — до 1 см. По результатам исследований известно, что β -частицы могут быть полностью поглощены оконными или автомобильными стеклами и металлическими экранами толщиной в несколько миллиметров; одежда

¹ **Электрон-вольт** (русское обозначение — эВ, международное — eV) — внесистемная единица энергии, используемая в атомной и ядерной физике, в физике элементарных частиц. Один электрон-вольт равен энергии, необходимой для переноса элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов в 1 В. $1 \text{ эВ} = 1,60218634 \cdot 10^{-19}$ Дж.

способна поглощать до 50 % β -частиц. При внешнем облучении организма на глубину около 1 мм проникает 20–25 % β -частиц, и это излучение опасно лишь при попадании радиоактивных веществ непосредственно на кожу, слизистую оболочку глаз или внутрь организма (после Чернобыльской аварии на расстояниях 50–100 км от АЭС наблюдались β -ожоги ног при ходьбе босиком). В качестве примера β -излучения может служить распад изотопов ^{90}Sr (100 % β -излучение) и ^{40}K (10 % γ -квантов и 90 % β -частиц), схемы распада которых приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Бета-частицы также испускаются при радиоактивном распаде ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^3H , ^{147}Pm .

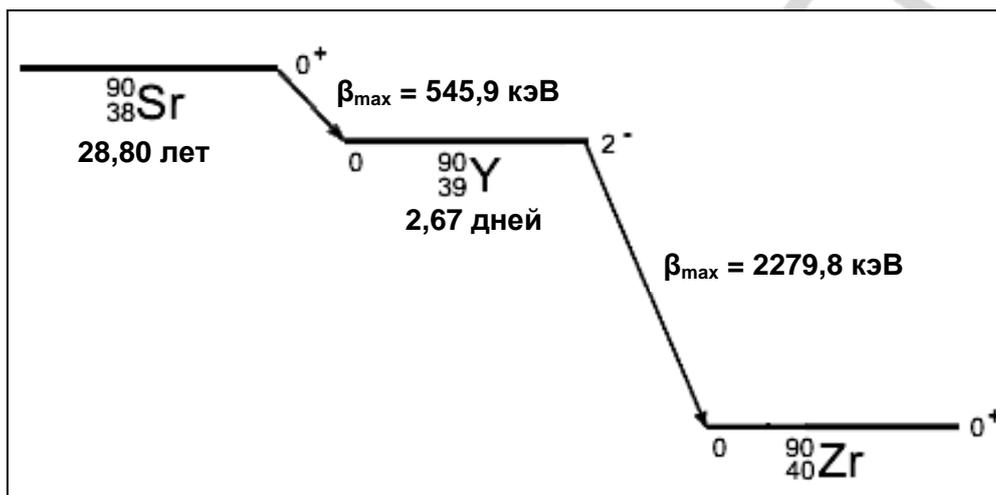


Рис. 1. Схема распада стронция ^{90}Sr : $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Zr}$. При распаде ^{90}Sr образуются электроны с энергиями до 546 кэВ, при последующем распаде ^{90}Y образуются электроны с энергиями до 2,28 МэВ с образованием изотопа ^{90}Zr

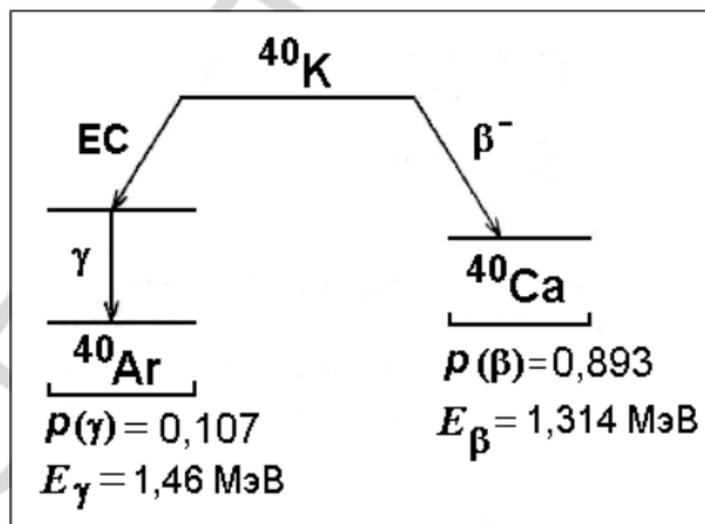


Рис. 2. Схема распада ^{40}K : β -распад ядра радиоактивного изотопа ^{40}K сопровождается образованием изотопа ^{40}Ca с испусканием β -частиц ($p = 89\%$), имеющих непрерывный спектр с максимальной энергией 1,314 МэВ, и образованием изотопа ^{40}Ar ($p = 11\%$) с моно γ -излучением с $E = 1,46 \text{ МэВ}$

Гамма-излучение (γ -излучение) — это коротковолновое, с длиной волны $\lambda < 0,1$ нм, электромагнитное излучение, возникающее при γ -распаде, схема которого представлена формулой (6).

Скорость γ -квантов равна скорости света, энергия γ -излучения находится в интервале 10 кэВ – 5 МэВ. Ионизирующая способность γ -излучения меньше, чем у α - и β -частиц. Гамма-излучение имеет наибольшую проникающую способность и в воздухе может распространяться на сотни метров. Для ослабления его энергии могут быть использованы различные материалы. Известно, что *слой половинного ослабления* (слой вещества, снижающий энергию γ -излучения в 2 раза) составляет: для воды — 23 см, стали и свинца — около 3 см, бетона — 10 см, дерева — 30 см. В связи с этим достаточно часто γ -излучение называют **проникающей радиацией**. Процесс испускания γ -кванта радионуклидом происходит *без изменения массового числа и заряда*, поэтому γ -излучение не является самостоятельным типом радиоактивности.

Известно, что процесс превращения материнских ядер в дочерние сопровождается α - и β -распадами. Образовавшиеся дочерние ядра оказываются в различных *возбужденных состояниях*, т. е. на более высоких энергетических уровнях относительно стационарного. Число таких уровней для ядра может быть достаточно большим, и это будет сопровождаться значительным числом возможных переходов между уровнями. Ядро испускает не один, а произвольное, но строго заданное для данного элемента количество квантов с известной энергией. По значению этой энергии можно точно определить тип первичного основного распада и, соответственно, сам элемент. В качестве примера могут служить распад ^{137}Cs и йода ^{131}I , приведенные на рис. 3 и 4.

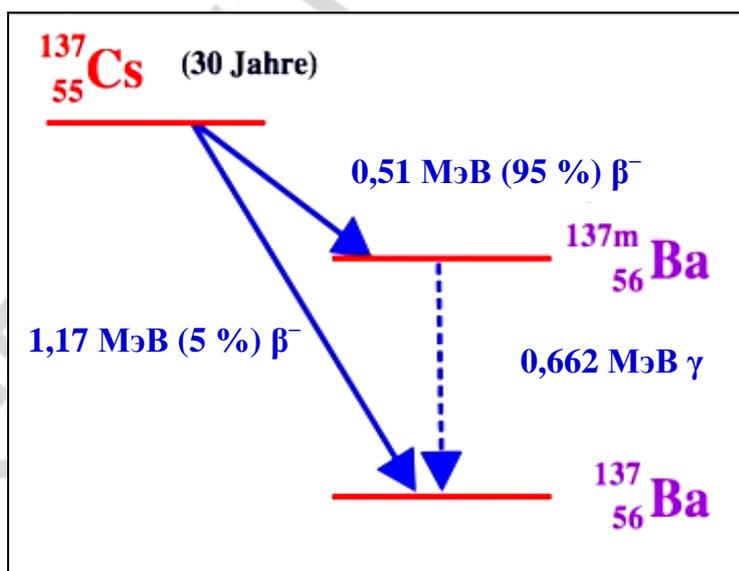


Рис. 3. Схема распада ^{137}Cs : при распаде образуются β -частицы с энергией 0,512 и 1,174 МэВ, γ -кванты с энергией 0,662 МэВ

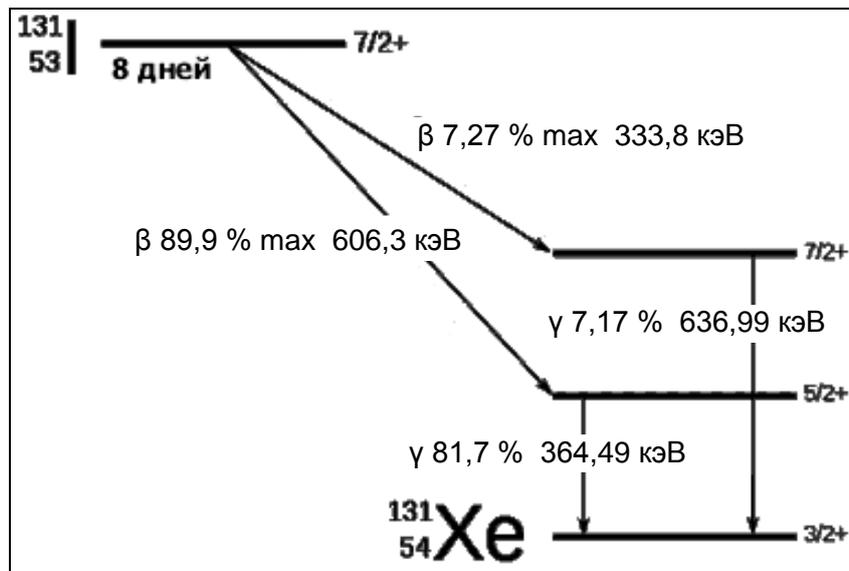


Рис. 4. Упрощенная схема распада ^{131}I : при распаде ^{131}I образуются электроны с энергиями до 606 кэВ и γ -кванты, в основном с энергиями 637 и 365 кэВ

^{137}Cs в 95 % случаев претерпевает β -распад до метастабильного ^{137m}Ba , промежуточного неустойчивого состояния с испусканием β -частиц с энергией 0,512 МэВ. Дальнейший переход до стабильного ^{137}Ba происходит путем испускания γ -кванта с энергией 0,662 МэВ. Только 5 % случаев распада ^{137}Cs происходят до стабильного ^{137}Ba с испусканием β -частиц с энергией 1,174 МэВ.

ОСНОВНОЙ ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Отдельные радиоактивные ядра в веществе распадаются независимо друг от друга, при этом ядерные превращения происходят не одновременно, а подчиняются закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

где N_0 — число *нераспавшихся* ядер в момент времени $t_0 = 0$; N — число оставшихся радиоактивных ядер в момент времени t ; λ — постоянная распада [1/с]. Закон радиоактивного распада выражается экспоненциальной зависимостью.

Постоянная распада (λ) численно равна доле ядер, распадающихся в единицу времени. Значение λ является величиной постоянной для данного радионуклида и не зависит от внешних условий, времени распада и количества радиоактивных ядер; измеряется в единицах, обратных времени. Например, если $\lambda = 0,01 \text{ с}^{-1}$, то это указывает на то, что каждую секунду распадается 0,01 часть всех ядер. **Число распавшихся радиоактивных ядер** можно определить из основного закона:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0 [1 - e^{-\lambda t}]. \quad (8)$$

Длительность существования радионуклидов характеризуется периодом полураспада ($T_{1/2}$). **Период полураспада** — это время, за которое половина всех ядер подверглась радиоактивному распаду, т. е. $N = 1/2 \cdot N_0$ (рис. 5).

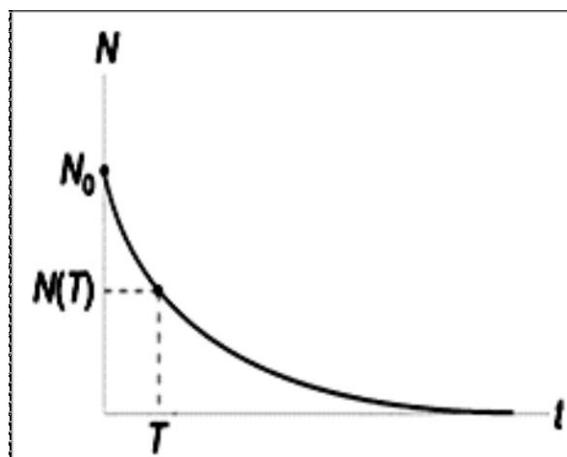


Рис. 5. Закон радиоактивного распада

В момент времени $t = T_{1/2}$ закон радиоактивного распада (7) примет вид:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t}; \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda t}. \quad (9)$$

Взяв натуральный логарифм от обеих частей последней формулы, получим:

$$-\ln 2 = -\lambda T_{1/2}, \quad (10)$$

откуда для периода полураспада получим следующую формулу:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,69}{\lambda}. \quad (11)$$

Среднее время жизни радиоактивного элемента — это промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер убывает в e раз. Данная величина обратна постоянной распада:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (12)$$

Период полураспада измеряется в секундах, часах, годах и для разных радионуклидов может изменяться от долей секунды до многих миллионов лет. Чем больше период полураспада, т. е. чем меньше скорость распада, тем дольше «живет» данный радиоактивный изотоп, создавая радиоактивное излучение. Например, период полураспада полония ^{212}Po составляет порядка 10 с, а период полураспада ^{90}Th превышает миллиард

лет. Период полураспада ^{131}I составляет 8,04 сут, ^{136}Cs — 13 сут, ^{90}Sr — 29,12 года, ^{239}Pu — 24 065 лет, ^{235}U — 703,8 млн лет, ^{232}Th — более 14 млрд лет. Последние 3 изотопа входили в состав ядерного топлива IV блока Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС).

Большой спектр изотопов с различными периодами полураспада был выброшен из атомных реакторов и охлаждающих бассейнов при авариях на Чернобыльской (26 апреля, 1986) и Фукусима-1 (11 марта, 2011) атомных электростанциях (рис. 6). В первые дни после аварий опасность исходила от быстро распадающихся изотопов йода ^{131}I и ^{136}Cs , т. к. эти радионуклиды в виде аэрозоля легко переносятся воздушными потоками на огромные расстояния и распространяются по всему земному шару. Уже 23–24 марта 2011 г., после взрыва на атомной станции Фукусима-1, следы, т. е. незначительное количество радиоактивных веществ, нехарактерное для данной местности, было отмечено в Западной Европе (Германия, Исландия, Франция), США (Калифорния, Вашингтон, Колорадо, Массачусетс и др. штаты), России и Беларуси.



Рис. 6. Основные радиоактивные изотопы, выброшенные из атомных реакторов и охлаждающих бассейнов при авариях на атомных электростанциях

В последующие десятилетия наибольшую угрозу представлял ^{137}Cs , т. к. период его полураспада составляет 30 лет и сейчас только половина всех радионуклидов Cs превратилась в неизлучающие и стабильные. Через 30 лет распадется половина от оставшейся половины, спустя время равное $T_{1/2}$, $2T_{1/2}$, $3T_{1/2}$, $4T_{1/2}$ в радиоактивном материале будет оставаться соответственно $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/16$ части нераспавшихся радионуклидов. Установлено, что за период времени в 10 раз превышающий период полураспада радиоэлемента, последний распадается практически полностью. Для полного распада ^{137}Cs и ^{90}Sr ($T_{1/2} = 29,1$ лет) необходимо около 300 лет.

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМЕ

Определенное количество радионуклидов накапливается в биологических объектах, в т. ч. и в организме человека, что вызывает определенную опасность, связанную с внутренним облучением. Снижение количества радионуклидов, находящихся в биологических объектах, происходит путем их радиоактивного и биологического выведения λ_B .

Скорость исчезновения радионуклидов из организма человека, т. е. снижение продолжительности его облучения, зависит от *периода полураспада радионуклидов* ($T_{1/2}$) и *периода биологического полувыведения* (T_B) — времени, за которое из организма выводится половина от поступивших радионуклидов.

Учитывая важность этих показателей, вводится понятие *эффективного периода полувыведения* $T_{эфф.}$ **Эффективный период полувыведения** — это время, в течение которого исходное количество радионуклидов уменьшается вдвое за счет распада и биологического выведения:

$$T_{эфф.} = \frac{T_B \cdot T_{1/2}}{T_B + T_{1/2}}. \quad (13)$$

Эффективный период полувыведения *долгоживущих изотопов* определяется в основном биологическим периодом полувыведения, *короткоживущих изотопов* — периодом полураспада. Биологический период полувыведения изотопа йода ^{131}I из организма составляет 138 сут, а период полураспада — 8 сут, поэтому время выведения из организма будет определяться периодом полураспада.

АКТИВНОСТЬ. ЕДИНИЦЫ АКТИВНОСТИ

Вещество, содержащее радионуклиды, называется **радиоактивным**. Основной количественной характеристикой радиоактивного источника (препарата, пробы) является **активность (A)**.

Активность радиоактивного источника ионизирующего излучения определяется как среднее число распадов ядер в единицу времени.

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}. \quad (14)$$

С учетом закона радиоактивного распада выражение для активности может быть представлено в виде:

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (15)$$

Активность радионуклида A с течением времени уменьшается по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (16)$$

где $A_0 = \lambda N_0$ — активность радионуклида в источнике ионизирующего излучения в начальный момент времени $t_0 = 0$; N_0 — количество ядер в данном объеме вещества в начальный момент времени; N — число ядер в том же объеме к моменту времени t ; λ — постоянная распада, имеющая смысл вероятности распада ядра за 1 с и равная доле ядер, распавшихся за единицу времени.

Активность также может быть представлена как:

$$A = \lambda N \text{ или } A = \frac{N}{T} \cdot 0,69. \quad (17)$$

Единицей измерения активности в системе СИ является **беккерель (Бк)**, получившая название в честь первооткрывателя явления радиоактивности А. Беккереля (Нобелевская премия 1903 г.). **1 Бк** равен активности радионуклида в источнике, в котором происходит один радиоактивный распад в секунду. Также используются кратные единицы: килобеккерель (1 кБк = 10^3 Бк), мегабеккерель (1 МБк = 10^6 Бк). Внесистемная единица измерения активности — **кюри (Ки)** — названа в честь французских физиков — супругов Кюри (Нобелевская премия 1903 г.).

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

1 Ки соответствует активности 1 г ^{226}Ra .

1 мкКи (микрокюри) = $3,7 \cdot 10^4$ распадов в секунду или $2,22 \cdot 10^6$ распадов в минуту.

Связь между массой радионуклидов и их активностью

Между активностью радионуклида A в источнике и массой радионуклидов m существует прямая зависимость. Чтобы установить связь между этими параметрами, следует учесть, что число нераспавшихся ядер N равно их массе, деленной на массу одного атома:

$$N = m/m_A.$$

Масса одного атома равна атомной массе M , деленной на число Авогадро N_A . Учитывая эти данные, получим:

$$A = \frac{N}{T} \cdot 0,69 = \frac{0,69 \cdot m \cdot N_A}{TM} = \frac{0,69 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot m}{TM} = 4,17 \cdot 10^{23} \frac{m}{TM}. \quad (18)$$

При определении массы радионуклида в граммах, атомной массы в граммах на моль, периода полураспада в секундах, измерение активно-

сти будет определено в беккерелях. Масса радионуклида (в граммах) может быть определена по его активности:

$$m = 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot A \cdot T \cdot M. \quad (19)$$

Для характеристики радиационной загрязненности объектов используются удельная массовая, удельная объемная и удельная поверхностная активности.

Удельная массовая активность A_m равна отношению активности радионуклидов к массе исследуемого объекта:

$$A_m = \frac{A}{m}. \quad (20)$$

Используется для характеристики радиационной загрязненности, как правило, твердых продуктов питания. Единицей измерения удельной массовой активности являются Бк/кг или Ки/кг.

Удельная поверхностная активность A_S равна отношению активности радионуклидов к площади поверхности заряженного объекта:

$$A_S = \frac{A}{S}. \quad (21)$$

Такая активность используется для оценки радиационной загрязненности поверхностей. Единицей измерения *поверхностной* активности являются Бк/м² или Ки/м², Ки/км².

Удельная объемная активность A_V равна отношению активности радионуклидов к объему заряженного объекта:

$$A_V = \frac{A}{V}. \quad (22)$$

Она используется для оценки радиационной загрязненности объема жидкостей и воздуха. Единицей измерения удельной *объемной* активности являются Бк/м³, Бк/л или Ки/м³, Ки/л.

Единицы измерения и соотношение между ними приведены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношения между единицами радиоактивности

Параметр и его обозначение	Единицы измерения		Соотношение
	СИ	Внеси- стемные	
Активность, A	Бк	Ки	1 Бк = 1 распад/с = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
Удельная массовая активность, A_m	Бк/кг	Ки/кг	1 Бк/кг = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки/кг 1 Ки/кг = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/кг
Удельная объемная активность, A_V	Бк/м ³	Ки/л	1 Бк/м ³ = $2,7 \cdot 10^{-8}$ Ки/л 1 Ки/л = $3,7 \cdot 10^{13}$ Бк/м ³
Удельная поверхност- ная активность, A_S	Бк/м ²	Ки/км ²	1 Бк/см ² = 104 Бк/м ² = 0,27 Ки/км ² 1 Ки/км ² = $3,7 \cdot 10^4$ Бк/м ² = 37 кБк/м ²

ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Наличие радиоактивного источника, в т. ч. и отдельных изотопов, основными характеристиками которых являются $T_{1/2}$ и A , сопровождается возникновением радиоактивного излучения и созданием внешнего радиационного фона. Количественной оценкой и мерой воздействия ионизирующего излучения и созданного радиационного фона на облучаемые объемы, в т. ч. и биологические, является доза¹.

ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ЕДИНИЦЫ

Для **количественной** характеристики радиационного фона, т. е. радиационной обстановки вокруг источника ионизирующего излучения, вводится экспозиционная доза.

Экспозиционная доза (X) — это отношение суммарного заряда ΔQ всех ионов одного знака, образованных в сухом атмосферном воздухе в элементарном объеме ΔV , к массе воздуха Δm в этом объеме:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}. \quad (23)$$

Экспозиционная доза используется **только для воздуха** в качестве характеристики воздействия рентгеновского или γ -излучения с энергией от 5 кэВ до 3 МэВ на окружающую среду. В единицах измерения системы СИ экспозиционная доза измеряется в кулонах на килограмм (Кл/кг), внесистемной единицей является рентген (Р). Единица названа в честь В. К. Рентгена за открытие лучей, названных его именем (Первая Нобелевская премия, 1901 г.).

Рентген — это доза *рентгеновского* или γ -излучения, при которой в 1 см³ сухого атмосферного воздуха в результате ионизации при *нормальных условиях* (температура — 0 °С, давление — 760 мм рт. ст.) образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов. Суммарный заряд, определяемый соотношением $Q = q \cdot n$, будет равен:

$$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,08 \cdot 10^9 \text{ (пар ионов)} = 3,33 \cdot 10^{-10} \text{ Кл.}$$

Т. к. объем воздуха $V = 1 \text{ см}^3$ имеет массу $1,29 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ ($m = \rho \cdot V$, $m = 1,29 \text{ кг/м}^3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$), то $1 \text{ Р} = \frac{\Delta Q}{\Delta m} = \frac{3,33 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}}{1,29 \cdot 10^{-6} \text{ кг}} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Таким образом, $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$; $1 \text{ Кл/кг} = 3,876 \cdot 10^3 \text{ Р}$.

¹ Доза (от др.-греч. δόσις — порция, приём) — доза облучения — поглощённое живым существом или иным объектом количество лучистой энергии определённого вида.

Мощность экспозиционной дозы — это отношение приращения (изменения) экспозиционной дозы ΔX за интервал времени Δt к этому интервалу времени:

$$\dot{X} = \frac{X}{t}. \quad (24)$$

Единицей *мощности экспозиционной дозы* является **1 Кл/(кг · с)** или **1 А/кг (ампер/кг), мкА/кг**.

Оценка воздействия радиационного фона на различные объекты, в т. ч. и биологические, определяется величиной поглощенной дозы излучения.

Поглощенная доза (D) — это количество энергии E , поглощенной единицей массы m данной среды, и оно равно отношению энергии E ионизирующего излучения к величине этой массы:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (25)$$

Единицей измерения *поглощенной дозы* в системе СИ является **Грей (Гр)**¹. Один Грей соответствует поглощенной дозе излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж (1 Гр = 1 Дж/кг). Внесистемная единица поглощенной дозы — **рад, 1 рад = 0,01 Гр, 1 Гр = 100 рад**. Дольные единицы: **мкГр, мГр, мкрад, мрад**.

Мощность поглощенной дозы:

$$\dot{D} = \frac{D}{t}. \quad (26)$$

Мощность поглощенной дозы измеряется в **Гр/с, рад/с, Р/час** и **мкР/час**.

Оценить поглощенную дозу с учетом экспозиционной дозы, можно из соотношения $D = f \cdot X$, где коэффициент f для воды и мягких тканей равен 1. На основании проведенных расчетов установлено, что 1 Р экспозиционной дозы соответствует 1 раду поглощенной дозы, точнее 1 Р = 0,87 рад в воздухе или 0,96 рад в биологической ткани, поэтому в мягких тканях с погрешностью до 5 % экспозиционную дозу в рентгенах и поглощенную дозу в радах можно считать одинаковыми.

Иногда для характеристики **экспозиционной дозы** используется единица измерения эффективной и эквивалентной доз для рентгеновского

¹ Название единицы «Грей» получено в честь английского физика Льюиса Харольда Грея, являющегося родоначальником радиобиологии, одним из научных результатов исследователя являлось определение поглощенной дозы радиации.

излучения — *зиверт*¹ (разд. 3). Единицы измерения мощности экспозиционной дозы для *рентгеновского излучения*: *1 Р/с (0,01 Зв/с)**, *1 Р/ч (0,01 Зв/ч)* или *1 мкР/ч (0,01 мкЗв/ч)**.

В табл. 2 приведены значения, определяющие естественный радиационный фон, допустимый и повышенный (утвержденные нормы).

Таблица 2

Характеристики радиационного фона

Радиационный фон	Единицы измерения, мкР/ч	Единицы измерения, мкЗв/ч
Естественный фон	10–20	0,1–0,2
Допустимый фон	20–60	0,2–0,6
Повышенный фон	60–120	0,6–1,2

На территории Беларуси до аварии на Чернобыльской АЭС *мощность экспозиционной дозы* в различных районах составляла от 2 до 12 мкР/ч (*0,02–0,12 мкЗв/ч*). В настоящее время, с учетом изменений радиационной обстановки после взрыва на ЧАЭС, на загрязненных радионуклидами территориях эти параметры имеют повышенные значения, обусловленные искусственной радиоактивностью: в Брагине — 0,48 мкЗв/ч (48 мкР/ч), Славгороде — 0,19 мкЗв/ч (19 мкР/ч); Минске — 0,10 мкЗв/ч (10 мкР/ч), Могилеве — 12 мкЗв/ч (12 мкР/ч) по данным Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды.

Эффективная и эквивалентная дозы

Ионизирующие излучения обладают разным разрушительным эффектом и существенными различиями в механизмах воздействия на биологические ткани.

Это обусловлено прежде всего такими физическими параметрами, как *средний линейный пробег*, *плотность ионизации* и *линейная передача энергии* (ЛПЭ), которые отличны для разных видов излучения. Соответственно, одна и та же поглощенная доза отличается биологической эффективностью, в зависимости от типа излучения. Поэтому для описания воздействия излучения на живые организмы вводят понятие относительной биологической эффективности излучения (ОБЭ), или коэффициента качества.

¹ Следует обратить внимание, что для описания радиационной обстановки на сайтах информгентств и в эфире телеканалов при освещении событий взрыва на АЭС Фукусима-1 (Япония, 2011), активно использовался термин «*Зиверт*». Название получено в честь шведского ученого Рольфа Зиверта. *Зиверт* (русское обозначение — Зв; международное — Sv) — единица измерения эффективной и эквивалентной доз ионизирующего излучения. *1 зиверт* \approx *100 рентген*, а *1 мкЗв* \approx *100 мкР*, при условии, что рассматривается биологическое действие рентгеновского или γ -излучения. Экспозиционной дозе в 1 Р соответствует эффективная доза примерно в 0,01 Зв и по измерениям экспозиционной дозы можно ориентировочно судить об эффективной дозе.

ОБЭ, или **коэффициент качества**, равен отношению эталонного излучения, вызывающий радиобиологический эффект, к дозе любого другого радиационного излучения, вызывающего такой же радиобиологический эффект¹. Эталонным излучением является рентгеновское излучение с энергией фотонов 180–200 кэВ.

$$\text{ОБЭ} = \frac{\text{Поглощенная доза рентгеновского излучения (180–200 кэВ), вызывающая биологический эффект}}{\text{Поглощенная доза ионизирующего излучения другого вида, вызывающая тот же биологический эффект}}. \quad (27)$$

Коэффициент качества (k) излучения для рентгеновских лучей, γ -квантов и β -частиц (электронов) равен единице, для медленных нейтронов $k = 3$, для быстрых нейтронов $k = 7-10$, для протонов $k = 10$, для α -частиц $k = 20$.

Из сравнения значений коэффициентов качества излучений очевидно, что воздействие α -излучения обладает поражающим эффектом в двадцать раз большим в сравнении с γ -излучением при одинаковых дозах.

Чтобы учесть неравномерность поражения от различных видов излучения, используют **эквивалентную дозу**. Она равна произведению поглощенной дозы и коэффициента качества:

$$H = k \cdot D. \quad (28)$$

Единицей измерения эквивалентной дозы в системе СИ является **зиверт**. **1 зиверт (Зв)** — это количество энергии, поглощенное килограммом биологической ткани, по воздействию равное поглощенной дозе в 1 Грей (Гр) рентгеновского или γ -излучений. Внесистемной единицей измерения эквивалентной дозы, позволяющей сравнивать различные виды излучений по одинаковому биологическому эффекту является **бэр** (биологический эквивалент рентгена), 1 бэр = 0,01 Зв.

Мощность эквивалентной дозы:

$$\dot{H} = \frac{H}{t}. \quad (29)$$

Единицей измерения мощности эквивалентной дозы являются **Зв/с**, **мЗв/час**, **мкЗв/с** в системе СИ. Внесистемные единицы: **бэр/с**, **мбэр/час**.

Возникающие поражения в результате получения определенной эквивалентной дозы различны для разных органов и тканей, т. е. органы и ткани отличаются радиационной чувствительностью. Для оценки воздействия радиации на организм человека с учетом радиационной чувстви-

¹ Радиобиологические эффекты — функциональные и морфологические изменения, развивающиеся в организме в результате воздействия излучения. По критерию механизмов формирования эффекты излучения делят на мишенные и немишенные. Мишенные радиобиологические эффекты состоят из двух групп — детерминированные и стохастические.

тельности каждого органа, вводится понятие эффективной эквивалентной дозы ($H_{эфф}$, далее используется эффективная доза). **Эффективная доза** — это сумма произведений эквивалентных доз по всем органам и тканям, умноженных на соответствующий *коэффициент радиационного риска* (ω_i) для этих органов:

$$H_{эфф} = \sum \omega_i \cdot H_i. \quad (30)$$

Коэффициент радиационного риска (ω_i) (*тканевый весовой множитель*) — это отношение вероятностного риска летального исхода при облучении определенного органа или ткани к риску смерти от равномерного облучения всего тела при такой эквивалентной дозе.

Значения коэффициента радиационного риска для разных органов и тканей организма человека составляют: гонады — 0,20; красный костный мозг, легкие, желудок, толстый кишечник — 0,12; щитовидная железа, пищевод, печень, молочные железы, мочевой пузырь — 0,05; кожа, поверхность костей — 0,01; остальные органы — 0,05. Сумма коэффициентов радиационного риска, учитываемых для всех органов человека $\sum \omega_i = 1$.

Эффективная доза может быть использована так же, как *мера риска возникновения отдаленных последствий* при облучении всего тела человека и его отдельных органов с учетом их радиочувствительности.

Как уже упоминалось, единицей измерения эффективной дозы в системе СИ является **зиверт**. Через другие единицы измерения СИ **зиверт** выражается следующим образом: $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ Гр}$ (для излучений с $k = 1,0$).

Зиверт — это количество энергии, поглощенное одним килограммом биологической ткани, равное по воздействию поглощенной дозе γ -излучения в 1 Грей. 1 Грей — это один Джоуль энергии в расчете на один килограмм массы, т. е. зиверт — это величина энергии, воздействующей на биологический объект.

Равенство 1 Зв и 1 Гр показывает, что поглощенная, эквивалентная и эффективная дозы имеют одинаковую размерность — Дж/кг. Однако это не означает, что эффективная доза численно равна поглощенной дозе.

Поглощенная доза характеризует количество энергии, поглощенной телом, и радиационный эффект для физических тел и объектов, кроме живых организмов.

При определении эквивалентной дозы учитываются *физические свойства ионизирующего излучения*, при этом эквивалентная доза равна поглощенной дозе, умноженной на коэффициент качества ионизирующего излучения, зависящий от вида излучения и характеризующий его *биологическую активность* (см. формулу (28)).

При определении *эффективной дозы* учитывается *биологическое воздействие радиации*: эффективная доза равна эквивалентной дозе, умноженной на взвешивающий тканевый коэффициент, зависящий от вклада

того или иного органа в поражение, наносимое при облучении отдельно-му органу или тканям организма в целом. *Эффективная доза может характеризовать индивидуальную дозу, полученную биологическим объектом или человеком* (см. формулу (30)).

Коллективная эффективная доза определяется как сумма произведений эффективных доз, полученных группой людей, подвергшихся воздействию ионизирующих излучений, и числа людей в каждой группе:

$$S = \sum H_{\text{эфф}(i)} N_i, \quad (31)$$

где N_i — число людей, получивших дозу $H_{\text{эфф}(i)}$. Единицей измерения коллективной дозы является человеко-зиверт (чел.-Зв).

Коллективная доза используется для характеристики радиационного воздействия в результате осуществления практической деятельности с целью оценки радиационных последствий на население и является объективной оценкой масштаба радиационного поражения. В табл. 3 приведены характеристики доз ионизирующих излучений, соотношения между системными и внесистемными единицами измерения этих параметров.

Таблица 3

Перевод единиц по международной классификации

Доза	Единицы		Перевод	
	в системе СИ	внесистемные		
Экспозиционная	Кулон на килограмм воздуха (Кл/кг)	Рентген (Р), Зиверт (Зв)	1 Кл/кг = 3876 Р	1 Зв \cong 100 Р; 1 мкР/ч = = 0,01 мкЗв/ч
Поглощенная	Грей (Гр)	Рад	1 Гр = 100 рад	1 Р = 0,96 рад, 1 Р = 0,87 рад
Эквивалентная	Зиверт (Зв)	Бэр	1 Зв = 100 бэр	—
Эффективная	Зиверт (Зв)	—	1 Зв = 100 бэр	—
Коллективная	Человеко-зиверт (чел.-Зв)	—	—	—

Единица измерения миллизиверт (мЗв) часто используется как мера дозы при медицинских диагностических процедурах (рентгеноскопии, рентгенографии, рентгеновской компьютерной томографии, а также радиотерапии и локальных облучениях).

При проведении профилактических медицинских рентгенологических исследований должно быть обеспечено соблюдение годовой эффективной дозы, равной 1 мЗв. Среднемировая доза облучения от рентгенологических исследований, накопленная на душу населения за год, составляет 0,4 мЗв, в странах с высоким уровнем доступа к медобслуживанию (более одного врача на 1000 человек населения) этот показатель достигает 1,2 мЗв. Характеристика доз излучений системных и внесистемных единиц измерения и связь между ними представлены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики доз ионизирующих излучений

Доза излучения	Формула	Системные единицы измерения (ЕИ)	Внесистемные (ЕИ)	Связь между системными и внесистемными (ЕИ)	Необходимые пояснения	Характеристика дозы
Экспозиционная доза — отношение суммарного заряда Q ионов одного знака, образовавшихся в некоторой массе воздуха m под действием рентгеновского (R) или гамма (γ) излучения, к величине этой массы воздуха	$X = \frac{Q}{m}$	Кл/кг	Рентген (Р)	$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$ $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ $1 \text{ Р} = \frac{3,33 \cdot 10^{-10}}{1,29 \cdot 10^{-6}} =$ $= 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$	<p>1 рентген (Р) — это доза R- или γ-излучения, которая вызывает в 1 см³ воздуха при нормальных условиях $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов.</p> <p>При дозе 1 Р в 1 см³ сухого воздуха образуется заряд $Q = n \cdot q =$ $= 2,08 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} =$ $= 3,328 \cdot 10^{-10} \text{ Кл.}$</p> <p>Масса воздуха $m = \rho V =$ $= 1,29 \text{ г/м}^3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$</p>	Характеризует радиационную обстановку вокруг объекта, т. е. степень ионизации окружающей среды электромагнитным излучением (γ -фон) * Экспозиционная доза не характеризует воздействие находящиеся в окружающей среде радионуклидов на биологические объекты
Мощность экспозиционной дозы	$\dot{X} = \frac{X}{t}$	А/кг	1 Р/с 1 мР/час 1 мкР/с	$1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг,}$ $1 \text{ А/кг} = 3876 \text{ Р/с}$	На территории Беларуси до аварии на ЧАЭС мощность экспозиционной дозы в различных районах составляла от 2 до 12 мкР/ч (0,02–0,12 мкЗв/ч)	
Поглощенная доза равна отношению энергии E , переданной излучением веществу массой m , к величине этой массы	$D = \frac{E}{m}$	Грей (Гр) 1 Гр = 1 Дж/кг	1 рад	$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$	рад — от англ. rad — radiation absorbed dose	Характеризует воздействие ионизирующего излучения на организм человека. Для мягких тканей в поле рентгеновского или γ -излучения поглощенная доза в 1 рад примерно соответствует экспозиционной в 1 Р (или 1 Р = 0,96 рад)

Доза излучения	Формула	Системные единицы измерения (ЕИ)	Внесистемные (ЕИ)	Связь между системными и внесистемными (ЕИ)	Необходимые пояснения	Характеристика дозы
<i>Мощность поглощенной дозы</i>	$\dot{D} = \frac{D}{t}$	Гр/сек	рад/сек		—	
<i>Связь поглощенной и экспозиционной дозы</i>	$D = f \cdot X$	Числовое значение коэффициента f зависит от структуры облучаемого объекта, энергии квантов и единиц измерения поглощенной D и экспозиционной X доз			Значения <i>коэффициента f</i> наиболее удобны для внесистемных единиц: для воздуха $f = 0,88$ рад/Р, для воды и мягких тканей $f = 1$ рад/Р, для костной ткани $f = 1-4,5$ рад/Р	
<i>Эквивалентная доза</i> — это поглощенная доза с учетом качества излучения	$H = k \cdot D$	зиверт (Зв) Зв = Дж/кг	бэр	1 Зв = 100 бэр 1 бэр → 1 рад 1 бэр = 0,01 Зв	Бэр — биологический эквивалент рада (рентгена). Предельно допустимая H при профессиональной деятельности — 5 бэр/год	При одинаковой поглощенной дозе биологический эффект облучения существенно зависит от вида ионизирующего излучения (т. е. от значения k)
Относительная биологическая эффективность ионизирующего излучения (ОБЭ) — это коэффициент качества (k) излучения, учитывающий различия в степени радиационного воздействия излучений различного вида	$\text{ОБЭ} = \frac{\text{Поглощенная доза рентгеновского излучения (180–200 кэВ), вызывающая биологический эффект}}{\text{Поглощенная доза ионизирующего излучения другого вида, вызывающая тот же биологический эффект}}$					k — <i>коэффициент качества излучения</i> рентгеновское излучение — 1 гамма-излучение — 1 электроны (β -частицы) — 1 медленные нейтроны — 3 быстрые нейтроны — 7–10 протоны — 10 α -частицы — 20

Доза излучения	Формула	Системные единицы измерения (ЕИ)	Внесистемные (ЕИ)	Связь между системными и внесистемными (ЕИ)	Необходимые пояснения	Характеристика дозы
<i>Мощность эквивалентной дозы</i>	$\dot{H} = \frac{H}{t}$	Зв/с мЗв/час	бэр/с мбэр/час	—	—	—
<i>Эффективная эквивалентная доза</i> — это сумма произведений эквивалентных доз, полученных отдельными органами организма H_i , и соответствующих им <i>коэффициентов радиационного риска</i> ω_i	$H_{эфф} = \sum \omega_i \cdot H_i$	Зв	<i>Взвешивающий фактор</i> ω_i (<i>коэффициент радиационного риска</i>) определяет вклад поражения данного органа в риск неблагоприятных последствий для всего организма при равномерном облучении; характеризует чувствительность i -го органа к воздействию излучения. Чем он больше, тем опаснее облучение для данного органа	—	ω_i для различных тканей: гонады — 0,25; молочная железа — 0,15; красный костный мозг — 0,12; легкие — 0,12; щитовидная железа — 0,03; поверхн. кости — 0,03; Все другие органы вместе — 0,3	$H_{эфф}$ позволяет учитывать разную радиочувствительность органов и тканей к действию излучений. Сумма взвешивающих факторов всех органов и тканей организма равна единице: $\sum \omega_i = 1$
<i>Коллективная доза</i> S — это сумма всех эффективных эквивалентных доз $H_{эфф(i)}$, полученных отдельными лицами, где N_i — число лиц в данной группе, получивших дозу $H_{эфф(i)}$	$S = \sum H_{эфф(i)} \cdot N_i$	человеко-зиверт (чел.-Зв)	—	—	—	Характеризует масштаб радиационного облучения большого контингента населения. Позволяет прогнозировать медико-биологические последствия радиационного облучения для населения
<i>Полулетальная доза</i>	$LD_{50/30}$	—	—	—	Вызывает гибель 50 % животных в течение 30 сут	

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Ионизирующее излучение — это поток частиц различной природы, обладающих энергией, достаточной для ионизации атомов при взаимодействии их с веществом. По механизму образования ионизирующие излучения классифицируют как первичные и вторичные. Первичные излучения возникают непосредственно в радиоактивном источнике, а вторичные — при взаимодействии первичного излучения с веществом.

По механизму взаимодействия с веществом выделяют непосредственно ионизирующее и косвенно ионизирующее излучения. **Непосредственно ионизирующее излучение** — это поток заряженных частиц (α -, β -частиц и др.), обладающих кинетической энергией, достаточной для ионизации атомов при столкновении с ними. **Косвенно ионизирующее излучение** — это поток нейтральных элементарных частиц (фотонов, нейтронов), которые при взаимодействии со средой высвобождают заряженные частицы (электроны, протоны и др.), способные ионизировать атомы и молекулы среды. К таким излучениям относят γ -излучение, рентгеновское, нейтронное и др.

Известно, что ионизирующие излучения способны взаимодействовать с различными материалами и объектами, вызывая конструкционные повреждения, химические превращения веществ, а также могут воздействовать на биологические объекты.

ХИМИЧЕСКОЕ И БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Химическое действие ионизирующих излучений вызывает химические превращения веществ. Проявлением таких превращений является трансформация молекул O_2 в молекулы O_3 , вызывающая быстрое окисление металлов; разложение H_2O на O_2 и H_2 с образованием некоторого количества H_2O_2 ; превращение аллотропных модификаций в более устойчивые (белого фосфора в красный, белого олова в серое, алмаза в графит); разложение газов (CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl , NH_3) на простые вещества (химические элементы); полимеризация соединений, содержащих двойные и тройные связи.

Биологическое действие ионизирующих излучений может быть как первичным, так и вторичным. **Первичное действие** ионизирующих излучений — это прямое попадание ионизирующих частиц в биологические молекулярные структуры клеток и в жидкие (водные) среды организма. **Вторичное действие** ионизирующих излучений — действие свободных радикалов, возникающих в результате ионизации в жидких средах организма и клеток. Свободные радикалы вызывают разрушения целостности

цепочек макромолекул (белков и нуклеиновых кислот), что может привести как к массовой гибели клеток, так и *канцерогенезу и мутагенезу*. Наиболее подвержены воздействию активно делящиеся клетки (эпителиальные, стволовые и эмбриональные).

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

Воздействия ионизирующих излучений на человека наблюдаются в течение всей его жизни и биологического развития. Эти воздействия обусловлены фоновым естественным излучением в условиях окружающей среды, преднамеренным использованием источников излучения в медицине для диагностики и лечения, а также ионизирующими излучениями в чрезвычайных ситуациях, в случае техногенных катастроф. Известно, что к апрелю 1986 г. в 14 странах мира на предприятиях атомной энергетики произошло более 100 аварий различной степени сложности. Наиболее крупными по уровню опасности авариями по Международной шкале ядерных событий ИНЕС считаются: 1979 г. США, Три-Майл-Айленд — уровень 5 (авария с риском за пределами станции); 1957 г. СССР, Южный Урал — уровень 6 (серьезная авария); 1986 г. СССР, Чернобыль и 2011 г. Япония, Фукусима — уровень 7 (крупная авария).

Напоминанием о радиационной опасности для человека на всех объектах, использующих ионизирующие излучения, служат знаки предупреждения о радиационной опасности. Международный условный знак радиационной опасности («трилистник», «вентилятор») имеет форму трех секторов с небольшим кругом в центре. Выполняется черным цветом на желтом фоне. В таблице символов Юникод есть символ знака радиационной опасности (☢ — U + 2622). В 2007 г. был принят новый знак радиационной опасности, в котором «трилистник» дополнен знаками «смертельно» («череп с костями») и «уходи!» (силуэт бегущего человека и указывающая стрелка). Изображается черным с белой обводкой на красном фоне.



а



б

Рис. 7. Знаки предупреждения о радиационной опасности:
а — международный условный знак радиационной опасности («трилистник»); *б* —
новый знак радиационной опасности

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ НА ЧЕЛОВЕКА

Чаще всего человек подвергается воздействию радиоактивного излучения от естественного природного фона, т. е. *естественной радиоактивности*. Естественные источники излучения можно разделить на источники *внешнего* и *внутреннего облучения*. К *внешним* источникам относятся космические излучения, солнечная радиация, излучения от горных пород земной коры и воздуха. К источникам *внутреннего облучения* относятся естественные радиоактивные вещества, попадающие в организм с водой и продуктами питания.

Среднемировая доза облучения от естественных источников, накопленная на душу населения за год, равна $2,4$ мЗв, с разбросом от 1 до 10 мЗв. Основной вклад в эти составляющие вносят: $0,4$ мЗв от космических лучей (от $0,3$ до $1,0$ мЗв, в зависимости от высоты над уровнем моря); $0,5$ мЗв от внешнего γ -излучения (от $0,3$ до $0,6$ мЗв, в зависимости от радионуклидного состава окружения — почвы, стройматериалов и т. п.); $1,2$ мЗв внутреннего облучения от поступающих ингалируемых атмосферных радионуклидов, преимущественно *радона* (от $0,2$ до 10 мЗв, в зависимости от местной концентрации радона в воздухе); $0,3$ мЗв внутреннего облучения от инкорпорированных, радионуклидов, т. е. радионуклидов, поступивших внутрь организма (от $0,2$ до $0,8$ мЗв, в зависимости от радионуклидного состава пищевых продуктов и воды).

ЗАГРЯЗНЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Известно выражение, что облучают человека даже собственные стены, т. е. стройматериалы, из которых изготовлены здания и сооружения. Например, в Швеции были проведены измерения фона радиационного излучения почти в тысяче квартир (677 домов из 13 городов), построенных из различных материалов до 1946 г., т. е. до начала крупных испытаний атомного оружия. Результаты измерений показали, что в деревянных строениях фоновые облучения человека примерно *в два раза* ниже, чем на открытой местности, в кирпичных — примерно такие же, в бетонных — в два, в гранитных — примерно *в четыре раза* выше.

Загрязнение строительных материалов происходит при использовании минерального сырья, содержащего естественные радионуклиды. Каждая тонна гранита содержит в среднем 10 г Th, 5 г U и 1,3 г Ra. Наиболее высокая *удельная активность* характерна для гранита, туфа, пемзы; меньше радиационная активность у мрамора, известняка. Наличие в строительных материалах U и Th приводит к выделению радона внутри зданий.

Радон (Rn) — это невидимый, не имеющий вкуса и запаха газ. Он тяжелее воздуха в 7,5 раз, период полураспада $T_{1/2} = 3,8$ суток. В природе радон встречается в двух основных формах: ^{222}Rn и ^{220}Rn . В течение суток

1 г ^{226}Ra , излучая α -частицы с энергией 4,8 МэВ, выделяет 1 мм³ газа Rn, который, в свою очередь, излучает α -частицы с энергией 55 МэВ.

Радон поступает в воздух жилых помещений в основном из грунта, при выделении его из стен и перекрытий, из системы водоснабжения и системы отопления, использующей природный газ. Известно, что в воде артезианских колодцев Финляндии и США отмечаются высокие уровни Rn. При обследовании домов в Финляндии оказалось, что концентрация Rn в ванной комнате в среднем в три раза выше, чем в кухне, и в 40 раз выше, чем в жилых комнатах. В природный газ Rn проникает под землей.

Несоблюдение правил радиационной безопасности в некоторых странах, использующих различные отходы промышленности в строительстве, привело к тому, что в ряде случаев в помещениях обнаружена концентрация Rn, в тысячи раз превышающая среднюю концентрацию на открытом воздухе.

В табл. 5 приведены значения удельной активности различных материалов, применяемых в строительной отрасли в мире.

Таблица 5

Удельная активность естественных радионуклидов строительных материалов (НКДАР, 1982 г.)

Строительный материал	Страна	Значение удельной массовой активности, Бк/кг		
		^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
Кирпич	ФРГ	330	280	230
Бетон, содержащий глинистые сланцы	Швеция	850	1500	70
Фосфогипс	ФРГ	110	600	5
Фосфогипс	Великобритания	70	800	20
Фосфогипс	США	–	1500	7
Шлак силиката кальция	Канада	–	2150	–
Шлак силиката кальция	США	–	1300–1500	–
Шлак из доменной печи	СССР (Россия)	240	70	20

В связи с этим важно понимать, что нерациональная деятельность человека, связанная с индустрией строительных материалов при привлечении для их изготовления отходов различных промышленных производств, может приводить к увеличению радиационного фона в зданиях.

Вклад в годовую эквивалентную дозу за счет строительных материалов в среднем для населения Земли составляет 0,1–1,5 мЗв на человека. Наименьшие дозы получает население, проживающее в деревянных домах — 0,5 мЗв/год, в кирпичных домах — 1,0 мЗв/год, в бетонных — 1,7 мЗв/год.

Значения допустимых уровней эффективной удельной активности $A_{\text{эфф}}$ в строительных материалах приведены в табл. 6.

**Допустимые уровни эффективной удельной активности $A_{эфф}$
в строительных материалах (СанПиН № 213)**

Применение строительных материалов	Значения $A_{эфф}$, Бк/кг
Для реконструируемых и общественных зданий	< 370
В дорожном строительстве в пределах населенных пунктов, а также при возведении производственных сооружений	370–740
В дорожном строительстве вне населенных пунктов	740–1500
По согласованию с санитарно-эпидемиологической службой Министерства здравоохранения Республики Беларусь	1500–4000
Не должны использоваться в строительстве	> 4000

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ, «ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ» ИЗОТОПЫ

Проблема радиоактивного загрязнения продуктов питания имеет глобальный характер. Проводимые испытания ядерного оружия, *последствия аварий* на АЭС и плановые выбросы предприятий атомной промышленности ухудшили экологическую обстановку на всей планете. В атмосферу попало большое количество радиоактивных элементов, которые аккумулировались, в основном, в почве и увеличили риск загрязнения растений и грибов, которые человек потребляет в пищу.

Внутреннее облучение человека происходит за счет радиоактивных газов, поступающих из глубины земных недр (радон, торон и др.), а также радиоактивных изотопов K, U, Th, Rb, Ra, входящих в состав пищевых продуктов, растений и воды.

Радиоактивный ^{40}K ($T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$ лет) может накапливаться как в продуктах питания животного происхождения, так и в растениях. В большей степени изотоп ^{40}K обнаружен в бобовых: горохе, бобах, фасоли, сое. Значение удельной радиоактивности (Бк/кг) по ^{40}K составляет в горохе 273,8 Бк/кг, в пшенице — 148,0 Бк/кг, картофеле — 129,5 Бк/кг; в молоке — 44,4 Бк/кг, в сливочном масле — 3,7 Бк/кг.

Однако значимость изотопа ^{40}K определяется также и его вкладом в собственную радиоактивность биологических тканей, содержащих природный K. В природном K содержится 0,01 % радиоактивного K, и это соотношение остается постоянным. Смесь изотопов K входит в состав мышечной ткани. В связи с присутствием изотопов ^{40}K в теле человека *значение природной радиоактивности равно 4–5 кБк*, что составляет примерно 80–85 % собственной радиоактивности организма, оставшиеся 15–20 % обусловлены, в основном, изотопом ^{14}C .

Среднегодовая эффективная эквивалентная доза, получаемая человеком в результате присутствия изотопа ^{40}K в тканях организма, составляет 0,18 мЗв.

Среди 20 **радиоизотопов I**, образующихся в реакциях деления U и Pu, особое место занимают **изотопы** $^{113-135}\text{I}$ ($T_{1/2} = 8,04$ сут; 2,3 ч; 20,8 ч; 52,6 мин; 6,61 ч), т. к. они являются источниками внешнего и внутреннего облучения. **В организм человека изотопы I могут поступать по цепочкам:** растения → человек; растения → животные → человек; вода → гидробионты → человек. **Коэффициенты накопления** (превышение над содержанием в воде) ^{131}I составляют: в морских рыбах — 10, в водорослях — 200–500, в моллюсках — 10–70.

Основным источником поступления радиоактивных изотопов I населению в зонах радиационного загрязнения были **местные продукты питания растительного и животного происхождения**. Усвоение нуклида растениями из почвы, учитывая малое значение $T_{1/2}$ (8 сут) и непродолжительный срок его жизни, не имеет практического значения.

Токсичность изотопов $^{131-135}\text{I}$ невелика по сравнению с другими радиоизотопами, особенно α -излучающими. Радиационные поражения тяжелой, средней и легкой степени у взрослого человека можно ожидать при поступлении ^{131}I в количестве 55 МБк, 18 МБк и 5 МБк на 1 кг массы тела соответственно. В патологический процесс вовлекаются все органы и системы, особенно тяжелые повреждения возникают в щитовидной железе, где формируются наиболее высокие дозы. Дозы облучения щитовидной железы у детей вследствие малой ее массы при поступлении одинаковых количеств изотопов I значительно больше, чем у взрослых (масса железы у детей в зависимости от возраста равна 1,5–7 г, у взрослых — 20 г).

После распада радиоактивных изотопов I основным источником внешнего и внутреннего облучения является **радиоактивный цезий**. Наибольшее значение имеет ^{137}Cs , характеризующийся большим выходом в реакциях деления, сроками жизни ($T_{1/2} = 30,2$ года), токсичностью и высокой миграционной способностью. Основным источником поступления радиоактивного ^{137}Cs в организм человека также являются продукты питания животного и растительного происхождения. Радиоактивный Cs, поступающий животным с загрязненным кормом, в основном накапливается в мышечной ткани (до 80 %) и скелете (10 %). В значительных количествах он накапливается в молочных продуктах и в яйцах птиц. **Коэффициент накопления** в мышцах рыб достигает 1000 и более, у моллюсков — 100–700, у ракообразных — 50–1200, водных растений — 100–10 000.

Радиоактивный стронций. *Природный стронций* относится к микроэлементам и состоит из смеси четырех стабильных изотопов ^{84}Sr (0,56 %), ^{86}Sr (9,96 %), ^{87}Sr (7,02 %), ^{88}Sr (82,0 %). По физико-химическим свойствам он является аналогом Ca. Sr содержится во всех растительных и животных организмах. В организме взрослого человека содержится около 0,3 г

Sr, преимущественно весь он находится в скелете, иногда — в печени и почках, в минимальном количестве — в мышцах и жировой ткани.

В начальный период ^{89}Sr является одним из компонентов загрязнения внешней среды в зонах ближних выпадений радионуклидов. Однако у ^{89}Sr относительно небольшой период полураспада, и со временем начинает превалировать ^{90}Sr . Животным радиоактивный Sr в основном поступает с кормом и в меньшей степени с водой (около 2 %). Содержание Sr в гидробионтах зависит от его концентрации в воде. Так, у рыб Балтийского моря содержание Sr в 5 раз больше, чем у рыб Атлантического океана.

Как чистый β -излучатель нуклид Sr основную опасность представляет при поступлении в организм с загрязненными продуктами. Радиоактивный Sr относится к остеотропным биологически опасным радионуклидам, избирательно откладывается в костях, особенно у детей, подвергая кости и заключенный в них костный мозг постоянному облучению.

Во многих странах для определения уровня радиоактивности продуктов питания действуют национальные программы мониторинга, которые, как правило, ориентированы на техногенные радионуклиды, такие как Cs, Sr и Pu.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГРИБОВ

Грибы являются одним из «даров леса», ценимых за вкусовые качества и уникальный витаминный ряд, оказывающий благотворное влияние на полноценную работу ряда функциональных систем человека. Однако известно, что грибы поглощают тяжелые металлы, промышленные и бытовые яды и опасные радионуклиды. Грибы особенно хорошо накапливают радиоактивный ^{137}Cs , который концентрируется в почве и верхнем (3–5 см) слое лесной подстилки. При высокой концентрации ^{137}Cs в гумусе радиационное загрязнение грибов может превышать установленную норму 379 Бк/кг. Съедобные грибы способны поглощать радиоактивные соединения Cs в количествах, превышающих нормативы, даже на почвах относительно чистой территории (до 1 Ки/км²). При этом радиоактивный изотоп ^{90}Sr , наличие которого строго отслеживается во всех продуктах питания, они практически не накапливают¹.

¹ В 1991 г. на стенах заброшенного энергоблока Чернобыльской АЭС была обнаружена образовавшаяся со временем черная плесень, представляющая грибковые организмы, способные поглощать радиацию. Исследование международной группы ученых показало, что три грибка, содержащих пигмент меланин — *Cladosporium sphaerospermum*, *Wangiella dermatitidis* и *Cryptococcus neoformans* — увеличивали биомассу и накапливали ацетат быстрее в среде, где уровень радиации превышал норму в 500 раз. Это означает, что грибки превращали энергию γ -излучения в химическую энергию таким же образом, как растения с помощью фотосинтеза превращают углекислый газ и хлорофилл в кислород и глюкозу. На их основе можно разрабатывать лекарства.

Разные виды грибов, произрастающие в одной и той же местности, накапливают радионуклиды неодинаково. Такая закономерность установлена с помощью метода спектрального анализа по исследованию грибов на территории, равномерно зараженной радионуклидами. Путем замеров проб грибов их разделили на четыре большие группы по накоплению радионуклидов: грибы-аккумуляторы, сильно накапливающие, средне накапливающие и слабо накапливающие. К *грибам-аккумуляторам* относится достаточно большой ряд съедобных грибов. Это горькушка, свинушка, моховик, польский гриб, колпак кольчатый. К *сильно накапливающим* относятся: зеленка, сыроежки, маслята, грузди белый и черный. *Средне накапливающие грибы* — это лисичка, белый гриб, подберезовик, подосиновик. *Слабо накапливающие грибы* — опенки луговой и осенний, зонтик. Для каждого вида грибов рассчитан коэффициент перехода радионуклидов из почвы в плодовое тело. Вне зависимости от степени радиационного загрязнения местности сбора грибов специалистами рекомендуется отдавать предпочтение мало накапливающим видам (рис. 8) и проводить тщательный радиационный контроль и измерение мощности β - и γ -излучений.

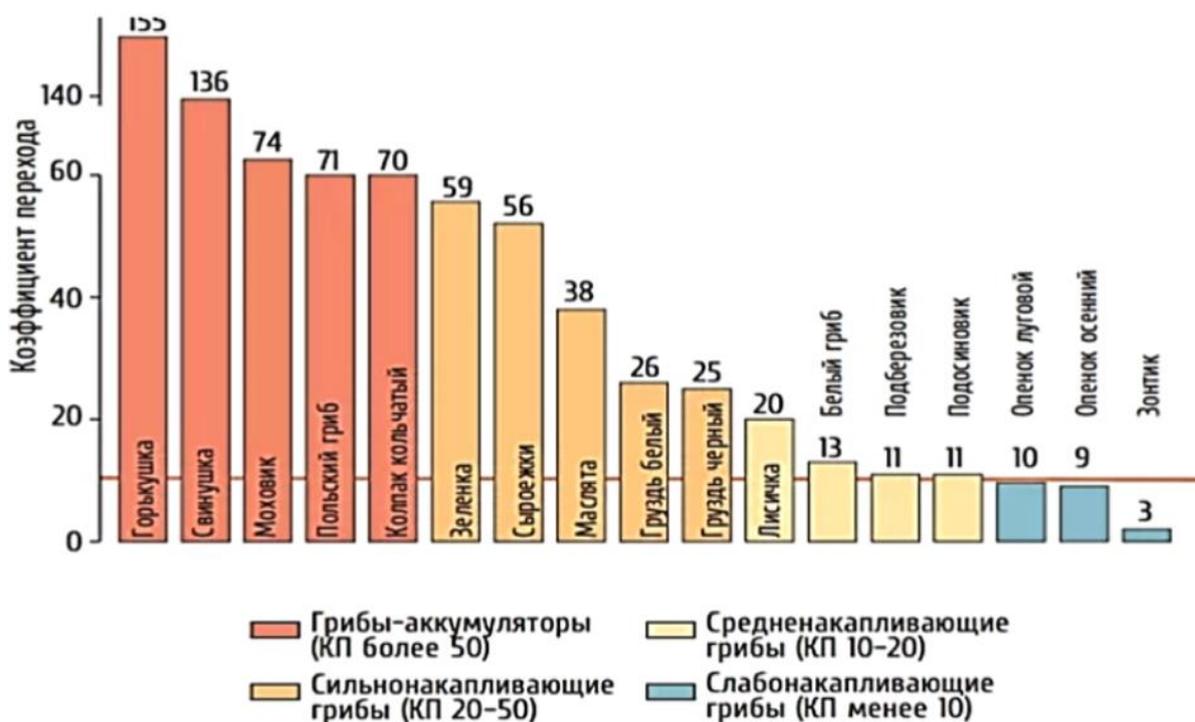


Рис. 8. Зависимость коэффициента перехода радионуклидов из почвы в плодовое тело грибов различных групп накопления

В Беларуси остается высоким процент проб заготавливаемых населением лесных ягод и грибов, загрязненных радионуклидами ^{137}Cs . Сбор даров природы, заготовка лекарственного сырья в лесах разрешены при плотности загрязнения ^{137}Cs до $2 \text{ Ки/км}^2 \cdot \text{с}$ обязательным контролем на

содержание радионуклидов. Уровень ^{137}Cs для дикорастущих ягод по Санитарным нормам, правилам и гигиеническим нормативам не должен превышать 185 Бк/кг, свежих или консервированных грибов — 379 Бк/кг, сушеных — не более 2500 Бк/кг.

ПРИБОРЫ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Известно, что радиоактивные излучения не воспринимаются органами чувств. Они могут быть обнаружены только при помощи приборов и устройств, принцип работы которых основан на использовании физико-химических методов или эффектов, которые возникают при взаимодействии излучений с веществом.

ТИПЫ ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Приборы и установки, которые используются для измерения или контроля ионизирующих излучений, можно разделить по функциональному назначению.

Дозиметры — приборы, измеряющие экспозиционную или поглощенную дозу излучения, а также мощность этих доз (бытовые дозиметры).

Радиометры — приборы, измеряющие активность объектов, содержащих радионуклиды: удельную активность радионуклидов, плотность потока ионизирующих частиц.

Спектрометры — приборы, измеряющие распределение ионизирующих излучений по энергии, времени, массе и заряду элементарных частиц по одному или более параметрам, характеризующим поля ионизирующих излучений (γ -спектрометры, с помощью которых было произведено дистанционное зондирование с самолетов и составлены карты загрязненности ^{137}Cs Республики Беларусь).

Сигнализаторы — приборы, указывающие на превышение какого-либо радиационного уровня либо диапазон значений доз.

Универсальные приборы, совмещающие функции дозиметра и радиометра, радиометра и спектрометра. К таким приборам относится дозиметр-радиометр типа РКСБ «Сосна». Дозиметры для измерения радиоактивности, накопившейся в человеческом теле, называются **счетчиками излучений человека (СИЧ)**.

УСТРОЙСТВО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Принципиальная схема любого дозиметрического и радиометрического прибора одинакова и включает три обязательных блока: *детекторное устройство (детектор), регистрирующий прибор (индикатор), блок питания (аккумуляторы, батарейки, элементы, электросеть и пр.)*.

Основное назначение детектора — это преобразование энергии ионизирующего излучения при его взаимодействии с веществом детектора в другие формы энергии, более удобные для регистрации, например, электрическую, световую и др.

Детектор при этом рассматривается как устройство, на вход которого поступают ионизирующие частицы, а на выходе появляются сигналы. В зависимости от *типа детектора* сигналом могут быть: вспышки света (*сцинтилляционный детектор*); импульсы тока (*ионизационный детектор*); пузырьки пара (*пузырьковая камера*, где через перегретую жидкость проходит ионизирующая частица и возникают пузырьки пара); капельки жидкости (*камера Вильсона*, где при прохождении через перенасыщенный пар частиц происходит ионизация, а на ионах как на центрах кристаллизации образуются капельки тумана).

Обязательной составной частью любого детектора является чувствительный объем, в котором энергия ионизирующего излучения в процессе взаимодействия с веществом преобразуется в определенный вид сигнала. Вещество, представляющее собой такой чувствительный объем, может быть газом, жидкостью и твердым телом. Детекторы получили соответствующие названия: *газовые, жидкостные, твердотельные*.

Устройства, регистрирующие ионизирующие излучения, включают такие важные элементы, как: *усилитель входных импульсов* — для усиления электрических сигналов; *преобразователь* — устройство для преобразования электрических сигналов по амплитуде, форме, количеству и длительности; *регистрирующее устройство* — для преобразования электрического сигнала в удобную для восприятия форму, например, самописец, стрелочный прибор, цифровой или звуковой индикатор.

Радиометр имеет конструктивное отличие от дозиметрического прибора. Отличие заключается в том, что источник ионизирующих излучений (пробу земли, воды, продуктов) и счетчик (детектор) помещают в свинцовый домик, который защищает элементы от внешнего радиоактивного фона, что позволяет уловить незначительные излучения от измеряемых объектов и зафиксировать величину удельной активности при очень низкоактивных пробах. Вследствие этого повышается чувствительность и диапазон (пределы) измерений прибора.

Одним из важнейших элементов приведенной схемы является детекторное устройство прибора, которое улавливает ионизирующие излучения от измеряемых объектов. В качестве детектора чаще всего используют ионизационные камеры, горизонтальные или торцевые счетчики, кристаллы или другие люминофоры, светящиеся под воздействием ионизирующих излучений, фотосоставы или химические растворы, изменяющие свой цвет или степень окраски в зависимости от величины или интенсивности излучений и др.

На практике наибольшее распространение получили ионизационные детекторы излучений (ионизационные камеры, пропорциональные счетчики, счетчики Гейгера–Мюллера, а также коронные и искровые счетчики). Они измеряют непосредственные эффекты взаимодействия излучения с веществом — ионизацию газовой среды. В зависимости от конструктивных особенностей приборов и характера проведения контроля радиационной обстановки приборы делят на четыре группы:

- приборы для индивидуального дозиметрического контроля;
- переносные приборы для группового дозиметрического контроля;
- переносные приборы для радиационного технологического контроля;
- стационарные приборы и многоканальные установки для непрерывного дистанционного дозиметрического и радиационного контроля.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Цель: оценить удельную массовую радиоактивность в пробах пищевых продуктов и строительных материалов с помощью радиометра.

Приборы и принадлежности:

- радиометр КРВП-3;
- весы электронные измерительные;
- пробы пищевых продуктов и строительных материалов.

Оценка лабораторной работы проводится по результатам расчетов удельной массовой радиоактивности пищевых продуктов и строительных материалов. Результаты расчетов оформляются в виде таблиц.

РАДИОМЕТР КРВП-3

Радиометр используется для измерения активности воды и пищевых продуктов. Это установка *счета импульсов*, которая состоит из *пересчетного блока* (рис. 9) и *камеры детектирования γ -излучения* (рис. 10).

Камера детектирования представляет собой разборный свинцовый домик, толщина всех стенок которого составляет 30 мм. Внутренние стенки изготовлены из трехмиллиметрового оргстекла. Передняя стенка откидывается с помощью рычага и пружины, открывая доступ внутрь домика.

Принцип работы прибора основан на измерении числа импульсов, поступающих с блока детектирования за определенное время. В качестве детектора γ -излучения используется газоразрядный счетчик Гейгера–Мюллера. Счетчик смонтирован в плоском пластмассовом корпусе и прикреплен к верхней стенке свинцового домика (рис. 11) для того, чтобы снизить влияние внешнего γ -излучения.

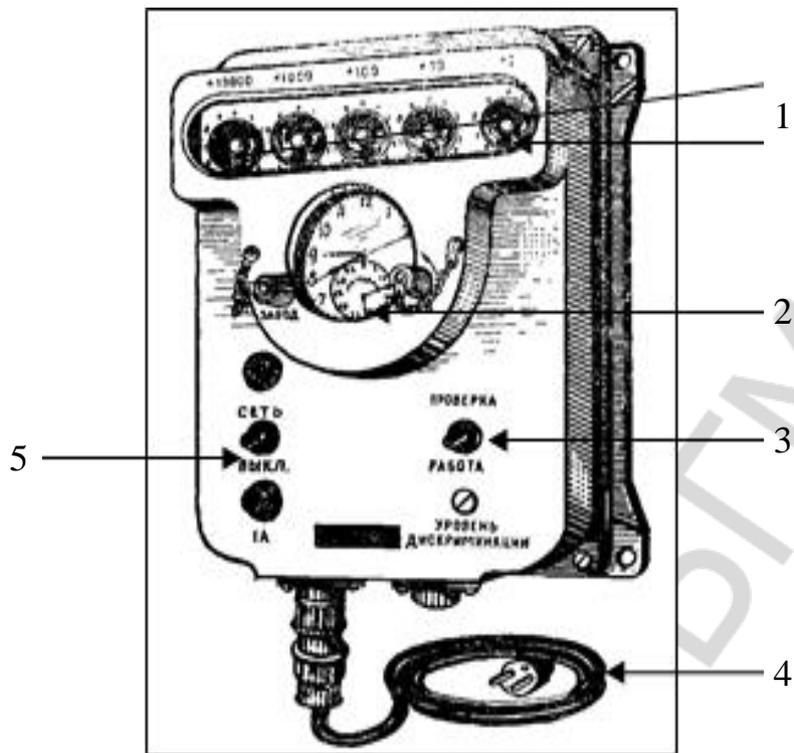


Рис. 9. Блок пересчетный, общий вид:

1 — декароны с пятью пересчетными декадами импульсов (пересчетный блок); 2 — часы с кнопкой ПУСК и ручкой ЗАВОД; 3 — тумблер рода работ (работа с блоком детектирования) или проверка; 4 — сетевой шнур; 5 — выключатель питающей сети

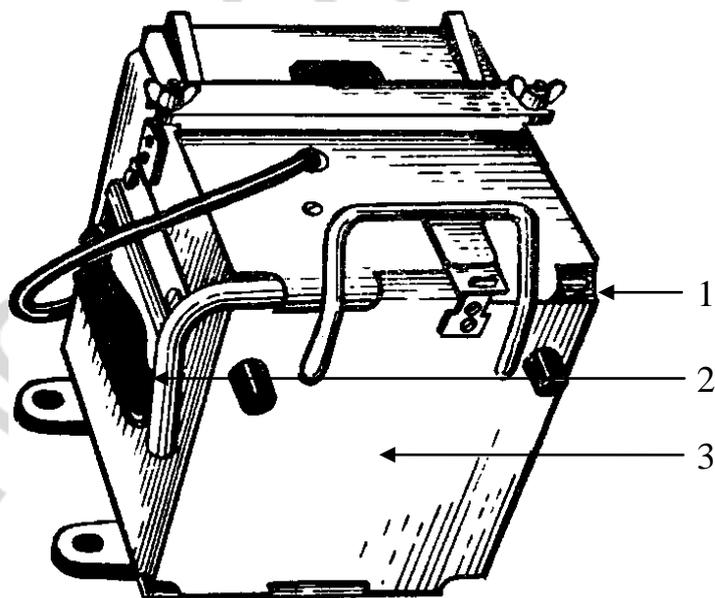


Рис. 10. Камера детектирования, общий вид:

1 — пружина; 2 — рычаг; 3 — передняя стенка свинцового домика

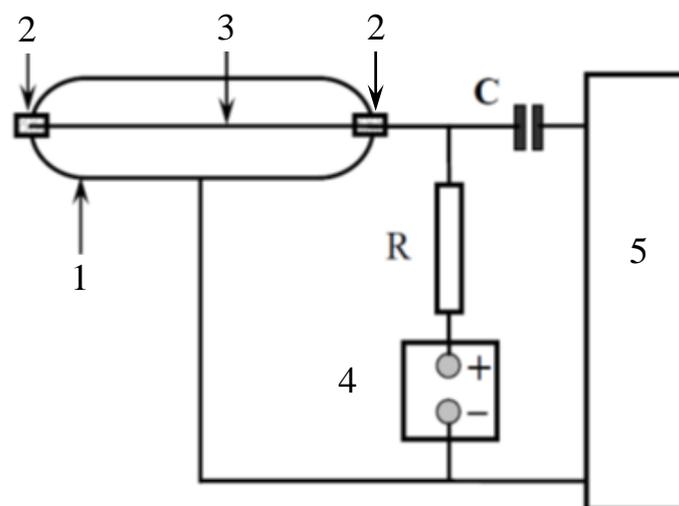


Рис. 11. Схема включения газового счетчика:

1 — тонкий металлический цилиндр (катод); 2 — изолятор; 3 — анод; 4 — источник высокого напряжения; 5 — блок регистрации; R — нагрузочное сопротивление; C — конденсатор

Газоразрядный счетчик — это устройство, состоящее из замкнутого резервуара и двух электродов, между которыми находится газовая среда, где и создается электрическое поле. Счетчик выполнен в виде тонкого металлического цилиндра 1, с торцов закрытого изоляторами 2, между которыми натянута тонкая металлическая нить 3, являющаяся положительным электродом (анодом), цилиндр 1 выполняет роль отрицательного электрода (катода). Оба электрода соединяются с контактами. Рабочий объем счетчика заполняется инертными газами с полностью заполненными внешними электронными орбитами атомов — Ar, Ne, He (атомы этих газов обладают незначительной способностью к захвату электронов). Давление газа внутри счетчика значительно меньше атмосферного (100–200 мм рт. ст.), что снижает вероятность столкновения электронов с атомами и молекулами и позволяет между двумя очередными столкновениями приобрести большие скорости и энергии, необходимые для ударной ионизации.

В газоразрядном счетчике используется принцип усиления газового разряда. В отсутствие ионизирующего излучения свободных ионов в объеме счетчика нет. Следовательно, электрического тока в цепи счетчика тоже нет. При воздействии ионизирующего излучения в рабочем объеме счетчика образуются заряженные частицы. Электроны, двигаясь в электрическом поле к аноду, площадь которого значительно меньше площади катода, приобретают кинетическую энергию и ионизируют атомы газовой среды. Выбитые при этом электроны также производят ионизацию. Таким образом, одна частица ионизирующего излучения, попавшая в объем газоразрядного счетчика, вызывает образование лавины свободных электронов. На нити счетчика собирается большое количество электронов. В результате положительный потенциал резко уменьшается. Под действием

возникшей разности потенциалов между катодом и анодом возникает электрический импульс тока, протекающего по сопротивлению R 5. Амплитуда импульса пропорциональна числу ионов, участвующих в его образовании, и зависит от напряжения. Каждый импульс тока отмечает попадание в счетчик Гейгера–Мюллера одной частицы. Регистрируя количество импульсов, возникающих в единицу времени, можно судить об интенсивности излучения. Импульсы, возникающие в блоке детектирования, по кабелю через дискриминатор и усилитель попадают на формирующий каскад пересчетного блока (см. рис. 9). В качестве формирующего каскада используется устройство (мультивибратор), которое обеспечивает необходимый по амплитуде и длительности импульс, позволяющий запустить пересчетные декады.

Пересчетная схема включает в себя 5 пересчетных декад на декаэтрадах и обеспечивает визуальный контроль числа зарегистрированных импульсов. Объем счета равен 10^5 импульсов.

Для определения средней скорости счета статистически распределенных во времени импульсов, пересчетный блок содержит часы 59 ЧП, синхронно связанные с пуском и остановкой пересчетной схемы.

ПОДГОТОВКА РАДИОМЕТРА К РАБОТЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Алгоритм подготовки следующий:

1. Ознакомьтесь с расположением и назначением тумблеров включения и управления, расположенных на лицевой панели радиометра.

2. Установите переключатель на пересчетном блоке в положение «ВЫКЛ». Проверьте завод часов, установите секундомер в исходное состояние кнопкой «ПУСК». Проверьте подсоединение блока детектирования к пересчетному блоку.

3. Включите шнур прибора в электрическую сеть, включите тумблер «СЕТЬ», расположенный на панели пересчетного блока, при этом должна загореться сигнальная лампочка и засветиться декаэтроны.

4. Прогрейте прибор в течение 10 мин. Время прогрева отсчитывается по часам, расположенным на панели пересчетного блока.

5. По истечении 10 мин убедитесь в исправности радиометра, для чего переведите переключатель РАБОТА – ПРОВЕРКА в положение ПРОВЕРКА, нажатием кнопки секундомера «ПУСК» включите пересчетную схему и через 10 с повторным нажатием кнопки «ПУСК» остановите секундомер и пересчетную схему. Количество зарегистрированных декаэтрами импульсов должно быть равно 1000 ± 30 , что будет соответствовать частоте сети 50 Гц. Для большей точности можно взять время не 10 с, а 100 с, тогда количество зарегистрированных импульсов должно быть $(10\ 000 \pm 300)$ импульсов.

6. Нажатием кнопки «ПУСК» сбросьте показания числа импульсов на декатронах; время отсчета на секундомере должно быть «0».

7. Подготовка свинцовой камеры к работе выглядит так:

а) откройте камеру:

– поверните рычаг в вертикальное положение и выдвиньте его из металлического держателя вправо;

– поднимите пружину, расположенную на крышке камеры и осторожно откройте, придерживая тяжелую дверку, оснащенную свинцовой защитой;

б) проверьте камеру на наличие в ней посторонних предметов;

в) закройте камеру в обратной последовательности.

8. Измерение фона камеры:

а) нажмите тумблер «ПУСК», измерение фона проводите в течение 10 мин;

б) остановите процесс измерения нажатием тумблера «ПУСК».

Проведите отсчет показаний времени по секундомеру и импульсов по декатронам, зафиксируйте эти показания в отчете лабораторной работы.

Повторным нажатием тумблера «ПУСК», осуществите сброс показаний на секундомере и декатронах на «0».

9. Измерение активности исследуемых образцов:

а) откройте камеру, поместите в камеру предварительно взвешенный исследуемый образец. Закройте камеру;

б) включите тумблер «ПУСК», время измерения — 10 мин. Последующим нажатием тумблера «ПУСК» проведите остановку измерений. Снимите показания времени по секундомеру и импульсов по декатронам, зафиксируйте эти показания. Сбросьте показания нажатием тумблера приборов на «0»;

в) откройте камеру, достаньте исследуемый образец;

г) проведите измерения числа импульсов следующих подготовленных проб пищевых продуктов или строительного материала. Занесите измерения в таблицу;

д) после измерений всех образцов закройте камеру;

е) отключите прибор переключением тумблера «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ». Необходимо вынуть шнур из сети.

ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Определение общей радиационной активности исследуемого образца происходит по формуле:

$$A = \frac{N_{\text{имп. пробы}} - N_{\text{имп. фона}}}{t} \left[\frac{\text{распад}}{с} = \text{Бк} \right],$$

где A — активность образца, $N_{\text{имп. пробы}}$ — число излучаемых импульсов пробы, $N_{\text{имп. фона}}$ — число излучаемых импульсов фона.

Определение удельной (массовой) активности исследуемых образцов:

$$A_m = \frac{A}{m} \left[\frac{\text{распад}}{\text{с} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{Бк}}{\text{кг}} \right],$$

где A_m — удельная (массовая) активность образца, A — активность образца, m — масса образца (пробы).

Рассчитайте активность проб, приведите расчеты. Полученные значения параметров внесите в табл. 7. Полученные значения удельной активности проб сравните с республиканскими допустимыми значениями (см. приложения, РДУ-99, Гигиенический норматив 10-117-99) и сделайте вывод о возможности использования исследуемых проб по назначению.

Полученные экспериментальные данные для характеристики строительных материалов и продуктов питания представлены в табл. 7, 8.

Таблица 7

Результаты измерений и расчетов

Наименование пробы	Масса пробы, кг	Время измерения, мин	Число импульсов фона, $N_{\text{фона}}$	Число импульсов пробы, $N_{(\text{фона}+\text{проб})}$	Удельная активность, A_m (Бк/кг)	Удельная активность, A_m (Ки/кг)	Оценка допустимости использования
Гранит 1		60	545	905			
Гранит 2		60					
Гранит 3		60					
Гравий		60					

Таблица 8

Результаты измерений и расчетов

Наименование пробы	Масса пробы, кг	Время измерения, мин	Число импульсов фона, $N_{\text{фона}}$	Число импульсов пробы, $N_{(\text{фона}+\text{проб})}$	Удельная активность, A_m (Бк/кг)	Удельная активность, A_m (Ки/кг)	Оценка допустимости использования
Черника 1		60	545	905			
Черника 2							
Грибы сушеные		60	545	816			
Шиповник		60					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Радиоактивность. Основные виды радиоактивности.
2. Основной закон радиоактивного распада, постоянная распада, период полураспада.
3. Виды излучения: α -распад, β -распад (электронный и позитронный) и γ -излучение.

4. Дайте определение активности. Единицы измерения. Соотношение между единицами измерения.

5. Понятие об удельной, объемной, поверхностной активностях радиоактивного источника. Единицы измерения этих параметров в системе СИ и внесистемные единицы измерения.

6. Основные дозы ионизирующих излучений: экспозиционная, поглощенная, эквивалентная, эффективная эквивалентная, коллективная.

7. Единицы измерения различных радиационных доз. Соотношение между единицей измерения Зиверт и Рентген.

8. Естественный радиационный фон Земли. Единицы измерения радиационного фона.

9. Вследствие каких факторов происходит повышение естественного радиационного фона в населенных пунктах? Какие показатели радиационного фона принято считать нормальными, допустимыми и повышенными? Как учитывается влияние фона при измерении активности?

10. Какой вклад в общую дозу облучения населения вносят строительные материалы? В чем заключается опасность R_n , выделяющегося из строительных материалов зданий и сооружений?

11. С какой целью проверяется объемная активность воздуха в жилых помещениях?

12. Для каких измерений предназначен радиометр КРВП-3? Принцип действия радиометра.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ 1

Рассчитайте удельную объемную активность для помещений различного типа, приведенную в табл. 9 в пКи/л, представив ее в Бк/м³.

Таблица 9

Концентрация радона в некоторых объектах и различных помещениях

Объект	Удельная объемная активность, пКи/л	Удельная объемная активность, Бк/м ³
Хорошо вентилируемые служебные помещения	0,06–0,35	
Квартиры в кирпичных домах с воздушным кондиционером	0,01–0,19	
Квартиры деревянных домов	0,03–1,7	
Кирпичные дома — нижние этажи	1,5–2,9	
Кирпичные дома — верхние этажи	0,7–1,0	
Каменные дома	2,3–5,8	
Дома из шлаковых панелей	4,0–8,0	
Подвальные этажи с плохой вентиляцией	3,6–7,8	

Проведя расчет и сопоставив полученные значения с допустимыми нормативами по содержанию Rn в воздухе жилых домов в Республике Беларусь, определите, в каком из помещений его концентрация будет превышать норму.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ 2

Наиболее загрязненными грибами оказались лисички, собранные вблизи деревни Братское в Наровлянском районе. Загрязнение составило 8988 Бк/кг. В Хойницком районе загрязнение грибов составило 6735 Бк/кг. Во сколько раз относительно допустимой нормы превышен уровень загрязнения грибов в первом и втором случае?

Задачи

1. Активность некоторого изотопа А за 10 сут уменьшилась на 20 %, а изотопа В — на 24 % по сравнению с первоначальной. Определите период полураспада этих изотопов.

2. Счетчик α -частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал $N_1 = 1400$ частиц в мин, а через 4 ч только $N_2 = 400$ частиц в мин. Определите период полураспада изотопа.

3. Известен период полураспада радиоактивного изотопа ^{137}Cs . Определите среднее время жизни ядра.

4. За какое время t распадется $\frac{7}{8}$ начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период полураспада равен 10 сут?

5. Период полураспада изотопа ^{210}Po равен 138,4 дня. Вычислите активность (в милликюри) по истечению 1 года, если начальное количество изотопа равно 1,0 мкг.

6. Известно, что образец изотопа ^{223}Ra первоначально имел активность $3,0 \cdot 10^4$ распадов в 1 мин. По таблице активности этого образца постройте график зависимости активности от времени, определите период полураспада и среднее время жизни образца.

Прошедшее время, дни	0	10	20	30	40	50	60	80
Активность образца изотопа $^{223}_{88}\text{Ra}$ (число распадов в мин)	$30 \cdot 10^4$	$17 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$0,3 \cdot 10^4$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лещенко, В. Г.* Медицинская и биологическая физика : учеб. пособие / В. Г. Лещенко, Г. К. Ильич. Минск : Новое знание, Москва : ИНФРА-М, 2012. 551 с.
2. *Савельев, И. В.* Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. / И. В. Савельев. Москва : Наука, 1980. Т. 3.
3. *Кутьков, В. А.* Радиационная безопасность персонала атомных станций : учеб. пособие / В. А. Кутьков, В. В. Ткаченко, В. П. Романцов. Москва, Обнинск : Атомтехэнерго, ИАТЭ, 2003. 344 с.
4. *Булдаков, Л. А.* Радиоактивное излучение и здоровье / Л. А. Булдаков, В. С. Калистратова. Москва : Информ-Атом, 2003. 165 с.
5. *Василенко, О. И.* Радиационная экология / О. И. Василенко // Медицина. 2004. Т. 45, № 3. С. 366–367.
6. *Мельнов, С. Б.* Биологические эффекты ионизирующих излучений у человека : учеб. пособие : в 2 ч. / С. Б. Мельнов, В. Н. Кипень, Н. Н. Тушин. Минск, 2012. Ч. 2. 196 с.
7. *Козлов В. Ф.* Справочник по радиационной безопасности : справочник / В. Ф. Козлов. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 352 с.
8. *Машкович, В. П.* Основы радиационной безопасности : учеб. пособие / В. П. Машкович, А. М. Панченко. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 176 с.
9. *Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87.* Москва : Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
10. *Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений (ОСП-72/87).* Москва : Энергоатомиздат, 1987. 160 с.
11. *Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99).* Минск, 99. 40 с.
12. *Нормы радиационной безопасности НРБ-99.* Москва : Энергоатомиздат, 1999. 117 с.

**Массовая доля ^{40}K в некоторых продуктах (%)
и их радиоактивность**

Продукты	%	Бк/г	Бк/кг	Продукты	%	Бк/г	Бк/кг
Чай	2,48	0,76		Орехи грецкие	0,66	0,20	
Курага	1,88	0,57		Картофель	0,57	0,17	
Какао-порошок	1,69	0,52		Грибы белые	0,45	0,14	
Кофе в зернах	1,60	0,49		Бананы	0,40	0,12	
Фасоль	1,10	0,34		Мед пчелиный	0,39	0,12	
Изюм	1,02	0,31		Крупа гречневая	0,38	0,12	
Кедровые орехи	0,78	0,24		Крупа перловая	0,17	0,05	
Горох	0,73	0,22		Мука пшеничная	0,12	0,04	

**Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов
в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99).
Гигиенический норматив 10-117-99**

Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
<i>Для ¹³⁷Cs</i>	
Вода питьевая	10
Молоко и цельномолочная продукция	100
Молоко сгущенное и концентрированное	200
Творог и творожные изделия	50
Сыры сычужные и плавленые	50
Масло коровье	100
Мясо и мясные продукты, в том числе:	
Говядина, баранина и продукты из них	500
Свинина, птица и продукты из них	180
Картофель	80
Хлеб и хлебобулочные изделия	40
Мука, крупы, сахар	60
Жиры растительные	40
Жиры животные и маргарин	100
Овощи и корнеплоды	100
Фрукты	40
Садовые ягоды	70
Консервированные продукты из овощей, фруктов и ягод	74
Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185
Грибы свежие	370
Грибы сушеные	2500
Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	37
<i>Для ⁹⁰Sr</i>	
Вода питьевая	0,37
Молоко и цельномолочная продукция	3,7
Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7
Картофель	3,7
Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	1,85

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Радиоактивность. Основные теоретические положения.....	4
Атомное ядро и его характеристики	4
Явление радиоактивности и радиоактивный распад	5
Основные виды радиоактивных излучений.....	6
Основной закон радиоактивного распада	9
Накопление радионуклидов в организме.....	12
Активность. Единицы активности.....	12
Дозиметрия ионизирующих излучений.....	15
Дозиметрические величины и их единицы.....	15
Взаимодействие ионизирующих излучений с различными материалами	24
Химическое и биологическое действие ионизирующих излучений.....	24
Воздействие ионизирующего излучения на человека.....	25
Влияние естественной радиоактивности на человека	26
Загрязнение строительных материалов.....	26
Приборы регистрации ионизирующих излучений	32
Типы приборов для регистрации ионизирующих излучений.....	32
Устройство дозиметрического и радиометрического прибора	32
Лабораторная работа «Исследование радиационной активности продуктов питания и строительных материалов»	34
Радиометр КРВП-3.....	34
Подготовка радиометра к работе и порядок выполнения лабораторной работы	37
Обработка полученных данных	38
Контрольные вопросы	39
Практическое задание 1	40
Практическое задание 2	41
Задачи	41
Список использованной литературы.....	42
Приложение 1	43
Приложение 2	44

Учебное издание

Гольцев Михаил Всеволодович
Медведева Ирина Федоровна
Мансуров Валерий Анатольевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ МАССОВОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РАДИОМЕТРА

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск М. В. Гольцев
Редактор И. А. Соловьёва
Компьютерная вёрстка Н. М. Федорцовой

Подписано в печать 26.05.21. Формат 60×84/16. Бумага писчая «Снегурочка».
Ризография. Гарнитура «Times».
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,13. Тираж 99 экз. Заказ 206.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный медицинский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/187 от 18.02.2014.
Ул. Ленинградская, 6, 220006, Минск.

Репозиторий БГМУ