

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА им. И.М. ГУБКИНА

**РАДИОАКТИВНОСТЬ,
ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
И НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ**

МОСКВА 2004

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. РАДИОАКТИВНОСТЬ	3
1.1. Закон радиоактивного распада	3
1.2. Альфа-распад.....	4
1.3. Бета-распад	5
1.4. Гамма-излучение.....	7
Раздел 2. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	7
2.1. Основные определения.....	7
2.2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом	9
2.3. Взаимодействие фотонов с веществом	9
2.4. Взаимодействие нейтронов с веществом.....	11
2.5. Дозовые характеристики излучения	12
Раздел 3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	17
3.1. Биологическое действие ионизирующих излучений....	17
3.2. Фоновое облучение человека.....	20
3.3 Принципы нормирования радиационного облучения...	23
3.4. Нормы радиационной безопасности	24

Раздел 1. РАДИОАКТИВНОСТЬ

1.1. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Радиоактивностью называют самопроизвольное (спонтанное) испускание ядром одной или нескольких частиц, сопровождающееся его превращением в другое ядро (или переходом в другое состояние). Начальное радиоактивное ядро (нуклид) называют материнским, а образовавшиеся ядра - дочерними.

Обнаруженное в 1886 г. А. Беккерелем излучение урана было названо им по характеру отклонения в магнитном поле α - и β - и γ -лучами. Эта классификация сохранилась и в настоящее время к радиоактивным процессам относят α -распад, β^+ и β^- -распады, γ -излучение, спонтанное деление тяжелых ядер и протонную радиоактивность.

Акт радиоактивного распада является случайным, поэтому за малый промежуток времени от t до $t + dt$ распадется малое число ядер dN , пропорциональное их числу в момент времени t и времени dt .

$$dN = -\lambda N(t) dt,$$

где коэффициент пропорциональности λ называют постоянной распада, а знак $-$ означает, что число нераспавшихся ядер уменьшается. Интегрируя (1), получим закон радиоактивного распада:

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

где N_0 – начальное число (при $t=0$) ядер, а $N(t)$ – число нераспавшихся ядер в момент времени t .

Число распавшихся ядер N_p определяется соотношением

$$N_p = N_0 (1 - e^{-\lambda t}).$$

Число ядер, распадающихся в единицу времени называют активностью радиоактивного препарата:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где $A_0 = \lambda N_0$ – начальная активность препарата. Активность измеряют в беккерелях (1 Бк соответствует одному распаду в секунду) или в кюри (число распадающихся за 1 секунду ядер, содержащихся в 1 г радия, 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк).

Для характеристики распада наряду с постоянной λ используется период полураспада $T_{1/2}$ – время, за которое распадается половина радиоактивных ядер:

$$N_0 e^{-\lambda T} = N_0 / 2,$$

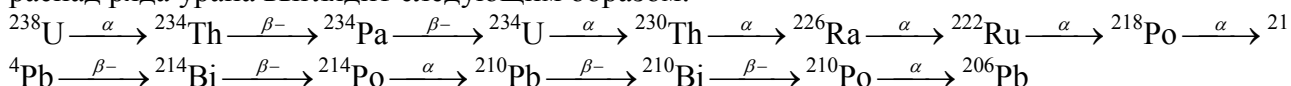
откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Наряду с этим вводят среднее время жизни ядра τ , определяемое как суммарное время жизни всех радиоактивных ядер, деленное на их начальное число N_0 :

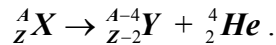
$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

В природе существуют три радиоактивных ряда (семейства), где каждый член ряда испытывает радиоактивный распад, а дочерние ядра также распадаются. Ряд тория начинается с ^{232}Th и оканчивается свинцом ^{208}Pb . Ряд урана начинается с ^{238}U и заканчивается свинцом ^{206}Pb , третий ряд начинается с ^{235}U и заканчивается ^{207}Pb . Существовал четвертый ряд, начинавшийся с ^{237}Np и заканчивавшийся ^{209}Bi . Изотоп нептуния за время существования Земли давно распался и в настоящее время в природе практически не встречается. Более подробно распад ряда урана выглядит следующим образом:

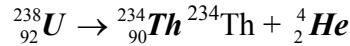


1.2 Альфа-распад

При распаде образуется ядро ${}^4_2\text{He}$ (α -частица) и дочернее ядро Y с массовым числом $A-4$ и зарядовым числом $Z-2$:



Примером может служить распад изотопа урана ${}^{238}_{92}\text{U}$:



Ядро является α -радиоактивным, если выполняется следующее неравенство:

$$\Delta E = (m_x - m_y - m_\alpha)c^2 \geq 0$$

Энергия ΔE выделяется в виде кинетической энергии α -частицы (большая часть) и дочернего ядра. Значение кинетической энергии α -частиц T_α почти для всех 2000 известных α -активных изотопов лежит в интервале $4 \text{ МэВ} \leq T_\alpha \leq 9 \text{ МэВ}$ со средним значением около 6 МэВ.

Пролетая через вещество, α -частица ионизует его молекулы, постепенно теряя свою энергию. В воздухе, где на образование пары ионов затрачивается около 35 эв, на пути α -частицы (несколько сантиметров при нормальных условиях) образуется примерно 10^5 пар ионов. В твердом веществе пробег α -частиц составляет порядка 0,01 мм и они полностью задерживаются листом бумаги.

Дочернее ядро при α -распаде может находиться как в основном, так и в возбужденном состоянии. Поэтому α -частицы будут обладать разными строго определенными кинетическими энергиями. На Рис.1.1 представлена схема α -распада висмута ${}^{212}_{83}\text{Bi}$

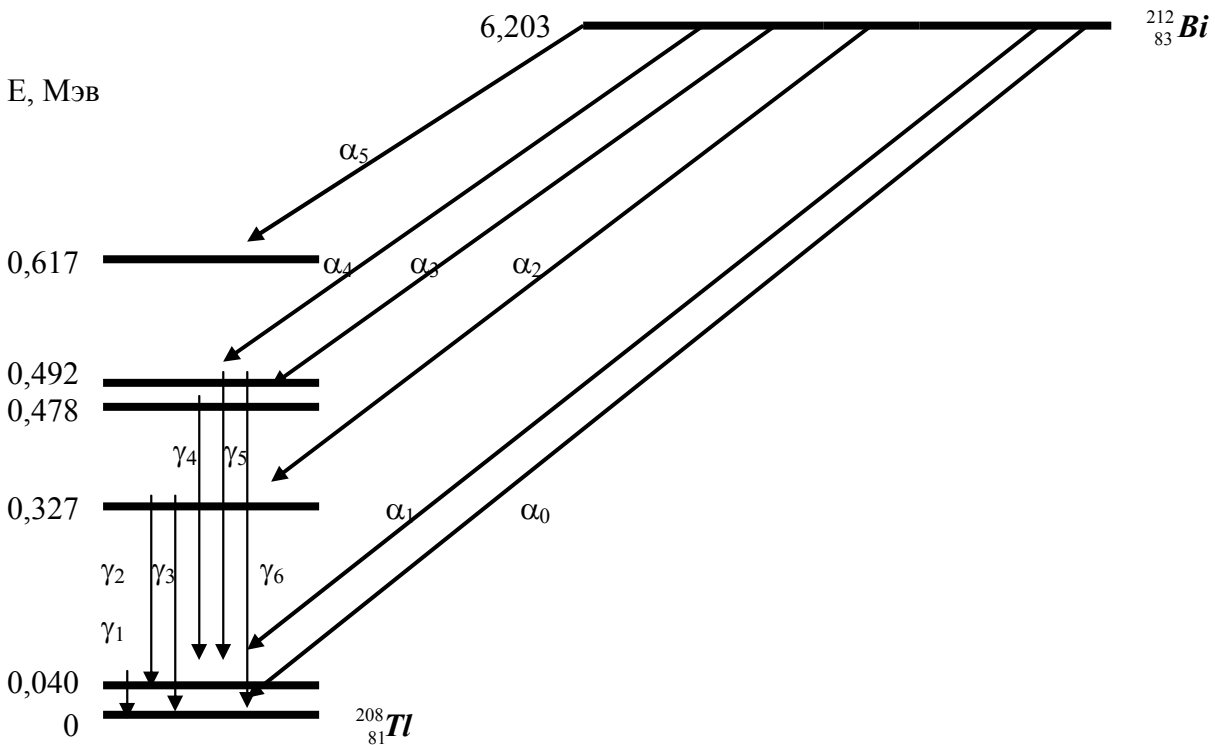


Рис.1.1 Схема α -распада висмута ${}^{212}_{83}\text{Bi}$

с образованием дочернего ядра теллура $^{208}_{81}\text{Te}$ в разных энергетических состояниях.

Кинетическая энергия вылетающих α -частиц лежит в пределах от 5,89 Мэв (α_5) до 6,09 Мэв (α_0). За время жизни τ (от 10^{-15} до 10^{-8} сек.) дочернее ядро переходит в основное состояние с испусканием γ -фотонов разной частоты ($\gamma_1 - \gamma_6$).

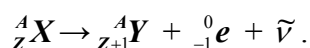
Энергия возбужденного состояния ядра может быть «снята» путем испускания протона, нейтрона, электрона и α -частицы. Кроме этого, возбужденное ядро может отдать избыток энергии электрону К-, L- и M-оболочки атома. Получив эту энергию, электрон покидает атом, а освободившееся место будет заполнено электронами с вышележащих уровней энергии. Этот процесс называется внутренней конверсией и сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.

α -частица возникает в ядре в момент распада и обладает средней энергией 6 Мэв. При вылете из ядра ей необходимо преодолеть потенциальный барьер, обусловленный ядерными силами и кулоновским отталкиванием. Высота барьера намного превышает 6 Мэв поэтому его преодоление возможно только за счет «туннельного эффекта».

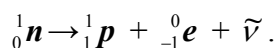
1.3 Бета-распад.

Бета-распад – процесс, в результате которого нестабильное ядро испускает электрон, позитрон или захватывает электрон атома. Соответственно различают β^- , β^+ распад и электронный К-, L-, реже М-захват.

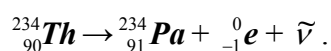
При β^- распаде образуется дочернее ядро, электрон и антинейтрино:



Дочернее ядро имеет заряд на единицу больший, чем материнское, поэтому можно считать, что нейтрон в материнском ядре превращается в протон:



Примером может служить β^- распад тория:



Исследование энергетического распределения электронов, рождающихся при β^- распаде, показало, что их кинетические энергии изменяются от 0 до $E_{\max}$. (Рис.1.2) Значение $E_{\max}$ определяется разностью масс материнского ядра и дочернего ядра и электрона.

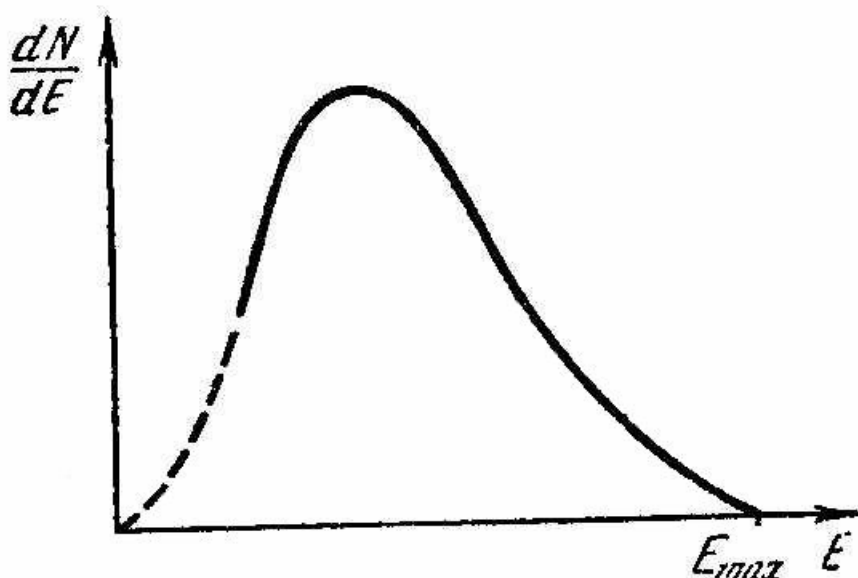


Рис.2

Площадь под кривой дает общее число электронов, испускаемых в единицу времени, dN – число электронов, испускаемых в единицу времени интервале энергий от E до $E + dE$.

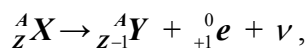
Очевидно, что если электрон при β -распаде вылетает с энергией меньшей $E_{\max}$, то наблюдается нарушение закона сохранения энергии.

Для того, чтобы объяснить потерю энергии $\Delta E = E_{\max} - E$, В.Паули в 1931 г. предположил, что одновременно с электроном испускается еще одна частица, которую Э.Ферми назвал нейтрино («нейтрончик»). Эта частица уносит разность энергий ΔE . Одновременно удалось объяснить и нарушение закона сохранения спина при β -распаде: складываясь спин протона ($1/2$) и спин электрона ($1/2$) могут дать 0 или 1, в то время как спин нейтрона равен $1/2$. Учет спина нейтрино ($1/2$) приводит к сохранению спина:

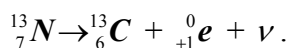
$$1/2 + 1/2 + 1/2 \rightarrow 1/2.$$

Существование нейтрино была экспериментально доказано в 1956 году.

Другим видом рассматриваемого распада является β^+ распад, который происходит по схеме:

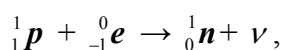


например:

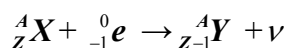


Позитрон ${}_{+1}^0e$ является античастицей для электрона. Следует заметить, что более детальное исследование процесса бета-распада показало, что при β -распаде образуется анти-нейтрино, а при β^+ распаде – нейтрино.

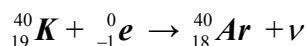
Третий вид бета-распада (электронный захват) представляет собой поглощение ядром К-электронов (реже L- или M-электронов):



по схеме:



например,



Освободившееся место в К-, L- или М-оболочке заполняется электронами вышележащих оболочек с испусканием характеристического рентгеновского излучения.

1.3 Гамма-излучение

Гамма-излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а лишь сопровождает α - и β -распады, а также возникает при ядерных реакциях, при торможении заряженных частиц, их распаде и т. д. γ -спектр является линейчатым (дискретным), что является доказательством дискретности энергетических состояний атомных ядер.

γ -квант испускается дочерним (а не материнским) ядром, которое образуется в возбужденном состоянии. За время жизни этого состояния (10^{-13} - 10^{-14} с) ядро переходит в основное состояние с испусканием γ -кванта. Переходя в основное состояние, возбужденное ядро может пройти через ряд промежуточных состояний, поэтому γ -излучение одного и того же радиоактивного изотопа может содержать несколько групп γ -квантов с разной энергией.

γ -излучение большинства ядер является столь коротковолновым, что его волновые свойства проявляются очень слабо и на первый план выступают корпускулярные свойства. Поэтому γ -излучение рассматривают как поток γ -квантов, имеющих при радиоактивных распадах энергии от 10кэВ до 5МэВ.

Ядро, находящееся в возбужденном состоянии, может перейти в основное состояние не только в результате испускания γ -кванта, но и при прямой передаче энергии возбуждения одному из электронов, который покидает атом. Это явление называется внутренней конверсией. Возникшее в результате вылета электрона вакантное место заполняется электронами вышележащих оболочек и сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.

Раздел 2. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

2.1 Основные определения

Ионизирующее - излучение (за исключением видимого света и ультрафиолетового излучения), взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков.

Ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц (электронов, протонов, α -частиц и т.д.), имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации атомов и молекул при столкновении, называется непосредственно ионизирующим излучением. Ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц (нейтронов или фотонов), которые в свою очередь могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения, называется косвенно ионизирующим излучением.

К фотонному ионизирующему излучению относятся: гамма-излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц, тормозное гамма-излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц, и тормозное и (или) характеристическое рентгеновское излучение.

К корпускулярному излучению относятся альфа-излучение, электронное, протонное, нейтронное, мезонное излучения.

Частицы корпускулярного ионизирующего излучения или фотоны принято называть ионизирующими частицами.

Ионизирующее излучение, состоящее из частиц различного вида или частиц и фотонов, называется смешанным ионизирующим излучением.

Принято различать первичное и вторичное ионизирующее излучение. Под первичным понимается ионизирующее излучение, которое в рассматриваемом процессе взаимодействия со средой является или принимается за начальное. Вторичное излучение возникает в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения с данной средой.

Объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение, называют источником ионизирующего излучения. Радиоактивность - превращение неустойчивого нуклида в другой нуклид, сопровождающееся испусканием ионизирующего излучения. Нуклид - вид атомов одного элемента с данным числом протонов и нейтронов в ядре. Нуклид, обладающий радиоактивностью, называется радионуклидом.

Отношение активности радионуклида в источнике к массе, объему (для объемных источников), площади поверхности (для поверхностных источников) или к длине (для линейных источников) источника называется удельной, объемной, поверхностной или линейной активностью источника соответственно.

Выбор единиц этих величин определяется конкретной задачей. Например, допустимую концентрацию радионуклида (объемную активность) в воде удобнее выражать в беккерелях на литр (Бк/л), а в воздухе в беккерелях на кубический метр (Бк/м³), так как суточное

потребление человеком воды определяется обычно в литрах, а воздуха - в кубических метрах.

Распад радиоактивных атомов сопровождается испусканием частиц (α -, β^- , β^+ -частицы, конверсионные электроны) и (или) фотонов. При этом число ядерных превращений не всегда совпадает с числом испускаемых частиц и еще реже — с числом испускаемых фотонов. Активность характеризует лишь число ядерных превращений. Поэтому термины " α -, или β -, или γ -активность" не имеют смысла. Связать активность радионуклида с числом испускаемых корпускулярных частиц или фотонов можно, зная схему распада нуклида.

2.2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом

Заряженные частицы, проходя через вещество, расходуют свою кинетическую энергию, в основном, при взаимодействии с электронами атомов вещества, их переход на возбужденный уровень или ионизацию (отрыв электрона от атома), и с кулоновским полем ядра (образование тормозного излучения).

Взаимодействия заряженных частиц разделяют на *упругие* и *неупругие*. К упругим относят такие взаимодействия, при которых сумма кинетических энергий взаимодействующих частиц до взаимодействия и после сохраняется неизменной. При неупругом взаимодействии часть кинетической энергии заряженной частицы передается образовавшимся частицам или фотонам; другая часть кинетической энергии передается атому или ядру на их возбуждение или перестройку. К таким взаимодействиям относятся неупругое рассеяние, ионизация и возбуждение атомов, образование тормозного излучения. При прохождении ионизирующей частицы через вещество она может испытать рассеяние, поглощение (захват), деление или пройти вещество без взаимодействия.

2.3. Взаимодействие фотонов с веществом

В диапазоне энергий фотонов $20 \text{ кэВ} < E_0 < 10 \text{ МэВ}$ может наблюдаться более десяти различных типов взаимодействия фотонов с веществом. Для защиты от фотонного излучения радионуклидных и реакторных источников главным образом используют фотоэффект, комптон-эффект и эффект образования электронно-позитронных пар.

При фотоэффекте фотон поглощается атомом, передает свою энергию одному из орбитальных электронов и выбивает его из атома. Вероятность фотоэффекта увеличивается с ростом энергии связи электрона в атоме. Поэтому наибольший вклад в этот процесс вносят электроны К-оболочки при условии, что энергия фотона равна или больше энергии E_K связи электрона на этой оболочке. Если энергия фотона $E_0 < E_K$, то фотоэффект может произойти на любой другой оболочке с энергией связи электрона, меньшей E_K . Освободившееся в ре-

результате фотоэффекта место на данной оболочке может быть занято электроном с более высокой оболочки. Процесс сопровождается вторичным фотонным характеристическим излучением.

Эффект Комптона представляет собой рассеяние фотона на свободном электроне. Фотон при этом не поглощается, а лишь изменяет свою энергию и направление движения. Максимальная потеря энергии фотона происходит при рассеянии назад, причем в любом случае при сколь угодно большой энергии фотона энергия рассеянного назад фотона не может превысить 0,255 МэВ.

Эффект образования электронно-позитронной пары. Фотон с энергией, превышающей удвоенную энергию покоя электрона $2m_0c^2 = 1,022$ МэВ, может образовать в поле ядра электронно-позитронную пару. Кинетическая энергия пары равна

$$E_{\text{пары}} = E_0 - 2m_0c^2 \quad (2.19)$$

где E_0 — энергия фотона.

Электронно-позитронная пара может быть также образована в поле атомного электрона. Однако вероятность этого процесса примерно в Z раз меньше, чем образование пары в поле ядра. Поэтому в задачах переноса фотонов в веществе его роль незначительна.

Образованные электрон и позитрон производят ионизацию среды, частично их энергия тратится на образование тормозного излучения. Замедлившись, позитрон рекомбинирует с одним из свободных электронов среды, образуя вторичное аннигиляционное излучение с выходом двух фотонов с энергией 0,511 МэВ каждый. Возможна также аннигиляция позитронов в полете. Эффект наиболее важен в области высоких энергий и сред с большим Z .

Таблица 2.1.

Интервалы энергий фотонов, в которых один из трех процессов взаимодействия фотонов с веществом является доминирующим

Вещество	Интервал энергий фотонов, E , МэВ		
	Фотоэффект	Комптон-эффект	Образование пар
Воздух	$<0,02$	$0,02 < E < 23$	> 23
Алюминий	$<0,05$	$0,05 < E < 15$	> 15
Железо	$<0,12$	$0,12 < E < 9,5$	$> 9,5$
Свинец	$<0,50$	$0,50 < E < 4,7$	$>4,7$

В табл. 2.1 показаны интервалы энергий фотонов, в которых один из трех процессов взаимодействия является доминирующим.

Если энергия γ -кванта превышает энергию связи нуклонов в ядре (7 - 8 МэВ), то в результате его поглощения ядром может наблюдаться ядерный фотоэффект – выброс одного из нуклонов (чаще – нейтрона).

2.4. Взаимодействие нейтронов с веществом

Не имея электрического заряда, нейтрон не взаимодействует с электрическим полем заряженных частиц и ядер атомов и может пройти значительные расстояния в веществе до столкновения с ядром. Условно принято следующее разбиение нейтронов по энергиям:

1. Медленные, $E < 1$ кэВ. В эту группу входят тепловые ($5 \cdot 10^{-3}$ эВ $< E < 0,5$ эВ), надтепловые ($0,5$ эВ $< E < 1$ кэВ).
2. Промежуточные, 1 кэВ $< E < 0,2$ МэВ.
3. Быстрые, $0,2 < E < 20$ МэВ.
4. Сверхбыстрые, $E > 20$ МэВ.

В поле ядра атома нейтроны в зависимости от их энергии могут испытывать различные типы взаимодействия: упругое и неупругое рассеяния, радиационный захват с испусканием фотона, захват с испусканием заряженных частиц и деление ядер.

Упругое рассеяние. В этом случае нейтрон рассеивается ядром, изменяет направление движения, теряя часть своей энергии. Полная кинетическая энергия системы нейтрон-ядро остается неизменной. Упругое рассеяние играет большую роль в ослаблении потока быстрых нейтронов, в особенности водородсодержащих средах. Так как массы протона и нейтрона практически одинаковы, то при столкновении с ядром водорода нейтрон в среднем теряет половину своей энергии. Ослабление быстрых нейтронов в водороде (водородсодержащей среде) приводит к постепенному переходу в область тепловых энергий и поглощению ядрами водорода. В других веществах нейтроны с энергией приблизительно до 1 МэВ преимущественно испытывают упругие рассеяния.

Неупругое рассеяние может произойти, если энергия падающего нейтрона E_0 превысит энергию E^* первого возбужденного состояния ядра-мишени. После неупругого рассеяния энергия возбужденного ядра-мишени снимается путем испускания одного или нескольких фотонов, спектр которых определяется структурой энергетических уровней возбужденного ядра. Энергия нейтронов уменьшается.

Поглощение нейтронов относится к классу неупругих взаимодействий и для большинства элементов происходит в области малых энергий нейтронов. После поглощения (захвата) нейтрона ядро находится в возбужденном состоянии, переход из которого в нормальное состояние сопровождается испусканием одного или нескольких фотонов. Подавляющее большинство нейтронов поглощается в тепловой области энергий, хотя этот эффект может наблюдаться в промежуточной и в резонансной областях энергии. Фотонное излучение, возникающее при радиационном захвате, имеет весьма высокую энергию (6—8 МэВ) и часто играет определяющую роль в формировании поля излучения за защитой. К числу

неупругих взаимодействий нейтронов с ядрами относятся также реакции с образованием заряженных частиц (n, p), (n, α) и др.

2.5. Дозовые характеристики излучения

Основной физической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения.

Поглощенная доза ионизирующего излучения D - отношение средней энергии dW , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = dW/dm$$

Вместо термина "поглощенная доза излучения" используют краткую форму *доза излучения*.

Единица поглощенной дозы в СИ - грей (Гр), равна поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия, равная 1 Дж.

Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад. Рад равен поглощенной дозе, при которой веществу массой 1 г передается энергия ионизирующего излучения, равная 0,01 Дж.

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр.}$$

Под переданной энергией в определении поглощенной дозы понимается

$$W = \sum E_{\text{вх}} - \sum E_{\text{вых}} + \sum E_o,$$

где $\sum E_{\text{вх}}$ - сумма кинетических энергий всех заряженных и незаряженных частиц, входящих в рассматриваемый объем; $\sum E_{\text{вых}}$ — сумма кинетических энергий всех заряженных и незаряженных частиц, выходящих из этого объема; $\sum E_o = \sum_i \Delta m_i c^2$, где Δm_i — изменение массы покоя всех входящих и выходящих частиц в электронвольтах.

Для оценки воздействия фотонного излучения с энергией до 3 МэВ было введено понятие **экспозиционной дозы X** , основанной на его ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе:

$$X = dQ/dm,$$

где dQ суммарный заряд всех ионов одного знака, созданных в воздухе, к массе dm воздуха в указанном объеме:

Единица экспозиционной дозы в СИ - кулон на килограмм (Кл/кг) - экспозиционная доза, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в объеме воздуха

массой 1 кг, производят ионы, несущие суммарный электрический заряд каждого знака равный 1 Кл.

До последнего времени использовалась внесистемная единица экспозиционной дозы - рентген (Р) ($1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ (точно)).

Экспозиционная доза не учитывает ионизацию, обусловленную тормозным излучением электронов и позитронов: этой величиной для воздуха обычно можно пренебречь из-за ее малости.

В условиях равновесия заряженных частиц экспозиционной дозе в 1 Кл/кг соответствует поглощенная доза 33,85 Гр в воздухе или 36,9 Гр в биологической ткани, внесистемной единице 1 Р соответствует поглощенная доза 0,873 рад в воздухе или 0,95 рад в биологической ткани. Поэтому с погрешностью до 5% экспозиционную дозу в рентгенах и поглощенную дозу в ткани в радах можно считать совпадающими.

Использование экспозиционной дозы после 1 января 1990 г. не рекомендуется, поскольку она была введена только для фотонного излучения с энергией до 3 МэВ и не может применяться в случае часто встречающегося на практике смешанного излучения разных видов.

При одинаковой поглощенной дозе для разных видов излучения биологический эффект оказывается различным (например, α -излучение гораздо опаснее β - или фотонного излучения). Для сравнения биологических эффектов, производимых одинаковой поглощенной дозой различных видов излучения, используют понятие относительной биологической эффективности излучения (ОБЭ).

Под ОБЭ излучения понимают отношение поглощенной дозы образцового рентгеновского излучения, вызывающего определенный биологический эффект, к поглощенной дозе рассматриваемого вида излучения, вызывающего тот же биологический эффект.

ОБЭ излучения зависит от многих параметров, но, главным образом от дозы.

Регламентированные значения ОБЭ, установленные для контроля степени радиационной опасности при хроническом облучении, называют коэффициентом качества излучения k . Этот безразмерный коэффициент определяет зависимость неблагоприятных биологических последствий облучения человека в малых дозах от полной линейной передачи энергии (ЛПЭ) излучения (табл. 2.2). Для фотонов, электронов, позитронов и β -частиц $k = 1 \text{ Зв/Гр}$; для нейтронов и протонов его значения приведены в табл. 2.3. В ряде последних работ для фотонов невысоких энергий ($E_0 < 1 \text{ МэВ}$) рекомендованы значения $k > 1 \text{ Зв/Гр}$, например, для $E_0 = 0,1 \text{ МэВ}$ $k = 1,5 \text{ Зв/Гр}$, для $E_0 = 0,05 \text{ МэВ}$ $k = 1,7 \text{ Зв/Гр}$, для $E_0 = 0,03 \text{ МэВ}$ $k = 1,5 \text{ Зв/Гр}$. Если энергетический состав излучения неизвестен, рекомендуется использовать значения k , приводимые в табл. 2.4

В задачах радиационной безопасности при хроническом облучении человека в малых дозах (в дозах, не превышающих пяти предельно допустимых годовых доз при облучении всего тела человека) основной величиной для оценки биологического действия излучения любого состава является эквивалентная доза.

Таблица 2.2.

Зависимость коэффициента качества k от ЛПЭ ионизирующего излучения

ЛПЭ для воды, кэВ/мкм	< 3,5	7,0	23	53	> 175
k , Зв/Гр	1	2	5	10	20

Таблица 2.3

Значения коэффициента качества k для моноэнергетических нейтронов и протонов

Энергия, МэВ	k , Зв/Гр	Энергия, МэВ	k , Зв/Гр
Нейтроны			
Тепловые	2,9	2,5	10
$1 \cdot 10^{-7}$	2,4	5,0	8,4
$1 \cdot 10^{-6}$	1,9	$1 \cdot 10^1$	6,7
$1 \cdot 10^{-5}$	1,7	$2 \cdot 10^1$	5,4
$1 \cdot 10^{-4}$	1,7	Протоны	
$5 \cdot 10^{-3}$	2,8	2	13,5
$2 \cdot 10^{-2}$	4,9	5	11,7
$1 \cdot 10^{-1}$	8,0	$1 \cdot 10^1$	9,4
$5 \cdot 10^{-1}$	12	$2 \cdot 10^1$	7,0
1	12		

Таблица 2.4.

Значения k для излучений различных видов с неизвестным энергетическим составом

Вид излучения	k , Зв/Гр
Рентгеновское γ -излучение, электроны, позитроны, β -излучение	1
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1 - 10 МэВ	10
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
α -излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи	20

Эквивалентная доза ионизирующего излучения H - произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества излучения k в данном объеме биологической ткани стандартного состава:

$$H = kD$$

Единица эквивалентной дозы в СИ - зиверт (Зв), равная эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг. Иными словами, зиверт — единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биологической ткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр образцового рентгеновского или γ -излучения. В качестве образцового обычно принимают рентгеновское излучение с граничной энергией 200 кэВ.

Внесистемная единица эквивалентной дозы - бэр (биологический эквивалент рада), равная эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 0,1 Дж/г. Иными словами, бэр — единица эквивалентной дозы любого вида излучения в биологической ткани, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 рад образцового рентгеновского или γ -излучения ($1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$).

Заметим, что безразмерная единица коэффициента качества в СИ — зиверт на грей, во внесистемных единицах — бэр на рад.

Разные органы или ткани имеют разную чувствительность к излучению. Известно, например, что при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение гонад (половые железы) особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому в последние годы для случаев неравномерного облучения разных органов или тканей тела человека введено понятие **эффективной эквивалентной дозы H_E**

Для определения этой величины необходимо ввести понятие риска. Риск — вероятность возникновения неблагоприятных последствий для человека (частота смертельных случаев, снижение продолжительности жизни, частота возникновения профессиональных заболеваний, травматизма, нетрудоспособности и т.д.) вследствие облучения, аварии или другой причины, проявление которой носит стохастический характер.

Таблица 2.5

Взвешивающие факторы W_i и риск смерти R от злокачественных опухолей и наследственных дефектов ^{*1} в результате облучения на 1 человека при эквивалентной дозе 1 Зв

Орган или ткань	Заболевание	R^{*2} 10^{-2} 1/(чел·Зв)	W_i
Гонады	Наследственные дефекты ^{*1}	0,40	0,25
Молочная железа	Рак	0,25	0,15
Красный костный мозг	Лейкемия	0,20	0,12
Легкие	Рак	0,20	0,12
Щитовидная железа	Рак	0,05	0,03
Поверхность кости	Злокачественные новообразования	0,05 0,50 ^{*3}	0,03
Все другие органы	Тоже		0,30 ^{*3}
Всего:		1,65	1,00
Из них злокачественные опухоли:		1,25	

^{*1} У первых двух поколений потомства облученных лиц.

^{*2} Приведенные значения риска смерти R для задач радиационной безопасности следует рассматривать как ориентировочные. В действительности они зависят от многих факторов: возраста, пола и т.д.

^{*3} Это значение распределяется поровну между пятью оставшимися органами и тканями, которые получили самую высокую эквивалентную дозу.

Эффективная эквивалентная доза

$$\Sigma H_E = \sum_i W_i H_i,$$

где H_i - средняя эквивалентная доза в i -ом органе или ткани; W_i -взвешивающий фактор, представляющий собой отношение стохастического риска смерти в результате облучения i -го органа или ткани к риску смерти от равномерного облучения тела при одинаковых эквивалентных дозах (табл. 2.6). Таким образом, W_i определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий для организма при равномерном облучении:

$$\sum_i W_i = 1.$$

При равномерном облучении всего организма эквивалентная доза в каждом органе или ткани одна и та же, $H_i = H$, и, следовательно, $H_E = H$. Таким образом, эффективная эквивалентная доза при неравномерном по органам и тканям облучении равна такой эквивалентной дозе при равномерном облучении всего организма, при которой риск неблагоприятных последствий будет таким же, как и при данном неравномерном облучении.

Единицы эффективной эквивалентной дозы совпадают с единицами эквивалентной дозы.

Эквивалентная доза или эффективная эквивалентная доза характеризует меру ожидаемого эффекта облучения для одного индивидуума. Эти величины являются *индивидуальными дозами*.

Раздел 3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

3.1. Биологическое действие ионизирующих излучений

Вскоре после открытия биологического действия ионизирующих излучений было установлено, что любой живой объект при определенной дозе облучения погибает. Однако дозы излучения, приводящие к гибели разных объектов, различаются в очень широких пределах (табл. 3.1).

Каждому биологическому виду свойственна своя мера чувствительности к действию ионизирующей радиации, которая характеризует его *радиочувствительность*. Степень радиочувствительности сильно варьируется в пределах одного вида (индивидуальная радиочувствительность), а для определенного индивидуума зависит также от возраста и пола, даже в одном организме различные клетки и ткани очень сильно различаются по радиочувствительности.

Таблица 3.1
Дозы фотонного излучения (смертность) различных организмов в облученной популяции

Биологический вид	D ₅₀ , Гр	Биологический вид	D ₅₀ , Гр
Обезьяны	2,5-6	Насекомые	10- 100
Крысы	7-9	Растения	10- 1500
Кролик	9 -10	Дрожжи	300 - 500
Птицы, рыбы	8-20	Простейшие	1000-3000

Энергия ионизирующего излучения при прохождении через биологическую ткань передается атомам и молекулам. Это приводит к образованию ионов и возбужденных молекул. Далее следует химический этап поражения клетки.

В основе первичных радиационно-химических изменений молекул могут лежать два механизма: 1) *прямое действие*, когда данная молекула испытывает изменения (ионизацию, возбуждение) непосредственно при взаимодействии с излучением; 2) *косвенное действие*,

когда молекула непосредственно не поглощает энергию ионизирующего излучения, а получает ее путем передачи от другой молекулы.

60-70 % массы в биологической ткани составляет вода. При ионизации заряженной частицей молекула воды реагирует, теряет электрон, а ионизированная молекула воды реагирует с другой нейтральной молекулой воды, в результате чего образуется высокореактивный радикал гидроксила $\text{OH}\cdot$.

Выванный электрон также очень быстро передает энергию окружающим молекулам воды, в результате чего возникает сильно возбужденная молекула воды H_2O^* , которая диссоциирует с образованием двух радикалов $\text{H}\cdot$ и $\text{OH}\cdot$. Свободные радикалы содержат неспаренные электроны и отличаются чрезвычайно высокой реакционной способностью.

В клетке организма ситуация значительно более сложная, чем при облучении воды, особенно если поглощающим веществом являются крупные и многокомпонентные биологические молекулы. В этом случае образуются органические радикалы, отличающиеся также крайне высокой реакционной способностью. Располагая большим количеством энергии, они легко могут привести к разрыву химических связей. Именно этот процесс и происходит чаще всего в промежутке между образованием ионных пар и формированием конечных химических продуктов.

Получающиеся в процессе радиолиза воды свободные радикалы и окислители, обладая высокой химической активностью, вступают в химические реакции с молекулами белка, ферментов и других структурных элементов биологической ткани, что приводит к изменению биохимических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, подавляется активность ферментных систем, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму, - токсины. Это приводит к нарушению жизнедеятельности отдельных систем или организма в целом. Индуцированные свободными радикалами химические реакции вовлекают в этот процесс многие сотни и тысячи молекул, не затронутых излучением. В этом состоит специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты. Никакой другой вид энергии (тепловой, электрический и др.), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям, какие вызывает ионизирующее излучение. Например, смертельная доза ионизирующего излучения для млекопитающих равна 10 Гр, что соответствует поглощенной энергии 10 Дж/кг. Если эту энергию подвести в виде тепла, то она нагрела бы организм человека лишь на 0,001 °C, т.е. меньше, чем от стакана выпитого горячего чая.

Нежелательные радиационные эффекты воздействия облучения на организм человека условно делятся на *соматические* ("сома" — по-гречески "тело") и *генетические* (на-

следственные). Соматические эффекты проявляются непосредственно у самого облученного, а генетические - у его потомства.

Генетические эффекты проявляются вследствие мутаций - изменений наследственных свойств организма, возникающих естественно (спонтанно) или вызываемых искусственно, например, при облучении. Мутации (от латинского *mutatio* - изменение, перемена) возникают в результате перестройки и нарушений в генетическом материале организма (хромосомах и генах). К соматическим эффектам условно относятся непосредственные ранние эффекты облучения (острая или хроническая лучевая болезнь и локальные лучевые поражения), которые проявляются в течение нескольких недель, и его отдаленные последствия (сокращение продолжительности жизни, возникновение опухолей и др.), проявляющиеся только через много месяцев или лет после облучения у самого облученного лица. К генетическим относятся последствия облучения генома зародышевых клеток в потомстве облученных особей (врожденные уродства и нарушения у потомков облученных, передающиеся по наследству). Различают стохастические и нестохастические эффекты воздействия излучения на организм. Если вредные эффекты облучения выявляются, начиная с какого-то определенного порогового значения дозы, то их называют нестохастическими или пороговыми. Для этих эффектов вероятность их возникновения (частота) и степень тяжести возрастают с увеличением дозы. Тяжесть эффекта (степень его выраженности) может возрастать более круто у лиц, чья радиочувствительность наибольшая. К нестохастическим эффектам относятся помутнение хрусталика глаза (лучевая катаракта), нарушение воспроизводительной функции, косметические повреждения кожи, дистрофические повреждения разных тканей и т.п. Последствия облучения человека, вероятность возникновения которых существует при сколь угодно малых дозах облучения (отсутствует порог) и возрастает с дозой, называют стохастическими или беспороговыми. Основные стохастические эффекты - канцерогенные (лейкемия и другие формы злокачественных новообразований) и генетические эффекты. Для предсказания частоты проявления стохастических эффектов облучения на практике обычно пользуются линейной зависимостью доза- эффект. Стохастические эффекты обычно обнаруживаются через длительное время после облучения и лишь при длительном наблюдении за большими группами населения в десятки и сотни тысяч человек. Цель радиационной защиты - это предотвращение вредных нестохастических эффектов и ограничение вероятности возникновения стохастических эффектов до уровней, считающихся приемлемыми. Самые разнообразные проявления поражающего действия ионизирующих излучений на организм называют лучевой болезнью человека. Многообразие этих проявлений зависит прежде всего от вида облучения (общее или местное, внешнее или от инкорпорированных радиоактивных ве-

ществ), временного фактора (однократное, повторное, хроническое облучение), равномерности поля (равномерное или неравномерное облучение) и т.п.

Острая лучевая болезнь возникает в результате однократно тотального внешнего относительно равномерного облучения и наступает при дозах 1—10 Гр и более. При меньших дозах могут отмечаться реакции разной степени выраженности со стороны отдельных систем организма. Классификация лучевых поражений при однократном тотальном облучении организма человека показана в зависимости от поглощенной тканевой дозы для фотонного излучения в табл. 3.2. Для других видов излучений следует использовать эквивалентную дозу с учетом коэффициента качества излучения. Приведенные в табл. 3.2 данные о последствиях лучевого воздействия относятся к случаю, когда отсутствует лечение. В настоящее время имеется ряд противолучевых средств и накоплен опыт комплексного лечения лучевой болезни, позволяющей исключить смертельный исход при дозах около 10 Гр.

Когда облучение систематически повторяется дозами, которые не вызывают лучевую болезнь, но значительно выше предельно допустимых доз, может развиваться хроническая лучевая болезнь. Наиболее характерными ее признаками являются изменения в составе крови (уменьшение лейкоцитов, малокровие) и ряд симптомов со стороны нервной системы.

3.2. Фоновое облучение человека

Фоновое облучение человека состоит из облучения естественными и искусственными источниками.

Первый компонент фона в свою очередь имеет две составляющие: *естественный фон* и *техногенный радиационный фон от естественных радионуклидов*. Естественный фон обусловливается внешним облучением (космическое излучение и естественные радионуклиды в горных породах, почве, атмосфере и др.) и внутренним излучением естественных радионуклидов, находящихся в организме (^{40}K и радионуклиды семейства урана и тория, поступающие в организм с воздухом, пищей и водой). Внутреннее облучение создает примерно 40 % естественного фона, около 60 % приходится на внешнее облучение. Доза естественного фона зависит от высоты над уровнем моря, количества и вида радионуклидов в горных породах и почве, количества радионуклидов, поступающих в организм человека с воздухом, пищей и водой. Например, люди, живущие на уровне моря, получают в среднем эквивалентную дозу от космического излучения около 0,3 мЗв в год или примерно 0,03 мкЗв в 1 час. Для людей, живущих на высоте выше 2 км над уровнем моря, это значение в несколько раз больше. Еще более интенсивному облучению подвергаются экипажи и пассажиры самолетов. При подъеме с 4 км до 12 км (максимальная высота полета трансконтинентальных авиалайнеров) доза

космического излучения возрастает примерно в 25 раз. С дальнейшим увеличением высоты над уровнем моря доза космического излучения продолжает увеличиваться и на высоте 20 км (максимальная высота полета сверхзвуковых реактивных самолетов) достигает 13 мкЗв/ч.

При перелете из Нью-Йорка в Париж пассажир обычного турбореактивного самолета получает дозу за время полета около 50 мкЗв, а пассажир сверхзвукового самолета, хотя и подвергается более интенсивному облучению, но получает дозу на 20 % меньшую за счет значительного сокращения времени полета. Суммарная средняя мощность эффективной эквивалентной дозы для человека от естественного фона на уровне моря составляет 1 мЗв/год, а в отдельных районах доза повышенного естественного фона может превосходить среднюю в десятки раз.

Изменение человеком окружающей среды и его деятельность могут увеличить дозы "нормального" облучения за счет естественных источников. Примеры такой деятельности - добыча полезных ископаемых, использование строительных материалов минерального происхождения в домостроении и минеральных удобрений, содержащих повышенное количество радионуклидов уранового и ториевого рядов, сжигание ископаемого топлива, в частности угля, приводящее к выбросу естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th и др.) и т.д. Такой фактор, как проживание в доме, часто приводит к повышению облучения, вызванному накоплением газообразных радионуклидов и их продуктов распада при недостаточной скорости вентиляции. Наибольший вклад в дозу облучения в этом случае дает не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ радон ^{222}Rn - дочерний продукт ^{226}Ra . В зонах с умеренным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в 8 раз, чем в наружном воздухе (рис.3.1)

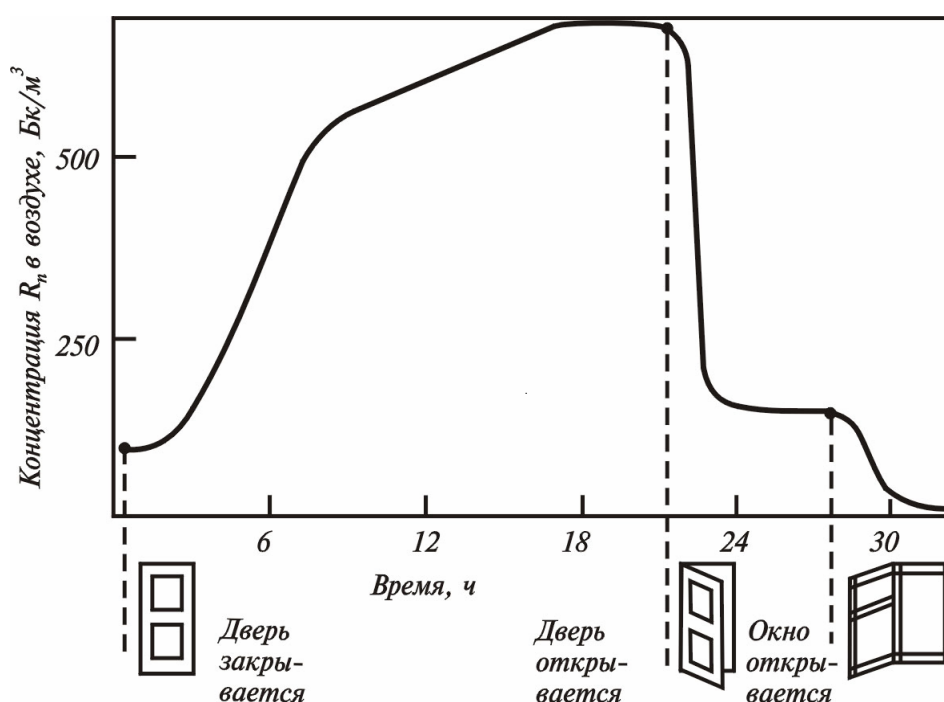


Рис. 3.1 Влияние проветриваемости на содержание радона в воздухе жилой комнаты одно-квартирного дома

Основной вклад в облучение техногенного радиационного фона приходится на строительные материалы в домостроении, он обуславливает годовую дозу $H_E = 1,05$ мЗв, т.е. примерно равную естественному фону.

Наряду с естественными источниками излучения важную роль в формировании фонового облучения играют искусственные источники, связанные главным образом с развитием научно-технического прогресса. Наибольший вклад среди источников искусственного фона принадлежит рентгенодиагностическому облучению в медицине, за счет которого создается годовая эффективная эквивалентная доза 1,4 мЗв. Облучение населения за счет глобальных радиоактивных выпадений составляет около 2 % облучения, формируемого естественным фоном. Эксплуатация АЭС при нормальных режимах обуславливает крайне низкие дозы облучения населения СССР, значения которых значительно меньше флуктуации естественного фона.

В табл. 3.3 представлена сводка данных, характеризующих средние годовые индивидуальные эффективные эквивалентные дозы облучения населения России за счет фонового облучения.

Таким образом, средняя для населения России годовая индивидуальная эффективная эквивалентная доза за счет всех источников фонового облучения $H_E = 3,5$ мЗв, из них за счет естественного фона 1 мЗв, за счет использования строительных материалов, содержащих естественные радионуклиды, 1,05 мЗв, за счет рентгенодиагностического облучения 1,4 мЗв.

Анализ имеющихся данных показывает, что на 1 млн. человек населения естественный фон может быть причиной 12,5 случаев смерти в год от злокачественных опухолей, использование строительных материалов с естественными радионуклидами - 17 случаев, рентгенодиагностика - 19 случаев.

Таблица 3.3

Компонент фона	Источники облучения	H_E , мЗв	$R_1 \cdot 10^{-6}$ 1/(чел-год)	$R_2 \cdot 10^{-6}$ 1/(чел-год)
Естественный	Космическое излучение и излучение естественно распределенных природных радиоактивных веществ	1,00	12,50	3,60
Техногенный радиационный фон от естественных радионуклидов	Строительные материалы	1,05	17,00	2,00
	Угольные электростанции суммарной мощностью 76 ГВт (эл.)	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
	Удобрения	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
Искусственный фон (обуслов-	Рентгенодиагностическое облучение в медицине	1,40	19,0* ¹	1,40

лен искусственными источниками)	Глобальные радиоактивные выпадения от испытательных взрывов ядерного оружия	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$
	АЭС суммарной мощностью 12 ГВт (эл.)* ²	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Остальные		$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
Полное фоновое облучение		3,50	48,80	7,07

*¹ Ведущий фактор летальных исходов – злокачественные опухоли легких.

*² В настоящее время мощность АЭС составляет 34,4 ГВт.

3.3 Принципы нормирования радиационного облучения

В основе современных концепций нормирования радиационного облучения лежит *радиационно-гигиенический* принцип, при котором предполагается, что меры радиационной безопасности, необходимые для защиты как персонала, работающего с источниками ионизирующих излучений, так и населения, достаточны, чтобы защитить и все другие виды живых организмов, хотя и необязательно все особи этих видов.

В условиях интенсивного развития ядерной энергетики и широкого использования разнообразных источников ионизирующего излучения, повышения в глобальных масштабах радиационного фона становится актуальной задача разработки *экологического принципа* охраны здоровья человека с учетом воздействия ионизирующих излучений на объекты природной среды (животные, растения, микроорганизмы).

Основная задача такого нормирования - охрана биологических ресурсов планеты, сохранение генофонда живых организмов в биосфере Земли, обеспечение среды обитания человека, необходимой для его нормального существования.

Нормирование в России исходит из следующих *основных принципов радиационной безопасности*: 1) непревышения установленного нормами основного дозового предела; 2) исключения всякого необоснованного облучения; 3) снижения дозы излучения до возможно низкого уровня.

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) установила следующие во многом сходные с российскими три взаимосвязанных принципа регламентации дозовых нагрузок:

1) эквивалентная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендованного комиссией для соответствующих условий;

2) никакой вид использования источников ионизирующих излучений не должен вводиться в практику, если он не приносит реальной пользы;

3) все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов.

Третий принцип за рубежом известен как принцип ALARA (аббревиатура из начальных букв слов в выражении As Low As Reasonable Achievable). Он следует из признания беспороговой зависимости доза - эффект в области малых доз.

3.4. Нормы радиационной безопасности

Основным документом, регламентирующим уровни воздействия ионизирующих излучений в РФ, являются «Нормы радиационной безопасности НРБ-99». Это основополагающий документ, регламентирующий требования Федерального закона «О радиационной безопасности населения» N 3-ФЗ от 09.01.96 и Федерального закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» N 52-ФЗ от 30.03.99. Нормы определяют пределы доз, допустимые уровни воздействия ионизирующего излучения и другие требования по ограничению облучения человека. Нормы распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека:

- в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения;
- в результате радиационной аварии;
- от природных источников излучения;
- при медицинском облучении.

НРБ-99 устанавливают следующие *категории облучаемых лиц*.

- персонал (группы А и Б);
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются следующие основные пределы доз (ПД), приведенные в табл. 3.4:

Таблица 3.4

Нормируемые величины <1>	Пределы доз	
	персонал (группа А) <2>	население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза, коже, кистях и стопах	150 мЗв 500 мЗв 500 мЗв	15 мЗв 50 мЗв 50 мЗв

<1> Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

<2> Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни облучения персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А. Далее в тексте все нормативные значения для категории «персонал» приводятся только для группы А.

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) — 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) — 70 мЗв.

И в заключение, следуя концепции приемлемого риска, разработанной Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ), необходимо отметить, что персонал при работе с источниками ионизирующих излучений не подвергается риску, превышающему риск для безопасной профессиональной деятельности, а ограниченная часть населения, которая может подвергаться воздействию радиоактивных веществ и других источников ионизирующих излучений, применяемых в учреждениях и (или) удаляемых во внешнюю среду с отходами, не подвергается риску, превышающему риск в повседневной жизни.

МКРЗ рекомендует при установлении предельного уровня облучения персонала принять риск, не превышающий риска, характерного для безопасной профессиональной деятельности, которая не превышает 10^{-4} 1/(чел-год). Это значение и принимается МКРЗ за основу при установлении предельного уровня облучения персонала.