

Теорчасть лабораторной работы “Радиация на Земле и в космосе”

Сокращенная версия описания к задаче «Радиация» (О.И. Василенко, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Ж.М. Селиверстова, А.В. Шумаков "РАДИАЦИЯ", М., Изд-во Московского университета. 1996.)

1. Введение
 2. Воздействие радиации на ткани живого организма
 3. Дозы излучения и единицы измерения
 - 3.1. Предельно допустимые дозы облучения
 4. Естественные источники радиации
 - 4.1. Космическое излучение
 - 4.2. Космогенные радионуклиды
 - 4.3. Внешнее облучение от радионуклидов земного происхождения
 - 4.4. Внутреннее облучение от радионуклидов земного происхождения
 5. Радиация от источников, созданных деятельностью человека
 6. Испытания ядерного оружия
 7. Атомная энергетика
 8. Медицинское применение радиации
 9. Воздействие радиации на человека
 10. Меры защиты
 11. Примеры решения задач
 12. Контрольные вопросы и задачи
- Приложение 1. Технические характеристики дозиметра SOEKS Quantum

1. Введение

Радиация является постоянным спутником жизни. Мы живем в мире, в котором радиация присутствует повсюду. Свет и тепло ядерных реакций на Солнце являются необходимыми условиями нашего существования. Радиоактивные вещества естественного происхождения присутствуют в окружающей среде. Наше тело содержит радиоактивные изотопы ^{14}C , ^{40}K , ^{210}Po . Зарождение жизни на Земле и её последующая эволюция протекали в условиях постоянного воздействия радиации.

Различные виды радиации по-разному взаимодействуют с веществом в зависимости от типа испускаемых частиц, их заряда, массы и энергии. Заряженные частицы ионизируют атомы вещества, взаимодействуя с атомными электронами. Нейтроны и гамма-кванты, сталкиваясь с заряженными частицами в веществе, передают им свою энергию, в случае гамма-квантов возможно также рождение электрон-позитронных пар. Эти вторичные заряженные частицы, тормозясь в веществе, вызывают его ионизацию. Воздействие излучения на вещество на промежуточном этапе приводит к образованию быстрых заряженных частиц и ионов. **Радиационные повреждения** вызываются в основном этими вторичными частицами, так как они взаимодействуют с большим количеством атомов, чем частицы первичного излучения. *В конечном итоге энергия первичной частицы трансформируется в кинетическую энергию большого количества атомов среды и приводит к ее разогреву и ионизации.*

2. Воздействие радиации на ткани живого организма

В органах и тканях биологических объектов как и в любой среде при облучении в результате поглощения энергии идут процессы ионизации и возбуждения атомов. Эти процессы лежат в основе **биологического действия излучений**. Его мерой служит количество поглощенной в организме энергии.

В реакции организма на облучение можно выделить четыре фазы. Длительность первых трёх быстрых фаз не превышает единиц микросекунд, в течение которых происходят различные молекулярные изменения. В четвёртой медленной фазе эти изменения переходят в функциональные и структурные нарушения в клетках, органах и организме в целом.

Первая, физическая фаза ионизации и возбуждения атомов длится 10^{-13} сек. Во второй, химико-физической фазе, протекающей 10^{-10} сек образуются высокоактивные в химическом отношении радикалы, которые, взаимодействуя с различными соединениями, дают начало вторичным радикалам, имеющим значительно большие по сравнению с первичными сроки жизни. В третьей, химической фазе, длящейся 10^{-6} сек, образовавшиеся радикалы, вступают в реакции с органическими молекулами клеток, что приводит к изменению биологических свойств молекул.

Описанные процессы первых трёх фаз являются первичными и определяют дальнейшее развитие лучевого поражения. В следующей за ними четвёртой, биологической фазе химические изменения молекул преобразуются в клеточные изменения. Наиболее чувствительным к облучению является ядро клетки, а наибольшие последствия вызывает повреждение ДНК, содержащей наследственную информацию. В результате облучения в зависимости от величины поглощённой дозы клетка гибнет или становится неполноценной в функциональном отношении. Время протекания четвёртой фазы очень различно и в зависимости от условий может растянуться на годы или даже на всю жизнь.

Различные виды излучений характеризуются различной биологической эффективностью, что связано с отличиями в их проникающей способности (рисунок 1) и характером передачи энергии органам и тканям живого объекта, состоящего в основном из лёгких элементов (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав мягкой ткани и костей в организме человека

элемент	заряд, Z	процентное отношение по весу	
		мягкая ткань	кости
водород	1	10.2	6.4
углерод	6	12.3	27.8
азот	7	3.5	2.7
кислород	8	72.9	41.0
натрий	11	0.08	—
магний	12	0.02	0.2
фосфор	15	0.2	7.0
сера	16	0.5	0.2
калий	19	0.3	—
кальций	20	0.007	14.7

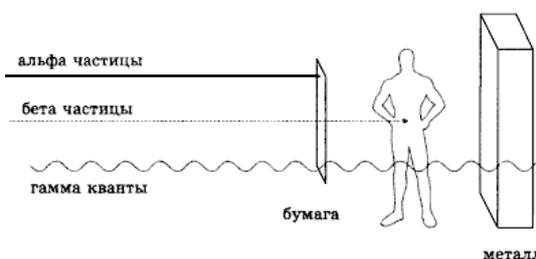


Рис. 1: Схематическое изображение проникающей способности различных излучений.

Альфа-излучение имеет малую длину пробега частиц и характеризуется слабой проникающей способностью. Оно не может проникнуть сквозь кожные покровы. Пробег альфа-частиц с энергией 4 МэВ в воздухе составляет 2.5 см, а в биологической ткани лишь 31 мкм. Альфа-излучающие нуклиды представляют большую опасность при поступлении внутрь организма через органы дыхания и пищеварения, открытые раны и ожоговые поверхности.

Бета-излучение обладает большей проникающей способностью. Пробег бета-частиц в воздухе может достигать нескольких метров, а в биологической ткани нескольких сантиметров. Так пробег электронов с энергией 4 МэВ в воздухе составляет 17.8 м, а в биологической ткани 2.6 см.

Гамма-излучение имеет еще более высокую проникающую способность. Если внешнее альфа- и бета-излучение поглощается, как правило, в одежде или коже и представляет в основном опасность при попадании радионуклидов внутрь организма, то при внешнем гамма-облучении его воздействию подвергается весь организм. Это с одной стороны требует специальных мер защиты от гамма-излучения, а с другой позволяет использовать его в разнообразных методах дистанционной диагностики.

Нейтроны. Биологический эффект от действия **тепловых нейтронов** в основном обусловлен процессами $H(n, \gamma)^2H$ и $^{14}N(n, p)^{14}C$. Сечения этих реакций составляют соответственно 0.33 и 1.76 барн. Основной эффект воздействия на биологическую ткань происходит под действием протонов, образующихся в реакции (n, p) и теряющих всю свою энергию в месте рождения.

Для **медленных нейтронов** сечения захвата нейтронов малы. Большая часть энергии расходуется на возбуждение и расщепление молекул ткани.

Для **быстрых нейтронов** до 90 % энергии в ткани теряется при упругом взаимодействии. При этом решающее значение имеет рассеяние нейтронов на протонах. Дальнейшее выделение энергии происходит в результате ионизации среды протонами отдачи.

3. Дозы излучения и единицы измерения

Эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, объема облучения тканей и органов. Для его количественной оценки введены специальные единицы, которые делятся на внесистемные и единицы в системе СИ. Сейчас используются преимущественно единицы системы СИ. Ниже в таблице 2 дан перечень единиц измерения **радиологических величин** и проведено сравнение единиц системы СИ и внесистемных единиц.

Таблица 2

Основные радиологические величины и их единицы

физическая величина	единица, её наименование, обозначение (международное, русское)		соотношение между внесистемной единицей и единицей СИ
	внесистемные	СИ	
активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри (Ci, Ки)	беккерель (Bq, Бк)	1 Ки = $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк
экспозиционная доза излучения	рентген (R, Р)	кулон на кг (C/kg, Кл/кг)	1 Р = $2.58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
поглощённая доза излучения	рад (rad, рад)	грей (Gy, Гр)	1 рад = 0.01 Гр
эквивалентная доза излучения	бэр (rem, бэр)	зиверт (Sv, Зв)	1 бэр = 0.01 Зв
мощность экспозиционной дозы излучения	рентген в секунду (R/s, Р/с)	ампер на килограмм (A/kg, А/кг)	1 Р/с = $2.58 \cdot 10^{-4}$ А/кг
мощность поглощённой дозы излучения	рад в секунду (rad/s, рад/с)	грей в секунду (Gy/s, Гр/с)	1 рад/с = 0.01 Гр/с
мощность эквивалентной дозы излучения	бэр в секунду (rem/s, бэр/с)	зиверт в секунду (Sv/c, Зв/с)	1 бэр/с = 0.01 Зв/с
интегральная доза излучения	рад-грамм (rad · g, рад · г)	грей-килограмм (Gy · kg, Гр · кг)	1 рад · г = 10^{-5} Гр · кг

Для описания влияния ионизирующих излучений на вещество используются следующие понятия и единицы измерения:

Активность радионуклида в источнике A . Активность равна отношению числа самопроизвольных ядерных превращений в этом источнике за малый интервал времени dN к величине этого интервала dt :

$$A = \frac{dN}{dt} .$$

Единица активности в системе СИ - беккерель (Бк). Внесистемная единица - кюри (Ки).

Число радиоактивных ядер $N(t)$ данного изотопа уменьшается со временем по закону:

$$N(t) = N_0 2^{-t/T_{1/2}} = N_0 e^{-t \ln 2 / T_{1/2}} = N_0 e^{-0.693t/T_{1/2}}$$

где N_0 - число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$ (N_0 - большое число!),

$T_{1/2}$ - **период полураспада** - время, в течение которого распадается половина радиоактивных ядер.

Массу m радионуклида активностью A можно рассчитать по формуле:

$$m = 2.4 \cdot 10^{-24} M T_{1/2} A ,$$

где M - массовое число радионуклида, A - активность в беккерелях, $T_{1/2}$ - период полураспада в секундах. Масса получается в граммах.

Экспозиционная доза (X). В качестве количественной меры рентгеновского и γ -излучения принято использовать во внесистемных единицах экспозиционную дозу, определяемую зарядом вторичных частиц dQ , образующихся в массе вещества dm при полном торможении всех заряженных частиц :

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Единица экспозиционной дозы – **рентген (Р)**. Рентген – это экспозиционная доза рентгеновского и γ -излучения, создающая в 1 см³ воздуха при температуре 0° С и давлении 760 мм рт. ст. суммарный заряд ионов одного знака в одну электростатическую единицу количества электричества. Экспозиционной дозе 1 Р соответствует 2.08 10⁹ пар ионов. Единица экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) — кулон на килограмм (Кл/кг).

$$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}; 1 \text{ Р} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$

Поглощение энергии ионизирующего излучения является первичным процессом, дающим начало последовательности физико-химических преобразований в облученной ткани, приводящей к наблюдаемому радиационному эффекту. Поэтому естественно сопоставить наблюдаемый эффект с количеством поглощенной энергии или поглощенной дозы.

Поглощённая доза D - основная дозиметрическая величина. Она равна отношению средней энергии dE , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = \frac{dE}{dm} .$$

Единица поглощённой дозы - **грей (Гр)**.

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад} = 10^4 \text{ эрг/г} .$$

Внесистемная единица **рад** определялась как поглощённая доза любого ионизирующего излучения, равная 100 эрг на 1 грамм облучённого вещества.

Эквивалентная доза Н. Для оценки возможного ущерба здоровью человека в условиях хронического облучения в области радиационной безопасности введено понятие эквивалентной дозы Н, равной произведению поглощённой дозы D_r , созданной облучением r и усреднённой по анализируемому органу или по всему организму, на весовой множитель W_r , называемый ещё - **коэффициент качества излучения** (таблица 3).

$$H = \sum_r W_r \cdot D_r$$

Единицей измерения эквивалентной дозы является Джоуль на килограмм. Она имеет специальное наименование - **зиверт (Зв)**.

Влияние облучения носит неравномерный характер. Для оценки ущерба здоровью человека за счет различного характера влияния облучения на разные органы (в условиях равномерного облучения всего тела) введено понятие **эффективной эквивалентной дозы** $E_{эфф}$, применяемое при оценке возможных стохастических эффектов – злокачественных новообразований.

Таблица 3

Взвешивающие коэффициенты W_r для различных видов излучения

вид и энергия излучения	весовой множитель излучения W_r
фотоны, все энергии	1
электроны и мюоны, все энергии	1
нейтроны с энергией < 10 кэВ	5
10 ÷ 100 кэВ	10
100 кэВ ÷ 2 МэВ	20
2 ÷ 20 МэВ	10
> 20 МэВ	5
протоны с энергией > 2 МэВ (кроме протонов отдачи)	5
α -частицы, осколки деления, тяжёлые ядра	20

Эффективная доза равна сумме взвешенных эквивалентных доз во всех органах и тканях:

$$E_{эфф} = \sum_t W_t \cdot H_t$$

где W_t - тканевый весовой множитель (таблица 4), а H_t - эквивалентная доза, поглощённая в ткани t .

Коллективная эффективная эквивалентная доза. Для оценки ущерба здоровью персонала и населения от стохастических эффектов, вызванных действием ионизирующих излучений, используют коллективную эффективную эквивалентную дозу S , определяемую как:

$$S = \sum_i E_i \cdot N_i$$

где E_i - средняя эффективная доза на всю группу людей; N_i - число людей в группе. Единицей S является человек-зиверт (чел-Зв).

Радионуклиды - радиоактивные атомы с данным массовым числом и атомным номером, а для изомерных атомов - и с данным определённым энергетическим состоянием атомного ядра. Радионуклиды (и нерадиоактивные нуклиды) элемента иначе называют его **изотопами**.

Тканевые весовые множители W_t для разных органов

ткань или орган	множитель
половые железы	0,20
печень	0,05
красный костный мозг	0,12
пищевод	0,05
толстый кишечник	0,12
щитовидная железа	0,05
лёгкие	0,12
кожа	0,01
желудок	0,12
поверхность костей	0,01
мочевой пузырь	0,05
остальные органы	0,05
молочные железы	0,05

Помимо приведённых выше величин для сравнения степени интенсивности взаимодействия вещества с ионизирующими частицами разных типов и энергий используется также величина **линейной передачи энергии** (ЛПЭ), определяемая соотношением:

$$L_{\Delta} = \left(\frac{d\bar{E}}{dl} \right)_{\Delta}$$

где \bar{dE} - средняя энергия, локально переданная среде ионизирующей частицей вследствие столкновений на элементарном пути dl (таблица 5).

Пороговая энергия обычно относится к энергии электрона. Если в акте столкновения первичная заряженная частица образует δ -электрон с энергией большей Δ , то эта энергия не включается в значение dE , и δ -электроны с энергией большей Δ рассматриваются как самостоятельные первичные частицы.

Выбор пороговой энергии является произвольным и зависит от конкретных условий. Из определения следует, что линейная передача энергии является некоторым аналогом тормозной способности вещества. Однако, между этими величинами есть различие. Заключается оно в следующем:

1. ЛПЭ не включает энергию, преобразованную в фотоны, т.е. радиационные потери;
2. при заданном пороге Δ ЛПЭ не включает в себя кинетическую энергию частиц, превышающую Δ .

Величины ЛПЭ и тормозной способности совпадают, если можно пренебречь потерями на тормозное излучение и $\Delta \rightarrow \infty$.

Таблица 5

Средние значения величины линейной передачи энергии L и пробега R для электронов, протонов и α -частиц в мягкой ткани

частица	E , МэВ	L , кэВ/мкм	R , мкм
электрон	0.01	2.3	1
	0.1	0.42	180
	1.0	0.25	5000
протон	0.1	90	3
	2.0	16	80
	5.0	8	350
	100.0	4	1400
α -частица	0.1	260	1
	5.0	95	35

По величине линейной передачи энергии можно определить весовой множитель данного вида излучения (таблица 6).

Таблица 6

Зависимость весового множителя излучения W_r от линейной передачи энергии ионизирующего излучения L для воды

L , кэВ/мкм	<3.5	7.0	23	53	>175
W_r	1	2	5	10	20

3.1. Предельно допустимые дозы облучения

Нормы радиационной безопасности (НРБ) разрабатываются на международном уровне и уровне государства и предназначены для регламентации облучения людей. Ниже описываются НРБ-99.

Нормы распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека:

- 1) в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников облучения;
- 2) в результате радиационной аварии;
- 3) от природных источников излучения;
- 4) при медицинском облучении.

Для обоснования расходов на радиационную защиту принимается, что облучение в коллективной эквивалентной дозе в 1 чел. · Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере 1 чел. · года жизни населения. Величина денежного эквивалента потери 1 чел. года жизни населения устанавливается указаниями федерального органа госсанэпиднадзора в размере не менее 1 годового душевого национального дохода.

Предел индивидуального пожизненного риска (вероятности возникновения у человека какого-либо эффекта в результате облучения) в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения в течение года персонала принимается округлённо равным $1.0 \cdot 10^{-3}$, а для населения – $5.0 \cdot 10^{-5}$. Уровень пренебрежимого риска составляет 10^{-6} .

Таблица 7

Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз	
	Персонал (группа А)**	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***	150 мЗв	15 мЗв
коже****	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

** Основные пределы доз, как и все остальные уровни облучения персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А.

*** Относится к дозе на глубине 300 мг/см².

**** Относится к среднему по площади в 1 см^2 значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см^2 под покровным слоем толщиной 5 мг/см^2 . На ладонях толщина покровного слоя – 40 мг/см^2 . Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усреднённого облучения любого 1 см^2 кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение предела дозы на хрусталик глаза от бета-частиц.

Категории облучаемых лиц. Потенциально облучаемые лица разделены на две категории.

- 1) персонал (группы А и Б);
- 2) всё население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.
- 3) Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:
 - 1) основные дозовые пределы, приведённые в таблице 7;
 - 2) допустимые уровни монофакторного (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего излучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объёмные активности (ДОВА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и другие;
 - 3) контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.). Их значения должны учитывать достигнутый в учреждении уровень радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Основные пределы доз. В таблице 7 приведены основные дозовые пределы.

Основные пределы доз облучения не включают в себя

- 1) дозы от природного облучения;
- 2) дозы от медицинского облучения;
- 3) дозы вследствие радиационных аварий.

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 .

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

4. Естественные источники радиации

Избежать облучения ионизирующим излучением невозможно. Жизнь на Земле возникла и продолжает развиваться в условиях постоянного облучения. Радиационный фон Земли складывается из трех компонентов:

1. космическое излучение;
2. излучение от рассеянных в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды природных радионуклидов;
3. излучение от искусственных (техногенных) радионуклидов.

Облучение по критерию месторасположения источников излучения делится на внешнее и внутреннее. **Внешнее облучение** обусловлено источниками, расположенными вне тела человека. Источниками внешнего облучения являются космическое излучение и наземные источники. Источником **внутреннего облучения** являются радионуклиды, находящиеся в организме человека.

4.1. Космическое излучение

Космическое излучение складывается из частиц, захваченных магнитным полем Земли, галактического космического излучения и корпускулярного излучения Солнца. В его состав входят в основном электроны, протоны и α -частицы. Это так называемое первичное космическое излучение, взаимодействуя с атмосферой Земли, порождает вторичное излучение. В результате на уровне моря излучение состоит почти полностью из мюонов (подавляющая часть) и нейтронов.

Поглощённая мощность дозы космического излучения в воздухе на уровне моря равна 32 нГр/час и формируется в основном мюонами. Для нейтронов на уровне моря мощность поглощённой дозы составляет 0.8 нГр/час и мощность эквивалентной дозы составляет 2.4 нЗв/час. За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около 0.35 мЗв в год.

Космическому внешнему облучению подвергается вся поверхность Земли. Однако облучение это неравномерно. Интенсивность космического излучения зависит от солнечной активности, географического положения объекта и возрастает с высотой над уровнем моря. Наиболее интенсивно оно на Северном и Южном полюсах, менее интенсивно в экваториальных областях. Причина этого – магнитное поле Земли, отклоняющее заряженные частицы космического излучения. Наибольший эффект действия космического внешнего облучения связан с зависимостью космического излучения от высоты.

Солнечные вспышки представляют большую радиационную опасность во время космических полетов. Космические лучи, идущие от Солнца, в основном состоят из протонов широкого энергетического спектра (энергия протонов до 100 МэВ), Заряженные частицы от Солнца способны достигать Земли через 15–20 мин. после того, как вспышка на его поверхности становится видимой. Длительность вспышки может достигать нескольких часов.

Величина дозы радиоактивного облучения, получаемая человеком, зависит от географического местоположения, образа жизни и характера труда. Например на высоте 8 км мощность эффективной дозы составляет 2 мкЗв/час, что приводит к дополнительному облучению при авиаперевозках. При трансконтинентальном перелете на обычном турбовинтовом самолете, летящем со скоростью ниже скорости звука ($T_{\text{полета}}$ 7.5 часа), индивидуальная доза, получаемая пассажиром (50 мкЗв), на 20 % больше, чем доза, полученная пассажиром сверхзвукового самолета ($T_{\text{полета}}$ 2.5 часа) (40 мкЗв), хотя последний подвергается более интенсивному облучению из-за большей высоты полета. Коллективная эффективная доза от глобальных авиаперевозок достигает 104 чел-Зв, что составляет на душу населения в мире в среднем около 1 мкЗв за год, а в Северной Америке около 10 мкЗв.

Таблица 8

Годовые поступления космогенных радионуклидов человеку и создаваемые ими дозы

Элемент	Поступление, Бк/год	Годовая эффективная доза, мкЗв
${}^3_1\text{H}$	250	0.004
${}^7_4\text{Be}$	50	0.002
${}^{14}_6\text{C}$	20000	12
${}^{22}_{11}\text{Na}$	50	0.15

4.1. Космогенные радионуклиды

В результате ядерных реакций, идущих в атмосфере (а частично и в литосфере) под влиянием космических лучей, образуются радиоактивные ядра - **космогенные радионуклиды**. Например



В создание дозы наибольший вклад вносят ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$ и ${}^{22}\text{Na}$, которые поступают вместе с пищей в организм человека (таблица 16).

Взрослый человек потребляет с пищей 95 кг углерода в год при средней активности на единицу массы углерода 230 Бк/кг. Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет около 15 мкЗв/год.

4.2. Внешнее облучение от радионуклидов земного происхождения

В настоящее время на Земле сохранилось 23 долгоживущих радиоактивных элемента с периодами полураспада от 10^7 лет и выше. Физические характеристики некоторых из них представлены в таблице 9.

Таблица 9

Радиоактивные изотопы, изначально присутствующие на Земле

радио- нуклид	весовое содержание в земной коре	период полураспада, лет	тип распада
${}^{238}_{92}\text{U}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4.47 \cdot 10^9$	α
${}^{232}_{90}\text{Th}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1.41 \cdot 10^{10}$	α, γ
${}^{40}_{19}\text{K}$	$3 \cdot 10^{-16}$	$1.28 \cdot 10^9$	β, γ
${}^{50}_{23}\text{V}$	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{14}$	γ
${}^{87}_{37}\text{Rb}$	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{10}$	β
${}^{115}_{49}\text{In}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{14}$	β
${}^{138}_{57}\text{La}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{11}$	β, γ
${}^{147}_{62}\text{Sm}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	α
${}^{176}_{71}\text{Lu}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{10}$	β, γ

В трёх радиоактивных семействах: урана (${}^{238}\text{U}$), тория (${}^{232}\text{Th}$) и актиния (${}^{235}\text{Ac}$) в процессах радиоактивного распада постоянно образуется 40 радиоактивных изотопов. Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около 0.35 мЗв, т.е. чуть больше средней индивидуальной дозы, обусловленной облучением из-за космического фона на уровне моря. Однако уровень земной радиации неодинаков в различных районах. Так, например, в 200 километрах к северу от Сан-Пауло (Бразилия) есть небольшая возвышенность, где уровень радиации в 800 раз превосходит средний и достигает 260 мЗв в год. На юго-

западе Индии 70000 человек живут на узкой прибрежной полосе, вдоль которой тянутся пески, богатые торием. Эта группа лиц получает в среднем 3.8 мЗв в год на человека. Как показали исследования, во Франции, ФРГ, Италии, Японии и США около 95 % населения живут в местах с дозой облучения от 0.3 до 0.6 мЗв в год. Около 3 % получает в среднем 1 мЗв в год и около 1.5 % более 1.4 мЗв в год. Если человек находится в помещении, доза внешнего облучения изменяется за счет двух противоположно действующих факторов:

1. Экранирование внешнего излучения зданием;
2. облучение за счет естественных радионуклидов, находящихся в материалах, из которого построено здание.

В зависимости от концентрации изотопов $^{40}_{19}K$, $^{226}_{88}Ra$ и $^{232}_{90}Th$ в различных строительных материалах мощность дозы в домах изменяется от $4 \cdot 10^{-8}$ до $12 \cdot 10^{-8}$ Гр/ч. В среднем в кирпичных, каменных и бетонных зданиях мощность дозы в 2-3 раза выше, чем в деревянных. В таблице 10 приведены данные о фоновом облучении в некоторых городах.

Таблица 10

Уровень фона в некоторых городах

город	среднегодовая доза, мкГр
Алма-Ата	1600 ± 100
Астрахань	800 ± 60
Вильнюс	1000 ± ±60
Ереван	750 ± 60
Кишинев	600 ± 20
Москва	900 ± 50
Новосибирск	800 ± 30
Рига	1100 ± 110
Санкт-Петербург	1200 ± 80
Таллин	900 ± 50
Якутск	700 ± 60

4.3. Внутреннее облучение от радионуклидов земного происхождения

В организме человека постоянно присутствуют радионуклиды земного происхождения, поступающие через органы дыхания и пищеварения. Наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят ^{40}K , ^{87}Rb , и нуклиды рядов распада (^{238}U и ^{232}Th) (таблица 11).

Таблица 11. Среднегодовая эффективная эквивалентная доза внутреннего облучения

источник радона	мощность излучения, кБк/сут
природный газ	3
вода	4
наружный воздух	10
стройматериалы и грунт под зданием	60

радио- нуклид	период полураспада	тип распада	доза, мкЗв
${}^{40}_{19}\text{K}$	$1.28 \cdot 10^9$ лет	β, γ	180
${}^{87}_{37}\text{Rb}$	$4.7 \cdot 10^{10}$ лет	β	6
${}^{210}_{84}\text{Po}$	160 сут.	α	130
${}^{220}_{86}\text{Rn}$	54 сек.	α	$170 \div 220$
${}^{222}_{86}\text{Rn}$	3.8 сут.	α	$800 \div 1000$
${}^{226}_{86}\text{Ra}$	1600 лет	α	13

Средняя доза внутреннего облучения за счет радионуклидов земного происхождения составляет 1.35 мЗв/год. Наибольший вклад (около 3/4 годовой дозы) дают не имеющий вкуса и запаха тяжёлый газ радон (Rn) и продукты его распада. Поступая в организм при дыхании, он вызывает облучение слизистых тканей лёгких. Радон высвобождается из земной коры повсеместно, но его концентрации в наружном воздухе существенно различаются для разных мест Земного шара. Однако, большую часть дозы облучения от радона человек получает, находясь в закрытом непрветриваемом помещении. В зонах с благоприятным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в среднем примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе. Источниками радона являются также строительные материалы. Так, например, большой удельной радиоактивностью обладают гранит и пемза, кальций-силикатный, шлак и ряд других материалов. Радон проникает в помещение из земли и через различные трещины в межэтажных перекрытиях, через вентиляционные каналы и т.д. Источниками поступления радона в жилые помещения являются также природный газ и вода.

Доля домов, внутри которых концентрация радона и его продуктов деления равна от 10^3 до 10^4 Бк/см³, составляет от 0.01 до 0.1 % в различных странах. Это означает, что значительное число людей подвергаются заметному облучению из-за высокой концентрации радона внутри домов, где они живут. В качестве удобрений ежегодно используются несколько десятков млн. тонн фосфатов. Большинство разрабатываемых в настоящее время фосфатных месторождений содержит уран, присутствующий в довольно высокой концентрации. Содержащиеся в удобрениях радиоизотопы проникают из почвы в пищевые продукты, приводят к повышению радиоактивности молока и других продуктов питания. Таким образом, эффективная доза от внутреннего облучения за счет естественных источников (1.35 мЗв/год) в среднем примерно в два раза превышает дозу внешнего облучения от них (0.65 мЗв/год). Следовательно, суммарная доза внешнего и внутреннего облучения от естественных источников радиации в среднем равна 2 мЗв/год. Для отдельных контингентов населения она может быть выше. Причем максимальное превышение над средним уровнем может достигать одного порядка.

5. Радиация от источников, созданных деятельностью человека

В результате деятельности человека во внешней среде появились **искусственные радионуклиды** и источники излучения. В природную среду стали поступать в больших количествах естественные радионуклиды, извлекаемые из недр Земли вместе с углем, газом, нефтью, минеральными удобрениями, строительными материалами. Сюда относятся геотермические электростанции, создающие в среднем выброс около $4 \cdot 10^{14}$ Бк изотопа ${}^{222}\text{Rn}$ на 1 ГВт выработанной электроэнергии; фосфорные удобрения, содержащие и ${}^{238}\text{U}$ (до 70 Бк/кг в Кольском апатите и 400 Бк/кг в фосфорите); уголь,

сжигаемый в жилых домах и электростанциях, содержит естественные радионуклиды ^{40}K , ^{232}U и ^{238}U в равновесии с их продуктами распада. Роль различных искусственных источников излучений в создании радиационного фона иллюстрируется таблицей 12.

Таблица 12

Среднегодовые дозы, получаемые от естественного радиационного фона и различных искусственных источников излучения

источник излучения	доза, мбэр/год
природный радиационный фон	200
стройматериалы	140
атомная энергетика	0.2
медицинские исследования	140
ядерные испытания	2.5
полеты в самолетах	0.5
бытовые предметы	4
телевизоры и мониторы ЭЛМ	0.1
общая доза	500

За последние несколько десятилетий человек создал несколько тысяч радионуклидов и начал использовать их в научных исследованиях, в технике, медицинских целях и др. Это приводит к увеличению дозы облучения, получаемой как отдельными людьми, так и населением в целом. Иногда облучение за счет источников, созданных человеком, оказывается в тысячи раз интенсивнее, чем от природных источников. В настоящее время основной вклад в дозу от источников, созданных человеком, вносит внешнее радиоактивное облучение при диагностике и лечении. В развитых странах на каждую тысячу населения приходится от 300 до 900 таких обследований в год, не считая массовой флюорографии и рентгенологических обследований зубов. Для исследования различных процессов, протекающих в организме, и для диагностики опухолей используются также радиоизотопы, вводимые в организм человека. В промышленно развитых странах ориентировочно проводится 10÷40 обследований на 1 млн. жителей в год. Коллективные эффективные эквивалентные дозы составляют 20 чел-Зв на 1 млн. жителей в Австралии и 150 чел-Зв в США. Средняя эффективная эквивалентная доза, получаемая от всех источников облучения в медицине, в промышленно развитых странах составляет 1 мЗв в год на каждого жителя, т.е. примерно половину средней дозы от естественных источников.

6. Испытания ядерного оружия

Радиологические последствия испытаний ядерного оружия определяются количеством испытаний, суммарными энерговыделением и активностью осколков деления, видами взрывов (воздушные, наземные, подводные, надводные, подземные) и геофизическими факторами окружающей среды в период испытаний (район, метеообстановка, миграция радионуклидов и др.). Испытания ядерного оружия, которые особенно интенсивно проводились в период 1954–1958 и 1961–1962 гг., стали одной из основных причин повышения радиационного фона Земли и, как следствие этого, глобального повышения доз внешнего и внутреннего облучения населения.

В США, СССР, Франции, Великобритании и Китае в общей сложности проведено не менее 2060 испытаний атомных и термоядерных зарядов в атмосфере, под водой и в недрах Земли, из них непосредственно в атмосфере 501 испытание. Испытания в атмосфере в СССР были завершены в 1962 г., подземные взрывы на Семипалатинском полигоне – в 1989 г., на Северном полигоне – в 1990 г. По оценкам во второй половине 20-го века за счет ядерных испытаний во внешнюю среду поступило $1.81 \cdot 10^{21}$ Бк продуктов ядерного

деления (ПЯД), из них на долю атмосферных испытаний приходится 99.84 %.

Продукты ядерного деления (ПЯД) представляют собой сложную смесь более чем 200 радиоактивных изотопов 36 элементов (от цинка до гадолиния). Большую часть активности составляют короткоживущие радионуклиды. Так, через 7, через 49 и через 343 суток после взрыва активность ПЯД снижается соответственно в 10, 100 и 1000 раз по сравнению с активностью через час после взрыва. Выход наиболее биологически значимых радионуклидов приведен в таблице 13. Кроме ПЯД радиоактивное загрязнение обусловлено радионуклидами наведенной активности (^3H , ^{14}C , ^{28}Al , ^{24}Na , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co и др.) и неразделившейся частью урана и плутония. Особенно велика роль наведенной активности при термоядерных взрывах.

Таблица 13

Выход некоторых продуктов деления при ядерном взрыве

радио- нуклид	период полураспада	выход на одно деление, %	активность на 1 Мт, 10^{15} Бк
$^{89}_{38}\text{Sr}$	50.5 сут.	2.56	590
$^{90}_{38}\text{Sr}$	29.12 лет	3.5	3.9
$^{95}_{40}\text{Zr}$	65 сут.	5.07	920
$^{103}_{44}\text{Ru}$	41 сут.	5.2	1500
$^{106}_{44}\text{Ru}$	365 сут.	2.44	78
$^{131}_{53}\text{I}$	8.05 сут.	2.9	4200
$^{136}_{55}\text{Cs}$	13.2 сут.	0.036	32
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30 лет	5.57	5.9
$^{140}_{56}\text{Ba}$	12.8 сут.	5.18	4700
$^{141}_{58}\text{Ce}$	32.5 сут.	4.58	1600
$^{144}_{58}\text{Ce}$	288 сут.	4.69	190
^3_1H	12.3 лет	0.01	$2.6 \cdot 10^{-2}$

При ядерных взрывах в атмосфере значительная часть осадков (при наземных взрывах до 50 %) выпадает вблизи района испытаний. Часть радиоактивных веществ задерживается в нижней части атмосферы и под действием ветра перемещается на большие расстояния, оставаясь примерно на одной и той же широте. Находясь в воздухе примерно месяц, радиоактивные вещества во время этого перемещения постепенно выпадают на Землю. Большая часть радионуклидов выбрасывается в стратосферу (на высоту $10 \div 15$ км), где происходит их глобальное рассеивание и в значительной степени распад. Нераспавшиеся радионуклиды выпадают по всей поверхности Земли.

Годовые дозы облучения населения коррелируют с частотой испытаний. Так, в 1963 году коллективная среднегодовая доза, связанная с ядерными испытаниями, составила 7 % дозы облучения от естественных источников. К 1966 году она снизилась до 2 %, а к началу 80-ых годов уменьшилась до 1 %. В дальнейшем формирование доз будет происходить практически только за счет ¹⁴C.

7. Атомная энергетика

Источником облучения, вокруг которого ведутся наиболее интенсивные споры, являются атомные электростанции. Преимущество атомной энергетики состоит в том, что она требует существенно меньших количеств исходного сырья и земельных площадей, чем тепловые станции (таблица 14), не загрязняет атмосферу дымом и сажей. Опасность состоит в возможности возникновения катастрофических аварий реактора, а также в реально не решенной проблеме утилизации радиоактивных отходов и утечке в окружающую среду небольшого количества радиоактивности.

Таблица 14

Расход природных ресурсов для производства 1 ГВт в год электроэнергии в угольном и ядерном топливных циклах

Ресурс	Ядерный топливный цикл	Угольный топливный цикл
Земля, га	20 ÷ 60	100 ÷ 400
Вода, млн. м ³	32	21
з	50 ÷ 200* 1500**	
Материалы (без топлива), тыс. т	32 16	12
Кислород, млн. т	—	8

* - При содержании урана в руде менее 0.1 %.

** - При прямоточном охлаждении.

К концу 1984 г. в 26 странах работало 345 ядерных реакторов, вырабатывающих электроэнергию. Их мощность составляла 220 ГВт или 13% суммарной мощности всех источников электроэнергии. К 1994 году в мире работало 432 атомных реактора, их суммарная мощность составила 340 ГВт.

В настоящее время более 20 % производимой в мире электроэнергии вырабатывают АЭС.

8. Медицинское применение радиации

Излучение используется в медицине для двух различных целей: диагностики болезней или повреждений и для уничтожения клеток, поражённых раком.

Одно из самых старых и наиболее распространённых диагностических применений - это рентгенодиагностика - рентгеновские лучи, проходят через тело пациента и позволяют получить изображение требуемого объекта. Ценности этого метода весьма высока - ежегодно проводятся миллионы рентгенологических исследований. В результате одного рентгенологического исследования грудной клетки пациент получает дозу излучения 0,1 мЗв.

В случае некоторых заболеваний диагностическую информацию можно получить с

использованием гамма-лучей, испускаемых радиоактивными веществами, которые вводятся в организм пациента путём инъекции, через рот или органы дыхания. Этот метод называют ядерной медициной. Радиоактивное вещество входит в состав фармацевтического препарата, подобранного таким образом, чтобы он преимущественно накапливался в исследуемом органе или ткани. Для наблюдения за распределением и движением радиоактивного вещества применяется "гамма-камера". Она позволяет обнаруживать гамма-излучение и получать изображение, и таким образом можно определить, является ли ткань здоровой, а также получить информацию о характере и стадии развития болезни.

Для лечения раковых заболеваний применяется лучевая терапия, в которой используют высокоэнергичные рентгеновские лучи или гамма-лучи, испускаемые кобальтом-60 или аналогичными источниками. Производится их точное нацеливание, часто с нескольких направлений, с тем, чтобы уничтожить поражённую ткань и при этом снизить дозу, получаемую окружающей здоровой тканью. При лечении болезней могут использоваться радиоактивные вещества либо в виде небольших количеств твёрдого материала, временно вводимого в ткани, либо в виде радиоактивных растворов, обеспечивая высокие, но локализованные дозы излучения.

Применение излучений в медицине является самым значительным источником искусственного облучения людей; глобальная среднегодовая доза составляет 1,4 мЗв.

9. Воздействие радиации на человека

Эффекты воздействия радиации на человека обычно делятся на две категории (таблица 15):

1. Соматические (телесные) - возникающие в организме человека, который подвергался облучению;
2. Генетические - связанные с повреждением генетического аппарата и проявляющиеся в следующем или последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки человека, подвергшегося облучению.

Таблица 15

Радиационные эффекты облучения человека

соматические эффекты	генетические эффекты
лучевая болезнь	генные мутации
локальные лучевые поражения	хромосомные aberrации
лейкозы	
опухоли разных органов	

Различают пороговые (детерминированные) и стохастические эффекты. Первые возникают когда число клеток, погибших в результате облучения, потерявших способность воспроизводства или нормального функционирования, достигает критического значения, при котором заметно нарушаются функции пораженных органов. Зависимость тяжести нарушения от величины дозы облучения показана в таблице 16.

Таблица 16

Воздействие различных доз облучения на человеческий организм

доза, Гр	причина и результат воздействия
$(0.7 \div 2) \cdot 10^{-3}$	доза от естественных источников в год
0.05	предельно допустимая доза профессионального облучения в год
0.1	уровень удвоения вероятности генных мутаций

0.25	однократная доза оправданного риска в чрезвычайных обстоятельствах
1.0	доза возникновения острой лучевой болезни
3 ÷ 5	без лечения 50 % облученных умирает в течение 1–2 месяцев вследствие нарушения деятельности клеток костного мозга
10 ÷ 50	смерть наступает через 1–2 недели вследствие поражений главным образом желудочно-кишечного тракта
100	смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы

Хроническое облучение слабее действует на живой организм по сравнению с однократным облучением в той же дозе, что связано с постоянно идущими процессами восстановления радиационных повреждений. Считается, что примерно 90 % радиационных повреждений восстанавливается.

Стохастические (вероятностные) эффекты, такие как злокачественные новообразования, генетические нарушения, могут возникать при любых дозах облучения. С увеличением дозы повышается не тяжесть этих эффектов, а вероятность (риск) их появления. Для количественной оценки частоты возможных стохастических эффектов принята консервативная гипотеза о линейной беспороговой зависимости вероятности отдаленных последствий от дозы облучения с коэффициентом риска около $7 \cdot 10^{-2}/\text{Зв}$ (таблица 17).

Таблица 17

Число случаев на 100000 человек при индивидуальной дозе облучения 10 мЗв

категории облучаемых	смертельные случаи рака	несмертельные случаи рака	тяжёлые наследуемые эффекты	суммарный эффект
работающий персонал	4.0	0.8	0.8	5.6
все население *	5.0	1.0	1.3	7.3

* Все население включает не только как правило здоровый работающий персонал, но и критические группы (дети, пожилые люди и т.д.)

Радионуклиды накапливаются в органах неравномерно. В процессе обмена веществ в организме человека они замещают атомы стабильных элементов в различных структурах клеток, биологически активных соединениях, что приводит к высоким локальным дозам. При распаде радионуклида образуются изотопы химических элементов, принадлежащие соседним группам периодической системы, что может привести к разрыву химических связей и перестройке молекул. Эффект радиационного воздействия может проявиться совсем не в том месте, которое подвергалось облучению. Превышение дозы радиации может привести к угнетению иммунной системы организма и сделать его восприимчивым к различным заболеваниям. При облучении повышается также вероятность появления злокачественных опухолей.

В таблице 18 приведены сведения о накоплении некоторых радиоактивных элементов в организме человека.

Организм при поступлении продуктов ядерного деления подвергается длительному, убывающему по интенсивности, облучению.

Наиболее интенсивно облучаются органы, через которые поступили радионуклиды в

организм (органы дыхания и пищеварения), а также щитовидная железа и печень. Дозы, поглощенные в них, на 1-3 порядка выше, чем в других органах и тканях. По способности концентрировать всосавшиеся продукты деления основные органы можно расположить в следующий ряд:

щитовидная железа > печень > скелет > мышцы.

Так, в щитовидной железе накапливается до 30 % всосавшихся продуктов деления, преимущественно радиоизотопов йода.

По концентрации радионуклидов на втором месте после щитовидной железы находится печень. Доза облучения, полученная этим органом, преимущественно обусловлена радионуклидами ^{99}Mo , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{140}Ba , ^{140}La .

Таблица 18

Органы максимального накопления радионуклидов

элемент		Наиболее чувствительный орган или ткань	Масса органа или ткани, кг	Доля полной дозы *
водород	H	все тело	70	1.0
углерод	C	все тело	70	1.0
натрий	Na	все тело	70	1.0
калий	K	мышечная ткань	30	0.92
стронций	Sr	кость	7	0.7
йод	I	щитовидная железа	0.2	0.2
цезий	Cs	мышечная ткань	30	0.45
барий	Ba	кость	7	0.96
радий	Ra	кость	7	0.99
торий	Th	кость	7	0.82
уран	U	почки	0.3	0.065
плутоний	Pu	кость	7	0.75

* Относящаяся к данному органу доля полной дозы, полученной всем телом человека.

Среди техногенных радионуклидов особого внимания заслуживают **изотопы йода**. Они обладают высокой химической активностью, способны интенсивно включаться в биологический круговорот и мигрировать по биологическим цепям, одним из звеньев которых может быть человек.

Основным начальным звеном многих пищевых цепей является загрязнение поверхности почвы и растений. Продукты питания животного происхождения - один из основных источников попадания радионуклидов к человеку.

Исследования, охватившие примерно 100000 человек, переживших атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, показывают, что рак - наиболее серьезное последствие облучения человека при малых дозах. Первыми среди раковых заболеваний, поражающих население, стоят лейкозы (рис. 2).

Распространенными видами рака под действием радиации являются рак молочной железы и рак щитовидной железы. Обе эти разновидности рака излечимы и оценки ООН показывают, что в случае рака щитовидной железы летальный исход наблюдается у одного человека из тысячи, облученных при индивидуальной поглощенной дозе один грей.

Данные по **генетическим последствиям облучения** весьма неопределенны. Ионизирующее излучение может породить жизнеспособные клетки, которые будут передавать то или иное изменение из поколения в поколение. Однако анализ этот затруднен, так как примерно 10 % всех новорожденных имеют те или иные генетические дефек-

ты и трудно выделить случаи, обусловленные действием радиации. Экспертные оценки показывают, что хроническое облучение при дозе 1 Гр, полученной в течение 30 лет, приводит к появлению около 2000 случаев генетических заболеваний на каждый миллион новорожденных среди детей тех, кто подвергся облучению.

В последние десятилетия процессы взаимодействия ионизирующих излучений с тканями человеческого организма были детально исследованы. В результате выработаны нормы **радиационной безопасности**, отражающие действительную роль ионизирующих излучений с точки зрения их вреда для здоровья человека. При этом необходимо помнить, что норматив всегда является результатом компромисса между риском и выгодой.

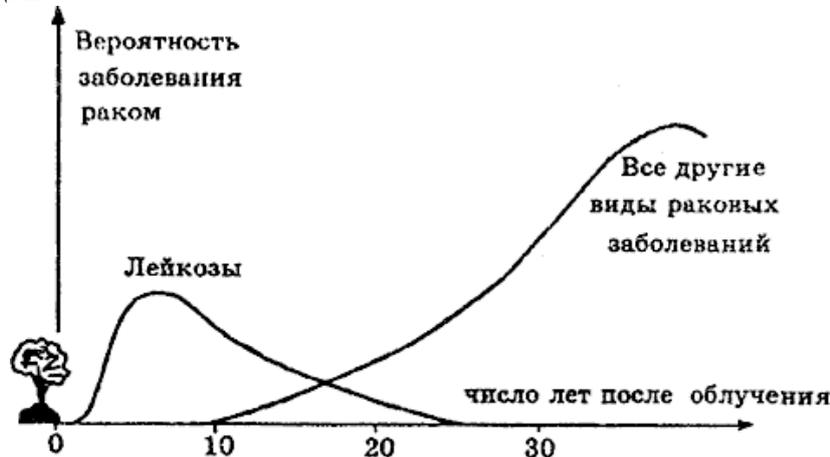


Рис. 2: Относительная среднестатистическая вероятность заболевания раком после получения однократной дозы в 0.01 Гр при равномерном облучении всего тела.

10. Меры защиты

Меры защиты персонала и населения регламентируются нормами радиационной безопасности (НРБ-99) и гигиеническими нормативами (ГН.2.61.054-99).

МКРЗ и НКРЗ Российской Федерации в рекомендациях по радиационной безопасности исходят из:

- не превышения основного дозового предела;
 - исключения всякого необоснованного облучения;
- снижения доз до наиболее низкого уровня с учётом медицинских и социально-экономических критериев.

МКРЗ и НКРЗ Российской Федерации в рекомендациях по радиационной безопасности полагают, что:

вмешательства должны принести больше пользы, чем вреда, т. е. уменьшение дозы должно быть достаточным, чтобы оправдать возможный вред от вмешательства и защиты, включая социальные затраты;

форма, масштаб и длительность должны быть оптимизированы, т. е. польза от уменьшения ущерба от излучения за вычетом ущерба, связанного с вмешательством, должна быть максимальной.

планируемое повышенное облучение персонала при ликвидации аварии выше установленных дозовых пределов (таблица 7) может быть разрешено только в тех случаях, когда нет возможности принять меры, исключая их применение, и может быть оправдано лишь спасением жизни людей, предотвращением дальнейшего развития аварии и облучения большого числа людей. Планируемое повышенное облучение допускается только для мужчин старше 30 лет лишь при их

добровольном письменном согласии, после информирования о возможных дозах облучения при ликвидации аварии и риске для здоровья.

Планируемое повышенное облучение в дозе не более 100 мЗв в год допускается с разрешения территориальных органов госсанэпиднадзора, а облучение в дозе не более 200 мЗв в год только с разрешения Госкомсанэпиднадзора России. Повышенное облучение не допускается:

- для работников, ранее уже получивших дозу 200 мЗв в год в результате аварии или планируемого повышенного облучения;
- для лиц, имеющих медицинские противопоказания согласно списку Минздравмедпрома России.

Лица, подвергшиеся однократному облучению в дозе, превышающей 100 мЗв, в дальнейшей работе не должны подвергаться облучению в дозе свыше 20 мЗв/год. Однократное облучение в дозе свыше 200 мЗв/год должно рассматриваться как потенциально опасное.

Меры радиационной защиты персонала и населения регламентируются нормами радиационной безопасности (НРБ-99) и основными санитарными правилами (ОСП-72-87).

Меры защиты направлены на:

предотвращение возникновения детерминированных эффектов путем ограничения облучения дозой ниже порога возникновения этих эффектов (нормирование годовой дозы);

принятие обоснованных мер по снижению вероятности индуцирования отдаленных стохастических последствий (онкологических и генетических) с учетом экономических и социальных факторов.

Целью мер защиты является обеспечение высоких показателей здоровья населения, которые включают: продолжительность жизни, интегральные по времени характеристики физической и умственной работоспособности, самочувствие и функцию воспроизводства.

Меры защиты включают:

- снижение облучения населения от всех основных источников излучения; ограничение вредного действия на население нерадиационных факторов физической и химической природы;

- повышение резистентности и антиканцерогенной защищенности жителей;
- медицинскую защиту населения;

повышение уровня радиационно-гигиенических знаний населения, психологическую помощь населению, помощь в преодолении преувеличенного восприятия опасности радиации;

- формирование здорового образа жизни населения;
- повышение социальной, экономической и правовой защищенности населения.

В случаях аварийных ситуаций принимаются дополнительные меры защиты, обеспечивающие снижение дозы облучения населения загрязненной территории и включающие:

- отселение жителей (временное или постоянное);

отчуждение загрязненной территории или ограничение проживания и функционирования населения на этой территории;

- дезактивацию территории, строений и других объектов;

систему мер в цикле сельскохозяйственного производства по снижению содержания радионуклидов в местной растительной и животной пищевой продукции; нормирование, радиационный контроль и выбраковку сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов с последующей переработкой их в радиационно чистые продукты, а также снабжение населения радиационно чистыми пищевыми продуктами;

внедрение в практику специальных правил поведения жителей и ведения ими приусадебного хозяйства.

Дополнительные меры также включают оптимизацию медицинского обслуживания населения и снижение доз облучения от других источников, в частности за счет ограничения поступления радона в жилые и производственные помещения.

11. Примеры решения задач

Задача 1. Рассчитать суммарную активность трития, образовавшегося в результате испытания ядерного оружия до 1970 г., если общий эквивалент ядерных взрывов составил 220 Мт.

Решение. Образование трития при испытании ядерного оружия составляет $2.6 \cdot 10^{13}$ Бк/Мт. До 1970 г. общий эквивалент ядерных взрывов составил 220 Мт. Образование трития:

$$220 \text{ Мт} \cdot (2.6 \cdot 10^{13} \text{ Бк/Мт}) = 5.7 \cdot 10^{15} \text{ Бк} .$$

Задача 2. По санитарным нормам допустимая плотность потока быстрых нейтронов составляет $I_0 = 20 \text{ нейтронов/(см}^2 \cdot \text{с)}$. Определить на каком минимальном расстоянии от источника, интенсивностью $S = 3 \cdot 10^6 \text{ нейтронов/с}$, можно работать без дополнительной защиты.

Решение. Плотность потока нейтронов $I(r)$ на расстоянии r от источника

$$I(r) = \frac{S}{4\pi \cdot r^2}$$

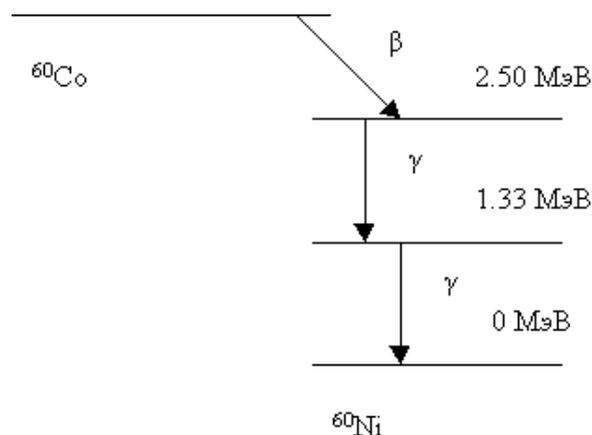
определяется соотношением:

Минимальное безопасное расстояние из соотношения $R_{\text{мин}}$:

$$R_{\text{мин}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{\pi I_0}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3 \cdot 10^6}{20 \pi}} \approx 109 \text{ см}$$

Задача 3. Индивидуальная доза облучения, полученная в результате воздействия источника ^{60}Co в течении 10 с, составила 100 Гр. Сколько фотонов γ -излучения попало при этом в организм человека, если каждый фотон теряет в тканях тела около 40 % своей энергии ?

Решение. При распаде ^{60}Co образуется 2 γ - кванта с энергиями 1.33 и 1.17 МэВ. Каждая такая пара фотонов выделит в тканях человека $(1.33 + 1.17) \cdot 0.4 = 1 \text{ МэВ} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.



Для человека весом 75 кг поглощённая доза от одной пары фотонов составит

$$\frac{1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}}{75 \text{ кг}} = 2.13 \cdot 10^{-15} \text{ Гр}.$$

При получении дозы 100 Гр число фотонов, попавших в организм, составит

$$2 \frac{100}{2.13 \cdot 10^{-15}} = 9.4 \cdot 10^{16}$$

Задача 4. Студент предполагает использовать для работы с источником ^{90}Sr , имеющим активность $A = 270 \text{ МБк}$ и находящемся в стеклянной пробирке, в качестве защиты только плотные перчатки. Не опасно ли это ?

Решение. $E^- = 1.74 \text{ МэВ}$, масса человека $M = 70 \text{ кг}$, $\varepsilon = 0.1$. На один акт распада ^{90}Sr приходится 1 фотон с энергией 1.74 МэВ, откуда для поглощённой человеком

$$D_t = \frac{270 \cdot 10^6 \cdot 1.74 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13} \cdot 10^{-1}}{70} = 10^{-7} \text{ Гр/с}$$

мощности дозы D_t получим

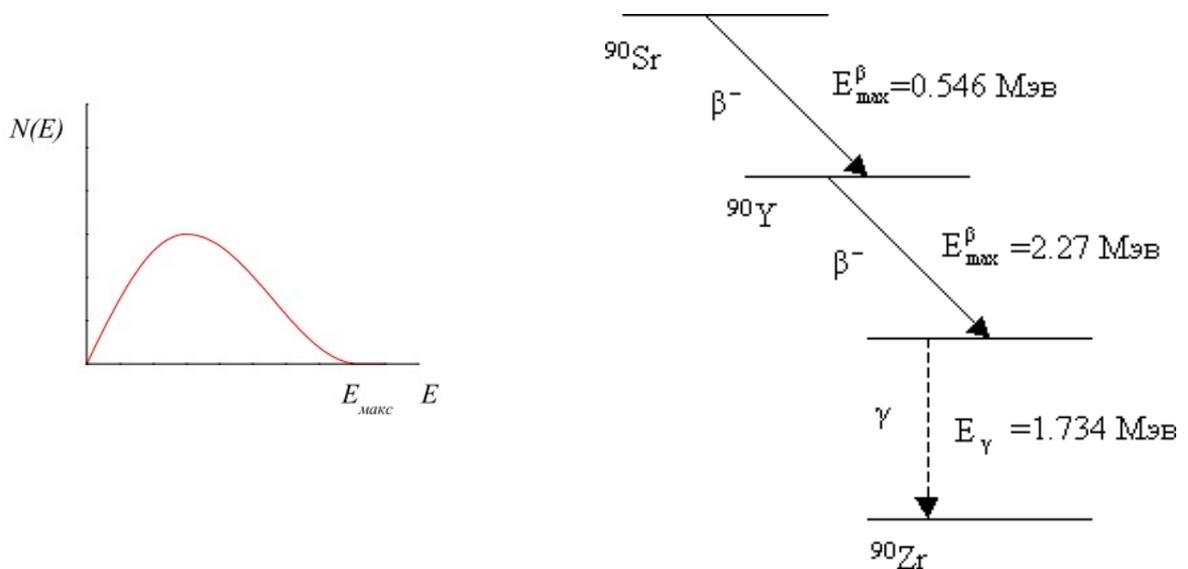
Предел дозы: ПД = 0.5 Гр/год $\approx 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ Гр/с}$

Работать опасно !!!

Задача 5. Количество ^{90}Sr , которое ежедневно попадает с пищей в организм человека, составляет 0.94 Бк. Каково значение дозы, накопленной в костной ткани за год?

Решение.

- Средние энергии β -распада составляют $0.3 \div 0.4$ от E_{\max}^{β} . В расчете возьмем 0.4.



- Будем считать, что в костях поглощается 10 % электронов. Общее количество энергии, поглощённой в организме от одного распада: $Q = (0.546 + 2.27) \cdot 0.4 + 1.734 \cdot 0.1 = 1.3 \text{ МэВ} = 1.3 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 2.08 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$, ($1 \text{ МэВ} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$).

Согласно таблице 18, доля радионуклида ^{90}Sr , поглощённая костной тканью, составляет $0.94 \text{ Бк} \cdot 0.7 = 0.66 \text{ Бк}$ или $5.68 \cdot 10^4$ распадов в сутки (в сутках 86400 с).

Фрагмент таблицы 18

Органы максимального накопления радионуклидов

Элемент		Наиболее чувствительный орган или ткань	Масса органа или ткани, кг	Доля полной дозы
Стронций	Sr	Кость	7	0.7

Таким образом, в сутки костная ткань поглощает

$$Q = 2.08 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \cdot 5.68 \cdot 10^4 = 11.8 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} .$$

Доза, поглощённая в год: $365 \cdot 11.8 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} .$

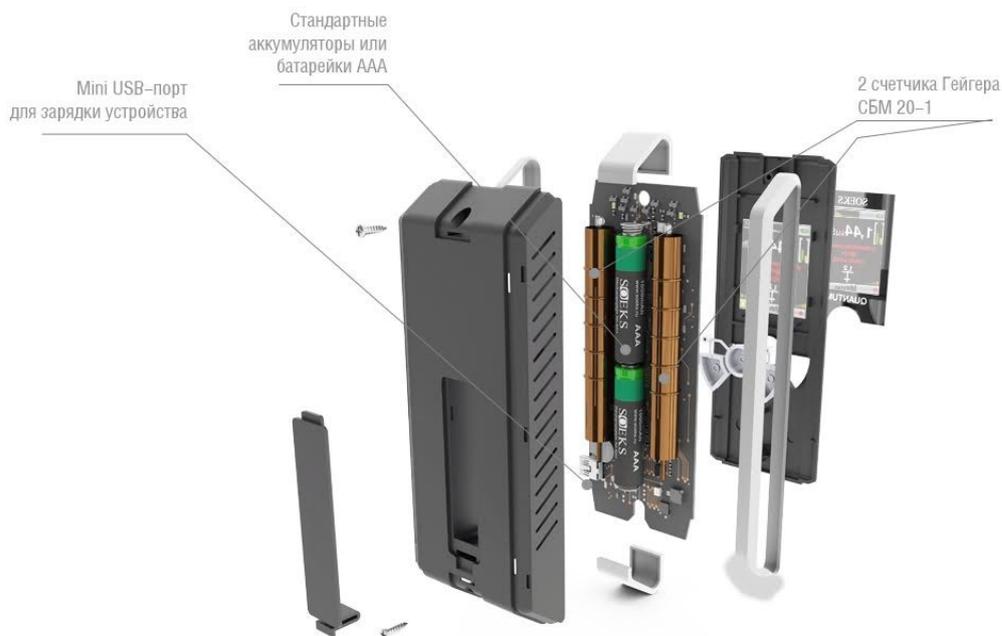
Доза, поглощённая за год в 1 кг костной ткани:

$$\frac{4.3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}}{7 \text{ кг}} = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/кг} = 0.6 \text{ мкГр}$$

12. Контрольные вопросы и задачи

1. Что такое радиация?
2. Перечислите основные виды радиоактивного излучения.
3. Опишите механизм передачи энергии тяжёлой заряженной частицей веществу.
4. В чем особенности воздействия радиации на ткани живого организма?
5. Что такое радионуклид? В чем различие понятий радионуклид и изотоп?
6. Что такое активность радионуклида в источнике?
7. Что такое экспозиционная доза?
8. Рассчитать дозу облучения в рентгенах от источника ^{60}Co активностью 50 мКи, полученную за 6 часов работы на расстоянии 40 см от источника.
9. Мощность дозы γ -излучения на расстоянии 10 см от источника составляет 5 Р/мин. Определить расстояние от источника, на котором можно находиться без защиты в течении рабочего дня (6 часов). Максимально допустимая доза γ -излучения составляет 0.05 Р за рабочий день.
10. Что такое линейная передача энергии (ЛПЭ)?
11. В чем различие между линейной передачей энергии и удельной ионизацией?
12. В чем различие между поглощённой дозой, эквивалентной дозой и эффективной эквивалентной дозой?
13. Что такое предельно допустимые дозы и пределы дозы?
14. Что такое внешнее и внутреннее облучение? Основные источники внешнего и внутреннего облучения.
15. Основные источники природной радиации.
16. Основные техногенные источники радиации.
17. Почему с увеличением высоты происходит увеличение мощности поглощённой дозы космического внешнего облучения?
18. Какую опасность представляют радионуклиды, попавшие внутрь организма ?
19. В чем особенности воздействия больших и малых доз радиации на человека?
20. В каких формах проявляется биологическая активность радионуклидов?

Приложение 1. Технические характеристики дозиметра SOEKS Quantum



(URL: https://soeks.ru/image/catalog/products/quantum/manual_dozimetr_quantum.pdf)

2 счетчика Гейгера-Мюллера (СБМ 20-1)

Диапазон показаний уровня радиоактивного фона, до 1 000 мкЗв/ч

Диапазон измерения накопленной дозы, до 1 000 Зв

Время накопления дозы до 999 дней

Накопление истории измерения радиационного фона, не менее 24 часа с шагом 10 секунд

Регистрируемая энергия гамма- излучения от 0,1, МэВ

Пороги предупреждения, мкЗв/ч от 0,3 до 100

Время измерения, секунд 10