



Я.Л. Мархоцкий

**Радиационная
и экологическая
безопасность
атомной
энергетики**

Ян Л. Мархоцкий

**Радиационная и
экологическая безопасность
атомной энергетики**

«Вышэйшая школа»

2009

УДК 621.039:614.876.084(075.8)
ББК 31.4я73

Мархоцкий Я. Л.

Радиационная и экологическая безопасность атомной
энергетики / Я. Л. Мархоцкий — «Вышэйшая школа»,
2009

Представлены сведения об элементах ядерной физики, естественных источниках радиации, действии ионизирующих излучений на организм человека, гигиенических аспектах радиационной безопасности, ядерном топливе, экологических проблемах энергетики, радиационной безопасности предприятий ядерно-топливного цикла. Для студентов высших учебных заведений, учащихся средних специальных и общеобразовательных учебных заведений, широкого круга читателей.

УДК 621.039:614.876.084(075.8)
ББК 31.4я73

© Мархоцкий Я. Л., 2009
© Вышэйшая школа, 2009

Содержание

Предисловие	6
Элементы ядерной физики	7
Краткая история создания атомистического учения	7
Строение атома и атомного ядра	8
Изотопы	10
Радиоактивность	11
Характеристика ионизирующих излучений	12
Закон радиоактивного распада и период полураспада	14
Деление ядер	15
Основы радиационной дозиметрии и единицы γ - радиоактивности	17
Дозы облучения	18
Естественные источники радиации	21
Биосферная радиация	22
Космическая радиация	27
Конец ознакомительного фрагмента.	28

Ян Людвинович Мархоцкий

Радиационная и экологическая безопасность атомной энергетики

Рецензенты: заведующий кафедрой «Основы медицинских знаний» Белорусского государственного педагогического университета имени М. Танка, доктор медицинских наук, профессор *В.П. Сытый*; главный научный сотрудник Управления системной интеграции, академик Международной академии наук информации, информационных процессов и технологии при ООН, доктор технических наук, профессор *В.О. Чернышев*

Выпуск издания осуществлен по заказу и при финансовой поддержке Министерства информации Республики Беларусь.

Предисловие

В настоящее время атом – это не только ядерное оружие различных видов, но и работающий энергоблок на АЭС, атомные ледоколы, мощные подводные лодки, надводные корабли, спутники, аппараты для лучевой терапии, радиационные дефектоскопы, электрокардиостимуляторы. Конечно, это неполный перечень использования источников ионизирующей радиации.

Атомная энергетика – молодая отрасль науки и техники. По мнению ученых, она в недалеком будущем станет основным поставщиком энергии, в том числе и электрической.

Атомная энергетика во многих странах выросла, возмужала и вышла на широкую дорогу промышленного производства электрической энергии, например в США, Англии, Франции, Канаде, Италии, Германии, Японии, Литве. В мире насчитывается 442 ядерных реактора общей мощностью свыше 365 тыс. МВт. Они расположены более чем в 30 странах. Строятся десятки новых реакторов. По данным МАГАТЭ, более 18 % электроэнергии, вырабатываемой в мире, производится на ядерных реакторах. Такие государства как Литва (80,6 %), Франция (77 %), Словакия (57,8 %) большую часть своих потребностей в электроэнергии удовлетворяют за счет АЭС.

К настоящему времени атомная энергетика смогла продемонстрировать свою жизнеспособность, экологическую привлекательность и возможность безопасного и конкурентоспособного обеспечения энергопотребностей общества.

Беларусь относится к категории стран, не обладающих значительными собственными топливно-энергетическими ресурсами, но это не препятствие для достижения высокого уровня экономического развития. Строительство собственной АЭС позволит снизить зависимость от импорта энергоресурсов и обеспечит республику относительно дешевой электроэнергией.

Автор

Элементы ядерной физики

Краткая история создания атомистического учения

Создание атомистической теории обычно приписывают древнегреческому философу Демокриту, жившему в V в. до н. э.

Однако историки утверждают, что основателем теории является учитель Демокрита – Левкипп, который считал, что материя состоит из отдельных непрерывно движущихся частиц (атомов). Древние атомисты Греции, Китая, Индии провозгласили, хотя и в самой общей форме, основное положение материалистической философии: материя несотворима, неуничтожима, вечна и бесконечна. Гениальную идею древних подтвердил М.В. Ломоносов в 40-х гг. XVIII в., разработав атомно-молекулярную теорию строения вещества. Согласно этой теории, вещество состоит из «корпускул» (молекул), которые, в свою очередь, состоят из элементов (или «нечувствительных физических частичек» – атомов). М.В. Ломоносов утверждал, что все движения материи сводятся к движению атомов и являются причиной всех изменений в природе. Он заложил основу дальнейшего познания тайн атомов, т. е. начался период химической атомистики.

В феврале 1896 г. французский ученый А. Беккерель обнаружил, что соли оксида урана засвечивают фотографическую пластинку, завернутую в светонепроницаемую бумагу. Таким образом было открыто неизученное ранее явление природы – испускание ураном неизвестного проникающего излучения, названного *радиоактивностью*. Исследования Беккереля были продолжены М. Склодовской-Кюри и П. Кюри, которые открыли радиоактивные элементы: торий, полоний, радий, актиний. Беккерелю и супругам Кюри за исследования радиоактивности в 1903 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Строение атома и атомного ядра

Природа состоит из простых и сложных веществ. К простым веществам относятся химические элементы, к сложным – их химические соединения. Мельчайшей частицей элемента, обладающей его химическими свойствами, является *атом*.

Спустя год после открытия радиоактивности английский физик Дж. Томсон установил, что элементарная частица – *электрон* — действительно существует и является составной частью вещества. Теория же атомного ядра появилась через 15 лет благодаря последователям английского ученого Э. Резерфорда и работам знаменитого датского физика Н. Бора.

В 1913 г. Н. Бор предложил модель атома, за основу которой была принята планетарная модель Э. Резерфорда. Согласно ей, атом состоит из положительно заряженного, расположенного в центре, *ядра*, вокруг которого движутся по своим строго определенным орбитам отрицательно заряженные частицы – *электроны*, точно так же, как планеты вокруг Солнца (рис. 1).

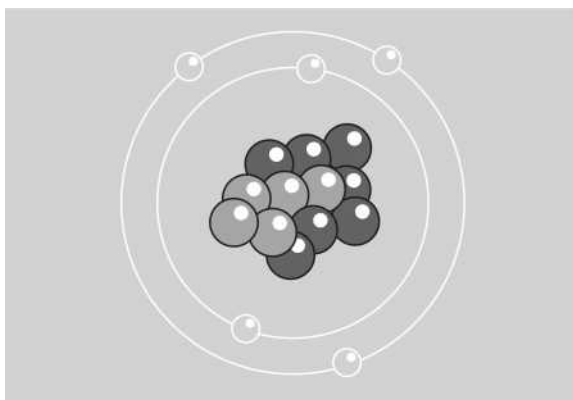


Рис. 1. Схема планетарного строения атома

Эти «летающие планеты» образуют вокруг ядра электронную оболочку. Электроны находятся на различных расстояниях от него. Их количество в атоме таково, что общий заряд нейтрализует положительный заряд ядра. Потеря электрона приводит к ионизации атома.

Кроме электронов, атомы содержат *протоны* и *нейтроны* в ядре атома. Протоны имеют положительный заряд. В связи с этим у нейтрального атома равное количество электронов и протонов. Количество протонов в ядре равно порядковому номеру элемента в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева.

В отличие от протонов нейтроны не обладают электрическим зарядом. В современной физике протоны и нейтроны объединяют общим названием *нуклон* (от лат. *nucleus* – ядро). Общее число нуклонов в атомном ядре соответствует массе атома. Обычно массу атомов всех химических элементов выражают в относительных единицах, условно приняв за единицу 1/12 часть массы основного изотопа углерода C^{12} .

Диаметр атома приблизительно равен 10^{-10} м, а его ядро имеет очень малые размеры – 10^{-15} – 10^{-14} м. Принадлежность атома данному элементу обусловлена количеством протонов в ядре. На рис. 2 представлены схематичные модели некоторых атомов.

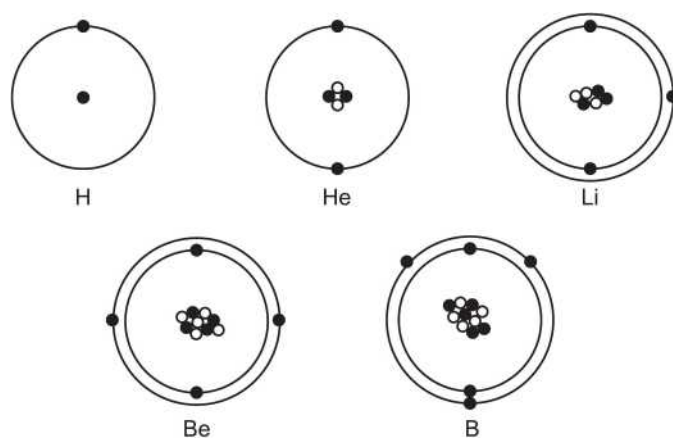


Рис. 2. Схематичные модели атомов водорода, гелия, лития, бериллия, бора

В центре расположено ядро, состоящее из протонов (черные кружки) и нейтронов (белые кружки). Вокруг ядер вращаются электроны. Число протонов в ядрах определяет, какой это элемент.

Изотопы

Изотопы – это разновидности одного и того же химического элемента. Их название (от греч. *isos* — одинаковый и *topos* — место) в дословном переводе означает «из одного места», иными словами – вещества, занимающие одно место в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева.

Атомы как материальные частицы обладают микроскопической массой. Поэтому физики выражают массу атомов не в единицах массы, а в числах протонов и нейтронов, составляющих ядро данного атома, и называют *массовым числом*.

Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающихся по числу нейтронов, являются разновидностями одно и того же химического элемента и называются его *изотопами*. На рис. 3 представлены изотопы водорода.

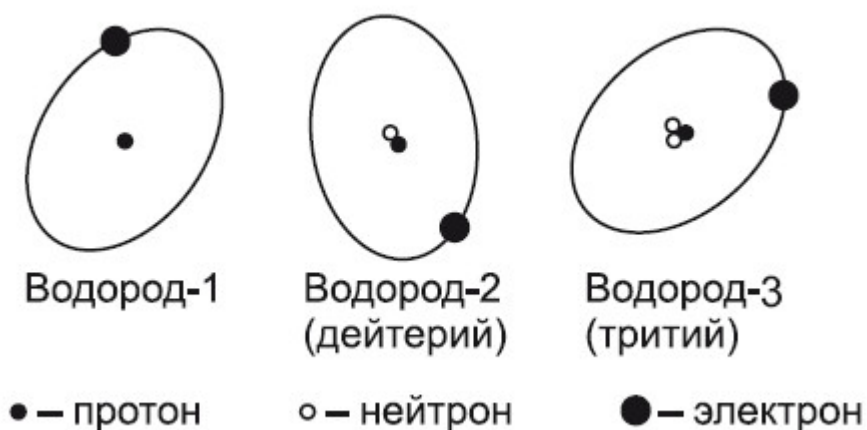


Рис. 3. Изотопы водорода

В ядре его атома либо вообще нет нейтронов, либо есть один или два. Это значит, что водород существует в виде трех изотопов, т. е. в виде трех атомов различной массы, но с одинаковым зарядом ядра. Следовательно, для того чтобы различать изотопы, их обозначают числом, равным сумме входящих в ядро протонов и нейтронов. Для водорода это соответственно водород-1 (обычный), водород-2 (дейтерий), водород-3 (тритий). В ядре цезия-137 содержится 55 протонов и 82 нейтрона (Cs_{55}^{137}), в радии-226 содержится 88 протонов и 138 нейтронов (Ra_{88}^{226}). Оказалось, что 106 элементов имеют 1600 разновидностей. Из этого числа около 365 изотопов существуют в природе, а свыше 1250 получены искусственно.

Ядра изотопов химических элементов называют нуклидами. Радионуклиды – это радиоактивные атомы с данным массовым числом и атомным номером. Большинство нуклидов нестабильно, они превращаются в другие нуклиды.

Радиоактивность

Радиоактивность – это самопроизвольное превращение (распад) атомных ядер некоторых химических элементов, приводящее к изменению их атомного номера и массового числа. Распад радиоактивных ядер сопровождается ионизирующим излучением и высокой энергией.

Ионизирующие излучения получили свое название благодаря способности вызывать ионизацию атомов и молекул в облучаемом веществе. Ионизирующие излучения подразделяются по своей природе на электромагнитные и корпускулярные.

Электромагнитное излучение – это рентгеновское излучение, γ -излучение радиоактивных элементов и тормозное излучение, возникающее при прохождении частиц. Видимый свет и радиоволны относятся также к электромагнитным излучениям. Однако они ионизирующей способностью не обладают, так как характеризуются большой длиной волны.

Корпускулярные излучения – это все остальные виды ионизирующих излучений: β -частицы (электроны, позитроны), протоны (ядра водорода), дейтроны (ядра дейтерия), α -частицы (ядра гелия), тяжелые ионы (ядра других элементов), тг-мезоны.

Радиоактивность изотопов, существующих в природе, называют *естественной*, а радиоактивность изотопов, полученных в результате различных ядерных реакций, – *искусственной*.

Характеристика ионизирующих излучений

В процессе радиоактивного распада ядра атомов радиоактивных элементов в большинстве случаев испускают α -частицы, β -частицы, γ -излучение.

Английскими физиками Э. Резерфордом и Ф. Содди было доказано, что во всех радиоактивных процессах происходят взаимные превращения атомных ядер химических элементов. Изучение свойств излучения, сопровождающего эти процессы в магнитном и электрическом полях, показало, что оно разделяется на α -частицы (ядра гелия), β -частицы (электроны, позитроны) и γ -лучи (электромагнитные излучения с очень малой длиной волны):

- α -излучение – поток положительно заряженных частиц. При распаде тяжелых ядер, например урана или радия, испускаются α -частицы – ядра гелия, состоящие из двух протонов и четырех нейтронов, т. е. несут два положительных электрических заряда (${}^4_2\text{He}$). Бывают и другие виды радиоактивных превращений. При этом важно, что соответствующий радионуклид преобразуется в изотоп другого химического элемента, испуская частицу, а часто и избыток энергии в виде γ -кванта; α -частицы движутся со скоростью 14–20 тыс. км/с в веществе прямолинейно, вызывая при этом ионизацию всех атомов на своем пути. Они обладают высокой ионизирующей способностью, т. е. на 1 см пробега образуют от 30 до 100 тыс. пар ионов. Пробег в воздухе составляет около 10 см, в биологической среде (вода, ткань) – до 0,1 мм.

Защитой от α -частиц служит тонкий слой любого вещества (одежда, лист бумаги, 10-сантиметровый слой воздуха); α -частицы обладают энергией 2–9 МэВ (за 1 эВ принимается энергия, которой обладает электрон, прошедший разность потенциалов в 1 В). В таких единицах свет, возникающий при взаимодействии молекул и воспринимаемый нами с помощью зрения, имеет энергию 2 эВ. Энергия ядерных излучений при превращениях атомных ядер в сотни тысяч и даже в миллионы раз больше. Наши органы чувств не воспринимают такие излучения, т. е. для человека они остаются невидимыми и неосязаемыми;

- β -излучение – поток отрицательно заряженных частиц (электронов) или заряженных положительно (позитронов). Позитрон – элементарная частица, имеющая массу электрона, но обладающая положительным элементарным зарядом; β -частицы, испускаемые при ядерных распадах естественных и искусственных радионуклидов, например ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca}$ т. е. ядро испускает электрон, при этом возникает ядро нового элемента при неизменном массовом числе. К β -излучателям относятся фосфор-32, стронций-90, иттрий-90 и др.

Скорость движения β -частиц составляет 250–300 тыс. км/с, их масса в 1840 раз легче протонов, поэтому они испытывают многократное отклонение от первоначального направления движения и вызывают ионизацию только отдельных атомов, пробегая путь в воздухе до 15 м, а в биосреде – до нескольких сантиметров.

На 1 см пробега β -частицы могут образовывать 20–300 пар ионов. Защитой от β -частиц служит слой вещества толщиной 1–2 см;

- γ -излучение – коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны 0,001–0,1 нм ($\lambda \approx 10^{-10}$ м) очень высокой энергии; γ -лучи не отклоняются в электрическом и магнитном полях. Это излучение близко к рентгеновскому, но обладает большими скоростью (300 тыс. км/с) и энергией. Ионизирующая способность γ -излучения малая – 2–3 пары ионов на 1 см, но высока проникающая способность. Пробег в воздухе γ -квантов может достигать более 100 м, в мягких тканях – до 1 м. Защитой от γ -излучений могут служить слой свинца не менее 1 см, толстые слои бетона, земли или воды.

Мягкие γ -лучи обладают энергией до 0,2 МэВ; средней жесткости – 0,2–1 МэВ; жесткие – 1–10 МэВ; сверхжесткие – более 10 МэВ.

Нейтроны – частицы, не обладающие электрическим зарядом, масса которых примерно равна массе протонов. Нейтроны были открыты в 1932 г. английским физиком Дж. Чедвиком. Они проникают в ядра атомов и вызывают ядерные реакции. Это дало возможность получить искусственные радиоактивные изотопы. В каждом ядре их ровно столько, сколько нужно, чтобы заполнить разницу между численным значением массы ядра атома и количеством протонов в нем.

В зависимости от кинетической энергии нейтроны подразделяются на быстрые – 0,15–10 МэВ, сверхбыстрые – 500 МэВ, промежуточные – 5 КэВ—0,5 МэВ, медленные – 0,1–5 КэВ, тепловые – в пределах 0,025 МэВ.

Под воздействием нейтронов элементы Na, K, C, N, P, превращаются в радионуклиды – γ -излучатели, т. е. создается наведенная радиоактивность. Если нейтронов в атоме слишком много, они могут превращаться в протоны, т. е. образуется новый химический элемент. Источником нейтронов являются атомные реакторы.

Рентгеновское излучение – электромагнитное излучение с длиной волны порядка от 80 нм до 0,001 нм.

В 1895 г. Рентгеном был открыт новый вид излучения (рентгеновские лучи). Со стороны длинных волн рентгеновское излучение граничит с ультрафиолетовым излучением, а со стороны коротких волн оно в значительной степени перекрывается ядерным γ -излучением. Как правило, в медицине используется рентгеновское излучение с длиной волны от 10 до 0,005 нм, чему соответствует энергия от 100 эВ до 0,5 МэВ.

Рентгеновское излучение невидимо и по способу возбуждения подразделяется на:

- характеристическое (жесткое, $\lambda = 0,01$ нм и меньше);
- тормозное (мягкое, λ от 0,01 нм и больше).

Проходя через тело, фотоны рентгеновского излучения взаимодействуют в основном с электронами атомов и молекул вещества, а достаточно жесткое излучение может взаимодействовать также с ядрами атомов. При этом происходят следующие первичные процессы: когерентное рассеяние, фотоэффект и комптон-эффект.

Обычно в медицинской диагностике используется рентгеновское излучение с энергией фотонов от 60 до 100–120 КэВ, а при лучевой терапии – 150–200 КэВ.

Закон радиоактивного распада и период полураспада

Как было отмечено ранее, известно, радиоактивность – это самопроизвольное превращение (распад) ядер некоторых химических элементов, приводящее к изменению их атомного номера и массового числа. Распад радиоактивных ядер сопровождается ионизирующим излучением. Спонтанный распад атомных ядер следует экспоненциальному закону:

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

где N — количество ядер в данном объеме вещества в момент времени t , N_0 — количество ядер в данном объеме вещества в момент времени $t = 0$; λ — постоянная распада (доли ядер, распадающихся за 1 с).

Величина τ , обратная λ , называется средней продолжительностью жизни радиоактивного изотопа $\tau = 1/\lambda$

Радиоактивные излучения возникают лишь в момент самопроизвольного превращения неустойчивого радионуклида в другой изотоп. Одни радиоактивные изотопы изменяются быстро, превращаясь в обычные стабильные. Другие – очень медленно (живут долго, излучая постоянно). Скорость распада принято описывать *периодом полураспада* ($T_{1/2}$) – таким промежутком, в течение которого из всех имеющихся в наличии ядер половина подвергается самопроизвольному превращению. Чем интенсивнее идет радиоактивный распад, тем короче период полураспада. Например, период полураспада плутония-239 равен 24 410 лет, радия-226 – 1617 лет, радона-222 – 3,82 дня, некоторых элементарных частиц – миллионные доли секунды.

Деление ядер

При захвате нейтронов (рис. 4) происходит деление тяжелых ядер. При этом используются новые частицы и освобождается энергия связи ядра, передаваемая осколкам деления. Ядра тяжелых элементов урана, плутония и некоторых других радионуклидов интенсивно поглощают тепловые нейтроны. После акта захвата нейтрона тяжелое ядро делится на две неравные по массе части, называемые *осколками* или *продуктами деления*. При этом испускаются *быстрые нейтроны* (в среднем около 2,5 нейтрона на каждый акт деления), отрицательно заряженные β -частицы и нейтральные γ -кванты, а энергия связи частиц в ядре преобразуется в кинетическую энергию осколков деления, нейтронов и других частиц. Эта энергия затем расходуется на тепловое возбуждение составляющих вещество атомов и молекул, т. е. на разогревание окружающего вещества.

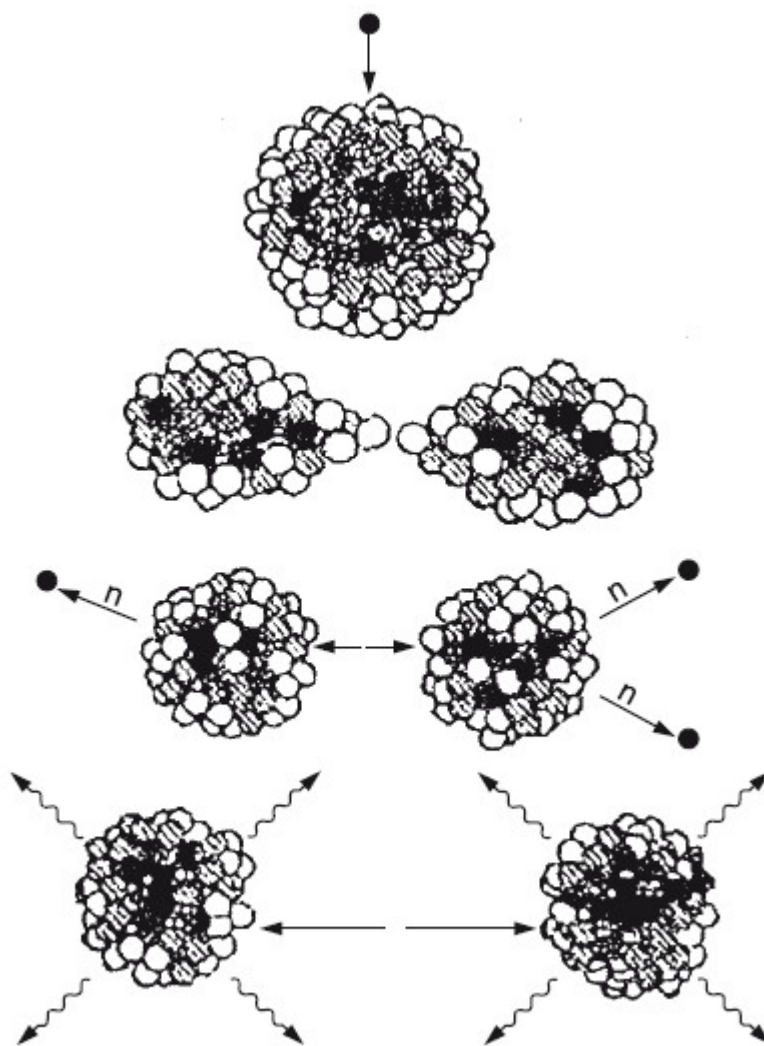


Рис. 4. Деление ядер

После акта деления ядер рожденные при этом осколки, будучи нестабильными, претерпевают ряд последовательных радиоактивных превращений и с некоторым запаздыванием испускают «запаздывающие» нейтроны, большое число α -, β - и γ -излучений. С другой стороны, некоторые осколки обладают способностью интенсивно поглощать нейтроны.

Разветвления реакций деления тяжелых ядер нейтронами, в результате которых число последних возрастает и может возникнуть самоподдерживающийся процесс деления, получили название *цепных ядерных реакций*. Выделяющаяся при этом огромная энергия как раз и является тем мощным источником, который широко используется в атомной энергетике.

Энергия деления тяжелого ядра (примерно 200 МэВ) состоит из кинетической энергии пары разлетающихся осколков деления (165 МэВ), мгновенных нейтронов деления (5 МэВ), энергии мгновенных γ -квантов (7 МэВ), энергии нейтрино (10 МэВ), энергии β -распада осколков деления (16 МэВ), энергии запаздывающего γ -излучения (6 МэВ).

Ядерный реактор – это устройство, в котором осуществляется управляемая цепная реакция деления ядер атомов тяжелых элементов.

Основы радиационной дозиметрии и единицы γ -радиоактивности

Количественной характеристикой радиоактивного препарата является его активность. *Активностью называется мера количества радиоактивного вещества, выражаемая числом радиоактивных превращений в единицу времени.*

За единицу активности в системе СИ принята активность препарата, в котором происходит 1 распад в 1 секунду. Эта единица называется *беккерелем* (Бк) по имени французского ученого А. Беккереля, открывшего в 1896 г., что уран самопроизвольно испускает невидимые лучи. Это явление было названо *радиоактивностью* ($1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}$). Используются также: единица в 1 тыс. раз большая – *килобеккерель* (кБк), единица в 1 млн раз большая – *мегабеккерель* (МБк).

В настоящее время еще используется устаревшая единица – *кюри* (Ки). Ее происхождение относится к тому периоду, когда в распоряжении ученых был единственный радиоактивный источник – *радий*, впервые выделенный из продуктов распада урана в лаборатории супругов Кюри. В 1 г чистого радия распадается каждую секунду 37 млрд ядер. Поэтому радиоактивность 1 г радия и была принята за единицу; один кюри – очень большая величина, поэтому применяются производные величины в тысячу и миллион раз меньшие – *милликюри* (мКи) и *микрокюри* (мкКи).

Зная радиоактивность в беккерелях, нетрудно перейти к активности в кюри и наоборот:

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

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

$$1 \text{ мкКи} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ кБк}.$$

Производными единицами являются:

$$1 \text{ пКи} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ки};$$

$$1 \text{ нКи} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ки};$$

$$1 \text{ мкКи} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ки};$$

$$1 \text{ мКи} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ки};$$

$$1 \text{ кКи} = 1 \cdot 10^3 \text{ Ки};$$

$$1 \text{ МКи} = 1 \cdot 10^6 \text{ Ки}.$$

Дозы облучения

Излучение и ионизация. По масштабам времени α -, β -частицы и γ -кванты существуют мгновение. Как они пропадают и куда девается их огромная энергия? Согласно закону сохранения энергии, она не возникает и не исчезает, она лишь переходит из одной формы в другую. При любых превращениях часть ее теряется в виде тепла. Энергия излучений передается веществу, в которое попала излученная из ядра элементарная частица или γ -квант. Для облученного вещества это не проходит бесследно:

- нарушаются кристаллические решетки;
- образуются отрицательные и положительные заряды;
- разрываются молекулы с наименее прочными связями.

Характерно, что α - и β -частицы растрачивают свою энергию в отдельных актах ионизации – образовании пар ионов заряженных частиц, на которые распадаются атомы. На каждую ионизацию требуется около 30 эВ. Можно подсчитать, что частица с энергией 600 КэВ на своем пути в воздухе способна создать примерно 20 тыс. пар ионов.

Радиационный эффект и дозы. В одной из своих лекций А. Беккерель заявил, что очень любит радий, но на него в обиде, так как на руках у ученого появились незаживающие язвы. Как видно, первые опыты с радиоактивными веществами были небезопасны. Не знали об опасности невидимых лучей М. Кюри и ее дочь Ирен, выделившие в чистом виде радий и полоний. Обе умерли от лейкоза. Большое количество рака легких отмечалось у шахтеров, добывающих уран. Работницы часовых заводов, раскрашивающие циферблаты часов люминесцентной краской, содержащей радий, смачивали кисточки во рту для придания им окончательной формы. Как следствие, работницы часто болели лейкозом и раком костей.

Проведенные исследования позволили установить, что факторов для неблагоприятного радиационного воздействия множество:

- радиоактивность снаружи и внутри организма;
- пути ее поступления;
- вид и энергия излучения при распаде;
- биологическая роль органов и облучаемых тканей.

Показателем, связующим их, является количество поглощенной энергии излучения от ионизации, которую энергия производит в рассматриваемой массе вещества. Данная величина называется *дозой*.

Экспозиционная доза и ее мощность. Экспозиционная доза – это поле радиации воздуха вокруг объекта, что указывает на количественную оценку радиационной обстановки дозы излучения в воздухе. Поскольку человеческое тело имеет линейные размеры, сравнимые с пробегом частиц, необходимо учитывать пространственное распределение экспозиционной дозы каким-либо физическим методом. Оказалось, что эффективные атомные номера воздуха и мягких тканей практически совпадают. Это позволило, измеряя ионизационный эффект, производимый радиационным излучением в воздухе, оценивать ионизацию в мягкой ткани, помещенной в ту же зону излучения.

Человек может находиться на местности, загрязненной разными радионуклидами. Короткопробежные α -частицы поглощаются нижней поверхностью обуви, одежды, не затрагивая жизненно важных органов. Учитывая проникающую способность β -излучения, большая часть его поглотится одеждой и кожей. Облучение организма γ -квантами и рентгеновскими излучениями будет равномерным. Таким образом, экспозиционная доза определяется только для воздуха и только для квантового излучения (γ -кванты и рентгеновские лучи).

Единицей экспозиционной дозы в системе СИ является кулон на килограмм (Кл/кг); 1 Кл/кг – это экспозиционная доза излучения, при которой в 1 кг массы сухого воздуха при нормальных условиях создаются ионы, несущие заряд в 1 Кл (каждого знака).

В медицинской практике используется внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген; 1 Р = 1000 мР или 1 000 000 мкР. Это такая доза рентгеновского или γ -излучения, которая в результате своего ионизирующего воздействия образует $2 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см³ чистого сухого воздуха при нормальных условиях.

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

$$1 \text{ Кл/кг} \approx 3880 \text{ Р}.$$

Уровень радиации может изменяться, поэтому для количественной характеристики излучения введено понятие *мощности экспозиционной дозы*, которую определяют как величину дозы за определенный промежуток времени (Р/ч, мР/ч, мкР/ч). В системе СИ мощность экспозиционной дозы выражают в амперах, деленных на килограмм (А/кг). Экспозиционная доза и ее мощность используются только для измерения степени ионизации воздуха.

В случае, когда воздух загрязнен одновременно α -, β - и γ -излучением (выпадение радиоактивных осадков после взрыва или аварии), можно воспользоваться единицами концентрации радиоактивности, например Бк/м³ воздуха, а для мощности экспозиционной радиации во внешней среде применяют Бк/(м³ с) или Бк/(кг воздуха • с).

Поглощенная доза и ее мощность. В настоящее время используются новые мощные источники излучений. Кроме рентгеновских и γ -квантов, нашли применение потоки ускоренных электронов, позитронов, тяжелых заряженных частиц, а также потоки нейтронов. Поэтому необходимо знать поглощенную энергию в различных средах. При расчете дозы, полученной человеком, необходимо учитывать как внешнее, так и внутреннее облучение, так как радионуклиды могут попадать в организм с пищей, водой, вдыхаемым воздухом, при некоторых диагностических процедурах. Значит, поражающее действие будет от трех излучений, которые вызвали ионизацию в организме.

Поглощенной дозой называют энергию излучения, переданную массе вещества, т. е. количество энергии, поглощенное единицей массы облучаемого вещества. Единицей поглощенной дозы в системе СИ служит грей (Гр); 1 Гр = 1 Дж/кг; 1 грей – это доза, при поглощении которой 1 кг вещества получает 1 Дж энергии. Внесистемной единицей измерения энергии является 1 рад (1 рад = 10^{-2} Гр, 1 Гр = 100 рад).

В воздухе и в мягких тканях организма человека одинаковая мощность экспозиционной дозы рентгеновского или γ -излучения (с энергией не более 3 МэВ) создает примерно одинаковое число ионов в 1 см³. Поэтому можно оценивать поглощение энергии мягкими тканями не по поглощенной дозе, а по мощности экспозиционной дозы.

Поглощенная доза в 1 рад примерно соответствует 1 Р или, точнее, 1 Р = 0,88 рад. Мощностью поглощенной дозы называется отношение поглощенной дозы ко времени.

Поглощенную дозу можно экспериментально установить в любом объекте. В человеческом организме это сделать трудно. Для этого нужны эквивалентные дозиметры с детекторами, по составу подобные органической ткани, которые размещают в полостях тела.

В настоящее время в лучевой терапии при локальном облучении используют понятие *интегральной дозы*. Это энергия, суммарно поглощенная во всем объеме объекта. Интегральная доза измеряется в джоулях, так как ее единица – 1 Гр кг = 1 Дж.

Эквивалентная доза и ее мощность. При одной и той же поглощенной дозе α -, β - и γ -излучение оказывают неодинаковое поражающее действие, что объясняется их различной ионизирующей способностью. Более тяжелая частица (например, протон) производит

на единице пути в ткани больше ионов, чем легкая (например, электрон). При одной и той же дозе D радиобиологический эффект тем выше, чем плотнее ионизация, создаваемая излучением. Чтобы учесть этот эффект, вводят понятие *эквивалентной дозы* (H). Она определяется соотношением $H = K \cdot D$, где K — коэффициент качества, или коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ); D — поглощенная доза.

Для рентгеновского, β - и β -излучения $K = 1$; для тепловых нейтронов $K = 5$; для быстрых нейтронов $K = 10$; для протонов $K = 10$, для α -частиц $K = 20$.

Единицей измерения H в системе СИ является зиверт (Зв):

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр } K.$$

Используются также производные единицы: в 1 тыс. раз меньшая — миллизиверт (мЗв), в 1 млн — микрозиверт (мкЗв). Внесистемной единицей эквивалентной дозы H служит БЭР — биологический эквивалент рада; $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$; $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$.

Если известна поглощенная доза D в радах, то ее умножение на коэффициент качества дает эквивалентную дозу H в бэрах. Мощность эквивалентной дозы измеряется в зивертах в час (Зв/ч), миллизивертах в час (мЗв/ч), микрозивертах в час (мкЗв/ч).

Эффективная эквивалентная доза. Эквивалентная доза рассчитывается для «средней» ткани человеческого организма. При лучевой терапии злокачественных опухолей приходится рассчитывать дозу облучения отдельных органов. Важно не только попадание радиации в организм человека, но и то, какой орган при этом поражается.

Органы и ткани человеческого организма по отношению к ионизирующим излучениям имеют разную радиочувствительность. Учет радиочувствительности производят с помощью коэффициентов радиационного риска (КР). Выделяют четыре группы критических органов, для которых устанавливаются предельно допустимые дозы облучения: все тело; все органы (кроме гонад и красного костного мозга); кости; конечности. Сильнее всего поражаются красный костный мозг, яичники, семенники как ткани и органы, осуществляющие эритро- и лейкопоэз, спермато- и овогенез.

Рассматривая предлагаемые учеными КР, находим, что облучение щитовидной железы дозой 13 в приведет к такому же поражению организма, как и облучение дозой 0,03 Зв всего организма в целом.

Это важно, так как, например, при лучевой терапии, при поступлении радиоактивности с пищей, водой, вдыхаемым воздухом с последующим накоплением в определенных органах, для которых определены КР, можно вычислить эффективную эквивалентную дозу, полученную человеком, а также сделать прогноз дальнейшего лечения.

Ожидаемая доза. Значительное количество людей вынуждены жить в условиях с повышенным радиоактивным фоном.

В этой связи необходимо предвидеть, какую дозу облучения получит организм за предстоящий год, десять лет, в течение всей жизни. Это позволит оценить вероятность последствий и принять меры защиты.

Расчет ожидаемой дозы требует высокой квалификации специалиста. В данном случае необходимо учитывать:

- периоды полураспада радионуклидов и их долю в общей радиоактивности;
- способность радионуклидов накапливаться в органах и тканях и выводиться из организма;
- особенности рациона питания и уровень загрязненности продуктов;
- долю внешнего облучения и много других факторов.

Естественные источники радиации

К естественным источникам радиации относятся:

- космическая радиация (лучи, падающие на Землю из космоса);
- земная радиация (радиоактивные элементы, содержащиеся в земных породах, строительных материалах, пище).

Радионуклиды естественного происхождения присутствуют в литосфере, гидросфере и атмосфере. Все естественные источники могут вызывать у человека внешнее и внутреннее облучение. Источники радиации, рассеянные в земной коре, всегда существовали на Земле и играли важную роль в эволюции флоры и фауны.

Среди внешних источников особого внимания заслуживают космические лучи и естественная радиация, находящаяся в почве и строительных материалах. Внутреннее облучение человек получает из воздуха, воды и продуктов питания.

Биосферная радиация

Радиоактивные элементы земных пород. Большую часть облучения, которому подвергается человек за счет естественной радиации, составляют *биосферные* источники. Они дают в среднем 5/6 годовой эффективной эквивалентной дозы, получаемой населением, в основном вследствие внутреннего облучения.

Биосферную радиацию создают радиоактивные элементы, содержащиеся в земных породах, природном газе, строительных материалах, продуктах питания, воде и воздухе. Некоторые основные радиоактивные изотопы биосферы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные радиоактивные изотопы биосферы

Радионуклид	Период полураспада, годы	Удельная активность, Бк/кг
^3H	12,3	$3,57 \cdot 10^{17}$
^{14}C	5730	$1,56 \cdot 10^{14}$
^{32}P	14,3 сут	$1,05 \cdot 10^{19}$
^{226}Ra	1620	$3,65 \cdot 10^4$
^{232}Th	$1,41 \cdot 10^{10}$	$4,03 \cdot 10^6$
Ac U(^{235}U)	$7,1 \cdot 10^8$	$7,92 \cdot 10^7$
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$	$1,23 \cdot 10^7$
^{239}Pu	$2,44 \cdot 10^4$	$2,27 \cdot 10^{12}$

Главным источником поступления в биосферу естественных радиоактивных веществ являются горные породы, в состав которых входят радиоактивные элементы, появившиеся в период формирования планеты и почвы. В результате деструктивных процессов метеорологического, гидрологического, геохимического и вулканического характера радиоактивные вещества подвергаются широкому рассеиванию. Поэтому количество радиоактивных элементов, содержащихся во внешней среде, зависит от горных пород, их вида и местонахождения.

Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) приводит средние концентрации ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в различных видах пород. Например, в граните средняя концентрация ^{40}K – 1200, ^{226}Ra – 100, ^{232}Th – 80 Бк/кг. В процессах миграции и круговорота радиоизотопов значительное место занимает растительный и животный мир.

Некоторые из изотопов (^{40}K , ^{14}C , ^3H) находятся в смеси со стабильными изотопами элементов, активно участвующими в обмене веществ и обеспечивающими функционирование всех органов и систем живой материи. Содержание их в организме зависит от степени накопления стабильных изотопов.

Содержание других радиоизотопов в организме (^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po) зависит от содержания их в окружающей среде. Например, в золе растений, выращенных на обычных почвах, содержится в среднем $3 \cdot 10^{-4}$ г/кг урана, а в золе растений, произрастающих на обогащенных ураном почвах, – $2 \cdot 10^{-3}$ г/кг.

Калий-40. Среди изотопов главное место по величине активности занимает изотоп калия – ^{40}K , который усваивается вместе с нерадиоактивными изотопами калия, необходи-

мыми для жизнедеятельности организма. Количество калия в растениях, по сравнению с его содержанием в земной коре, меньше в 3—10 раз. В организме животных его еще меньше (в 10–15 раз по сравнению с содержанием калия в породах).

Данные о содержании калия в некоторых продуктах и их удельная активность по ^{40}K представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Содержание калия в некоторых пищевых продуктах и их удельная активность по калию-40

Продукт	Содержание калия, %	Удельная активность, Бк/кг (10^{-9} Ки/кг)
Пшеница	0,5	150 (4,0)
Горох	0,9	274 (7,4)
Картофель	0,45	130 (3,5)
Говядина	0,37	84 (2,3)
Рыба	0,26	77 (2,1)
Молоко коровье	0,14	44 (1,2)

Суммарное содержание калия в организме взрослого человека (масса 70 кг) составляет 0,19 % 130 г). Особенно богаты калием органы и ткани, обладающие высокой функциональной активностью, – скелетная мускулатура, сердце, нервная ткань и др. Содержание стабильного калия и калия-40 в организме человека зависит от пола, возраста, массы тела, характера мышечной деятельности. У мужчин в мышцах калия обычно больше, чем у женщин. При старении уровень калия в тканях снижается.

Углерод-14. Общее содержание углерода в теле взрослого человека составляет в среднем 18 % т. е. около 12,6 кг. Углерод равномерно распределяется в тканях, следует считать, что их удельная радиоактивность по ^{14}C составляет 52 Бк/кг.

Тритий — ^3H . Количество трития составляет 10,2 % в мышцах и 6,4 % – в костях. Удельная активность в мягких тканях тела человека за счет ^3H составляет 0,55 Бк/кг, а в костях – 0,34 Бк/кг.

Свинец — ^{210}Pb . Основная часть свинца содержится в скелете. Удельная активность в костной ткани составляет 15 Бк/кг, а в мягких тканях – 6,4 Бк/кг.

Полоний — ^{210}Po . В течение суток из воздуха в легкие человека поступает около 0,0007 Бк/кг ^{210}Po , а у выкурившего 1 пачку сигарет в сутки – до 0,07 Бк/кг.

Содержание урана в организме невелико, на долю тория и его α -активных дочерних продуктов приходится до 40 % суммарной α -активности тела человека.

На накопление радиоактивности отдельными органами и тканями тела человека влияет:

- скорость обменных процессов в организме;
- функциональное состояние организма;
- содержание радиоизотопов в рационе питания, воде и вдыхаемом воздухе.

Поступление с рационом питания определенного количества радионуклидов должно уравнивать выведение их из организма.

Нарушение равновесия между поступлением и выведением, т. е. увеличение радионуклидов в рационе, может проявляться патологией из-за избыточного облучения.

Строительные материалы. Материалы, применяемые в строительстве (кирпич, бетон, дерево, шлак), могут содержать радиоактивные вещества. В табл. 3 приводятся данные (НКДАР) об удельной активности некоторых радионуклидов в строительных материалах.

Таблица 3.

Удельная активность естественных радионуклидов некоторых строительных материалов

Строительный материал	Страна	Средняя концентрация, Бк/кг		
		^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
Кирпич	Германия	330	280	230
Бетон, содержащий глиняные сланцы	Швеция	850	1500	70
Фосфогипс	Великобритания	70	800	20
Шлак силикатного кальция	США	—	1300	—
Шлак из доменной печи	СНГ	240	70	20

Определенный интерес представляют уровни γ -фона в жилых зданиях. Например, наименьший γ -фон в зданиях, построенных из дерева и известняка, – до 0,5 мЗв/г; в кирпичных и железобетонных зданиях – соответственно, до 1 и 1,7 мЗв/г.

Здания, с одной стороны, экранируют человека от внешних излучений, с другой – увеличивают дозы в зависимости от содержания естественных радионуклидов в строительных материалах. Годовая эффективная эквивалентная доза за счет внешнего облучения внутри помещений с учетом времени пребывания человека в помещениях составляет $2,9 \cdot 10^{-9}$ Зв, а суммарная (вне и внутри помещения) годовая эффективная эквивалентная доза за счет внешнего облучения радионуклидами земного происхождения равна $3,5 \cdot 10^{-4}$ Зв.

Промежуточный радиоизотоп в рядах урана и тория – радон. Значительную дозу облучения человек получает с вдыхаемым воздухом, находясь длительное время в непроветриваемых помещениях. Радон – газ, не имеющий вкуса и запаха, – один из промежуточных радиоизотопов в рядах урана (U) и тория (Th). Если распад урана и тория происходит не в монолитной, а в размельченной породе, он вытекает в атмосферу. Переносясь воздушными потоками, радон продолжает распадаться, образуя дочерние радиоизотопы.

Среди изотопов радона известны ^{222}Rn с периодом полураспада 3,82 дня, ^{220}Rn с периодом полураспада 54,5 с. Наиболее опасен для человека ^{222}Rn , α -излучатель. При вдыхании с воздухом он вызывает внутреннее облучение легких. Таким образом, если радон не жестко связан с материнскими ядрами урана и тория, его можно рассматривать как самостоятельный источник радиоактивности.

Просачиваясь из грунта или материалов строительства дома, радон скапливается в закрытых непрветриваемых помещениях (подвалы, ванне комнаты, кухни и т. д.). Много радона содержится в таких строительных материалах, как пемза, гранит, шлак, сухая штукатурка, строительные блоки, изготовленные из фосфогипса, красный кирпич, полученный из отходов производства алюминия, доменные шлаки.

Концентрация радона на первом и цокольном этажах высокая, на верхних этажах – ниже. Эффективным средством уменьшения высоких концентраций радона, просачивающегося через пол, являются вентиляционные установки в подвалах. Выделение радона из стен уменьшается при покрытии их тремя слоями масляной краски или слоем обоев, облицовки их пластиковыми материалами.

В кухонные помещения радон проникает с природным газом. Его накопление можно уменьшить с помощью местной вытяжной вентиляции, проветривания кухни. Содержание его в природном газе уменьшается при переработке последнего на газонаполнительных станциях и в процессе хранения. Количество радона уменьшается в природном газе при увеличении пути от станции до потребителя.

Пресная минеральная вода нередко обогащена радоном. Вода частных и общественных колодцев может содержать от 740 Бк/м^3 и достигать нередко $37 \cdot 10^3 \text{ Бк/м}^3$. Много радона в воде глубоких скважин и некоторых минеральных источниках, меньше – в воде рек и озер.

В незначительных дозах радон оказывает стимулирующее действие на организм, а в больших – угнетающее. При приготовлении пищи или кипяченой воды присутствующий радон в значительной степени улетучивается. Поступивший в организм радон сравнительно быстро выводится.

Значительную опасность для человека представляет попадание паров воды с высоким содержанием радона в легкие с вдыхаемым воздухом. Это чаще происходит в ванной комнате, а также при приеме радоновых ванн. Обследование домов в Финляндии показало, что концентрация радона в ванной комнате была в 40 раз выше, чем в жилых помещениях.

Выделяющийся радон из почвы, воды, строительных материалов рассеивается в воздухе. Дочерние продукты радона, как правило, в виде положительных ионов, присоединяются к составным элементам и аэрозольным частицам воздуха, которые осаждаются в дыхательных путях. Поэтому содержание радона в легких на 20–40 % выше, чем в других тканях.

Радиоизотоп радона ^{220}Rn – торан (дочерний продукт тория) тоже существенно влияет на естественный фон Земли. Правда, его концентрация в природе незначительна по сравнению с концентрацией дочерних продуктов радона. При плохой естественной и искусственной вентиляции жилых и административных зданий, корпусов фабрик и заводов концентрация радона, торана и дочерних продуктов может увеличиваться до 740 Бк/м^3 . Безусловно, человек, находясь в таких помещениях, подвергается значительному облучению.

Зависимость уровня земной радиации от вида почв и климатических факторов.

Почва – верхние слои земной коры, преобразованные под совокупным влиянием тепла, воды, воздуха, растительных и животных организмов, микроорганизмов и деятельности человека. Количество радиоактивных элементов, содержащихся в почвах, в значительной мере определяется концентрацией радиоактивных веществ в материнской породе, т. е. в гранитных породах гор. Почвы, возникшие из продуктов кислых магматических пород, содержат относительно большое количество урана, радия, тория, калия по сравнению с почвами, образованными из ультраосновных и основных пород. Глинистые почвы обычно богаче радиоактивными элементами, чем песчаные.

Радиоактивные газы, возникающие из дочерних продуктов урана, тория, поступают в атмосферный воздух. Скорость их поступления зависит от многих причин:

- от изменения барометрического давления (снижения);

- диффузии почвенных газов в сторону убывающей концентрации;
- нагревания земной поверхности, способствующего конвенции воздушных потоков;
- глубины промерзания почвы и толщины снегового покрова.

В приземном слое воздуха концентрация радиоактивных газов самая высокая. Скорость поступления радона и торана в атмосферный воздух зависит от состояния почвы, ее пористости, температуры, влажности. Снежный покров толщиной 0,5 м на 80 % экранирует земную радиацию. Повышение атмосферного давления уменьшает эмиссию газов из почвы. В летний период, при нагревании почвы выше атмосферного воздуха, выделение радона увеличивается в результате конвенции.

Его концентрация в воздухе континентальных мест равна примерно $2 \cdot 10^3$ Бк/м³, в прибрежных районах и на островах – 20 Бк/м³, а над океанами и в арктических областях – 2 Бк/м³.

Концентрация зависит от скорости ветра и температуры.

В некоторых районах мира мощность дозы естественного радиационного фона значительно выше той, которую испытывает большинство населения планеты. Особенно увеличен уровень радиации, исходящей из почвы и гор, например в районах Памира и Тибета, где отмечается высокое содержание урана и тория в породах вулканического происхождения. Неподалеку от города Посус-ди-Калдас в Бразилии есть небольшая возвышенность, на которой уровень радиации в 800 раз превосходит средний (0,3 Зв/кг). Во Франции примерно 1/6 часть населения живет в районах, где скалы состоят из гранита и радиационный фон составляет 1,8–3,5 Зв/кг. В Индии около 100 тыс. людей получают дозу, равную 13 Зв/кг. Это самый высокий уровень естественного радиационного фона, которому подвержен человек.

Космическая радиация

Космические излучения имеют 3 источника своего происхождения:

- галактическая радиация;
- радиационные пояса Земли;
- солнечная радиация.

Галактическая радиация. Галактическая радиация поступает из межзвездного пространства, из глубин космоса. Астронавты, наблюдавшие галактическую радиацию, описывали ее в виде светящихся облаков, звезд, мельчайших полосок. Видеть ее можно было даже в полной темноте с закрытыми глазами вследствие прохождения частиц сквозь веко и непосредственного воздействия на сетчатку. Такие частицы проходят сквозь корабль и тело. Они обладают очень высокой энергией, большой массой и крупными размерами.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.