

1 ВИДЫ И ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Вводные пояснения

Атомы всех химических элементов, входящих в периодическую систему, состоят из *электронов, протонов и нейтронов*. Элементы отличаются друг от друга только числом и расположением этих частиц. В начале XX века было выдвинуто несколько теорий строения атома, с помощью которых ученые пытались объяснить различные физические свойства. В 1911 году английский физик Эрнест Резерфорд предложил планетарную модель атома, которая получила развитие в трудах датского физика Нильса Бора (1913 г.). Согласно этой модели атом похож на Солнечную систему в миниатюре: вокруг крошечного ядра движутся по орбитам «планеты» – электроны. Размеры ядра в сто тысяч раз меньше размеров самого атома, но плотность его очень велика, поскольку масса ядра почти равна массе всего атома. Ядро, как правило, состоит из нескольких более мелких частиц, которые плотно сцеплены друг с другом (рис. 1).

Некоторые из этих частиц имеют положительный заряд и называются *протонами*. Число протонов в ядре и определяет, к какому химическому элементу относится данный атом: ядро атома водорода содержит всего один протон, атома кислорода – 8, урана – 92. В каждом атоме число электронов в точности равно числу протонов в ядре; каждый электрон несет отрицательный заряд, равный по абсолютной величине заряду протона, так что в целом атом электрически нейтрален.

В ядре, как правило, присутствуют и частицы другого типа, называемые *нейтронами*, поскольку они электрически нейтральны. Ядра атомов одного и того же элемента всегда содержат одно и то же число протонов, но число нейтронов в них может быть разным. Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающиеся по числу нейтронов, относятся к разным разновидностям одного и того же химического элемента, называемым *изотопами* данного элемента. Их обозначают, приписывая к символу элемента число, равное сумме всех частиц в ядре данного изотопа. Так, уран-238 содержит 92 протона и 146 нейтронов; в уране-235 тоже 92 протона, но 143 нейтрона.

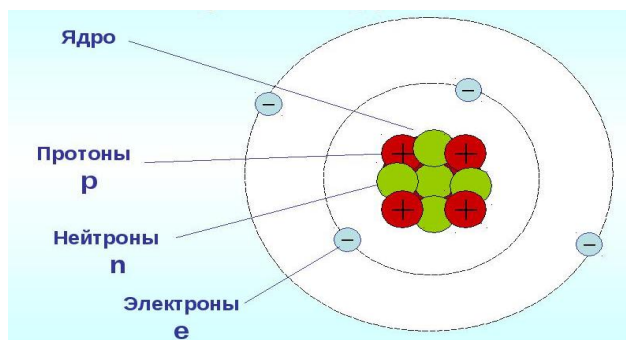


Рисунок 1 – Строение атома

Другими словами, **изотопы** – это разновидности атомов одного и того же элемента, в ядрах которых содержится разное число нейтронов. Следовательно, **атомы** данного химического элемента – это **нуклиды** с одинаковым зарядом ядра (**атомным номером**). Атомы с большой атомной массой являются неустойчивыми, они способны самопроизвольно превращаться в другие нуклиды – это явление получило название радиоактивности. При самопроизвольном распаде радионуклидов испускается ионизирующее излучение, которое, воздействуя на вещество, в том числе живое, приводит к его ионизации (образованию ионов разных знаков).

Выделяют ниже следующие виды ионизирующего излучения.

Непосредственно ионизирующее излучение – заряженные частицы, кинетическая энергия которых достаточна для ионизации среды. Например, α - и β -излучение.

Альфа-излучение – представляет собой ядра гелия, которые испускаются при радиоактивном распаде элементов тяжелее свинца или образуются в ядерных реакциях.

Бета-излучение – это электроны или позитроны, которые образуются при бета-распаде атомных ядер или частиц от самых легких (нейтрон) до самых тяжелых.

Космическое излучение. Приходит на Землю из космоса. В его состав входят преимущественно протоны и ядра гелия. Более тяжелые элементы составляют менее 1 %. Проникая вглубь атмосферы, космическое излучение взаимодействует с ядрами, входящими в состав атмосферы, и образует потоки вторичных частиц (мезоны, гамма-кванты, нейтроны и др.).

К косвенно ионизирующему излучению относят незаряженные частицы, при взаимодействии которых со средой образуется непосредственно ионизирующее излучение. Например,

нейтроны, образующиеся в ядерных реакциях (в ядерных реакторах и в других промышленных и исследовательских установках, а также при ядерных взрывах); фотоны – кванты электромагнитного излучения. Различают также рентгеновское излучение – излучение рентгеновских трубок и характеристическое излучение возбужденных атомов; *γ-излучение* – излучение возбужденных атомных ядер; тормозное излучение получают на ускорителях электронов.

Необходимость количественной и качественной оценки действия ионизирующего излучения на организм человека и животных, проведения контроля качества продуктов питания, воды, состояния территории, обеспечения работы с радиоактивными материалами способствовали развитию *дозиметрии и радиометрии*. Это разделы ядерной физики, которые разрабатывают теоретические и прикладные вопросы измерения и идентификации ионизирующих излучений. Величина, используемая для оценки степени воздействия [ионизирующего излучения](#) на любые вещества, живые организмы и их ткани получила название *дозы облучения*.

Дозу организм может получить от любого радионуклида или их смеси независимо от того, находятся ли они вне организма или внутри его (в результате попадания с пищей, водой или воздухом). Дозы можно рассчитывать по-разному, с учетом того, каков размер облученного участка и какова его чувствительность, где он расположен, один ли человек подвергся облучению или группа людей, в течение какого времени это происходило и т.д. Поэтому выделяют ниже следующие виды доз.

Экспозиционная доза – это величина, характеризующая степень ионизации вещества. Это такое количество энергии от гамма- и рентгеновского излучения, потраченное на ионизацию одного кубического сантиметра сухого воздуха, при нормальных условиях, с образованием в этом объёме определённого числа пар ионов одинакового знака, к массе воздуха в этом объёме. Другими словами количественная сторона. Есть один кубический объём воздуха. На него воздействовало жёсткое гамма- или рентгеновское излучение, в результате чего в нем образовалось некоторое количество ионов с одним знаком. То есть, тут доза представлена, как ущерб воздуху в образовавшихся ионах. В системе СИ для измерения экспозиционной дозы используется – Кулон/кг (Кл/кг),

а внесистемной единицей является рентген (Р). Соотношение этих единиц представлено в таблице 1.

Таблица 1 – 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	кюри (Ci, Ки)	беккерель (Bq, Бк)	$1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Экспозиционная доза излучения	рентген (R, Р)	кулон/килограмм (C/kg, Кл/кг)	$1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Поглощённая доза излучения	рад (rad, рад)	грей (Gy, Гр) = Дж/кг	$1 \text{ рад} = 0.01 \text{ Гр}$
Эквивалентная доза излучения	бэр (rem, бэр)	зиверт (Sv, Зв)	$1 \text{ бэр} = 0.01 \text{ Зв}$
Мощность экспозиционной дозы излучения	рентген в секунду (R/s, Р/с)	ампер/килограмм (A/kg, А/кг)	$1 \text{ Р/с} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$
Мощность поглощённой дозы излучения	рад в секунду (rad/s, рад/с)	грей в секунду (Gy/s, Гр/с)	$1 \text{ рад/с} = 0.01 \text{ Гр/с}$
Мощность эквивалентной дозы излучения	бэр в секунду (rem/s, бэр/с)	зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с)	$1 \text{ бэр/с} = 0.01 \text{ Зв/с}$
Интегральная доза излучения	рад-грамм (rad·g, рад·г)	грей-килограмм (Gy · kg, Гр · кг)	$1 \text{ рад} \cdot \text{г} = 10^{-5} \text{ Гр} \cdot \text{кг}$

Поглощенная доза – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы.

Эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения

повреждать ткани организма.

Эффективная эквивалентная доза – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению.

Коллективная эффективная эквивалентная доза – эффективная эквивалентная доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации

Полная коллективная эффективная эквивалентная доза – коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получают поколения людей от какого-либо источника за все время его дальнейшего существования.

Таким образом, можно заметить, что все виды доз облучения измеряются своими единицами, как системными, так и несистемными, что представлено в таблице 1, могут быть вычислены одна из другой с использованием определенных коэффициентов. Например, использование единицы поглощенной дозы рад не исключает измерение излучения в рентгенах, так как 1Р эквивалентен 0,88 рад. Для мягких тканей $1Р = 0,95$ рад. Как видно из последнего соотношения, экспозиционная и поглощенная дозы, выраженные во внесистемных единицах численно практически равны (разница составляет всего 5 %). Данное обстоятельство отчасти оправдывает использование внесистемной единицы рентгена. Зная коэффициенты биологического действия ионизирующих излучений на живой организм (таблица 2) и поглощенную дозу, можно определить эквивалентную (биологическую) дозу облучения.

В свою очередь, из эквивалентной дозы можно получить эффективную, используя данные рисунка 2.

Мощность дозы – это доза, отнесённая к единице времени, или количество энергии гамма-излучения в единицу времени. Другими словами, мера воздействия. Приращение дозы ко времени. Например, чем больше мощность экспозиционной дозы, тем большую дозу получит воздух за то же самое время. Зная мощность дозы, легко определить дозу за известный промежуток времени.

Таблица 2 – Значение коэффициента биологического действия разных видов излучения

Вид излучения	Коэффициент, Зв/Гр
---------------	-----------------------

Рентгеновское и γ -излучение	1
Электроны, позитроны, β -излучение	1
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1 – 10,0 МэВ	10
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
α -излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи	20

Органы человека

Гонады (половые железы)

Красный костный мозг

Толстый кишечник

Желудок

Легкие

Мочевой пузырь

Печень

Пищевод

Щитовидная железа

Кожа

Клетки костных поверхностей

Головной мозг

Остальные ткани

Организм в целом

Коэффициент

0,2

0,12

0,12

0,12

0,12

0,05

0,05

0,05

0,05

0,01

0,01

0,025

0,05

1

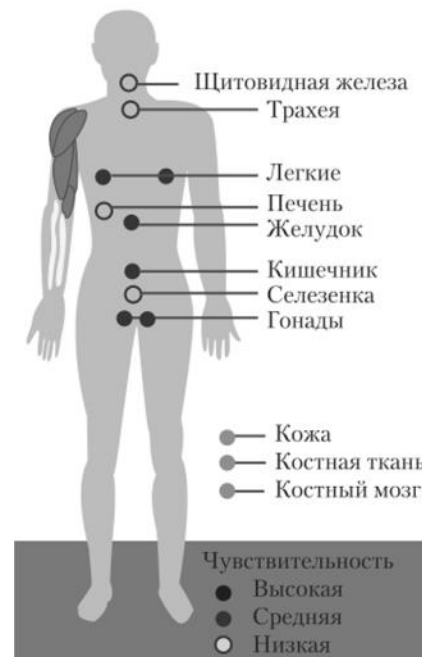


Рисунок 2 – Коэффициенты радиационного риска для разных тканей (органов) человека при равномерном облучении всего тела

Интегральная доза излучения – количество энергии, поглощенной в облучаемом объеме. Интегральная доза измеряется в джоулях, так как ее единица – «грей на килограмм» ($1 \text{ Гр} \cdot \text{кг} = 1 \text{ Дж}$).

Порядок выполнения заданий

Рассмотрим пример решения задачи по определению общей поглощенной, эквивалентной и эффективной дозы.

Задача 1. Определить общую поглощенную, эквивалентную и эффективную эквивалентную дозу облучения организма в целом за год, ткани и органы которого были однократно равномерно

облучены разными видами радиоактивных излучений, если дозы составили: от γ -излучения – 2 рад, β -излучения – 2 Р, α -излучения – 0,1 Гр?

Решение.

1. Переводим все используемые единицы измерения разных видов излучения к одному (используемые единицы должны быть одинаковыми). Например, если использовать единицу поглощенной дозы Грей (Гр), то доза от γ -излучения составит 0,02 Гр (таблица 1), β -излучения – $2\text{Р} \times 0,88 = 1,76 \text{ рад} = 0,0176 \text{ Гр}$. Общая поглощенная доза составит: $D_n = 0,02 + 0,0176 + 0,1 = 0,1376 \text{ Гр}$ или 13,76 рад.

2. Используя коэффициенты из таблицы 2, определяем эквивалентную дозу, полученную организмом от этого источника: $D_э = 0,02 \times 1 + 0,0176 \times 1 + 0,1 \times 20 = 2,0376 \text{ Зв}$. Обратите внимание, что, так как единицы поглощенной дозы мы использовали в греях, поэтому единицы эквивалентной дозы получили в зивертах. Если бы мы использовали рады, то получили бы бэры.

3. Соответственно исходным данным, организм облучен равномерно, поэтому по рисунку 2 для организма в целом коэффициент равен 1. Следовательно, эффективная эквивалентная доза будет равна: $D_{эф} = 2,0376 \times 1 = 2,0376 \text{ Зв}$ или 203,76 бэр. Если бы по условию задачи организм облучался неравномерно, то эффективная эквивалентная доза определялась бы как сумма произведений эквивалентных доз, полученных каждым органом, и соответствующими коэффициентами.

Задания

1. Зарисуйте строение атомного ядра, используя рисунок 1. Заполните таблицу 3.

Таблица 3 – Виды излучений

Вид излучения	Характеристика	Источник

2. Рассчитайте общую поглощенную и эффективную эквивалентную дозу, которую получит организм животного или человека при равномерном облучении организма от смешанных источников излучений со следующими характеристиками:

а) α -излучение – 2 рад, β -излучение – 20 рад, быстрые нейтроны – 0,1 Гр; γ -излучение – 2 Гр;

б) α -излучение – 1 Гр, β -излучение – 10 Р, медленные нейтроны

– 2 рад; γ -излучение – 100 Р;

в) α -излучение – 100 мР, β -излучение – 5 Р, γ -излучение – 10 мГр?

3. Какую дозу получит организм животного и человека за сутки, месяц и год, если он находится в зоне, где радиационный фон составляет: а) 55 мР/час; б) 38 мкР/час; в) 0,2 рад/с?

4. Какую дозу в греях получит животное весом 150 кг, если излучение идет на каждый килограмм живой массы от смешанного источника и составляет α -излучение – 1 рад, β -излучение – 10 рад, γ -излучение – 20 рад?

5. Рассчитайте эффективную эквивалентную дозу полученную организмом при облучении щитовидной железы рентгеновским излучением дозой: а) 8Р; б) 30 мГр; в) 5рад?

6. Рассчитайте эффективную эквивалентную дозу полученную организмом животного при облучении γ -излучением, если поглощенная доза для гонад составила 1,5 Р, для кожи 1 Р, для легких 2 Р?

7. Какова эквивалентная доза излучения, если животное облучали 7 часов потоком быстрых нейтронов с мощностью излучения 6 Гр/час?

8. Общая поглощенная доза составила 15000 мР. На 80 % получено от β -излучения, 10 % от γ -излучения, 5 % от α -излучения и 5 % – от быстрых нейтронов. Рассчитайте поглощенную и эквивалентную дозы для каждого вида излучения. Какой вид излучения занимает наибольшую долю в эквивалентной биологической дозе в данном случае? Ответ поясните.

9. При облучении биологической ткани потоком альфа-частиц с кинетической энергией 4,4 МэВ каждый грамм ткани получил дозу, равную 0,5 Зв. Полагая, что для альфа-частиц коэффициент биологического действия равен 20, найти число частиц, поглощенных тканью массой 1 кг?

Контрольные вопросы

1. Какие виды ионизирующих излучений существуют и чем они отличаются?

2. В чем отличие поглощенной дозы от экспозиционной дозы облучения?

3. В каких единицах измеряются эквивалентная и эффективная дозы облучения?

4. Как соотносятся системные и несистемные единицы измерения доз облучения? Чем объясняется использование разных единиц измерения?

5. Что такое мощность излучения и почему её нужно учитывать при прогнозировании полученной дозы?