

гии через элементарную площадку dS . Поглощённая D в точке внутри данного объёма:

$$D = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t} = K - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} I. \quad (1)$$

Здесь ρ — плотность вещества, $K = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathcal{E}_a}{\Delta t}$.

Если формирование D происходит за счёт электронов, возникающих в результате взаимодействия фотонов с веществом, а др. источников электронов нет, то K в (1) — начальная энергия всех электронов, освобождённых фотонами, рассчитанная на единицу массы вещества (*жерма*), I — вектор потока энергии; $D=K$ при $\operatorname{div} I=0$. Условие $\operatorname{div} I=0$ соответствует т. н. электронному равновесию, при котором энергия всех электронов, вошедших в рассматриваемый объём, равна энергии всех электронов, вышедших из него, а поглощённая энергия излучения в этом объёме равна суммарной кинетич. энергии электронов, освобождённых в его пределах фотонами (справедливо, если пренебречь потерями энергии электронов на тормозное излучение).

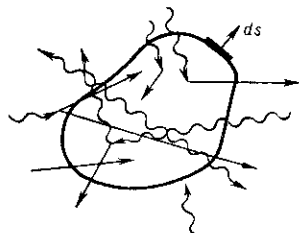


Схема преобразования энергии фотонов (волнистые линии) в энергию электронов (прямые линии).

Формирование дозы определяется физ. процессами, связанными с взаимодействием излучения с веществом. Для эл.-магн. (фотоного) излучения D зависит от атомного номера Z элементов, составляющих вещества: чем выше Z , тем больше поглощённая D . В результате при одинаковых условиях облучения D в тяжёлых веществах больше, чем в лёгких. Связано это с тем, что фотоны взаимодействуют с электронной оболочкой атомов. Чем выше Z , тем больше электронов в единице массы вещества и, следовательно, больше возникает актов передачи и поглощения энергии. Для двух веществ, различающихся по Z , D фотоного излучения D_1 и D_2 связаны между собой соотношением:

$$D_2 = \frac{\mu_{k1}}{\mu_{k2}} D_1.$$

Здесь μ_{k1} и μ_{k2} наз. коэф. передачи энергии и, являются частью коэф. ослабления интенсивности излучения, характеризующей преобразование эл.-магн. энергии в кинетич. энергию электронов в элементарных актах взаимодействия (см. *Гамма-излучение. Рентгеновское излучение*).

Нейтроны взаимодействуют с ядрами атомов. Для них поглощённая D определяется ядерным составом вещества, и характер взаимодействия с ядрами существенно зависит от энергии нейтронов. Для живой ткани поглощённая D формируется преим. в результате взаимодействия нейтронов с ядрами C , H , O и N ; ф-ла условной тканевой «молекулы» для мягких тканей живого организма имеет вид $(C_5H_{40}O_{18}N)_x$. Для тепловых нейтронов наиб. значение при формировании тканевой D имеют 2 ядерные реакции — *радиационный захват* нейтронов ядрами водорода ${}^1_0\text{H}(n, \gamma){}^2_0\text{H}$ и реакция ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$. Возникающие при радиац. захвате фотоны с энергией 2,23 МэВ дают существенный вклад в D . В реакции на N возникают протоны с энергией 0,62 МэВ и образуется радиоакт. ${}^{14}_6\text{C}$ (вклад в D к-рого незначителен). Нейтроны с энергией ~ 1 кэВ замедляются в теле человека до тепловых энергий. D , обусловленная передачей энергии в упругих взаимодействиях при замедлении нейтронов, примерно на порядок меньше, чем D , обусловленная вторичным излучением, возникающим при захвате тепловых нейтронов.

Осн. процесс, определяющий D быстрых нейтронов (0,5—10 МэВ) в живой ткани, — упругое рассеяние; при

этом на долю протонов отдачи приходится 70—80% всей поглощённой энергии. Часть быстрых нейтронов в живом организме замедляется до тепловых скоростей, поэтому суммарная D обусловлена как упругими взаимодействиями нейтронов с ядрами, так и D от тепловых нейтронов. Относит. вклад тепловых нейтронов в суммарную D невелик и уменьшается с ростом энергии первичных быстрых нейтронов. Так, для нейтронов с энергией 1 МэВ часть общей D в живом организме, связанная с тепловыми нейтронами, $\sim 11\%$. Для нейтронов промежуточных энергий (1—500 кэВ) D в живой ткани формируется как в результате упругого рассеяния, так и в результате ядерных реакций. Характерная особенность нейтронов промежуточных энергий — наличие резонансных пиков сечения взаимодействия нейтронов с ядрами нек-рых элементов ткани (см. *Нейтронная спектроскопия, Нейтронная физика*).

В случае потока заряж. частиц (электронов, α -частиц и др.) D зависит от их т. н. *линейной* передачи энергии (ЛПЭ), к-рая равна энергии заряж. частицы, переданной веществу на ед. длины её пути. Для моноэнергетич. потока заряж. частиц, ЛПЭ к-рых равна L , D за время t связана с плотностью потока частиц Φ соотношением:

$$D = L\Phi t.$$

Поглощённая D измеряется в системе СИ в *греях* (Гр), 1 Гр равен энергии в 1 Дж, поглощённой массой в 1 кг. На практике распространена внесистемная единица D — *рад*, 1 рад = 10^{-2} Дж/кг = 10^{-2} Гр.

Экспозиционная доза — мера ионизац. действия эл.-магн. излучения в воздухе. Она определяется как отношение суммарного заряда всех ионов одного знака ΣQ , созданных в воздухе вторичными частицами (электронами и позитронами, образующимися в элементарном объёме при полном их торможении), к массе Δm воздуха в этом объёме:

$$D_3 = \Sigma Q / \Delta m.$$

Экспозиц. D пропорц. к *ерме* (сумме нач. кинетич. энергии всех вторичных заряж. частиц на единицу массы воздуха).

Экспозиц. D в СИ измеряется в Кл/кг, $D_3 = 1$ Кл/кг соответствует тому, что электроны и позитроны, освобождённые в 1 кг атм. воздуха в первичных актах поглощения и рассеяния фотонов, образуют при полном торможении в воздухе ионы с $\Sigma Q = 1$ Кл. В условиях электронного равновесия при $D_3 = 1$ Кл/кг ионы с $\Sigma Q = 1$ Кл образуются в 1 кг воздуха. На этом основано измерение экспозиц. D .

Распространённой внесистемной единицей экспозиц. D является *рентген* (Р); 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг. Это соответствует образованию $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см³ воздуха (при 0°C и 760 мм рт.ст.). На создание такого кол-ва ионов необходимо затратить энергию $0,114$ эрг/см³ = 88 эрг/г. Т. о., 88 эрг/г — энергетич. эквивалент 1 Р. Зная атомный состав вещества, ср. энергию ионизации и энергетич. спектр излучения, по величине экспозиц. D можно рассчитать поглощённую D рентг. и γ -излучений в любом веществе.

Относительная биологическая эффективность. Поглощение энергии излучения является первопричиной последующих процессов, к-рые в конечном итоге приводят к наблюдаемым физ.-хим. изменениям вещества. При облучении живых организмов, в частности человека, могут возникать биол. неблагоприятные последствия, к-рые определяют т. н. *уровень радиационной опасности*.

Для данного вида излучения радиац. индуцированные эффекты во мн. случаях оказываются пропорц. поглощённой энергии излучения. Это позволяет считать поглощённую D их мерой. Однако при одной и той же поглощённой D в тканях живого организма биол. эффект оказывается различным для разных видов излучения. Наур., нек-рые виды биол. реакций для