

## РАЗДЕЛ 4. ДОЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Исторически величины, используемые для измерения "количества" ионизирующего излучения (в дальнейшем называемого "излучение"), основываются на большом числе актов ионизации, происшедших в конкретной ситуации, или большом количестве энергии, переданной обычно определенной массе вещества. Такие приближения не позволяют учитывать дискретную природу процесса ионизации, но эмпирически оправдываются тем, что макроскопические величины (подобранные для различных видов излучения) прекрасно согласуются с получаемыми биологическими эффектами.

Будущие исследования вполне могут показать, что было бы лучше использовать другие величины, основанные на статистическом распределении актов в малом объеме вещества, соответствующем размерам, биологических существей, таких, как ядро клетки или ее молекулярная ДНК. Но пока Комиссия МКРЗ рекомендует применение макроскопических величин. Они известны как дозиметрические величины и их формальное определение дано Международной комиссией по радиационным единицам измерениям (МКРЕ).

До обсуждения дозиметрических величин необходимо предварительно напомнить часть сведений о биологических эффектах излучения. Процесс ионизации неизбежно вызывает изменения атомов и молекул, по крайней мере временные, и таким образом, может иногда повредить клетки. Если повреждение произошло и полностью не устранилось, оно может воспрепятствовать выживанию или воспроизводству клетки или же дать в результате жизнеспособную, но измененную клетку. Два указанных исхода облучения клетки имеют существенно разное значение для организма в целом.

Потеря даже многих клеток не влияет на большинство органов и тканей тела, но если число потерянных клеток достаточно велико, то может быть нанесен заметный ущерб, отражающийся в утрате функции ткани. Вероятность нанесения такого ущерба будет равна нулю при малых дозах, но выше некоторого уровня дозы (порога) будет круто возрастать до единицы (100%). Выше порога тяжесть ущерба также будет увеличиваться вместе с дозой. По этим причинам, эффекты данного типа, ранее называемые "нестохастическими", теперь называются Комиссией "детерминированными".

Результат будет совершенно другим, если облученная клетка не погибла, а изменилась. Несмотря на существование высокоэффективных защитных механизмов, при репродуцировании измененной, но жизнеспособной соматической клетки после разной продолжительности задержки, называемой латентным периодом, может возникнуть клон клеток, являющийся проявлением злокачественного состояния, т. е. рака. Вероятность возникновения рака в результате облучения обычно возрастает с увеличением дозы, по-видимому, без порога и приблизительно пропорционально дозе, по меньшей мере, при дозах, значительно ниже порогов для детерминированных эффектов. Доза не влияет на тяжесть заболевания раком. Эффекты такого типа называются "стохастическими", что говорит об их "случайной или статической природе". Если повреждение возникает в клетке, функция которой заключается в передаче генетической информации последующим поколениям, то любые возникающие в результате эффекты самых различных типов и степени тяжести отражаются на потомстве облученного человека. Стохастические эффекты такого типа называются "наследуемыми".

Знание пространственно-временной энергетическо-угловой плотности потока частиц  $\phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t)$  позволяет в любой точке пространства ( $\mathbf{r}$ ) в любой момент времени ( $t$ ) рассчитать любую характеристику поля излучения.

Условно можно выделить два класса дозиметрических величин (рис.20):

**1. Базисные величины**, определяемые в исходном поле, свободном от каких-либо возмущений, т.е. когда в поле излучения не вносятся каких-либо возмущений, например присутствием в поле тела человека или соответствующих ему моделей (биологических фантомов), разработанных в разных приближениях. Характерная базисная

величина – экспозиционная доза. Такие дозиметрические величины, как поглощенная доза, керма, эквивалентная доза, могут быть также базисными, если они определены в невозмущенном исходном поле излучения. Эти базисные величины относятся к элементарному объему вещества, помещенного в точку определения дозиметрической величины, не искажающему исходное поле. Таким образом, базисные дозиметрические величины полностью определяются характеристиками исходного невозмущенного поля излучения.

**2. Фантомные величины** формируются в результате возмущения исходного радиационного поля помещением в него фантома. Эти величины относятся к заданной точке детектирования внутри фантома или на его поверхности и определяются не только характеристиками исходного поля излучения, но также и всеми параметрами фантома (геометрия, размеры, состав). Наиболее широко используются для исследований следующие гомогенные тканеэквивалентные фантомы: 1. Слой толщиной 30 см с бесконечными поперечными размерами; 2. Цилиндр диаметром 30 и высотой 60 см; 3. Сфера диаметром 30 см.

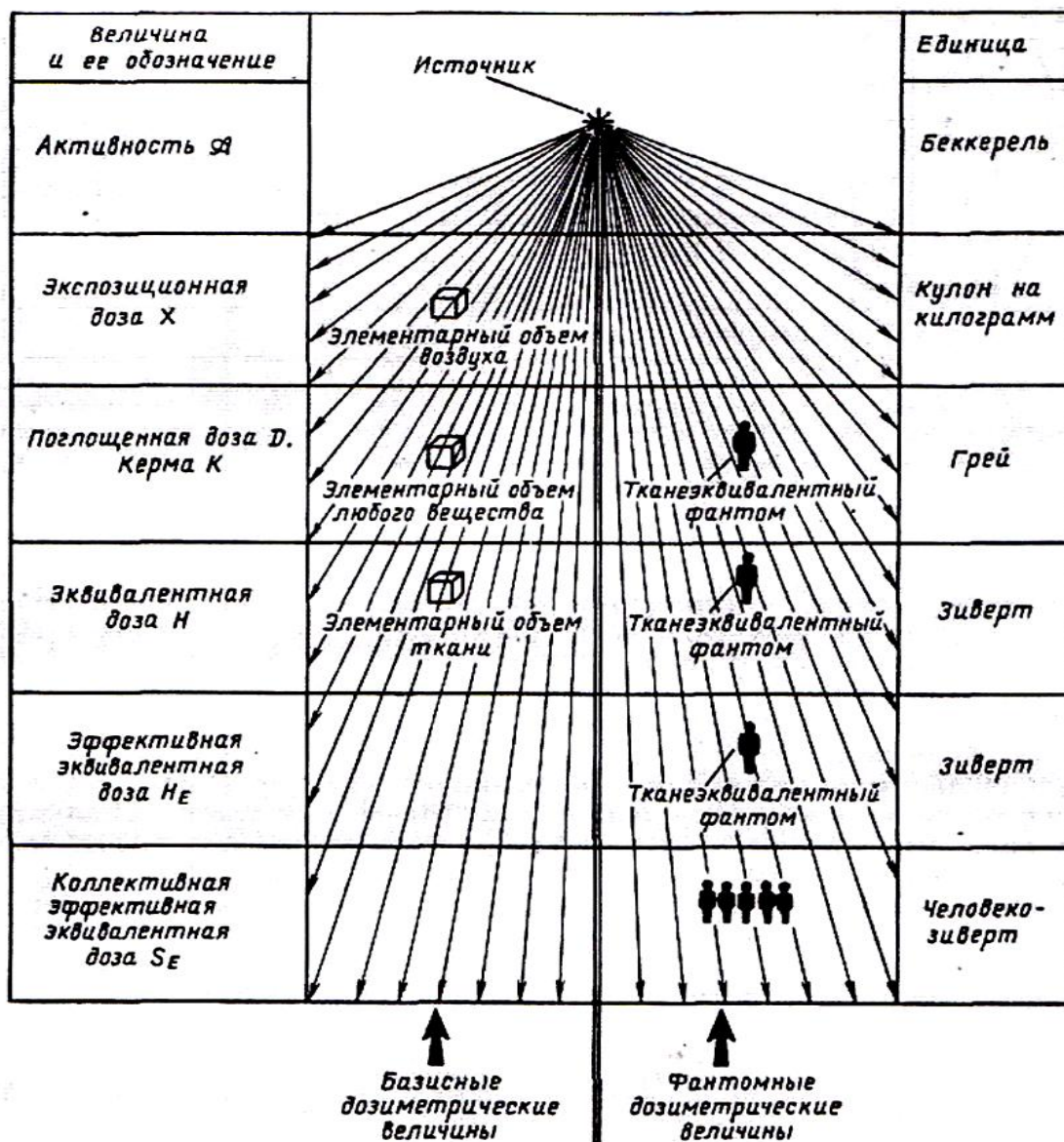


Рис.20. Базисные и фантомные дозиметрические величины.

#### 4.1. Экспозиционная доза и ее мощность

**Экспозиционная доза.** Для оценки поля фотонного излучения одним из первых было введено понятие экспозиционной дозы и ее мощности.

**Экспозиционная доза** выражает энергию фотонного излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха.

**Экспозиционная доза «X»** – это количественная характеристика фотонного излучения, которая основана на его ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе и представляет собой отношение суммарного заряда « $dQ$ » всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой « $dm$ », полностью остановились (поглотились), к массе воздуха в указанном объеме:

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

Понятие экспозиционной дозы рекомендовано для фотонов с энергией до **3 МэВ** и только для воздуха.

Таким образом гамма-кванты, поступающие в  $1,293 \times 10^{-3}$  г (0,001293 г) или  $1 \text{ см}^3$

сухого атмосферного воздуха, образуют в нем вторичные электроны, которые создают ионы как внутри, так и вне рассматриваемой массы воздуха. Все эти положительные и отрицательные ионы, дающие заряд 1 СГСЭ каждого знака при определении единицы экспозиционной дозы должны быть учтены.

При определении экспозиционной дозы облучения должно выполняться **условие электронного равновесия**: каждому электрону, покидающему рассматриваемый объем, соответствует другой электрон такой же энергии, который входит в этот объем (рис.21):

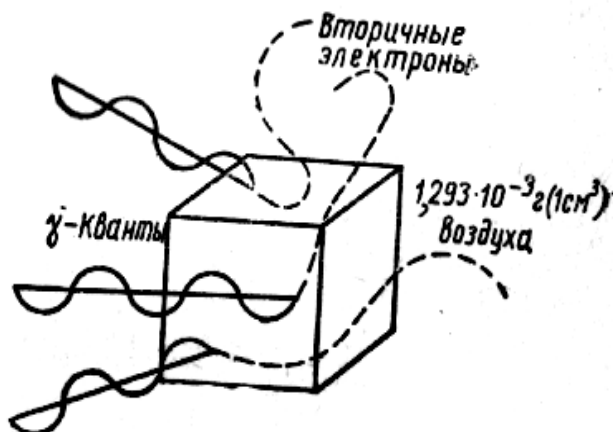


Рис.21. К понятию электронного равновесия.

Единица измерения экспозиционной дозы в СИ: **кулон на килограмм**.

**1 Кл/кг равен** экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в объеме воздуха массой **1 кг**, производят ионы, несущие электрический заряд **1 Кл** каждого знака.

Внесистемная единица экспозиционной дозы: **Рентген (Р)**. Рентген – это единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 г сухого атмосферного воздуха (0 °С и 760 мм. рт. ст.) в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Соотношение между системной и несистемной единицей имеет вид:

$$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р, или } 1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

Производные единицы: миллирентген (мР) микрорентген (мкР); милликулон на килограмм (мКл/кг), микрокулон на килограмм (мкКл/кг).

**Эффективный атомный номер вещества.** На практике, как правило, мы имеем дело с веществами (поглотителями энергии излучения) состоящие не из одного химического элемента, а из нескольких и часто имеющих слишком различные заряды ядра. Поэтому, для определения переданных энергий веществу введено понятие **эффективного атомного номера вещества**. Под эффективным атомным номером сложного вещества в дозиметрии понимается атомный номер такого условного простого вещества, для которого коэффициент передачи энергии излучения, рассчитанный на один электрон среды, является таким же, как и для данного вещества. Другими словами, для любых двух веществ, имеющих одинаковый эффективный атомный номер, энергия излучения, переданная заряженным частицам в расчете на один электрон среды, должна быть одинаковой при тождественных условиях облучения. При условии электронного равновесия энергия фотонного излучения, преобразованная в данном веществе в кинетическую энергию заряженных частиц, равна поглощенной энергии излучения.

Следовательно, для двух веществ с одинаковым атомным номером при обеспечении электронного равновесия и тождественных условиях облучения

поглощенная энергия излучения, приходящаяся на один электрон облучаемой среды, будет одинаковой.

**Энергетические эквиваленты рентгена.** По определению  $1 \text{ P} = 1 \text{ СГСЭ} = n q$ , где  $n$  – число ионов;  $q$  – заряд иона (равный  $4,8 \times 10^{-10}$  СГСЭ). Тогда  $n = \frac{1}{4,8 \cdot 10^{-10}} = 2,08 \cdot 10^9$  пар ионов.

Следовательно,  $1 \text{ P}$  – это такое количество излучения, под действием которого в  $1 \text{ см}^3$  воздуха при нормальных условиях образуются вторичные электроны, создающие  $2,08 \times 10^9$  пар ионов.

При пересчете на 1 г воздуха  $1 \text{ P}$  соответствует  $1,61 \times 10^{12}$  пар ионов/г. Если учесть, что средняя работа ионизации в воздухе  $\varepsilon = 34$  эВ, а  $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-12}$  эрг, то экспозиционной дозе в  $1 \text{ P}$  соответствует  $X = n \cdot \varepsilon = 7,06 \times 10^4$  МэВ/см<sup>3</sup> или  $X = 0,114$  эрг/см<sup>3</sup>. При расчете на 1 г воздуха  $X = 88$  эрг/г.

Величины  $0,114$  эрг/см<sup>3</sup> и  $88$  эрг/г называют энергетическими эквивалентами рентгена.

**Мощность экспозиционной дозы, уровень радиации.** Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения – это отношение приращения экспозиционной дозы «dX» за интервал времени «dt» к этому интервалу времени:

$$P_3 = \frac{dX}{dt}.$$

Системная единица измерения  $P_3 = \text{Кл/кг} \cdot \text{с} = \text{А/кг}$  (Ампер на килограмм), несистемная единица  $\text{P/с}$ ,  $\text{мP/с}$ ,  $\text{мкP/с}$ .

**Мощность экспозиционной дозы, измеренная на высоте 1 м от земли (пола) называется уровнем радиации (гамма фоном) и измеряется в P/час, мP/час, мкP/час.**

Для Республики Беларусь естественным уровнем радиации является гамма-фон не превышающей значения равного  $P_\gamma = 20$  мкP/час.

**Связь между мощностью дозы и интенсивностью излучения.** Связь между мощностью экспозиционной дозы и интенсивностью гамма-излучения (эрг/см<sup>2</sup>·с) имеет следующее соотношение:

$$P = I \cdot \gamma / 0,114 = N h\nu \gamma / 1,6 \cdot 10^{-6} / 0,114, (\text{P/с}),$$

или после преобразования получим:  $P = 14,5 \cdot N E_\gamma \gamma, (\text{мкP/с}),$

где,  $N$  – число гамма-квантов пересекающих площадь в  $1 \text{ см}^2$  за 1 секунду;  $h\nu (E_\gamma)$  – энергия квантов (МэВ);  $1,6 \cdot 10^{-6}$  – число эргов в МэВ;  $0,114$  – энергетический эквивалент рентгена в воздухе;  $\gamma$  – линейный коэффициент электронного преобразования в воздухе (какая доля из общей интенсивности гамма-лучей трансформируется во вторичные электроны при прохождении слоя воздуха толщиной в 1 см).

Иногда, при отсутствии дозиметра, необходимо знать уровень радиации на местности (после аварии на ЧАЭС). Для этого необходимо по карте определить плотность загрязнения территории цезием и рассчитать мощность дозы гамма излучения от него на данной территории, а затем к гамма-фону который был аварии на ЧАЭС прибавить мощность дозы рассчитанной по нижеприведенной формуле.

Мощность дозы гамма-излучения от цезия-137 (запас цезия) на высоте 1 м от поверхности земли связана соотношением:

$$P_3 = 6,5 \times 10^{-3} q, (\text{мкP/час}),$$

где,  $q$  – плотность загрязнения территории, (мКи/км<sup>2</sup>).

**Гамма-постоянная и гамма эквивалент.** При работе с радионуклидными

источниками надо иметь в виду, что число распадов не всегда совпадает с количеством испускаемых частиц, например у  $Co-60$  на один электрон приходится два гамма-кванта.

Мощность дозы гамма-излучения единичной активности можно всегда определить, если известна гамма-постоянная, характеризующая данный радионуклид. **Гамма-постоянная (постоянная мощности экспозиционной дозы)** представляет собой дозовую характеристику поля гамма-излучения точечного изотропно излучающего источника при фиксированных значениях активности радионуклида «А» и расстоянии от источника до детектора «l» и определяется по формуле:

$$\Gamma = D_0 \cdot l^2 / A,$$

где, А – активность в мКи; l – расстояние в см;  $D_0$  – мощность дозы гамма-излучения в Р/ч.

Таким образом размерность гамма-постоянной равна:

$$\Gamma = \frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мКи}}.$$

Из этого следует, что гамма-постоянная во внесистемных единицах – это мощность экспозиционной дозы (Р/ч), создаваемая гамма-квантами всех линий точечного изотропного гамма-источника активностью 1 мКи на расстоянии 1 см без начальной фильтрации.

**Миллиграмм-эквивалент радия.** Ионизирующее действие гамма-излучения любых источников иногда оценивают путем сравнения их с радиевым эталонным источником при одинаковых условиях измерения. Так появилась величина, **называемая гамма-эквивалентом**, которая измеряется в миллиграмм-эквивалентах радия (мг.эkv.Ра) или грамм-эквивалентах радия (г. эkv. Ра).

Таким образом, **миллиграмм-эквивалент радия** – это единица гамма-эквивалента радиоактивного препарата, гамма-излучение которого при данной фильтрации и тождественных условиях измерения создает такую же мощность экспозиционной дозы, как гамма-излучение 1 мг государственного эталона радия в равновесии с основными дочерними продуктами распада при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм.

Экспериментально было установлено, что точечный источник радия с фильтром из платины толщиной 0,5 мм активностью 1 мКи, находящийся в равновесии с дочерними продуктами распада, создает на расстоянии 1 см мощность экспозиционной дозы **8,4 Р/ч**. Значение гамма-постоянной радия  $\Gamma_{Ra} = 8,4 \text{ Р} \cdot \text{см}^2 / \text{ч} \cdot \text{мКи}$  принимается для сравнения мощности дозы от источников гамма-излучения, имеющих различные гамма-постоянные.

Для определения гамма-эквивалента активности радионуклидов (М), если известна их активность (А) в мКи, пользуются простой формулой:

$$M = \Gamma \cdot A / 8,4, \text{ (мг.эkv.Ра)},$$

где,  $\Gamma$  – гамма-постоянная сравниваемого радионуклида,  $\text{Р} \cdot \text{см}^2 / \text{ч} \cdot \text{мКи}$ ; А – активность сравниваемого нуклида, мКи.

В практических расчетах для оценки поля излучения на рабочем месте без защитных экранов часто используют формулу для перехода от активности радионуклида М (мг. эkv.Ра) к мощности экспозиционной дозы на расстоянии R (м) от источника излучения, имеющей вид:

$$P = 8,4 \cdot M / R^2 \cdot 10^4, \text{ (Р/ч)},$$

где, 8,4-гамма-постоянная данного радионуклида; М–гамма-эквивалент радионуклида в мг.эkv.Ра; расстояние от источника до точки в которой рассчитывается защита (м).

Соответственно доза на рабочем месте за рабочий день (t) определяется по формуле:

$$D = 8,4 \cdot M \cdot t / R^2 \cdot 10^4, \text{ (Р)}.$$

Для персонала (НРБ-2000) принят рабочий день равный 6 часов и рабочая неделя

36 часов. Рабочий год для персонала (НРБ-2000) составляет 1700 часов и допустимая доза (ПД) в 20мЗв должна быть равномерно распределена в течении рабочего года. Таким образом мощность дозы на рабочем месте не должна превышать  $P_{\text{доп}} = 20 \text{ мЗв}/1700\text{ч} = 0,0117 \text{ мЗв/ч}$ .