

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ НА КЛЕТОЧНОМ УРОВНЕ

Алексашенко В.Н. – Союз «Чернобыль», Санкт-Петербург

Аннотация. В статье приводится упрощённый расчёт поглощённых доз на клеточном уровне от α , β , γ -излучающих радионуклидов при внутреннем облучении лёгких. В расчётах использована кубоидная модель усреднённой типичной клетки. Приведены расчеты α , β , γ -излучающих радионуклидов на клетку.

Модель клетки, энергия излучения, поглощённая доза.

ON THE DETERMINATION OF THE ABSORBED DOSE OF IONIZING RADIATION IN THE BODY AT THE CELLULAR LEVEL

Aleksashenko V.N. – Union «Chernobyl», Saint-Petersburg

Abstract. The article provides a simplified calculation of absorbed doses at the cellular level α , β , γ -emitting radionuclides in internal exposure of the lungs. In the calculations we used Kubena model averaged typical cells. The calculations of α , β , γ -emitting radionuclides in the cell.

Model of the cells, energy of radiation, the absorbed dose.

Введение

В настоящее время среди исследователей радиационной безопасности ведутся дискуссии о влиянии малых доз радиации на здоровье людей. Существуют две основные точки зрения о влиянии радиации на живые организмы. Согласно первой – сколько угодно малая поглощенная доза радиации вредна живым организмам, а вторая – только начиная с какого-то определенного уровня поглощенной дозы, начинаются необратимые изменения в организме. По существу, вторая точка зрения нашла свое отражение в нормативных документах, которые регламентируют уровни поглощенной и эффективной доз для различных групп населения и времени воздействия облучения (СанПиН ... , 2009). Используемая энергетическая характеристика радиоактивного воздействия на организм, измеряемая в джоулях (Дж) на килограмм веса, является основой для определения степени допустимого облучения для различных категорий людей. Применяемая система измерения поглощенных доз фактически работает только для гамма-излучения, поскольку для него сравнительно просто можно измерить долю поглощенного организмом фотонного излучения. Для α и β -излучения, в силу того, что

они сравнительно легко задерживаются защитными внешними покровами и одеждой, достаточно трудно оценить их воздействие на живые организмы. Обычно определяется поглощенная доза энергии облучающих α и β -частиц на единицу веса тела. Рассчитанная таким способом поглощенная доза при внешнем облучении не будет адекватно отражать переданную организму энергию и нанесенный ему вред. Иная ситуация складывается при внутреннем облучении организма, когда α и β -излучатели попадают внутрь с воздухом, пищей и водой. Непосредственно определить величину поглощенной дозы при внутреннем облучении крайне затруднительно. Практика показывает, что внутренне α и β -облучение, сопоставимое по энергии с внешним, приводит к более серьезным последствиям. В таком случае более достоверная оценка получаемого вреда организмом будет, если проводить расчет поглощенной дозы по энергии, полученной одной клеткой, и далее переходить, с учетом количества клеток, содержащихся в единице веса, к греям (Гр) или джоулям (Дж) на килограмм. И уже полученную таким образом величину сравнивать с установленными уровнями облучения и нормами радиационной безопасности.

Цель исследования – показать возможности альтернативного дозиметрического подхода в определении поглощённых доз на клеточном уровне от α , β , γ -излучающих радионуклидов, используя основную дозиметрическую величину поглощённой дозы D -грей (Гр).

Действие ионизирующей радиации

Поглощение энергии в организме происходит в чрезвычайно короткие промежутки времени, измеряемые ничтожно малыми долями секунд, и сопровождается ионизацией и возбуждением молекул и атомов с последующим образованием высоко активных в химико-биологическом отношении радикалов. Эти первоначальные изменения, не имеющие порога, реализуются на уровне клетки, клеточных ассоциаций и тканей в биологические изменения, которые протекают с различной скоростью. Так, например, постоянно происходит отмирание и удаление из организма клеток крови, эпителия кишечника, эпидермиса. Одновременно происходит и восстановление повреждений на всех уровнях: клетка, ткань, орган и организм в целом. Считают, что 90 % повреждений восстанавливается (при облучении в не смертельных дозах) (Зуевич и др., 2011).

Наибольшую опасность при внутреннем облучении представляют α -излучающие радионуклиды, поскольку α -частица (ядро атома гелия) создает большую плотность ионизации и, соответственно, биологических повреждений. Биологический эффект представляется не только величиной поглощённой дозы, но и пространственно-временным распределением её в теле человека. Важное значение имеют морфофункциональные особенности тканевых структур (где поглощается энергия), определяющие как степень повреждения, так и интенсивность восстановительных процессов. Эксперименты также показывают, что неравномерное облучение более канцерогенно, чем равномерное при одинаковой дозе. Поэтому в случаях поступления в лёгкие даже небольших количеств α -излучающих радионуклидов в отдельных участках, например лёгочной ткани, могут

развиваться опухоли, а рост их числа среди облученных связан с увеличением blastogenic дозы облучения «клеток риска» в местах скопления радионуклидов (Тимофеев-Ресовский и др., 1981). Такая реакция живых организмов достаточно хорошо укладывается в рамки разработанной в двадцатые годы прошлого столетия и сформулированной Дессауэром теории точечного тепла. Рассуждения Дессауэра сводятся к следующему: «С одной стороны, плотность поглощённой энергии в среднем невелика, а энергия отдельных актов поглощения весьма большая и всегда превышает энергию, необходимую для разрыва химических связей или активации химических реакций. С другой стороны, при совершенно случайном распределении “точечного тепла” конечный эффект в клетке благодаря её крайней неоднородности будет зависеть от попаданий дискретных порций энергии в микрообъемы, где находятся ее жизненно важные структуры» (Зуевич и др., 2011).

В связи с вышеизложенным очевидно, что любое, даже незначительное поступление техногенных α , β , γ -излучающих радионуклидов в живой организм оказывает на него пагубное влияние. Структура онкологических болезней атомщиков не отличается от российских показателей: первые три места занимают опухоли органов дыхания, желудка, кожи (Кондраткова, Соколова, 1999).

Расчёт поглощенных доз в клетках эпителиальной ткани трахеобронхиального отдела легких

Приведём упрощённую методику расчёта поглощённых доз от α , β , γ -излучающих радионуклидов, поступающих ингаляционным путем в лёгкие ^{222}Rn , ^{239}Pu («горячих частиц»), а также α -излучающих природных радионуклидов, постоянно содержащихся в лёгких.

При вычислениях использованы опубликованные общепринятые данные:

- содержание ^{222}Rn в воздухе новых квартир – 200 Бк/м³ (Зуевич и др., 2011);
- содержание α -излучающих природных радионуклидов, постоянно находя-

щихся в лёгких, приблизительно 0,5 Бк/кг (Кондраткова, Соколова, 1999);

– активность одного мкг ^{239}Pu («горячей частицы») – 2300 Бк;

– постоянное заполнение эпителиальной ткани трахеобронхиального отдела лёгких воздухом – 1,6 л (Сборник ... , 1969);

– один грамм ткани лёгких содержит $6,7 \times 10^8$ усреднённых типичных клеток диаметром 14,2 мкм. Для упрощения расчётов будем использовать кубоидную модель типичной усреднённой клетки, размер стороны куба (далее клетки) – 11,4 мкм (Алексашенко, 2011);

– масса облучаемой эпителиальной ткани трахеобронхиального отдела лёгких – 1,96 г (Зуевич и др., 2011);

– в этой массе (1,96 г) содержится $1,35 \times 10^9$ клеток;

– поглощённая доза – фундаментальная дозиметрическая величина – D -грей (Гр) для одной клетки определяется из равенства:

$$1 \text{ Гр} = \text{Дж/кг} = 6,24 \times 10^{18} \text{ эВ} / 6,75 \times 10^{11} \text{ клеток} = 0,92 \times 10^7 \text{ эВ/1 клетка} = 9,2 \text{ МэВ/1 клетка}.$$

Когда говорят о поглощённой дозе в 1 Гр, имеют в виду поглощённую энергию в $6,24 \times 10^{18}$ эВ в единице массы ткани 1 кг, в которой находятся $6,75 \times 10^{11}$ клеток. Для наших расчётов на клеточном уровне поглощённая энергия в 9,2 МэВ на клетку будет соответствовать дозе 1 Гр. Эту фундаментальную величину (9,2 МэВ/1 клетка) будем сравнивать с поглощённой клеткой энергией от любого вида излучения, переводя энергию излучения, переданную клетке (МэВ), в поглощённую дозу (Гр).

Вычислим поглощенную дозу, получаемую 1 клеткой, для различных видов излучения с учетом того, что:

– длина пробега α -частицы с энергией 5 МэВ в ткани составит 44 мкм, что соответствует 4 клеткам;

– длина пробега β -частицы с энергией 0,6 МэВ в ткани составит 1680 мкм, что соответствует 147 клеткам;

– γ -квант с энергией 0,66 МэВ в ткани радиусом 1 см теряет 0,09 энергии, что соответствует поражению 900 клеток.

В результате арифметических вычис-

лений получаем: α -частица с энергией 5 МэВ создает поглощённую дозу в клетке ткани $1,36 \times 10^{-1}$ Гр (13,6 рад). Это означает, что единицей массы ткани (1 кг) была бы поглощена энергия в $1,36 \times 10^{-1}$ Дж; β -частица с энергией 0,6 МэВ создает поглощённую дозу в клетке ткани $4,3 \times 10^{-4}$ Гр (0,04 рад); γ -квант с энергией 0,66 МэВ (Cs^{137}) создаёт поглощённую дозу в клетке ткани $7,6 \times 10^{-6}$ Гр (0,0007 рад).

По результатам вычислений следует, что поглощённая доза в одной клетке (мишени) от одной α -частицы с энергией 5 МэВ в 316 раз больше, чем от одной β -частицы с энергией 0,6 МэВ и в 18000 раз больше, чем от одного γ -кванта с энергией 0,66 МэВ.

Поскольку α -частица оказывает наибольшее дозовое воздействие на клетку, дальнейшие расчеты будем проводить только для α -излучающих радионуклидов.

а) Для лёгких, в которые ингаляционным путём поступает из воздуха ^{222}Rn

При скорости дыхания 1200 л/ч и содержании в воздухе ^{222}Rn – 200 Бк/м³ за один вдох (1,6 л) в лёгкие поступит активность 0,32 Бк, что соответствует испусканию этой активностью одной α -частицы каждые 3,12 с. За 1 час (без учёта репарации) будут поражены 4615 клеток. Каждой клетке будет передана излучением энергия 1,25 МэВ, что соответствует поглощённой дозе $1,36 \times 10^{-1}$ Гр (13,6 рад).

б) Для лёгких, постоянно содержащих α -излучающие радионуклиды – 0,5 Бк/кг (взято с большим запасом для упрощения расчётов)

От содержащихся в лёгких радионуклидов 0,5 Бк/кг каждые 2 с будет происходить один α -распад в 1 кг ткани, при котором за 1 час будет поражено 7200 клеток. Соответственно в 2 г эпителиального слоя трахеобронхиального отдела лёгких будет поражаться 14 клеток в час.

Из этих вычислений можно сделать вывод, что при увеличении или уменьшении содержания радона в воздухе будет зависеть только увеличение или уменьшение числа поражённых клеток, при постоянной поглощённой дозе каждой клеткой

$1,36 \times 10^{-1}$ Гр (13,6 рад). Поскольку поражающее действие α -частицами носит вероятностный характер, то, когда через клетку, поражённую одной α -частицей с энергией 5 МэВ и не успевшую репарироваться, пройдет другая α -частица, поглощённая одной клеткой доза увеличится в два раза ($1,36 \times 10^{-1} \times 2 = 2,72 \times 10^{-1}$ Гр (27,2 рад). С каждым новым прохождением α -частицы через центр ядра одной и той же клетки доза будет увеличиваться соответственно в разы.

в) Для лёгких, в которые ингаляционным путём попала топливная «горячая» частица, содержащая ^{239}Pu

При попадании 1 мкг ^{239}Pu в лёгкие поражаются 512 клеток, и в этом объёме поглощается энергия 8×10^4 МэВ/ч, что соответствует поглощённой дозе одной клеткой 8000 Гр/ч. При попадании в организм «горячей» частицы содержащей плутоний активностью в 1 Бк, усреднённая клетка получает поглощённую дозу 3,6 Гр (360 рад) в час. Возможно, этим объясняется высокая опасность «горячих» частиц менее 1 мкг ^{239}Pu (2300 Бк). Поглощённая доза, полученная от «горячей» частицы, содержащей плутоний, накапливается пропорционально времени от начала поступления в организм до конца жизни (период полувыведения из организма – 200 лет). Возможным (альтернативным) путём решения проблемы плутониевой дозиметрии может стать контроль приземного слоя воздуха на содержания микрочастиц плутония и других трансурановых элементов от аварийных и штатных выбросов предприятиями ЯТЦ в окружающую среду (Алексашенко, 2011).

Заключение

В работе показана только энергетическая часть воздействия α , β , γ -излучающих радионуклидов на клетку (мишень). В этой работе не рассматривалось микрораспреде-

ление энергии в клетке (мишени) на клеточные структуры и внутриклеточные жидкости. Это уже другой – молекулярный уровень исследования. Приведённые упрощённые расчёты помогут понять биофизическое действие ионизирующей радиации на клеточном уровне и возможно помогут объяснить случаи онкологических заболеваний при незначительных (меньше предельно допустимых) уровнях полученного облучения (Гофман, 1994).

Литература

- СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009). 2009.
- Зуевич Ф.И., Тихонов М.Н., Довгуша Л.В., Матвеев К.М., Шкрабо И.В.* Радиационно-гигиенические проблемы влияния радона на состояние здоровья населения. СПб.: Полиграф-Ателье, 2011. 245 с.
- Тимофеев-Ресовский Н.В., Савич А.В., Шальнов М.И.* Введение в молекулярную радиобиологию (физико-химические основы). М.: Медицина, 1981. 320 с.
- Кондраткова М, Соколова Е.* О здоровье работников Минатома // Атомпресса, 1999. № 3 (334).
- Сборник задач по радиохимии / Под ред. И.А. Коршунова. М.: Высшая школа, 1969. 30 с.
- Алексашенко В.Н.* Чернобыль: проблемы дозиметрии // Чернобыль: 25 лет спустя. Социально-правовые и медицинские проблемы граждан, пострадавших в радиационных авариях и катастрофах: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. СПб.: Агентство ВиТ-принт, 2011. С. 33–34.
- Гофман Д.* Рак, вызываемый облучением в малых дозах: независимый анализ проблемы / Пер. с англ.; Под ред. Е.Б. Бурлаковой и В.Н. Лысцова. М.: Социал.-экол. союз, 1994. 354 с.