



UA0300557

ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕК ЧАСТИЦАМИ ОБЪЕКТА “УКРЫТИЕ”

В. Г. Батий, А. А. Сизов

Межотраслевой научно-технический центр “Укрытие” НАН Украины, Чернобыль

В настоящее время в связи с выводом энергоблоков ЧАЭС из эксплуатации и преобразованием объекта “Укрытие” в экологически безопасную систему и строительством новых объектов по обращению с радиоактивными отходами (РАО) в непосредственной близости от объекта “Укрытие” планируется множество работ, приводящих к облучению персонала. Для минимизации дозовых нагрузок персонала необходимо как можно более точно прогнозировать риск облучения, одной из составляющих которого является риск облучения “горячими” частицами объекта “Укрытие”.

Основными особенностями внутреннего облучения за счет ингаляции радиоактивных аэрозолей и пыли объекта “Укрытие” является облучение по двум путям:

диффузное облучение пылью и аэрозолями, которое можно рассчитать согласно [1], при этом их количество со временем возрастает за счет разрушения лавообразных топливосодержащих материалов;

облучение “горячими” частицами.

В данной работе рассматривается облучение “горячими” частицами. Этот путь облучения недостаточно изучен, и в данной работе предлагается один из возможных подходов для решения этой проблемы.

Расчет дозы от “горячих” частиц

Здесь и далее под термином “горячие” частицы подразумеваются частицы топлива разрушенного 4-го энергоблока ЧАЭС, имеющие его свойства. В расчете использовались следующие свойства “горячих” частиц [2]:

плотность частиц 5 - 9 г/см³ (в расчете 8 г/см³);

диаметр частиц 5 - 20 мкм;

состав - среднетопливный (на 2001 г.), % от общей активности:

⁹⁰ Sr	35,058	¹⁰⁶ Ru	0,019
¹³⁴ Cs	0,330	¹³⁷ Cs	41,864
¹⁴⁴ Ce	0,003	¹⁵⁴ Eu	0,990
²³⁸ Pu	0,252	²³⁹ Pu	0,206
²⁴⁰ Pu	0,338	²⁴¹ Am	0,676
²⁴⁴ Cm	0,054	²⁴¹ Pu	20,210

В расчете учитывались следующие отделы легочной системы человека, рекомендованные МКРЗ [1], в которых может отложиться “горячая” частица: носовой (extrathoracic) – ET (существуют две различные области ET₁ и ET₂, но в рамках данных расчетов они обладают одинаковыми свойствами), бронхиальный (bronchial) – BB, бронхиолярный (bronchiolar) – bb, альвеолярный (alveolar interstitium) – AI. Доза рассчитывалась без учета вероятности попадания в соответствующий отдел и задержания там, т. е. исходная предпосылка для расчета – это попадание частицы в соответствующий отдел легочной системы.

Поглощенная доза в ткани рассчитывается как

$$D = k \cdot \frac{E_m}{m}$$

где D – поглощенная доза, Гр; m – масса ткани, в которой выделилась энергия, кг; E_m – энергия, выделившаяся в массе m , Дж; k – коэффициент, учитывающий размерность вышеприведенных величин.

В расчете рассматривалась не вся масса, поглотившая энергию, а только слой ткани, в котором возможно возникновение раковой опухоли [1]. Для каждой области легочной системы человека этот слой характеризуется следующими значениями:

ET – слой толщиной 10 мкм на глубине 40 мкм от поверхности (40 – 50 мкм);

BB – слой толщиной 37 мкм на глубине 10 мкм (10 – 50 мкм);

bb – слой толщиной 8 мкм на глубине 4 мкм (4 – 12 мкм);

AI – слой толщиной ~ 30 мкм на глубине 39 мкм (39 – 70 мкм).

Слой слизи, покрывающий каждую область (кроме ET₁), в расчет не принимался по консервативным соображениям (частица может осесть под слой слизи).

Коэффициенты линейного поглощения энергии альфа-частиц и электронов в биоткани рассчитывались по программе STAR (ESTAR и ASTAR) Национального института стандартов и технологий США [3], а также с использованием данных [4].

Формула для расчета тормозной способности альфа-частиц учитывала различные корректирующие поправки:

оболочечные коррекции, которые важны при небольших скоростях альфа-частиц по сравнению со скоростями атомных электронов;

коррекция Баркаса и Блоха, которая учитывает отклонение от аппроксимации Борна первого порядка;

коррекция плотностного эффекта, которая незначительна только для альфа-частиц с энергиями около нескольких сот МэВ.

Значения тормозной способности при низких энергиях рассчитаны по подгоночной формуле [6] с коэффициентами из [5], которая представляет экспериментальные значения для многих элементов и ограниченного числа

компаундов. Более подробное описание этого метода описано в [3].

На рис. 1 схематично показан учет только тех тканей, облучение которых может привести к возникновению раковых заболеваний.

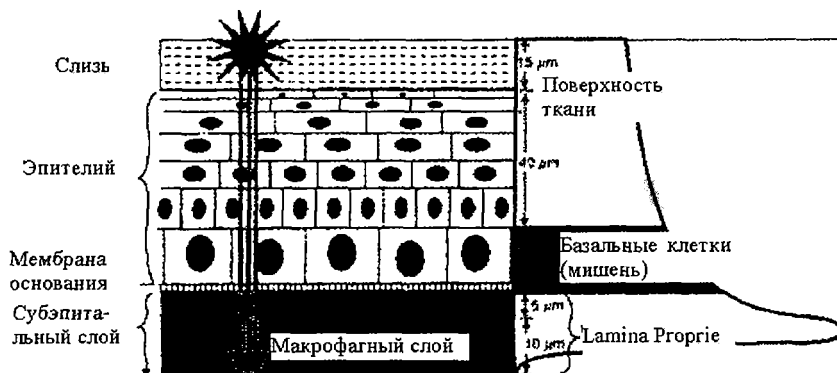


Рис. 1. Схема учета поглощения энергии только клетками, в которых возможно развитие раковых опухолей (слева - схематическое изображение ткани ET_1 , справа - схематическое изображение кривой Брегга, под ней выделен участок, который необходимо принимать во внимание в расчете, базальные клетки).

Расчет поглощенной дозы производился следующим образом. Сначала для каждого радиоактивного изотопа, входящего в состав "горячей" частицы, определялась его активность, после чего определялась масса биоткани, поглотившей энергию излучения этого элемента с объемом, равным объему слоя ракообразующих клеток, поглотивших энергию. После этого производился расчет поглощенной энергии в этом слое с учетом толщины и глубины расположения слоя ракообразующих клеток (см. рис. 1). Кроме того, учитывался коэффициент самопоглощения в самой "горячей" частице, как показано ниже.

Результаты расчета приведены на рис. 2.

При этом необходимо отметить, что граница чувствительной области ET (равно как и Al) определена [1] в ~ 40 мкм, а альфа-частицы (с энергией 5,0 - 5,8 МэВ) имеют максимальный пробег в биоткани 33 - 40 мкм. Такое совпадение приводит к следующей очень важной особенности: различие в глубине расположения чувствительного слоя ET между 35 и 40 мкм приводит к различию в суточной дозе почти в 50 раз. Поэтому в зависимости от особенностей организма и даже от его состояния доза облучения топливными частицами может изменяться в десятки раз.

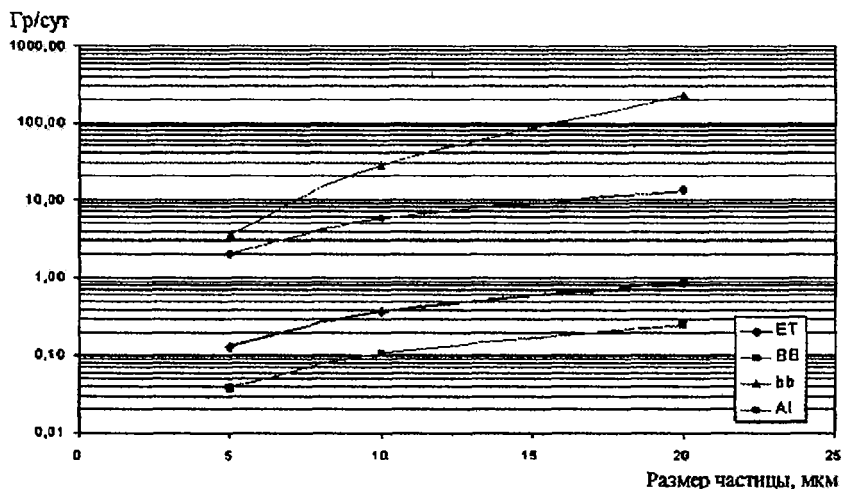


Рис. 2. Суточная поглощенная доза с учетом самопоглощения в частице.

Расчет риска облучения "горячими" частицами

Как показано выше, поглощенные дозы облучения достаточно велики. Учитывая, что процесс облучения "горячей" частицей носит вероятностный характер, для определения опасности такого облучения необходимо оценить его радиологический риск.

Частица может быть выведена из отдела легочной системы человека как через короткое время (при этом отдел получит дозу, не превышающую порог возникновения детерминистических эффектов), так и через время, когда этот порог будет превышен. Следовательно, оценка риска для каждого из упомянутых выше отделов легочной системы человека производится по формуле

$$r = \begin{cases} D_i \cdot r_{iE} \cdot P_{inh} \cdot P_{i\,dep} \cdot P_{i\,clr}, & \text{if } D_i \cdot P_{i\,clr} < D_{st} \\ P_{inh} \cdot P_{i\,dep} \cdot P_{i\,clr}, & \text{if } D_i \cdot P_{i\,clr} > D_{st} \end{cases} \quad (1)$$

где D_i - доза облучения от "горячих" частиц i -го отдела легочной системы человека, Гр; D_{st} - доза, при которой возникают детерминистические эффекты [9], Гр; r_{iE} - вероятность возникновения раковой опухоли в i -м отделе легочной системы человека, Гр⁻¹; P_{inh} - вероятность вдохнуть "горячую" частицу (зависит от концентрации частиц в воздухе), год⁻¹; $P_{i\,dep}$ - вероятность того, что частица попадет в i -й отдел легочной системы человека и задержится там; $P_{i\,clr}$ - вероятность вывода частицы из i -го отдела легочной системы человека за время t ; t - время облучения.

Вероятность того, что частица будет находиться во вдыхаемом воздухе, определяется как

$$P_{inh} = 1 - \left(1 - \frac{V_i}{V_p(d)}\right)^h$$

где V_i - объем вдыхаемого воздуха за один вдох, м³; $V_p(d)$ - объем воздуха, в котором находится хотя бы одна частица, зависящий от размера частицы d , л / м³; h - количество вдохов в год.

Концентрация “горячих” частиц в воздухе взята из работ [7, 8], она равна в невозмущенном воздухе одной частице на 1000 м³ в районе с. Заполье и одной частице на 300 - 500 м³ в локальной зоне объекта “Укрытие”.

Вероятность P_{idep} взята из публикации МКРЗ № 66 [1]. Она учитывает способность частицы попасть в определенный отдел легочной системы человека, а также вероятность ее удержания там.

P_{iclr} - это вероятность вывода частицы из i -го отдела легочной системы человека за время облучения. Она рассчитана на основе периода полувыведения радиоактивных частиц из легочной системы [1].

Наиболее сложно определить коэффициент r_{LE} - вероятность возникновения раковой опухоли в i -м отделе легочной системы человека, Гр⁻¹. Как показано выше, поглощенная доза значительна. Определять эффект от этой дозы по кривым зависимости “доза - эффект”, полученным на основе эпидемиологических данных облученных при атомной бомбардировке Японии [9] и другим, по-нашему мнению, не совсем корректно, так как эти данные получены на основе облучения всего тела или органа, а не микрообъемов. В настоящее время вопрос влияния на человека облучения микрообъемов активно изучается. В данной работе принята концепция трансформации клетки при однократном прохождении через ее ядро альфа-частицы [10].

При расчете риска облучения “горячими” частицами в локальной зоне объекта “Укрытие” время нахождения персонала в год на промплощадке принято максимально 200 ч (исходя из МЭД и предела дозы облучения персонала). Также в этом случае используется ослабление поступления в организм пыли за счет применения дополнительных СИЗ органов дыхания (коэффициент 0,05).

На рис. 3 изображен суммарный риск облучения “горячими” частицами на промплощадке объекта “Укрытие”. Выделенными чертами показаны границы индивидуального риска для персонала (сверху) и пренебрежимый риск (снизу).

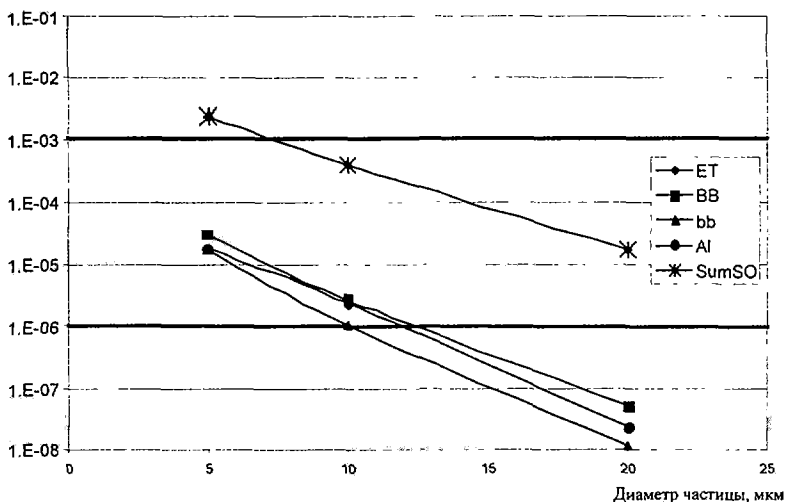


Рис. 3. Суммарный риск облучения "горячими" частицами при работе на промплощадке объекта "Укрытие".

Выводы

1. Необходимо определить референтную глубину расположения слоя базальных клеток в ET области, а также глубину расположения AI области, так как небольшие отклонения в этих значениях приводят к большим отклонениям в поглощенной дозе (и соответственно в риске) в этих областях.

2. Расчетный риск от облучения "горячими" частицами достаточно близок к границе индивидуального риска для персонала, а в некоторых случаях даже превышает его, поэтому необходимо дальнейшее исследование дозиметрии "горячих" частиц и рисков от такого облучения.

Список литературы

1. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection – Oxford: Pergamon Press, 1996. – 484 p.

2. Получение экспериментальных данных для определения современного состояния пылевого загрязнения и проведение количественных оценок последствий радиационной аварии на объекте "Укрытие": (Отчет МНТЦ по первому этапу договора 78/96). - Чернобыль, 1997.

3. Available on-line by <http://physics.nist.gov/Star>

4. Борзаковский А.Е., Чеснокова Т.Д., Пучеров Н.Н. Торможение

протонов и альфа-частиц в сложных веществах (биологические объекты). - Киев, 1981. - 20 с. - (Препр./АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-81-32).

5. *International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 49, Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles.*

6. *Varelas, C., Biersack, J. Reflection of energetic particles from atomic or ionic chains in single crystals // Nucl. Instr. Meth. - 1970. — Vol. 79. - P. 213.*

7. *Технический отчет о ходе выполнения работ по договору 44-РЭ/96 "Исследование "объекта Укрытие" как источника радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы. Разработка регламента контроля неорганизованных выбросов радиоактивного аэрозоля из ОУ" / Украинская академия аграрных наук. Ин-т агроэкологии и биотехнологии. - Киев, 1999.*

8. *Гаргер Е.К., Кашпур В.А. Радиоактивные аэрозоли в приземном слое атмосферы 30-км зоны ЧАЭС // Тезисы докладов 5-й ежегодной научно-практической конференции Международного Чернобыльского Центра "В 21 столетие с безопасными ядерными технологиями". - Славутич, 2001.*

9. *Estimating radiogenic cancer risks, EPA402-R-93- 076, U. S. Environmental Protection Agency, June 1994.*

10. *Richard C. Miller, Gerhard Randers-Pehrson, Charles R. Geard et al. The oncogenic transforming potential of the passage of single a particles through mammalian cell nuclei // Procl. Natl. Acad. Sci. USA Applied Biological Sciences. - 1999. - Vol. 96. - P. 19 - 22.*