

Энергетическая зависимость фактора качества для оценки персонального эквивалента дозы фотонного излучения

А. В. Белоусов^{1,*}, Г. А. Крусанов^{1,2,†}, А. П. Черняев^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 28.06.2017; Подписана в печать 29.06.2017)

В работе с помощью компьютерного моделирования методом Монте Карло (программный код Geant4) произведена оценка энергетической зависимости персонального эквивалента дозы $H_p(0.07)$, $H_p(3)$, $H_p(10)$ фотонного излучения с энергиями до 40 МэВ в водном фантоме. Для оценки энергетической зависимости H_p выполнен расчет среднедозовых значений линейной передачи энергии (ЛПЭ) всех видов вторичных частиц в тонком слое чувствительного детектора, расположенного на глубинах 0.07, 3 и 10 мм соответственно. Показано, что в данном диапазоне энергий фотонов фактор качества, равный отношению H_p/D , где D — поглощенная доза, может существенно отличаться от рекомендованного для фотонов всех энергий значения, равного единице. Основная причина увеличения фактора качества связана с большим вкладом продуктов фотоядерных реакций.

PACS: 87.53.Vn.

УДК: 539.122.04.

Ключевые слова: персональный эквивалент дозы, фактор качества, ЛПЭ, фотоядерные реакции, Монте Карло, Geant4.

ВВЕДЕНИЕ

Для персонального мониторинга в условиях внешнего облучения используется величина, называемая эквивалентом дозы H [1]. Эта величина определена как произведение поглощенной дозы D в данной точке на среднее значение фактора качества (в отечественной литературе называемого также коэффициентом качества) Q в данной точке:

$$H = Q \cdot D. \quad (1)$$

Для фотонов рекомендованное значение фактора качества (ФК) во всём диапазоне энергий составляет 1, хотя и отмечается наличие энергетической зависимости фактора качества от ЛПЭ для других типов частиц. При взаимодействии фотонов с веществом образуются потоки вторичных частиц, в т. ч. тяжелых заряженных частиц при значении энергии выше порога фотоядерных реакций. Также как и при облучении тонких слоев фотонами с энергией выше порога фотоядерных реакций [2], вклад вторичных электронов в поглощенную дозу может быть сравним с вкладом тяжелых частиц и ядер отдачи. Несмотря на существенно большее (примерно в 100 раз) сечение образования вторичных электронов в данном диапазоне энергий, вследствие их преимущественного распространения в направлении первичных фотонов передача энергии производится не поверхностным, а более глубоко лежащим сло-

ям. Напротив, тяжелые частицы передают свою энергию локально в точке образования. С учетом высокого значения линейной передачи энергии (ЛПЭ) тяжелых заряженных частиц — продуктов фотоядерных реакций, а следовательно большого значения ФК, их вклад в суммарный эквивалент дозы может быть весьма значителен. В результате, отношение H_p/D будет существенно (по меркам радиационной безопасности) отличаться от 1. Целью работы является оценка энергетической зависимости фактора качества монохроматического фотонного излучения с энергиями до 40 МэВ в водной среде методом компьютерного моделирования.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки степени радиационной опасности излучений определенного вида используется среднее значение фактора качества, которое определяется как:

$$Q = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q(L) D_L(L) dL, \quad (2)$$

где $Q(L)$ — функция полной линейной передачи энергии (ЛПЭ) L в воде, $D_L(L)dL$ — поглощенная в точке доза, обусловленная излучением с ЛПЭ в диапазоне $(L, L + dL)$. Зависимость фактора качества излучения Q от ЛПЭ L вводится следующим образом [1]:

$$Q(L) = \begin{cases} 1, & L \leq 10 \\ 0.32L - 2.2, & 10 < L < 100 \text{ кэВ/мкм} \\ 300/\sqrt{L}, & L \geq 100 \end{cases} \quad (3)$$

*E-mail: belousovav@physics.msu.ru

†E-mail: krusanov@physics.msu.ru

На практике вычисления производятся по формуле (3), в которой в качестве аргумента берется среднедозовое значение ЛПЭ L_D :

$$L_D = \frac{1}{D} \int_0^\infty LD(L)dL. \quad (4)$$

Моделирование выполнено с помощью инструментария Geant4 [3–5], разработанного в ЦЕРН. Облучаемый фантом представляет собой параллелепипед 30 см × 30 см × 15 см, заполненный водой. «Чувствительный» слой размерами 1 см × 1 см × 6 мкм, в котором ведется накопление данных, расположен вдоль оси пучка в центре фантома. Для каждой частицы, испытавшей взаимодействие внутри чувствительного слоя, определяются два параметра: StepLength (Δl_i) — расстояние между двумя соседними точками, в которых происходит какое-либо взаимодействие данной частицы с веществом (шаг) и TotalEnergyDeposit (ΔE_i) — полная энергия, потерянная на данном шаге. На основании этих значений вычисляется линейная передача энергии (ЛПЭ) на каждом шаге: $L_i = \Delta E_i / \Delta l_i$. Среднедозовое значение ЛПЭ может быть вычислено как взвешенная сумма

$$L_D = \sum L_i w_i, \quad (5)$$

где L_i — значение ЛПЭ на i -м шаге (для любой частицы), а веса w_i определяются поглощенной дозой D_i в объеме интереса:

$$w_i = \frac{D_i}{\sum D_i}. \quad (6)$$

В настоящей работе объем интереса имеет фиксированную массу, поэтому весовые коэффициенты могут быть записаны через поглощенную в объеме энергию ΔE_i : $w_i = \frac{D_i}{\sum D_i} = \frac{\Delta E_i}{\sum \Delta E_i}$. Подставляя данное выражение в уравнение (5) окончательно получаем для среднедозового значения ЛПЭ следующую формулу:

$$L_D = \frac{\sum \frac{\Delta E_i^2}{\Delta l_i}}{\sum \Delta E_i}. \quad (7)$$

Таким образом, ФК, характеризующий отношение персонального эквивалента дозы к поглощенной дозе, определяется выражением

$$H_p/D = Q(L_D). \quad (8)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов фактора качества $Q(L_D)$ по формуле (8) для детекторов, расположенных на глубинах 0.07, 3 и 10 мм представлены на рис. 1, 2, 3 соответственно.

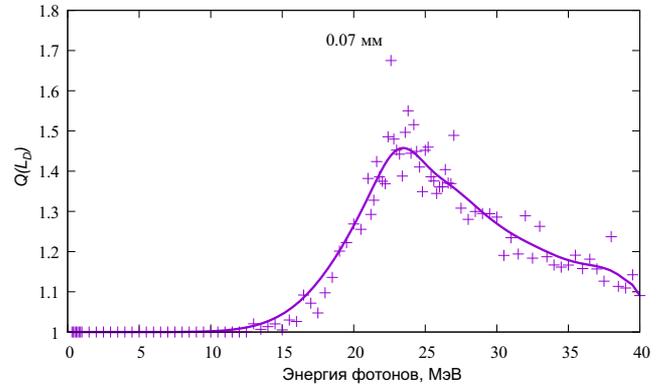


Рис. 1: Энергетическая зависимость фактора качества фотонного излучения, рассчитанная на глубине 0.07 мм

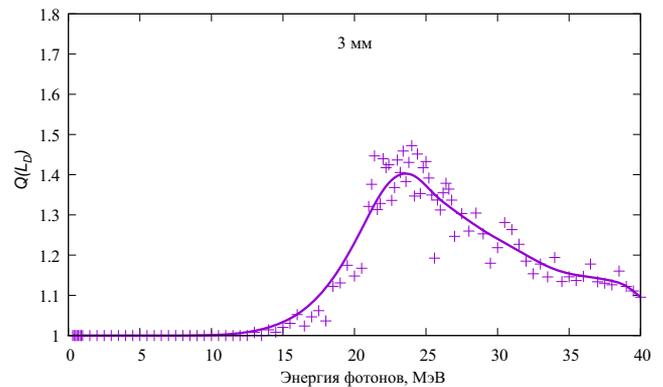


Рис. 2: Энергетическая зависимость фактора качества фотонного излучения, рассчитанная на глубине 3 мм

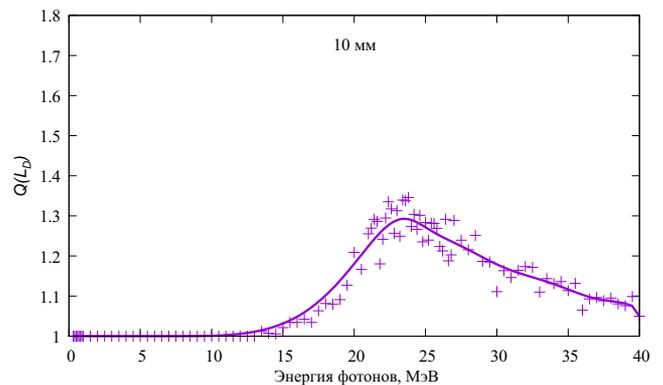


Рис. 3: Энергетическая зависимость фактора качества фотонного излучения, рассчитанная на глубине 10 мм

Фактор качества начинает превышать значение, равное 1, начиная с энергии фотонов ~10 МэВ, когда становится заметным вклад фотоядерных реакций (~1%) в общее сечение взаимодействия. Затем график проходит через широкий максимум в области энергий 20–25 МэВ, соответствующий максимуму гигантского дипольного резонанса (ГДР) на легких элементах. Значения в максимуме составляют 1.5, 1.4 и 1.3 для глубин

0.07, 3 и 10 мм. Отличие эквивалента дозы от поглощенной дозы на 50% является весьма существенным как с точки зрения радиационной безопасности, так и в области лучевой терапии, где такое превышение может привести к осложнениям на коже. Оценка эквивалента дозы исходя из среднедозового значения ЛПЭ может привести к получению заниженных значений. Действительно, эквивалент дозы, создаваемый излучениями различного типа, можно вычислить как сумму

$$H = \sum Q_i D_i, \quad (9)$$

где Q_i — величина фактора качества для излучения i -го типа, которое создает в объеме интереса поглощенную дозу D_i . (Хотя обычно под фразой «излучения i -го типа» понимают различного рода частицы (протоны, электроны и т.д.), в данном случае тип излучения будет определяться соответствующим значением фактора качества). Подавляющее большинство вторичных частиц имеет ЛПЭ менее 100 кэВ/мкм, среднедозовое значение соответственно будет находиться на возрастающей части формулы (3) и результат будет занижен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование прохождения фотонного излучения через вещество, определено значение ФК фотонного излучения в зависимости от их энергий. Показано, что в области энергий 10–40 МэВ персональный эквивалент дозы может превышать поглощенную дозу на 30–50% в зависимости от глубины, на которой он определяется. Данное превышение весьма существенно для целей радиационной безопасности. Основная причина увеличения персонального эквивалента дозы связана с высоким вкладом продуктов фотоядерных реакций в поглощенную дозу в околоповерхностных слоях. Для дальнейшего повышения точности оценок необходимо оценить, насколько оправдана концепция среднедозового значения ЛПЭ применительно к данной области. Эта весьма ресурсоемкая задача стоит в дальнейших планах авторов.

Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова.

- [1] ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4).
 [2] Белоусов А. В., Калачев А. А., Крусанов Г. А., Черняев А. П. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. 2015. № 5. С. 86. (Belousov A. V., Kalachev A. A., Krusanov G. A., Chernyaev A. P. Mosc. Univ. Phys. Bull. 2015. 70, N 5. P. 416.)

- [3] Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. Nuclear Instruments and Methods A. 2003. **506**. P. 250.
 [4] Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. **53**, N 1. P. 270.
 [5] Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. Nuclear Instruments and Methods A. 2016. **835**. P. 186.

Photon radiation quality factor energy dependence for personal dose equivalent calculation

A. V. Belousov^{1,a}, G. A. Krusanov^{1,2,b}, A. P. Chernyaev^{1,2}

¹Department of accelerators' physics and radiation medicine, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^abelousovav@physics.msu.ru, ^bkrusanov@physics.msu.ru

Using the Monte Carlo computer simulation (Geant4 code), the energy dependence of the personal dose equivalent $H_p(0.07)$, $H_p(3)$, $H_p(10)$ of photon radiation with energies up to 40 MeV in water phantom was estimated. To estimate the energy dependence of H_p , the calculation of linear energy transfer (LET) averaged by dose of all types of secondary particles in a thin layer of a sensitive detector located at depths of 0.07, 3 and 10 mm, respectively, is performed. It is shown that in the given range of photon energies, the quality factor equal to the ratio H_p/D , where D is the absorbed dose, can differ significantly from the value recommended for photons of all energies equal to unity. The main reason for the increase in the quality factor is due to the large contribution of photonuclear reaction products.

PACS: 87.53.Bn.

Keywords: personal dose equivalent, quality factor, LET, photonuclear reactions, Monte Carlo, Geant4.

Received 28 June 2017.

Сведения об авторах

1. Белоусов Александр Витальевич — канд. физ.-мат.наук., доцент; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: belousovav@physics.msu.ru.
2. Крусанов Григорий Андреевич — аспирант; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: krusanov@physics.msu.ru.
3. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат.наук, профессор, заведующий кафедрой; тел.: (495) 939-13-44.