

ОЦЕНКА СРЕДНЕГО РАДИАЦИОННОГО ВЗВЕШИВАЮЩЕГО ФАКТОРА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОНКИХ СЛОЕВ ТКАНЕЙ ТОРМОЗНЫМИ ФОТОНАМИ

А.В. Белоусов, А.С. Осипов, А.П. Черняев
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва

При прохождении фотонного излучения в биологических тканях возникают потоки вторичных частиц. В результате фотоядерных реакций образуются излучения, обладающие высоким значением линейной передачи энергии, и, как следствие, высоким значением радиационного взвешивающего фактора w_R . При облучении тонких слоев вторичные электроны вследствие большого пробега не успевают передать всю свою энергию веществу слоя. Образовавшиеся тяжелые частицы передают свою энергию веществу практически локально. В результате вклад вторичных тяжелых частиц в эквивалентную дозу может быть велик, несмотря на малую вероятность протекания фотоядерных реакций. В работе оценивается среднее значение w_R всех видов излучений, индуцированных при облучении тонких слоев фотонами тормозного спектра.

Ключевые слова: относительная биологическая эффективность, спектры тормозного излучения, радиационный взвешивающий фактор, продукты фотоядерных реакций, биологические ткани, тонкие слои

Введение

Современные аппараты для лучевой терапии генерируют тормозное излучение высокой энергии. Известно множество работ, авторы которых на основе экспериментальных данных по определению относительной биологической эффективности (ОБЭ), результатов микродозиметрических экспериментов и расчетов, а также компьютерного моделирования пришли к выводу, что ОБЭ фотонов зависит от их энергии.

В частности, облучение клонированных клеток V79 тормозными фотонами от терапевтического разрезного микротрона на энергию 50 МэВ показало, что ОБЭ, определенное относительно тормозного пучка с максимальной энергией 4 МэВ, имеет значение 1,12–1,14 [1]. Аналогичные эксперименты на микроколониях крипт кишечника мышей привели к оценкам ОБЭ 1,06–1,10 для фотонов тормозного спектра с максимальной энергией 50 МэВ [2]. Gudowska

et al, основываясь на тормозных спектрах, полученных симулированием по методу Монте-Карло, и численных оценках вклада фотоядерных реакций в поглощенную тканями пациента дозу получили значения ОБЭ фотонов с энергией 50 МэВ $1,02 \pm 0,01$ [3]. Похожие оценки получены Sprunty с соавторами [4]. Tilikidis et al на основании экспериментально измеренных микродозиметрических характеристик пучка тормозных фотонов с конечной энергией 50 МэВ оценили ОБЭ по отношению к излучению ^{60}Co как 1,13 [5]. Важно отметить, что низкие значения оценок ОБЭ [3, 4] получены при выполнении расчетов для тела пациента, тогда как при экспериментальных исследованиях, в ходе которых облучались объекты малой толщины, получены большие значения ОБЭ.

Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) [6] признает тот факт, что многочисленные доказательства ясно свидетельствуют о существовании энергетической

зависимости ОБЭ фотонов высоких энергий. Увеличение ОБЭ высокоэнергетичных фотонов связано с образованием в результате фотоядерных реакций тяжелых заряженных частиц (протоны, альфа-частицы и т.д.), ядер отдачи и нейтронов, обладающих высоким значением ЛПЭ. Тем не менее, МКРЗ рекомендует считать радиационный взвешивающий фактор* (radiation weighting factor, w_R), характеризующий радиобиологическое действие ионизирующих излучений, равным единице для фотонов всех энергий. Данная рекомендация обосновывается тем, что радиационный взвешивающий фактор вводится для характеристики радиационной опасности данного вида излучения для человека в целом. Для электронов и пионов также рекомендуется значение 1; для протонов – 2 (в предыдущих рекомендациях было значение 5); для альфа-частиц, ядер отдачи и тяжелых ионов – 20.

Фотоны высоких энергий, проходя через вещество, передают свою энергию в основном посредством неупругого комптоновского рассеяния и в результате эффекта образования электрон-позитронных пар. Вкладом фотоэффекта в случае легких элементов, преимущественно и составляющих биологическую ткань, можно пренебречь при энергии фотонов более 10 МэВ. Пробег образовавшихся в результате обоих процессов вторичных электронов составляет ~5 см. При прохождении фотонного излучения через толстый поглотитель только малая часть поглощенной в тканях дозы, обусловлена продуктами фотоядерных реакций, поскольку образовавшиеся электроны теряют в пределах поглотителя почти всю свою энергию, а вероятность их образования существенно выше вероятности протекания фотоядерных реакций.

В случае тонких слоев вещества электроны покидают пределы слоя, не успевая растратить всю свою энергию. Образовавшиеся в результате фотоядерных реакций тяжелые заряженные частицы и ядра отдачи обладают высоким значением ЛПЭ и существенно меньшим, чем электроны пробегом, из-за чего вся их энергия поглощается практически локально. Несмотря на то, что сечение фотоядерных реакций много меньше суммарного сечения других видов взаимодействия фотонов с веще-

ством, вклад продуктов (протонов, ядер отдачи) может оказаться значительным.

Например, при энергии фотона ~23 МэВ, что соответствует максимуму сечения реакции $^{16}_8\text{O}(\gamma, p)^{15}_7\text{N}$ образуется протон (условная вероятность** образования ~1 %) с энергией ~8 МэВ. Его пробег в мягких тканях составляет ~0,3 мм, потери энергии в пределах слоя толщиной 1 мм составят ~6 МэВ. Фотоны с энергией 23 МэВ образуют электроны со средней энергией ~10 МэВ, условная вероятность образования электронов ~99 %, тормозная способность таких электронов ~2 МэВ/см. В слое толщиной 1 мм такие электроны оставляют энергию ~100 кэВ. Вклад протонов в поглощенную дозу, предполагая, что вся доза создается только протонами и электронами, составит $6 \times 0,01 / (6 \times 0,01 + 0,1 \times 0,99) \sim 40$ %. Даже из этой очень грубой оценки видно, что с учетом фотоядерных реакций формирование дозы в тонких слоях сильно отличается от формирования дозы в толстых поглотителях. В силу вдвое большего радиационного взвешивающего фактора вклад протонов в эквивалентную дозу будет еще выше. Примерно такая же ситуация наблюдается для ядер отдачи: их энергия примерно в 15–20 раз меньше, чем энергия протонов, тем не менее с учетом значения $w_R=20$ вклад в эквивалентную дозу по порядку равен вкладу протонов, тогда как вклад в поглощенную дозу чрезвычайно мал.

Целями настоящей работы являются: компьютерное моделирование прохождения высокоэнергетичного фотонного излучения через тонкие слои биологической ткани; определение вклада тяжелых частиц и ядер отдачи, образовавшихся в результате фотоядерных реакций в поглощенную дозу; оценка среднего значения радиационного взвешивающего фактора всех видов излучений, индуцированных фотонами высоких энергий в объеме слоя; выполнение аналогичных расчетов для спектров тормозного излучения с различной максимальной энергией.

Моделирование

В качестве инструмента для проведения компьютерного моделирования по методу Мон-

* В предыдущих рекомендациях в схожих целях использовалось понятие коэффициента качества излучения

** Условная вероятность есть вероятность данного процесса, при условии, что фотон каким-либо образом провзаимодействовал с веществом.

те-Карло выбран программный пакет GEANT4.9.6. Данный пакет позволяет симулировать транспорт всех видов частиц через среду произвольной (определяемой пользователем) геометрии и произвольного элементного состава. Для фотонов симулируются следующие виды взаимодействия: упругое рассеяние, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар в поле ядра и атомных электронов, фотоядерные реакции, рождение π -мезонов. Для электронов и позитронов учитываются ионизационные потери и потери на тормозное излучение, упругие столкновения и многократное рассеяние. Для позитронов дополнительно учитываются процессы аннигиляции, в том числе и на лету. Для тяжелых заряженных частиц учитываются те же процессы, что и для электронов, а также неупругое рассеяние в ядерных реакциях. Транспорт фотонов и электронов (позитронов) рассчитывается вплоть до минимальной энергии 250 эВ, для тяжелых заряженных частиц энергия отсечки 1 кэВ.

Спектры тормозного излучения получены при использовании стандартного примера "Medical Linac Advanced Example", входящего в пакет GEANT4 и симулирующего медицинский ускоритель [7]. Электроны генерируют фотоны тормозного излучения в вольфрамовой мишени, излучение фильтруется через 9 мм Ве + 6 мм вольфрама.

В выбранных условиях симуляции пластина из усредненной биологической ткани в виде параллелепипеда произвольной толщины, элементный состав которой соответствует формуле $(C_5H_{40}O_{18}N)_x$, облучается монохроматическим пучком фотонов, испускаемых с плоского источника в виде круга радиуса 10 см. Поперечное сечение параллелепипеда представляет собой квадрат, вписанный в круг, с которого испускаются частицы, если смотреть по ходу пучка. В слое биологической ткани определяется количество взаимодействий всех типов частиц и энергия, выделившаяся во всем слое в результате этих взаимодействий. На основании этих данных определяется вклад фотоядерных реакций в полное сечение взаимодействия фотонного излучения и вклад частиц, в том числе ядер отдачи, образовавшихся в результате протекания в слое фотоядерных реакций, в поглощенную дозу.

Результаты и обсуждение

При прохождении фотонного излучения через биологическую ткань в основном происходят фотоядерные реакции типа (γ, n) , (γ, p) , (γ, np) и (γ, α) . Среднее значение радиационного взвешивающего фактора (а также коэффициента качества) всех видов излучений (протоны, альфа-частицы, ядра отдачи, электроны и позитроны, фотоны), индуцированных в слое биологической ткани первичными фотонами, можно оценить согласно выражению

$$\langle w_R(E_\gamma) \rangle = \delta_{e,\gamma}(E_\gamma) \times 1 + \delta_{\alpha, NR}(E_\gamma) \times 20 + \delta_p(E_\gamma) \times 2, \quad (1)$$

где $\delta_{e,\gamma}(E_\gamma)$ – суммарный вклад фотонов, электронов и позитронов в поглощенную дозу, при облучении монохроматическим пучком фотонов с энергией E_γ ; $\delta_{\alpha, NR}(E_\gamma)$ – суммарный вклад α -частиц и ядер отдачи; $\delta_p(E_\gamma)$ – вклад протонов. Поскольку альфа-частицы и ядра отдачи обладают одинаковым значением w_R , вклад этих продуктов объединен. Вследствие малой толщины слоя и большой длины свободного пробега, образовавшихся фотонейтронов, их вклад в поглощенную дозу пренебрежимо мал.

Вклад альфа-частиц и ядер отдачи уменьшается с возрастанием толщины облучаемого слоя. Поведение вклада протонов в рассматриваемом диапазоне толщин и энергий первичного пучка более сложно. При очень малых толщинах протоны не успевают потерять в слое всю свою энергию и, по мере увеличения толщины слоя, все большая часть их энергия поглощается внутри объема, их вклад в поглощенную дозу растет. При дальнейшем увеличении толщины слоя потери энергии протонов, вследствие малости их пробега становятся примерно постоянными, а все большая часть энергии вторичных электронов передается облучаемому объему, вклад протонов начинает уменьшаться.

Кривые, описывающие энергетическую зависимость вкладов соответствующих частиц в поглощенную дозу, имеют многочисленные локальные максимумы и минимумы, что обусловлено большим количеством возможных каналов фотоядерных реакций. Другой причиной является тот факт, что по мере роста энергии открывается все большее число каналов и сильно меняется вероятность каждого из них, поскольку сечения в данной области энергий описываются относительно узкими максимумами гигантских ядерных резонансов.

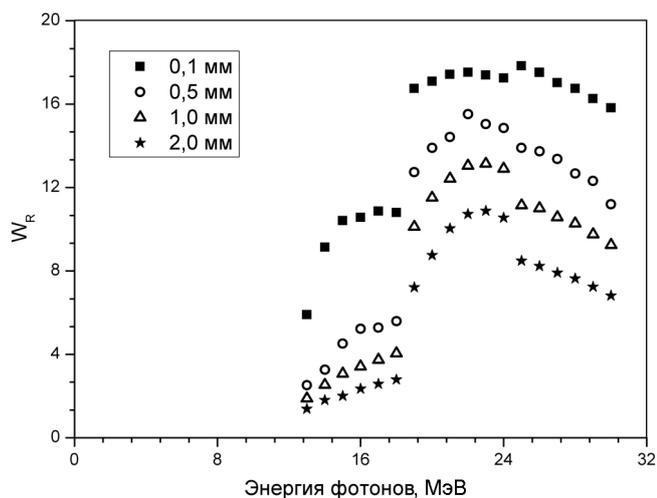


Рис. 1. Зависимость среднего радиационного взвешивающего фактора всех видов излучений от энергии первичных фотонов для слоев различной толщины

Результаты расчетов по формуле (1) энергетической зависимости радиационного взвешивающего w_R всех видов излучений, индуцированных в тонком слое при облучении монохроматическими фотонами высоких энергий для слоев различной толщины, показаны на рис. 1. В энергетических зависимостях усредненных значений w_R всех видов излучений, индуцированных первичными фотонами в тонком слое, также наблюдаются локальные максимумы и минимумы описанной выше природы, однако выражены они гораздо слабее. По мере увеличения толщины слоя прослеживается тенденция к уменьшению w_R . Форма кривых, описывающих энергетические зависимости, слабо зависит от толщины облучаемого слоя.

На рис. 2 представлены значения радиационного взвешивающего фактора для слоев различной толщины, усредненные по спектрам тормозного излучения в зависимости от максимальной энергии спектров. Кривые плавно возрастают по мере роста максимальной энергии, выходя на пологий локальный максимум в области энергий 30 МэВ. Сохраняется общая тенденция увеличения w_R с уменьшением толщины облучаемого слоя. Так, для слоя толщиной 0,1 мм радиационный взвешивающий фактор принимает значение $\sim 2,0$, тогда как для слоя толщиной 2,0 мм $\sim 1,3$.

Зависимость радиационного взвешивающего фактора всех видов излучений, индуциро-

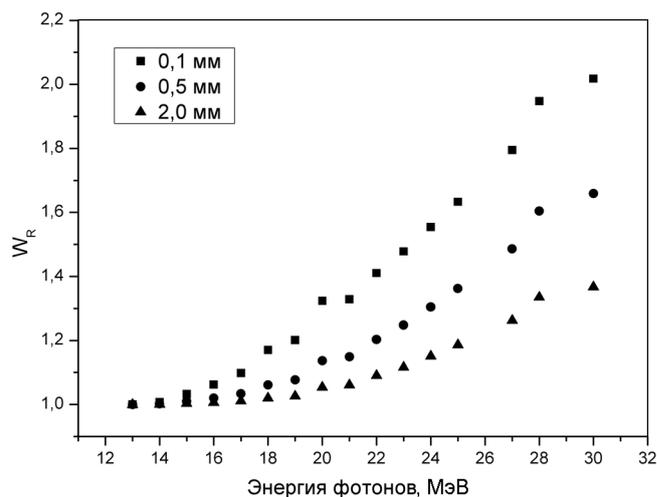


Рис. 2. Зависимость w_R тормозного излучения от максимальной энергии спектра

ванных фотонами тормозного спектра, от толщины облучаемого объема для различных значений максимальной энергии тормозного спектра E_{γ}^{\max} описывается следующим образом. При значении максимальной энергии тормозного излучения 15 МэВ доля фотонов, которые могут участвовать в фотоядерных реакциях, мала. Кроме того, мало сечение фотоядерных реакций при данной энергии фотонов. В результате значение w_R слабо отличается от единицы для всего диапазона исследуемых толщин. По мере роста верхней границы энергии радиационный взвешивающий фактор отличается от 1 все более значительно, а значения w_R плавно уменьшаются с увеличением толщины слоя. Так, для спектров тормозного излучения с энергиями 20, 25 и 30 МэВ значения w_R изменяются в пределах 1.32–1.05, 1.63–1.18 и 2.02–1.37 соответственно при увеличении толщины слоя от 0.1 до 2 мм. В исследуемом диапазоне энергий тормозного излучения (до 30 МэВ) при всех значениях толщин радиационный взвешивающий фактор возрастает с увеличением энергии фотонов.

Заключение

Таким образом, с помощью компьютерной симуляции с использованием программного кода GEANT4.9.6, реализующего метод Монте-Карло, исследовано прохождение моноэнергетического фотонного излучения через тонкие

слои биологической ткани среднего элементного состава. Смоделированы спектры тормозного излучения, эмулирующие спектры, получаемые на медицинских линейных ускорителях.

Показано, что средний радиационный взвешивающий фактор всех видов излучений, индуцированных в тонком слое при облучении монохроматическими фотонами, может достигать значений, на порядок превышающих рекомендованное МКРЗ значение, равное единице. В случае облучения тонких слоев фотонами тормозного спектра среднее значение w_R достигает $\sim 2,0$ и $\sim 1,3$ при толщинах 0,1 мм и 2,0 мм соответственно.

Работа поддержана грантом РФФИ 12-02-31390_мол_а.

Список литературы

1. Zackrisson B., Johansson B., Ostbergh P. Relative biological effectiveness of high-energy photons (up to 50 MV) and electrons (50 MeV). // Radiat. Res. 1991, **128**, P. 192–196.
2. Zackrisson B., Karlsson M. Relative biological effectiveness of 50 MV x-rays on jejunal crypt survival *in vivo*. // Radiat. Res., 1992, **113**, P. 12–14.
3. Gudowska I., Brahme A., Andreo P. et al. Calculation of absorbed dose and biological effectiveness from photonuclear reactions in a bremsstrahlung beams of end point 50 MeV. // Phys. Med. Biol., 1999, **44**, P. 2099–2125.
4. Spurny F., Johansson L., Satherberg A. et al. The contribution of secondary heavy particles to the absorbed dose from high-energy photons beams. // Phys. Med. Biol., 1996, **41**, P. 2643–2656.
5. Tilikidis A., Lind B., Nafstadius P., Brahme A. An estimation of the relative biological effectiveness of 50 MV bremsstrahlung beams by microdosimetric techniques. // Phys. Med. Biol., 1996, **41**, P. 55–69.
6. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40 (2–5).
7. http://www.ge.infn.it/geant4/examples/medical_linac/

BREMSSTRAHLUNG IRRADIATION OF THIN TISSUE LAYERS

A.V. Belousov, A.S. Osipov, A.P. Tchernyaev

Physical Department, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

At passage of photon radiation to biological matter there are streams of secondary particles. As a result of photonuclear reactions the radiations possessing high value by a linear energy transfer (LET) and by high value of the radiation weighting factor w_R . In thin layer secondary electrons, owing to the big range, transfer to matter only a part of their kinetic energy. The formed heavy particles transfer all their energy to matter practically locally. As a result despite small probability of photonuclear reactions the contribution of secondary heavy charged particles and nuclei recoil to an absorbed dose can be great. In work average value w_R all kinds of the radiation induced by bremsstrahlung at irradiation of thin layers is estimated.

Key words: *relative biological effectiveness, bremsstrahlung spectra, radiation weighting factor, photonuclear reaction products, biological tissues, thin layers*

E-mail: BelousovAV@physics.msu.ru