Моделирование облучения тонких слоев биологической ткани низкоэнергетичным фотонным излучением

А.В. Белоусов^{*a*}, А.С. Осипов^{*b*}

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ^a belousovav@physics.msu.ru, ^bosipov_as@physics.msu.ru

Статья поступила 08.04.2013, подписана в печать 08.05.2013.

Моделируется прохождение фотонного излучения с энергией 1–400 кэВ через тонкие слои (0.001–1.0 мм) биологической ткани. Моделирование выполнено по методу Монте-Карло с использованием программного пакета GEANT 4.9. Получены энергетические зависимости поглощенной дозы, количества актов ионизации и количества актов ионизации, приходящихся на единицу поглощенной дозы для слоев различной толщины. Показано, что характер этих зависимостей во многом определяется толщиной слоя. В предположении, что одинаковые количества актов ионизации в слое вызывают одинаковый биологический эффект оценены энергетические зависимости относительной биологической эффективности фотонного излучения в исследуемом диапазоне энергий.

Ключевые слова: моделирование методом Монте-Карло, GEANT 4.9, относительная биологическая эффективность, фотоны, тонкие слои.

УДК: 53.043. PACS: 87.53.Dq.

Введение

Оценки радиационной чувствительности тонких слоев оксидов металлов, полупроводников, неорганических и биополимеров показывают, что тонкие пленки в основном более чувствительны в расчете на единицу массы, чем более толстые слои [1–2]. В последнее время появился интерес к радиационным повреждениям, происходящим при облучении тонких слоев биологических молекул [3–5]. Особое место среди этих исследований занимает облучение тонких пленок ДНК в связи с особой важностью для радиобиологии и лучевой терапии. Кроме того, многочисленные эксперименты по определению относительной биологической эффективности (ОБЭ) также проводятся на монослоях различных клеток.

Фотоны низких энергий производят при взаимодействии со средой первичные электроны низкой энергии, обладающие относительно высоким значением линейной передачи энергии. Радиобиологические данные, полученные при исследовании взаимодействия низкоэнергетичного фотонного излучения, могут использоваться для тестирования различных моделей радиационных повреждений биологических структур. При взаимодействии с тонкими слоями образовавшиеся электроны покидают пределы слоя, не успев растратить всей своей энергии. Таким образом, может происходить недооценка различных величин, например радиационно-химического выхода какого-либо продукта.

В связи с вышесказанным актуальной является задача моделирования прохождения низкоэнергетического фотонного излучения через тонкие слои биологической ткани. Целью работы является исследование энергетической зависимости поглощенной дозы и количества актов ионизации для слоев различной толщины. А также исследование зависимости этих же величин от толщины слоя. Оценка количества актов ионизации, приходящихся на единицу поглощенной в слое вещества дозы и оценка энергетической зависимости ОБЭ фотонов низких энергий.

1. Моделирование методом Монте-Карло

Вычисления выполнялись с использованием программного кода GEANT 4.9.10 для реализации метода Монте-Карло. Расчеты основаны на применении модели низкоэнергетических электромагнитных взаимодействий, разработанной в Национальной лаборатории Лоуренса Ливермора (LLNL). Данная модель симулирует электромагнитные взаимодействия до энергии фотонов и частиц 250 эВ и основана на оцененных библиотеках сечений EPDL97, EEDL и EADL. Трассируются все испущенные частицы и симулируются все виды взаимодействия для фотонов: фотоэлектрическое поглощение, комптоновское и рэлеевское рассеяние, процесс рождения пар. Транспорт электронов симулируется учетом процессов многократного рассеяния, ионизации и генерации тормозного излучения.

Геометрия эксперимента выглядит следующим образом. На тонкую пластину в форме плоского диска радиуса R = 3 см направляется поток фотонов от плоского круглого источника такого же радиуса. Элементный состав пластины соответствует усредненной биологической ткани: $C_5 H_{40} O_{18} N$. Все фотоны имеют одинаковое направление и одинаковую энергию, которая меняется в ходе различных симуляций. Для достижения расчетной погрешности менее 0.1% трассируется 10^9 первичных фотонов. Внутри слоя подсчитывается количество различных процессов (фотоэффекта, ионизации и т. д.) и выделенная в результате данных процессов энергия. На основании этих данных рассчитывается поглощенная доза и количество актов ионизации.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены кривые, описывающие зависимость количества актов ионизации, приходящихся на один фотон первичного изучения в зависимости



Рис. 1. Зависимость количества актов ионизации в расчете на один фотон первичного излучения от толщины облучаемого слоя для различных энергий фотонов

от толщины облучаемого слоя для фотонов различной энергии в диапазоне 1-10 кэВ. При прохождении фотонного излучения с энергией ~1 кэВ через биологическую ткань количество актов ионизации в расчете на один фотон первичного излучения сначала резко возрастает с увеличением толшины облучаемого слоя. а затем выходит на плато при толшине слоя свыше 0.05 мм. Данный ход кривой связан с малой энергий образовавшихся в результате фотопоглощения электронов, которой недостаточно для дальнейшей ионизации атомов в слое¹. По мере увеличения энергии фотонного излучения E_{γ} ход возрастания кривых становится более плавным, и при энергиях более 10 кэВ можно полагать, что кривые почти линейны в рассматриваемом диапазоне толщин. Данный ход кривых объясняется тем фактом, что энергия фотоэлектронов становится достаточной для того, чтобы выйти за пределы тонкого слоя. Резкое возрастание в области низких энергий определяется высоким значением линейного коэффициента поглощения, при некоторых толщинах поглощаются практически все падающие фотоны. Линейный участок возрастания связан с увеличением вероятности взаимодействия фотонного излучения Р_γ по мере роста толщины слоя $l: P_{\gamma} = \Delta I/I = (1 - \exp(\mu l)) \approx \mu l$ при малых значениях µl.

На рис. 2 представлены кривые зависимости количества актов ионизации в расчете на один фотон первичного излучения от энергии первичного фотонного излучения для слоев различной толщины. Как видно из рис. 2, поведение кривых зависит от толщины облучаемого слоя. Для очень тонких слоев толщиной ~ 0.001 мм кривая монотонно убывает, причем градиент спада уменьшается с ростом энергии фотонного излучения. Резкий спад наблюдается в области доминирования фотоэлектрического поглощения вплоть до энергий ~ 20 кэВ. С ростом энергии градиент спада уменьшается, и при энергиях более 100 кэВ кривая



Puc. 2. Зависимость количества актов ионизации на один фотон первичного излучения от их энергии для слоев различной толщины

выходит на примерно постоянное значение. Для слоев толщиной более 0.005 мм после резкого спада в кривых наблюдается широкий минимум в районе 50 кэВ, после которого кривые слабо возрастают. Кривая для энергии фотонов 1 кэВ имеет форму, очень похожую на форму кривой, полученной в работе [6] при измерении радиационно-химического выхода сверхскрученных ДНК (supercoiled DNA) при облучении фотонами с энергией 1.5 кэВ.

Для лучшего понимания закономерностей на рис. 3 приводится зависимость вклада вторичной ионизации, вызванной высвобожденными в результате первичной



Рис. 3. Зависимость вклада вторичной ионизации в полную от толщины облучаемого слоя для первичных фотонов различной энергии





 $\square \ 0.001 \ \text{mm} \ \bigcirc 0.005 \ \text{mm} \ \bigtriangleup 0.01 \ \text{mm} \ \bigtriangledown 1.0 \ \text{mm}$

Рис. 4. Зависимость вклада вторичной ионизации в полную от энергии первичного фотонного излучения для слоев различной толщины

ионизации электронами среды, в полную ионизацию от толщины слоя для фотонов различных энергий, а на рис. 4 — от энергии фотонов для слоев различной толщины. На рис. 3 все кривые имеют похожую форму, резкое почти линейное возрастание — вклад вторичной ионизации по мере увеличения толщины слоя сменяется почти постоянным значением.

Для фотонов первичного излучения с энергией 1 кэВ вклад вторичной ионизации в полную ионизацию составляет $\sim 50\%$, т.е. энергии вторичных электронов недостаточно для выхода из слоя толщиной более 0.001 мм. По мере роста энергии фотонов кривые возрастают, все большее число вторичных электронов покидает слой, не успевая растратить всей своей энергии, кривые возрастают более плавно. Толщины, начиная с которых зависимость становится примерно постоянной, сдвигаются в область больших значений, а сам вклад возрастает. Для энергии фотонов 10–50 кэВ вклад в области плато составляет $\sim 60\%$, возрастая до $\sim 90\%$ при энергиях свыше 300 кэВ.

Кривые, изображающие зависимость вклада вторичной ионизации в полную от энергии фотонов (рис. 4), имеют сложную форму, вид которой зависит от толщины облучаемого слоя. Для слоев толщиной до 0.01 мм в кривых наблюдаются два локальных максимума, величина и положение которых зависят от толщины слоя. При энергии фотонного излучения свыше 100 кэВ кривые плавно уменьшаются с ростом энергии. Для более толстых слоев наблюдается иная зависимость. Так, для слоя толщиной 1.0 мм кривая быстро возрастает, достигая максимума 65% в области энергий в районе 20 кэВ, затем снижается, достигая локального минимума $\sim 58\%$ в области энергий 50 кэВ, и плавно возрастает по мере роста энергии фотонного излучения, достигая 93% при энергии 400 кэВ.

Зависимость поглощенной в слое дозы, рассчитанной на единичный фотон падающего излучения, от его толщины для различных энергий первичного фотонного излучения показана на рис. 5. Характер поведения



Рис. 5. Зависимость поглощенной в слое дозы от его толщины для различных энергий фотонов

кривых существенным образом зависит от энергии первичного излучения. В случае низких энергий фотонного излучения в области ~1 кэВ кривая монотонно уменьшается по мере увеличения толщины слоя. Вид кривой близок к линейной функции начиная с толщин порядка 0.005 мм. При малой энергии фотонов длина их свободного пробега так мала, что вероятность взаимодействия в слое приближается к единице. Линейность спада определяется линейным увеличением массы облучаемого объема с увеличением толщины слоя. По мере роста энергии фотонного излучения поведение кривых начинает меняться. Вплоть до энергии фотонов в районе 100 кэВ кривые, за исключением малого начального участка резкого возрастания, слабо меняются при увеличении толщины облучаемого слоя. В этой области увеличение вероятности взаимодействия фотонов, пропорциональной µl, а следовательно, увеличение выделившейся энергии компенсируется линейным увеличением массы. По мере возрастания энергии фотонного излучения переходная область становится все шире, и компенсация наступает при больших толщинах. Начальный участок возрастания кривых обусловлен неионизационными потерями энергии, вклад которых в полные потери показан на рис. 6.

Как видно из рис. 6, вклад ионизационных потерь в полные резко возрастает по мере увеличения толщины облучаемого слоя, постепенно выходя на плато. Для фотонов, с энергией 1 кэВ выход на плато происходит при толщине 0.005 мм, а вклад ионизационных потерь энергии составляет 50%. С ростом энергии фотонного излучения кривые возрастают менее резко. Вклад ионизационных потерь энергии возрастает, достигая ~ 95% для фотонов с энергией более 200 кэВ. При дальнейшем увеличении энергии фотонного излучения вклад ионизационных потерь растет менее быстро. Например, для фотонов с энергией 400 кэВ при толщине слоя 1.0 мм вклад составляет $\sim 90\%$ и он меньше, чем для фотонов с энергией 200 кэВ. Из рис. 6 следует, что в целях вычисления поглощенной дозы D выражение $dD/dt = I\mu_{km}$, где I — интенсивность фотонного излучения, а μ_{km} — массовый коэффициент передачи энергии фотонного излучения, может применяться без



Рис. 6. Вклад ионизационных потерь энергии в полные в зависимости от толщины слоя для различных энергий первичного излучения

существенных погрешностей только начиная с некоторых значений толщины слоя.

Зависимость поглощенной в толщине слоя дозы в расчете на один фотон первичного излучения от его энергии для слоев различной толщины представлена на рис. 7. Вид кривых примерно одинаков, после резкого спада до минимума в области энергий 40–50 кэВ кривые плавно возрастают. Для самых тонких слоев (до 0.01 мм) кривые проходят через слабо выраженный максимум, положение которого зависит от толщины слоя. В дальнейшем кривые слабо изменяются, возрастая или убывая в зависимости от толщины, и выходят на примерно постоянное значение.



Рис. 7. Зависимость поглощенной в толщине слоя дозы от энергии фотонного излучения для слоев различной толщины

Зависимости вклада ионизационных потерь энергии в полные потери от энергии первичного фотонного излучения (рис. 8) имеют сложную форму. Характер кривых сложным образом зависит от толщины облучаемого слоя. Для толщин менее 0.01 мм кривые резко спадают



Рис. 8. Зависимость вклада ионизационных потерь энергии в полные от энергии первичных фотонов для слоев различной толщины

до минимумов в области 15-30 кэВ в зависимости от толщины слоя, затем резко возрастают до максимумов в области 40-60 кэВ. Величина и положение локальных максимумов и минимумов зависит от толщины слоя, смещаясь в область более высоких энергий по мере увеличения толщины. При толщинах порядка 0.1 мм кривая сначала резко возрастает, достигая широкого максимума (90-95%) в области энергий от 15 до 135 кэВ, при дальнейшем увеличении энергии кривая резко спадает, постепенно выходя на плато (70%) при достижении энергии фотонов 300 кэВ. При толщинах порядка 1.0 мм кривая возрастает более резко примерно до 98% при энергиях свыше 50 кэВ, слабо меняется до достижения фотонами энергии 200 кэВ и в дальнейшем слабо спадает до 91% при энергии 400 кэВ.

Зависимость количества актов ионизации, приходящихся на единицу поглощенной в слое вещества дозы, от толщины слоя для пучков различных энергий представлена на рис. 9. Вид кривых практически одинаков для пучков различной энергии, кривые плавно возрастают по мере увеличения толщины слоя, выходя на постоянное значение, величина которого определяется энергией фотонов.

На рис. 10 представлена зависимость количества актов ионизации, приходящихся на единицу поглощенной дозы, от энергии фотонного излучения для облучаемых слоев различной толщины. Форма кривых слабо зависит от толщины облучаемого слоя — они сначала резко спадают, достигая минимума по мере роста энергии фотонов до энергии 10–20 кэВ. После резкого возрастания проходят через максимум в области энергий 30–45 кэВ и плавно спадают, выходя на плато при энергии фотонов более 100 кэВ. Отметим, что отношение значений кривых в максимуме к значениям в минимуме зависит от толщины слоя. Более подробное описание можно найти в предыдущей работе [7].



Рис. 9. Зависимость количества актов ионизации, приходящихся не единицу поглощенной дозы, от толщины облучаемого слоя для фотонов различной энергии





Относительная биологическая эффективность (RBE, relative biological effectiveness) ионизирующего излучения определяется как отношение доз опорного (референсного) излучения D_r к дозе исследуемого излучения D, при которых происходит одинаковый эффект: RBE = D_r/D . В качестве референсного излучения в настоящее время используется гамма-излучение радионуклида 60 Со. Полагая, как это принято, что основной биологический эффект обусловлен актам ионизации, его можно определить как отношение доз, при которых происходит одинаковое количество актов ионизации. Зависимость ОБЭ фотонного излучения от энергии для слоев различной толщины представлена на рис. 11. Вид кривых похож для слоев различной толщины: после резко спада до минимума в районе ~10 кэВ, положение которого слабо зависит от толщины, кривые возрастают до максимума в районе 30-45 кэВ, положение которого смещается в область больших энергий для слоев большей толщины. Видно,



Рис. 11. Энергетическая зависимость относительной биологической эффективности фотонного излучения при облучении слоев различной толщины

что величина ОБЭ существенным образом зависит от толщины облучаемого слоя. ОБЭ в тонких слоях может иметь значения существенно меньшие единицы. Максимальные значения в области энергий 10–100 кэВ меняются примерно на порядок, от 0.35 до 3. Эти результаты позволяют объяснить разброс экспериментальным образом определенных значений относительной биологической эффективности.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что в случае оценок радиационных повреждений (в том числе радиационно-химического выхода и ОБЭ), вызванных низкоэнергетичным фотонным излучением, в тонких слоях могут быть получены заниженные значения. Полученные зависимости от толщины слоя позволяют скорректировать эти значения. Функции зависимости от толщины выходят на плато начиная с определенных толщин, которые зависят от энергии первичного излучения.

Оценки энергетической зависимости относительной биологической эффективности, выполненные в том предположении, что одинаковые количества актов ионизации в слое вызывают одинаковой эффект, показывают существенную зависимость от толщины. Максимальные значения в области энергий 10–100 кэВ меняются примерно на порядок, от 0.35 до 3. Настоящий подход может быть применен к любым радиационным воздействиям с прямым (основанным на первичной ионизации) ионизирующим действием фотонного излучения.

Список литературы

- Davenas J., Stevenson I., Celette N. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2002. 191. P. 653.
- Chapiro A. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1988.
 32. P. 111.
- Fayard B., Touati A., Sage E. et al. // J. Chim. Phys. 1999.
 96. P. 147.

- Folkard M., Prise K.M., Broklehurst B., Michael B.D. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1999. 32. P. 2753.
- 5. *Fujii K., Yokaya A. //* Radiat. Phys. Chem. 2009. **78**. P. 1188.
- Alizadeh E., Sanche L. // Radiat. Prot. Dos. 2012. 151. P. 591.
- 7. Белоусов А.В., Бурый В.Е., Матусова Т.В., Черняев А.П. // Медицинская физика. 2012. № 3. С. 86.

Modelling of an irradiation of biological matter thin layer by low-energy photon

A. V. Belousov^a, A. S. Osipov^b

Department of Accelerator Physics & Radiation Medicine, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a belousovav@physics.msu.ru, ^b osipov_as@physics.msu.ru.

In work passage of 1–400 keV photon through thin films (0.001–1.0 mm) of biological matter is modeled. Modelling performed on a method Monte Carlo with use of software package GEANT 4.9. Energy dependence of absorbed dose, quantity of ionization act's and ratio quantity of ionization act's of unit absorbed dose for a various thickness films received. It is shown, that character of dependence in many respects defined by films thickness. In the assumption, that identical quantities of ionization acts in a films cause identical biological effect energy dependence of photon relative biological effectiveness are estimated.

Keywords: Monte Carlo simulation, GEANT 4.9, RBE, photon, thin films. PACS: 87.53.Dq. *Received 8 April 2013*.

English version: Moscow University Physics Bulletin 4(2013).

Сведения об авторах

1. Белоусов Александр Витальевич — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: belousovav@physics.msu.ru.

2. Осипов Алексей Сергеевич — ассистент; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: osipov_as@physics.msu.ru.