

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

А.В. Белоусов, В.Е. Бурый, Т.В. Матусова, А.П. Черняев
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет

Целью данной работы является литературный обзор данных по относительной биологической эффективности (ОБЭ) фотонов низких энергий (до энергий ~ 1 МэВ). Другой целью работы является компьютерное моделирование методом Монте-Карло прохождения фотонов через биологические ткани и исследование энергетической зависимости числа актов ионизации. Проверяется гипотеза о наличии линейной зависимости между количеством актов ионизации в выделенном объеме и поглощенной в нем дозе. В диапазоне энергий 1–100 кэВ данная гипотеза отвергается. Этот факт может объяснить наблюдаемые в экспериментах существенные отклонения значений ОБЭ низкоэнергетических фотонов от единицы. Высокая чувствительность среднего количества актов ионизации, приходящегося на единицу поглощенной дозы, к энергии первичного пучка объясняет большой разброс результатов измерений ОБЭ в эксперименте. Коэффициент ОБЭ оказывается крайне чувствительным к спектральному составу рентгеновского излучения.

Ключевые слова: относительная биологическая эффективность; фотоны низких энергий; рентгеновское излучение

Введение

При облучении биологической ткани наблюдаются определенные последствия радиационного воздействия. Наблюдаемый эффект – результат поглощения энергии излучения атомами и молекулами. Результат воздействия излучения на объект определяется не только поглощенной энергией, но и характером распределения этой энергии в облучаемом объекте, распределением облучения во времени, видом излучения и другими факторами. Применительно к биологическому действию различие в типах частиц не является главным фактором, определяющим различие в радиационных эффектах. Даже частицы одного типа, но разных энергий могут вызвать неодинаковый эффект при одной и той же поглощенной дозе.

В 1953 году Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) ввела понятие относительной биологической эффективности (ОБЭ), значение которой определялось как от-

ношение доз “стандартного” (сначала рентгеновского 200 кВп, в настоящее время γ -излучения ^{60}Co) и исследуемого излучений, создающих одинаковый биологический эффект. В настоящее время решением МКРЗ принято, что ОБЭ фотонов любых энергий равняется единице. В то же время различные эксперименты и расчеты на основании разработанных моделей показывают, что ОБЭ в зависимости от энергии может меняться в достаточно широких пределах.

При определении радиационного взвешивающего фактора для ионизирующих излучений различных типов используются оценки ОБЭ этих излучений. МКРЗ в 1990 г. [1] рекомендовала значение взвешивающего фактора (radiation weighting factor) w_R , равное единице для всех излучений с низким значением ЛПЭ, причем в эту группу входят фотоны и электроны всех энергий. И хотя в 2007 г. МКРЗ отметила, что в многочисленных экспериментах *in vitro* на клет-

ках наблюдается значительное различие в качестве радиации, например, между излучением ^{60}Co и низкоэнергетическими фотонами, тем не менее, рекомендуется значение взвешивающего фактора w_R , равное 1.

В сороковые годы прошлого века было высказано предположение, что радиационное действие начинается с инициирования радиационно-химических процессов во внутриклеточной воде*. Главенствующая роль при этом принадлежит ионизации, в результате которой образуются электрон-ионные пары. Они, в свою очередь, быстро трансформируются в более долгоживущие радикальные продукты. Эта теория получила название *теории косвенного радиобиологического действия*. Альтернативная модель – *модель прямого радиобиологического действия* – предполагает, что основная роль принадлежит непосредственным взаимодействиям ионизирующего излучения с биомолекулами. В обеих теориях полагается, что основной биологический эффект определяется числом актов ионизации, а не поглощенной энергией.

При понижении энергии фотонов уменьшается энергия вторичных электронов и растет значение линейной передачи энергии. Полагая, что радиационный эффект, в первую очередь, определяется количеством актов ионизации в единице объема, следует ожидать повышения биологической эффективности с уменьшением энергии фотонов. Во многих работах сравниваются максимальные значения ОБЭ в приближении низких доз RBEM, которое определяются как отношение начальных (при малых дозах) наклонов кривых “доза–эффект” (по отношению к опорному излучению). Чаще всего начальный наклон получается при аппроксимации кривых “доза–эффект” линейными или линейно-квадратичными функциями.

Цель работы – обзор данных по ОБЭ и компьютерное моделирование процесса прохождения фотонов низких энергий через биологические ткани, исследование энергетической зависимости числа актов ионизации, а также проверка гипотезы о наличии линейной зависимости между поглощенной дозой и количеством актов ионизации в заданном объеме.

* Ионизирующее излучение, проходя через живые организмы, прежде всего, взаимодействует с водной компонентой. Вода составляет 70 % от веса человека, в том числе 49 % находится внутри клеток, 17 % – в межклеточных жидкостях, 4 % – в плазме крови

ОБЭ фотонов ультрамягких энергий и фотонов рентгеновского диапазона

Фотоны низких энергий представляют собой очень удобный инструмент для изучения воздействия ионизирующего излучения на хромосомы, поскольку теряют свою энергию, образуя вторичные электроны фиксированной энергии. Кроме того, электроны низких энергий (менее 10 кэВ), присутствуют в спектрах вторичных частиц с высоким и с низким значением ЛПЭ. Фотоны низких энергий (до 10 кэВ) взаимодействуют с биологическими объектами главным образом посредством фотоионизации и дальнейшего испускания электронов Оже и Костера–Кронига в процессах релаксации. Эти низкоэнергетические электроны поглощают большую часть энергии фотона [2]. Так, фотоны, испущенные с К-оболочки алюминия (энергия 1,48 кэВ), образуют два электрона, суммарная длина трека которых составляет порядка 70 нм. Более интересно изучение фотонов Cu_K , испускаемых с К-оболочки меди, поскольку их энергия составляет 0,28 кэВ и они образуют единственный фотоэлектрон, пробег которого порядка 7 нм (приблизительно 14 актов ионизации), что ненамного превышает размер ДНК. В случае фотонов C_K поглощенная доза целиком обусловлена фотопоглощением, при котором испускается электрон с энергией 260 эВ, в случае Al_K поглощенная доза, обусловлена преимущественно появлением пары электронов – фотоэлектрона с энергией 1 кэВ и Оже-электрона с энергией примерно 0,5 кэВ. Дополнительной особенностью является возможность поглощения углеродных фотонов атомом фосфора, который входит в состав ДНК. Поглощение происходит на L-оболочке с испусканием двух низкоэнергетических электронов (140 и 110 эВ), которые могут производить только односторонние разрывы в ДНК. Результаты по ОБЭ ультрамягкого фотонового излучения обобщены в табл. 1.

Вследствие этого ультрамягкие фотоны могут быть очень эффективны при продуцировании гибели клеток различных типов [3–6], трансформации клеток [6], мутации клеток [3], двойных разрывов ДНК [7] и хромосомных aberrаций [8–10]; ОБЭ таких фотонов достигает значений 2–4 (только в двух работах [11, 12] сообщают, что ОБЭ фотонов данных энергий близко к единице). Исследования показали

Таблица 1

Относительная биологическая эффективность ультрамягкого фотонного излучения

Тип клеток и эффект	C _к (0,28 кэВ)	Al _к (1,5 кэВ)	Ti _к (4,5 кэВ)	Cu _к (8 кэВ)	ссылка
Инактивация HS-23	5,8	1,4	–	–	[5]
Инактивация CHO-10B	3,1	1,8	–	–	
Инактивация V79	3,4	2,3	1,6	1,4	[4, 30, 31]
Мутация V79	3,0	2,2	–	–	[4, 31]
Аберрации V79	2,4	–	–	–	[10]
Аберрации ВНК	2,6	–	–	–	[32]
Инактивация 10TS	1,3	1,4	–	1,1	[12]
Инактивация HF19	3,8	2,3	1,8	–	[4, 30, 31]
Мутация HF19	2,2	2,5	–	–	[4, 30]
Инактивация AT2LO	3,2	1,8	1,9	–	[25, 33]
Инактивация AG1522	1,2	1,0	–	1,0	[34]
Аберрация лимфоцитов	2,1	1,4	–	–	[8]
Инактивация дрожжей	2,6	2,4	–	–	[7]
Двунитевые разрывы в дрожжах	3,8	2,2	–	–	

(табл. 2), что наибольшей биологической эффективностью по отношению к излучению ^{60}Co обладают фотоны, энергия которых находится в диапазоне 4,8–10 кэВ. Наиболее эффективны фотоны с энергией 6,9 кэВ, для которых RBE_M^* составляет $7,70 \pm 2,98$, что значительно выше, чем значения при энергиях 4,8 и 10 кэВ ($5,75 \pm 2,41$ и $6,21 \pm 2,53$ соответственно). Согласно данным работы [13], ОБЭ характеристического излучения Cu_L (956 эВ), определенная по отношению к рентгеновскому излучению 250 кВп, составляет 1,8 при уровне выживаемости 10 %.

Goodhead [14], обобщив результаты экспериментов по облучению биологических объектов ультрамягкими фотонами, определил по клоногенической инактивации, значение ОБЭ различных типов клеток. Полученное им значение относительно гамма-излучения ^{60}Co составило 5,8. С другой стороны, Hill et al. [15], исследуя влияние фотонов с энергией 273 и 860 эВ (при этих энергиях одинаковый линейный коэффициент ослабления биологической ткани), получили $\text{OBE}=1$. Основная трудность, возникающая при определении ОБЭ в данном энергетическом диапазоне, связана со сложностью определения поглощенной дозы в клетке. Морфология клетки, неоднородность монослоя, присущая клеткам радиочувствительность и избирательность поглощения играют

критическую роль при вычислении фактора поглощения.

В области ультрамягкого фотонного излучения радиобиологические эксперименты выполнены как для синхротронного излучения, так и для рентгеновского с различными материалами мишеней и фильтров. Теоретические вычисления, основанные на моделировании по методу Монте-Карло, показали, что ОБЭ фотонов с энергией в диапазоне 1–10 кэВ в 1,5 больше, чем излучения ^{60}Co [16]. Вычисления, основанные на исследовании распределения вторичных электронов, показали, что ОБЭ применяемых в маммографии фотонов по отношению к рентгеновскому излучению с энергией 200 кВп не превышает 2 [17]. В работе Zeitz et al. [18] исследовалась ОБЭ двух различных спектров рентгеновского излучения с максимальной энергией 40 кэВ (мишень из Mo или W и фильтр из Sn толщиной 0,15 мм) относительно гамма-излучения ^{60}Co . Для клеток HeLa-S3 получено значение ОБЭ $1,3 \pm 0,1$ на уровне выживаемости 10 % и обнаружено линейное возрастание ОБЭ при уменьшении мощности дозы. Bistovic при изучении выживаемости клеток V79 получил ОБЭ рентгеновского излучения с максимальной энергией 20 и 70 кэВ $1,40 \pm 0,07$ и $1,19 \pm 0,06$ по отношению к излучению ^{60}Co соответственно [19], не обнаружив при этом существенной зависимости от дозы. Spadinger и Palcic, исследуя клоногеническую выживаемость клеток V79 и CHO, определили ОБЭ рентгеновского излучения с

* Значение RBE_M определяется по отношению линейных коэффициентов в линейно-квадратичной модели

Таблица 2

Сравнительные характеристики биологического действия фотонов различных энергий по отношению к излучению ⁶⁰Со, определенные по лимфоцитам человека

Излучение	Энергия, кэВ	Условия	$\alpha \times 10^{-2} \text{Гр}^{-1}$	$\beta \times 10^{-2} \text{Гр}^{-2}$	RBE _M	Ссылка
СИ	40,0	ЦК ¹	2,37±0,93	4,27±1,34	2,21±1,21	[24]
СИ	17,4	ЦК ²	3,44±0,87	5,25±0,94	3,21±1,48	
СИ	17,4	МС	3,83±1,72	4,05±2,04	3,58±2,11	[23]
СИ	10,0	МС	6,65±0,92	5,36±0,85	6,21±2,53	
СИ	6,9	МС	8,24±0,41	8,04±0,40	7,70±2,98	
СИ	4,8	МС	6,15±1,06	9,48±1,57	5,75±2,41	
СИ	3,1	МС	2,12±0,49	2,99±0,51	1,98±0,89	
СИ	1,83	МС	1,26±0,28	0,40±0,25	1,18±0,52	
⁶⁰ Со	1250	ЦК	1,07±0,41	5,50±0,26	-	[25]
¹³⁷ Со	662	ЦК	1,50±0,50	4,70±0,30	1,40±0,71	[26]
¹³⁷ Со	662	МС	1,80±0,70	4,60±0,40	1,68±0,84	[27]
Рентген	17,4 ³	ЦК	6,55±0,97	3,51±0,82	6,12±2,51	[28]
Сr _к	5,4	МС	7,70±1,20	13,0±1,50	7,20±0,98	[29]

1 – цельная кровь; 2 – монослой; 3 – средняя энергия излучения (максимальная 29 кэВ); СИ - синхротронное излучение (монокроматизированное)

энергией 55 кэВ относительно излучения ⁶⁰Со как 1,0–1,4 [20].

Значительно более высокие значения ОБЭ получены в пределе малых доз. Frankenberg et al., исследуя выживаемость трех типов клеток, получили, сравнивая рентгеновское излучение с максимальной энергией 29 и 200 кэВ, ОБЭ первого в диапазоне 1,2–2,0 [6, 7]. Микроядерные тесты, проведенные на лимфоцитах человека, показали, что ОБЭ рентгеновского излучения при напряжении на трубке 14 и 50 кВп составляет в пределе малых доз, по отношению к излучению ⁶⁰Со, значения 2,6±0,2 и 1,6±0,2 соответственно [21]. В работе Sasaki et al. [22] исследовалось влияние монохроматических фотонов с энергией 4,8–14,6 кэВ на дицентрические формации в лимфоцитах человека, было обнаружено увеличение биологической эффективности по мере уменьшения энергии с максимумом в районе энергии 6,9 кэВ. При данной энергии фотонов фотоэлектроны и связанные с ними электроны Оже имеют ЛПЭ 4,21 кэВ/мкм. Линейный коэффициент α , полученный в рамках линейно-квадратичной модели, оказался в 10 раз больше, чем для излучения ⁶⁰Со. Эти данные были подтверждены в работах Krumrey [23], где изучалось влияние монокроматизированного синхротронного излучения с энергией 1,83–17,3 кэВ на образование дицентриков в лимфоцитах человека, причем максимальное значение ОБЭ 7,70±2,98 соответствовало энергии фотонов 6,9 кэВ.

Оценки ОБЭ монокроматизированного синхротронного излучения с энергией 4 кэВ по отношению к рентгеновскому излучению 250 кВп, выполненные по кривым выживаемости СЗН/10TS1/2 [35], дают значение 1,5±0,3 при уровне выживаемости 10 %.

В табл. 3 приведены данные по ОБЭ низкоэнергетического рентгеновского излучения, определенные при уровне выживаемости 10 % по аппроксимации линейно-квадратичной моделью по отношению к излучению ⁶⁰Со.

В табл. 4 приводятся данные по ОБЭ ультрамягких фотонов различных энергий, рассчитанных по методу Монте-Карло и полученных экспериментальным путем. Как видно, в большинстве случаев расчетные значения дают заниженную оценку ОБЭ. Возможно, это связано с тем, что в этой области сильнее нарушается пропорциональность между поглощенной дозой и числом актов ионизации, определяющих биологический эффект.

Материал и методы

Исследования выполнялись путем постановки компьютерного эксперимента с помощью пакета библиотек Geant4, который позволяет на основе моделирования по методу Монте-Карло получить энергетические потери различных типов частиц в веществе, а также определить число актов ионизации в заданном объеме. Данный пакет позволяет отдельно рассматривать пер-

Таблица 3

ОБЭ низкоэнергетического рентгеновского излучения [36]

Эффективная энергия, кэВ	Доза, Гр	ОБЭ
8,1	5,54	1,50
11,7	5,13	1,62
18,5	5,34	1,56
90	6,47	1,29
⁶⁰ Co (1250)	8,33	1,00

Таблица 4

Сравнение значений ОБЭ ультрамягкого фотонного излучения различных энергий, полученных расчетным и экспериментальным путем

Энергия фотонов, кэВ	ОБЭ (числ.)	ОБЭ (эксп.)
C _K (0,28)	1,6	2,1 ¹ [37]
		2,7 ² [37]
		3,8 ³ [71]
N _K (0,39)	2,3	–
O _K (0,52)	2,7	–
Cu _L (0,96)	1,8	2,3 [37]
Al _K (1,49)	1,6	1,6 ⁴ , 1,6 ⁵ [38]
		1,7 [37]
		1,9 [37]
		2,2 [7]
Ti _K (4,55)	1,3	1,4 [37]
Рентген, 220 кВп	1,2	–
⁶⁰ Co	1,0	–

1 – анализ фрагментов; 2 – ФАР анализ; 3 – метод осаждения; 4 – фильтрованное элюирование; 5 – референсное излучение – рентген 250 кВп

вичное и вторичное излучение. В работе моделировалось прохождение через биологическую ткань пучков фотонов в диапазоне энергий от 1 кэВ до 1 МэВ. Поскольку исследуется только энергетическая зависимость отношения поглощенной энергии к полному числу актов ионизации в чувствительном объеме (средняя энергия на один акт ионизации), в качестве чувствительного объема была выбрана пластина, поперечные размеры которой много больше размеров исходного пучка. Толщина пластины – 5 мм, вещество – вода*. Весь чувствительный объем располагается в положительной части системы

координат, а одна из его вершин находится в начале координат.

Поперечное сечение пучка представляет собой окружность радиусом 0,05 мм. Таким образом, моделируется точечный (узкий) моноэнергетический пучок, количество частиц в пучке – 10^7 . Начальное распределение частиц в пучке равномерное для всех энергий. Направление движения частиц в сторону детектора выбрано таким образом, что центральная ось пучка расположена перпендикулярно плоской поверхности детектора и пересекает его геометрический центр.

Результаты и обсуждение

В данной работе рассматривается гомогенная по атомному составу ткань с постоянной плотностью, поэтому энергия, поглощенная в чувствительном объеме, с точностью до постоянного множителя может рассматриваться как поглощенная доза. Зависимость $\langle E \rangle$

* Вода выбрана из тех соображений, что она составляет около 70% биологической ткани, потому полученные качественные результаты должны быть справедливы и для биологических объектов. Более адекватный состав приводит к сильному увеличению времени расчетов и на первом этапе не обязателен. Он будет учтен в дальнейших исследованиях для количественного описания

– полной поглощенной энергии (дозы) в чувствительном объеме, нормированная на единичный падающий фотон первичного излучения, – зависит от энергии первичного пучка фотонов сложным образом (рис. 1. сплошная линия, ромбы). При начальном повышении энергии фотонов кривая сначала резко возрастает, проходя через максимум в районе 11 кэВ, затем резко падает с примерно таким же градиентом, как и при возрастании. Достигнув минимума в районе энергий 66 кэВ, кривая снова начинает монотонно возрастать вплоть до конца исследуемого энергетического интервала (1 МэВ). Полная поглощенная энергия (доза), приходящаяся на единичный поток энергии первичного излучения (рис. 1. пунктир, квадраты) слабо падает до энергии ~7 кэВ, затем резко уменьшается с ростом энергии фотонов вплоть до значения энергии ~50 кэВ. При дальнейшем увеличении энергии первичных фотонов поглощенная доза в расчете на единичный поток энергии слабо меняется, выходя на примерно постоянный уровень при энергии свыше 100 кэВ.

Вклад различных процессов в поглощенную дозу различным образом зависит от энергии первичного пучка. Так, вклад процессов ионизации вторичными электронами в поглощенную энергию резко возрастает от 50 % при энергии 1 кэВ до 97 % при энергии 27 кэВ. При дальнейшем возрастании энергии первичного фотонного излучения вклад процессов вторичной ионизации выходит на примерно постоянный уровень. В области доминирования комптоновского рассеяния ($E_{\gamma} > 50$ кэВ), а точнее, начиная с энергии 100 кэВ, подавляющая доля поглощенной дозы (более 98 %) обусловлена вторичной электронной ионизацией.

Вклад процесса комптоновского рассеяния резко возрастает от $\sim 10^{-5}$ % при энергии фотонов 1 кэВ до ~ 1 % при энергии 61 кэВ. При дальнейшем возрастании вклад процесса комптоновского рассеяния плавно уменьшается до значений 0,2 % (при 250 кэВ) и до значений $\sim 10^{-4}$ % (при 1 МэВ). Вклад фотоэффекта в поглощенную энергию резко уменьшается от 50 % при энергии фотонов 1 кэВ до 5 % при энергии 10 кэВ и плавно уменьшается при последующем увеличении энергии фотонного пучка, достигая 10^{-2} % при энергии 200 кэВ. Вклад процесса многократного рассеяния вторичных электронов сложным образом зависит от энергии первичных фотонов, не превышая в

максимуме 0,6 %. Энергия, выделившаяся в исследуемом объеме в результате процессов испускания тормозного излучения, плавно увеличивается с ростом энергии фотонов первичного излучения, и ее вклад в поглощенную энергию не превышает 0,03 %.

Качественный вид кривой, описывающей количество актов ионизации в расчете на один фотон первичного излучения, в зависимости от энергии фотонов очень похож на вид кривой для поглощенной дозы. Количество актов ионизации резко возрастает до максимума в районе 10 кэВ, затем также резко опускается до минимума в районе 69 кэВ, которые лежат ниже значения при энергии 1 кэВ, и плавно возрастает при дальнейшем увеличении энергии первичного пучка. Количество актов ионизации, нормированное на единичный поток энергии первичного излучения, резко уменьшается с возрастанием энергии первичного пучка и выходит на примерно постоянный уровень при энергиях свыше 50 кэВ.

При энергии 1 кэВ, половина актов ионизации обусловлена фотоионизацией атомов среды (рис. 2. треугольники), а вторая половина – ионизацией в результате ионизационного торможения вторичных электронов (рис. 2. квадраты). При увеличении энергии фотонов доля актов ионизации, обусловленных взаимодействием вторичных электронов, плавно возрастает до энергии ~25 кэВ достигая ~85 %, затем плавно снижается, достигая локального максимума при энергии 61 кэВ (вклад ~80 %) и плавно возрастает, вы-

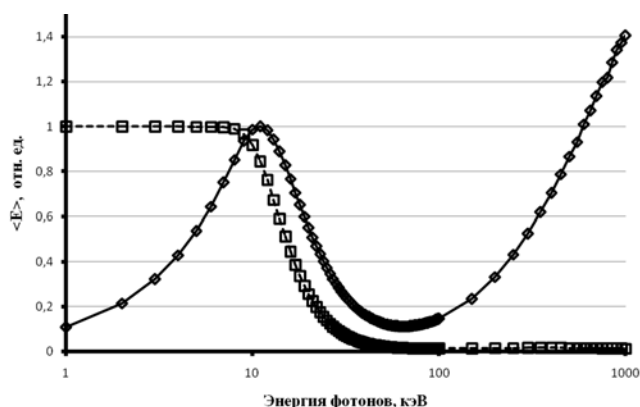


Рис. 1. Зависимость поглощенной энергии от энергии первичного пучка. Сплошная кривая (ромбы) – нормировка на единичный падающий фотон, пунктир (квадраты) – нормировка на единичный поток энергии

ходя на насыщение. В области энергий первичных фотонов свыше 200 кэВ подавляющее большинство актов ионизации (более 95 %) обусловлено вторичными электронами (рис. 2, сплошная линия, ромбы). При этом доля актов ионизации, вызванных фотоэффектом, резко понижается от 50 % для энергии первичного пучка 1 кэВ до 10 % при энергии 21 кэВ. При последующем возрастании энергии первичных фотонов вклад фотоэффекта плавно понижается до 5 % при энергии 35 кэВ и далее до 1 % (при энергии 70 кэВ). При энергиях свыше 100 кэВ вкладом фотоионизации можно пренебречь. Вклад комптоновского рассеяния в общее число актов ионизации плавно возрастает,

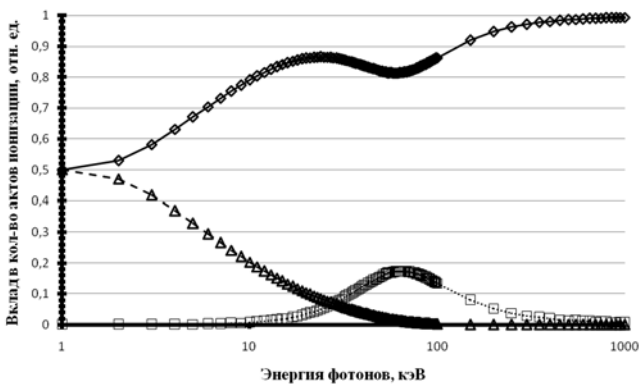


Рис. 2. Вклад различных процессов в полное количество актов ионизации: ромбы – ионизация вторичными электронами; треугольники – фотоионизация; квадраты – комптоновское рассеяние

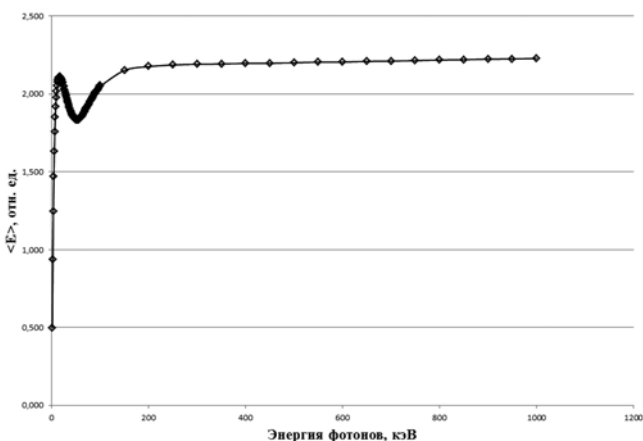


Рис. 3. Энергетическая зависимость средней энергии, приходящейся на один акт ионизации в чувствительном объеме

достигая широкого максимума (~15 %) в области энергий 50–80 кэВ. При дальнейшем возрастании энергии первичного пучка вклад комптоновского рассеяния в полное число актов ионизации плавно уменьшается и составляет 1 % при энергии 65 кэВ. При этом абсолютное количество актов ионизации, обусловленное комптоновским рассеянием, плавно возрастает с увеличением энергии фотонов и проходит через максимум при энергии 41 кэВ.

На рис. 3. представлена энергетическая зависимость отношения энергии $\langle E \rangle$, выделившейся в чувствительном объеме (поглощенной дозы) к количеству актов ионизации, произошедших в том же объеме. Т.е. эта величина представляет собой среднюю энергию, приходящуюся на один акт ионизации. Кривая резко возрастает при увеличении энергии фотонов, проходя через максимум при энергии первичного пучка фотонов в области 16 кэВ, затем плавно снижается до минимума в области 54 кэВ. При дальнейшем росте энергии первичного пучка кривая плавно возрастает вплоть до энергий в области 200 кэВ и выходит на примерно постоянное значение.

На рис. 4. показано изменение количества актов ионизации с энергией первичного пучка при фиксированной выделившейся энергии. Наиболее резкие изменения происходят в области энергий первичного пучка 1–100 кэВ. Этим фактом, возможно, и объясняется большой разброс измеренных значе-

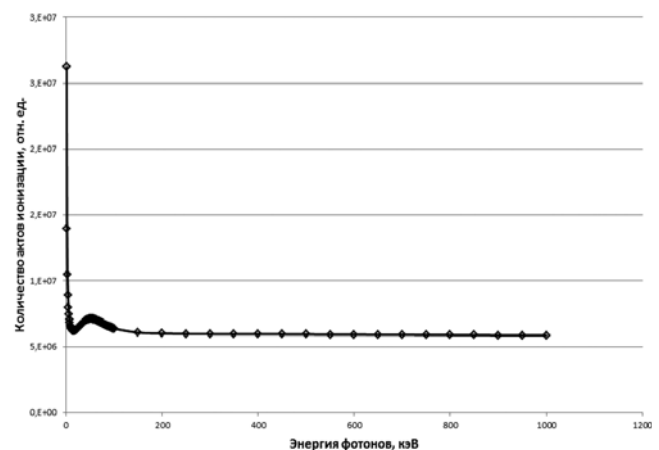


Рис. 4. Зависимость количества актов ионизации при фиксированной дозе от энергии первичного пучка фотонов

ний ОБЭ фотонов в данном энергетическом диапазоне. Энергия в максимуме кривой соответствует 54 кэВ, а в минимуме – 16 кэВ. При энергиях выше 200 кэВ можно полагать прямую пропорциональность между поглощенной энергией (дозой) и количеством актов ионизации. Следует отметить, что в случае применения ионизационных камер при одинаковой поглощенной энергии фиксировался бы различный ионизационный ток в зависимости от энергии фотонов.

Заключение

Для фотонов низких энергий (в диапазоне 1–100 кэВ) не выполняется предположение о наличии линейной зависимости между числом актов ионизации, произведенных в некотором объеме и поглощенной дозой в том же объеме. Этим фактом могут объясняться наблюдаемые в экспериментах отклонения значений коэффициента ОБЭ низкоэнергетических фотонов от единицы. Высокая чувствительность средней энергии ионизации к энергии первичного пучка в области 1–100 кэВ позволяет объяснить большой разброс экспериментальных измерений ОБЭ фотонного излучения в данной области энергий. Коэффициент ОБЭ оказывается чувствительным к спектральному составу фотонного излучения.

Список литературы

1. ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP, **21**, No. 1–3, Oxford: Pergamon Press., 1991.
2. Perkins S.T., Cullen D.E., Chen M.H. et al. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-500400, 30, 1991.
3. Goodhead D.T., Thacker J., Cox R. Effectiveness of 0.3 keV carbon ultrasoft X-rays for the inactivation and mutation of cultured mammalian cells. // Int. J. Radiat. Biol., 1979, **36**, P. 101–114.
4. Raju M.R., Carpenter S.G., Chmielewski J.J. et al. Radiobiology of ultrasoft X-rays. I. Cultured hamster cells (V79). // Radiat. Res., 1987, **110**, P. 396–412.
5. Carpenter S., Cornforth M. N., Harvey W. F. et al. Radiobiology of ultrasoft X-rays. IV. Flat and round-shaped hamster cells (CHO-10B, HS-23). // Radiat. Res., 1989, **119**, P. 523–533.
6. Frankenberg D., Kuhn H., Frankenberg-Schwager M. et al. 0.3 keV carbon K ultrasoft X-rays are four times more effective than γ -rays when inducing oncogenic cell transformation at low doses. // Int. J. Radiat. Biol., 1995, **68**, P. 593–601.
7. Frankenberg D., Goodhead D.T., Frankenberg-Schwager M. et al. Effectiveness of 1.5 keV aluminium and 0.3 keV carbon K characteristic X-rays at inducing DNA double strand breaks in yeast cells. // Int. J. Radiat. Biol., 1986, **50**, P. 727–741.
8. Virsik R.P., Schafer C.H., Harder D. et al. Chromosome aberrations induced in human lymphocytes by ultrasoft AlK and CK X-rays. // Int. J. Radiat. Biol., 1980, **38**, P. 545–557.
9. Wilkinson R. E., Goodhead D. T., Thacker J. Induction of chromosome aberrations by very short tracks at different stages of the cell cycle. // Radiat. Protect. Dosymetry, 1985, **13**, P. 161–165.
10. Thacker J., Wilkinson R.E., Goodhead D.T. The induction of chromosome exchange aberrations by carbon ultrasoft X-rays in V79 hamster cells. // Int. J. Radiat. Biol., 1986, **49**, P. 645–656.
11. Cornforth M.N. Testing the notion of the one hit exchange. // Radiat. Res., 1990, **121**, P. 21–27.
12. Schillaci M.E., Carpenter S., Raju M.R. et al. Radiobiology of ultrasoft X-rays. II. Cultured C3H mouse cells (10T1/2). // Radiat. Res., 1989, **119**, P. 83–92.
13. Hill M.A., Vecchia M.D., Townsend K.M. S., Goodhead D.T. Production and dosimetry of copper L ultrasoft x-rays for biological and biochemical investigations. // Phys. Med. Biol., 1998, **43**, P. 351–363.
14. Goodhead D.T. Soft X-ray radiobiology and synchrotron radiation. // In: Synchrotron Radiation in the Biosciences. Ed. by Chance B., Deisenhofer J., Ebashi E. et al. – New York: Oxford University Press, 1994, P. 683–705.
15. Hill C.K., Nelms B.E., MacKay J.F. et al. Synchrotron-produced ultrasoft X rays: equivalent cell survival at the isoattenuating energies 273 eV and 860 eV. // Radiat. Res., 1998, **150**, No. 5, P. 513–520.
16. Michalik V., Frankenberg D. Two types of double-strand breaks in electron and photon tracks and their relation to exchange-type chromosome aberrations. // Radiat. Environ. Biophys., 1996, **35**, No. 3, P. 163–169.

17. Kellerer A.M. Electron spectra and the RBE of X rays. // *Radiat. Res.*, 2002, **158**, No. 1, P. 13–22.
18. Zeitz L., Kim S. H., Kim J. H., Detko J. F. Determination of relative biological effectiveness (RBE) of soft X rays. // *Radiat. Res.*, 1977, **70**, P. 552–563.
19. Bistrovic M., Biscan M., Viculin T. RBE of 20 kV X-rays determined for survival of V79 cells. // *Radiother. Oncol.*, 1986, **7**, P. 175–180.
20. Spadinger I., Palcic B. The relative biological effectiveness of ^{60}Co γ -rays, 55 kVp X-rays, 250 kVp X-rays, and 11 MeV electrons at low doses. // *Int. J. Radiat. Biol.*, 1992, **61**, P. 345–353.
21. Verhaegen F., Vral A. Sensitivity of micronucleus induction in human lymphocytes to low-LET radiation qualities: RBE and correlation of RBE and LET. // *Radiat. Res.*, 1994, **139**, P. 208–213.
22. Sasaki M. S., Kobayashi K., Hieda K. et al. Induction of chromosome aberrations in human lymphocytes by monochromatic X-rays of quantum energy between 4.8 and 14.6 keV. // *Int. J. Radiat. Biol.*, 1989, **56**, P. 975–988.
23. Krumrey M., Ulm G., Schmid E. Dicentric chromosomes in monolayers of human lymphocytes produced by monochromatized synchrotron radiation with photon energies from 1.83 keV to 17.4 keV. // *Radiat. Environ. Biophys.*, 2004, **43**, No. 1, P. 1–6.
24. Schmid E., Krumrey M., Ulm G. et al. The maximum low-dose RBE of 17.4 and 40 keV monochromatic X-rays for the induction of dicentric chromosomes in human lymphocytes. // *Radiat. Res.*, 2003, **160**, P. 499–504.
25. Bauchinger M., Schmid E., Streng S., Dresch J. Quantitative analysis of the chromosome damage at first division of human lymphocytes after ^{60}Co γ -irradiation. // *Radiat. Environ. Biophys.*, 1983, **22**, P. 225–229.
26. Schmid E., Hieber L., Heinzmann U. et al. Analysis of chromosome aberrations in human peripheral lymphocytes induced by *in vitro* α -particle irradiation. // *Radiat. Environ. Biophys.*, 1996, **35**, P. 179–184.
27. Schmid E., Braselmann H., Nahrstedt U. Comparison of γ -ray induced dicentric yields in human lymphocytes measured by conventional analysis and FISH. // *Mutat. Res.*, 1995, **348**, P. 125–130.
28. Schmid E., Regulla D., Kramer H.M., Harder D. The effect of 29 kV X-rays on the dose response of chromosome aberrations in human lymphocytes. // *Radiat. Res.*, 2002, **159**, P. 771–777.
29. Roos H., Schmid E. Analysis of chromosome aberrations in human peripheral lymphocytes induced by 5.4 keV X-rays. // *Radiat. Environ. Biophys.*, 1998, **36**, P. 251–254.
30. Cox R., Thacker J., Goodhead D.T. Inactivation and mutation of cultured mammalian cells by aluminium characteristic ultrasoft X-rays. II. Dose-responses of Chinese hamster and human diploid cells to aluminum X-rays and radiations of different LET. // *Int. J. Radiat. Biol.*, 1977, **31**, P. 561–576.
31. Goodhead D.T., Thacker J., Cox R. Is selective absorption of ultrasoft X-rays biologically important in mammalian cells? // *Phys. Med. Biol.*, 1981, **26**, P. 1115–1127.
32. Wilkinson R.E., Goodhead D.T., Thacker J. Induction of chromosome aberrations by very short tracks at different stages of cell cycle. // *Radiat. Protect. Dosimetry*, 1985, **13**, P. 161–165.
33. Goodhead D.T. Models of radiation inactivation and mutagenesis. // In: *Radiation Biology in cancer Research*. Ed. by Meyn R.E., Withers. H.R. – New-York: Raven Press, 1980, P. 231–247.
34. Cornforth M.N., Schillaci M.E., Goodhead D.T. et al. Radiobiology of ultrasoft X-rays. III. Normal human fibroblast and the significance of terminal track structure in cell inactivation. // *Radiat. Res.*, 1989, **119**, P. 511–522.
35. Wells C.M. M., Pearson D.W., De Luca P.M. et al. Synchrotron-produced ultrasoft X-rays: a tool for testing biophysical models of radiation action. // *Int. J. Radiat. Biol.*, 1991, **59**, P. 985–996.
36. Hoshi M., Antoku S., Nakamura N. et al. Soft X-ray dosimetry and RBE for survival of Chinese hamster V79 cells. // *Int. J. Radiat. Biol.*, 1988, **54**, P. 577–591.
37. De Lara C.M., Hill M.A., Jenner T.J. et al. Dependence of the yield of DNA double-strand breaks in Chinese hamster V79-4 cells on the photon energy of ultrasoft X rays. // *Radiat. Res.*, 2001, **155**, P. 440–448.
38. Prise K.M., Folkard M., Davies S., Michael B.D. Measurement of DNA damage and cell killing in Chinese hamster v79 cells irradiated with aluminium characteristic ultrasoft X rays. // *Radiat. Res.*, 1989, **117**, P. 489–499.

RELATIVE BIOLOGICAL EFFECTIVENESS OF LOW-ENERGY PHOTON

A.V. Belousov, V.E. Buriy, T.V. Matusova, A.P. Chernyaev

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

This work is to review the literature of data concerning RBE of low-energy photons. The other goal of this work is the computational calculation and modeling of photon propagation through biological tissues with Monte-Carlo method and investigation of dependence of the number of ionization acts on primary radiation energy. The hypothesis is checked, if there is a linear dependence between the number of acts of ionization within a selected volume and the dose acquired in that volume. This hypothesis is not valid in the range of energies from 1–100 keV. This fact can explain substantial deviation of the values of RBE shown in experiment from the unity. The high sensitivity of the average number of ionization acts per acquired dose to the energy of the primary beam explain the wide range of experimental measures of RBE. RBE is shown to be highly sensitive to the X-ray spectrum.

Key word: relative biological effectiveness; low-energy photon; x-ray photon

E-mail: BelousovAV@physics.msu.ru