

СПЕКТРЫ ТОРМОЗНЫХ ФОТОНОВ В МАЛЫХ ПОЛЯХ, СОЗДАВАЕМЫХ МЕДИЦИНСКИМИ УСКОРИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКА 18 МВ

В.А. Климанов^{1,2}, А.В. Белоусов^{2,3}, Г.Е. Горлачев⁴, Ю.С. Кирпичев^{4,5}, Т. Меджадж¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

² Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна, Москва

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина МЗ РФ, Москва

⁵ Центр лучевой терапии "ОнкоСтон", Москва

Проведено расчетное исследование спектров тормозного излучения, генерируемого узким пучком электронов 18 МэВ при падении на мишень, первый слой которой сделан из вольфрама, для случая малых полей. Изучено две геометрии: в первой мишень и кольцевые детекторы на расстоянии 100 см от нее находятся в воздухе, вторая геометрия, по возможности, приближена к конструкции головки ускорителя Varian, работающего в режиме генерации тормозного пучка 18 МВ. Кольцевые детекторы расположены так же, как в первой геометрии. Расчеты выполнены методом Монте-Карло по кодам Geant4, Penelope и программному пакету Г.Е. Горлачева, для сравнения результатов привлекались также данные, полученные по коду EGSnrc (программа BEAM). Обсуждаются причины различия между данными, рассчитанными по разным кодам. На основе полученных результатов сформулирован ряд закономерностей, наблюдаемых в энергетических распределениях тормозных фотонов для малых полей.

Ключевые слова: *тормозное излучение, энергетическое распределение, медицинские ускорители электронов, метод Монте-Карло, малые поля*

Введение

Малые поля все шире применяются в дистанционной лучевой терапии (ЛТ), так как с их помощью часто удается создать более благоприятные распределения дозы для лучевого лечения. Вместе с тем, экспериментальное определение распределений дозы для малых полей встречает ряд проблем, которые для тормозных пучков с максимальной энергией ≤ 10 МВ исследованы во многих публикациях. Результаты, полученные в этих работах, проанализированы в публикации МАГАТЭ (TRS

№ 483) [1]. Что же касается области более высоких энергий, то здесь количество публикаций весьма ограничено. Попытка обобщить результаты исследований для тормозных пучков со спектром ≥ 10 МВ была сделана в работе [2]. В работах [1, 2], в частности, отмечается, что в немалой степени нетрадиционность малых полей связана с особенностями энергетического распределения фотонов в таких полях. В литературе имеются работы, посвященные определению спектров тормозного излучения в области энергий, обычно используемых в ЛТ. В них применялись разные методы, такие, как

прямое измерение спектров, восстановление спектров по глубинным и профильным распределениям дозы в водном фантоме и, наконец, расчет методом Монте-Карло. Наиболее подходящим методом решения этой задачи оказался метод Монте-Карло-моделирования. Обширная библиография работ по этой теме имеется в классической публикации Шейх-Багери и Роджера [3]. Одной из первых работ явилась публикация [4], а эффективные спектры тормозного излучения линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) были получены в работах [5, 6]. В этих первых исследованиях фактически не учитывалась модификация спектра внутри головки ускорителя, производимая сглаживающим фильтром и коллиматорами. Отметим также, что практически во всех работах спектры тормозных пучков определены для достаточно больших полей и наблюдается значительное расхождение в результатах, полученных в разных работах для одних и тех же моделей ЛУЭ.

Изучение спектров тормозных фотонов для малых полей началось относительно недавно. Полученные результаты для фотонов с максимальной энергией до 10 МэВ, как отмечено выше, обобщены в отчете МАГАТЭ TRS № 483 [1]. Область же более высоких энергий оказалась мало изученной. Одной из немногих работ в этом направлении для тормозных пучков высокой энергии явилась публикация [7], в которой изучен спектр фотонов в водном фантоме на глубинах 10 и 20 см, создаваемый пучками с круглым поперечным сечением разных радиусов со спектром 15 МВ. Однако работ, в которых бы изучался спектр фотонов, падающих на водный фантом, для медицинского ЛУЭ при работе в режиме генерации узких тормозных пучков с максимальной энергией 18 МэВ, в литературе практически нет. Исключение составляет классическая работа [3], в которой рассчитаны методом Монте-Карло спектры тормозных фотонов, падающих на водный фантом, для разных марок ЛУЭ и разных ускоряющих потенциалов. Однако в этой работе был рассмотрен только один размер круглого поля на поверхности фантома $R=2,5$ см.

Учитывая выше сказанное, целью настоящей работы явилось исследование особенностей спектров тормозного излучения, падающего на водный фантом, для ускорителя компании Varian при генерации пучка 18 МВ для малых полей разных размеров. Второй задачей явилось сравнение формы спектров, опреде-

ленных по широко известным в настоящее время кодам Geant4 [8], Penelope [9], EGSnrc (точнее, по одной из программ комплекса, а именно BEAM) [10] и программному пакету Г.Е. Горлачева [11], физика транспорта фотонов и электронов в котором основаны на коде EGS4 [12].

Материал и методы

Анализ тормозных спектров проводили на основе результатов расчета методом Монте-Карло по кодам GEANT4, PENELOPE и BEAM. Расчеты с использованием GEANT4 и PENELOPE выполнялись в настоящей работе, а результаты, полученные по BEAM, заимствованы из работы [3]. Так как в последние годы некоторые модели ЛУЭ производятся без сглаживающего фильтра, то расчет спектров был проведен для двух геометрий (рис. 1). В первом случае (рис. 1а) тонкий луч (ТЛ) моноэнергетических электронов (диаметр=0,002 мм) нормально падает на мишень, состоящую из слоев вольфрама и меди. Энергетическое распределение тормозных фотонов при моделировании задачи регистрировали в воздухе в кольцевых детекторах разного радиуса (от 0,5 до 5,0 см с шагом 0,5 см), высотой 1,0 см. Детекторы располагались в плоскости, перпендикулярной к геометрической оси, совпадающей с направлением ТЛ электронов. Плоскость детектирования находилась на расстоянии 100 см от точки падения ТЛ на мишень.

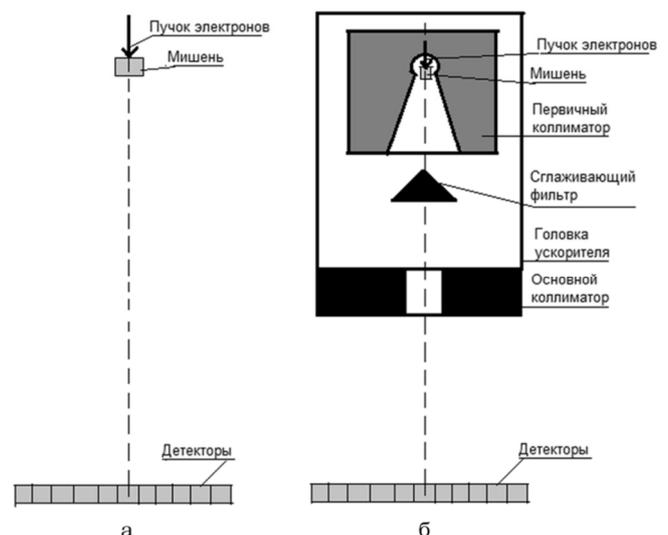


Рис. 1. Геометрии облучения, в которых производился расчет спектров тормозных фотонов

Во второй геометрии (рис. 1б) воспроизводятся основные геометрические параметры мишени, первичного коллиматора и сглаживающего фильтра ускорителя Varian 18. Вторичный (основной коллиматор) моделировали в виде пластины из вольфрама толщиной 8 см, в центре которой имелись отверстия квадратного или круглого сечения, размеры которых выбирали так, чтобы они соответствовали примерному интервалу поперечных размеров малых полей ($\leq 5 \times 5$ см). Детекторы, в которых определялся спектр проходящих через них фотонов, располагались так же, как и в первой геометрии, на расстоянии 100 см от входной поверхности мишени.

Мишень, на которую падал моноэнергетический узкий пучок электронов 18 МэВ, имела цилиндрическую геометрию и состояла из двух дисков из вольфрама и меди. В одном варианте, который в основном использовался для сравнения результатов расчета по разным программам и выполнялся в геометрии рис. 1а, высота диска из вольфрама была равна 1,4 см, а медного – 0,1 см (мишень 1). Во втором варианте размеры дисков соответствовали техническому описанию ускорителя Varian 18 (мишень 2) [13].

Спектры тормозного излучения, получаемые методом Монте-Карло, и скорость расчета в определенной степени зависят от входных настроек программ, особенно это относится к низкоэнергетической части спектра. Во всех использованных программах для электронов учитывались процессы ионизации и генерации тормозного излучения, для позитронов – дополнительно процесс аннигиляции. Для фотонов учитывали процессы рэлеевского и комптоновского рассеяния, рождения электрон-позитронных пар и фотоэлектрический эффект, испускание характеристического излучения и электронов Оже.

При проведении расчетов по коду Penelope симуляционные параметры были выбраны одинаковыми для всех материалов и равными следующим значениям: энергия поглощения электронов 0,1 МэВ; энергия поглощения фотонов 0,01 МэВ; энергия поглощения позитронов 0,1 МэВ; параметры упругого рассеяния C_1 и C_2 , и энергии отсечки для неупругих столкновений W_{cc} и испускания тормозного излучения W_{cr} в соответствии с рекомендациями руководства пользователя к Penelope-2014 были взяты равными $C_1=C_2=0,1$, $W_{cc}=5,0$ кэВ, $W_{cr}=10,0$ кэВ.

Вычисления в программном коде Geant4 10.4 выполнены в двух вариантах. В первом варианте расчет проводили с использованием набора физических процессов QGSP_BIC_HP. Данный пакет, строго говоря, предназначен преимущественно для расчета с высокой точностью транспорта нейтронов низких энергий. Вместе с тем, есть указания, что пакет можно применять и для расчета тормозного излучения в мегавольтовой области энергий. Во втором варианте расчет выполняли с использованием набора физических процессов (physics list) Penelope. В данном наборе используется смешанный подход, описание физических процессов производится как с помощью аналитических моделей, так и с помощью параметризации экспериментальных сечений (EADL, EEDL, EPDL). Нижняя граница по энергии, т.е. минимальная величина энергии частиц, до которой производилось моделирование, составляла 250 эВ для всех процессов, кроме рождения пар (1,022 МэВ). В написанном в работе программном коде учитывались также процессы снятия атомного возбуждения посредством испускания фотонов флуоресценции и Оже-электронов (включая каскады). Порог рождения вторичных частиц составляет 0,01 мм, т.е. вторичные частицы, пробег которых в веществе меньше этого значения, не моделировали, и полагали, что их энергия целиком поглощается в точке образования.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведено сравнение спектров, рассчитанных в геометрии рис. 1а для мишени 1 по коду [8] и по программному пакету Г.Е. Горлачева. Из рис. 2 видно, что для энергий фотонов, меньших 7 МэВ, спектры практически совпадают, однако для более высоких энергий спектр, рассчитанный по Geant4, оказывается более жестким. Это также можно видеть из рис. 3, где показана зависимость средней энергии энергетических распределений от расстояния до оси пучка. Разница между средними энергиями спектров для всех детекторов около 0,5 МэВ.

На рис. 4 показаны энергетические распределения тормозных фотонов, создаваемые узким пучком электронов 18 МэВ в разных детекторах, для мишени, которая применяется в 18 МВ ускорителях компании Varian [12]. Здесь спектры рассчитаны уже по трем кодам [8, 9,

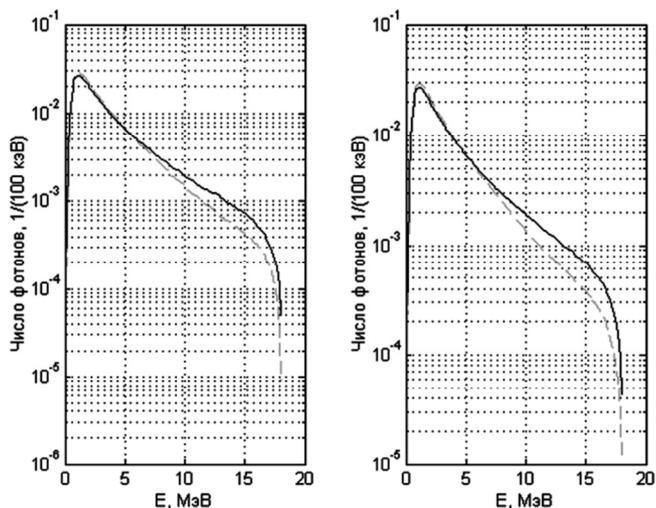


Рис. 2. Энергетическое распределение тормозного излучения, проходящего через кольцевые детекторы радиусами $R_{in}=0$ см, $R_{out}=0,5$ см (а) и $R_{in}=2,0$ см, $R_{out}=2,5$ см (б). Обозначения: — — расчет по коду Geant4 [8] с использованием пакета QGSP_BIC_HP; ---- — расчет по программному пакету [11], физика транспорта излучений в котором основана на коде EGS4 [12]; R_{in} — внутренний радиус кольцевого детектора; R_{out} — внешний радиус кольцевого детектора

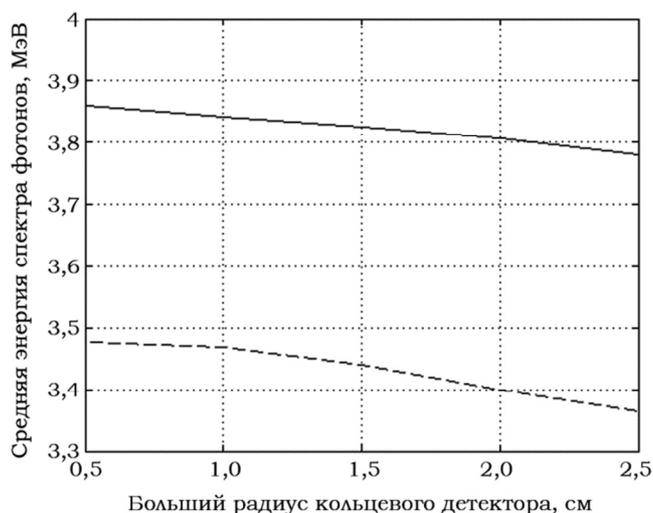


Рис. 3. Зависимость средней энергии тормозных фотонов в пределах кольцевых детекторов от расстояния между внешней границей детекторов и осью пучка. — — расчет по коду Geant4 [8] с использованием пакета QGSP_BIC_HP; ---- — расчет по программному пакету [11]

11]. Причем расчеты по коду Geant4 выполнялись по второму варианту. Как и следовало ожидать, спектры, полученные по Geant4 и Penelope, близки между собой, так как в этом случае в программах использовалась одинаковая физика процессов при моделировании траекторий. В то же время спектр, рассчитанный по коду [11], снова оказался более мягким. Но в данном случае различие меньше, чем в первой серии расчетов. Это более наглядно видно из рис. 5, на котором показана зависимость средней энергии всех трех видов спектров от расстояния до оси пучка. Для спектров, полученных по Geant4 и Penelope, средние энергии близки между собой, а для программного пакета [11] средняя энергия примерно на 0,2 МэВ меньше. Отметим также непрерывное уменьшение средней энергии в кольцевых детекторах с увеличением расстояния от оси пучка для всех расчетов. Но если условно ограничить область малых полей для 18 МВ спектра максимальным эквивалентным радиусом $R=3$ см, то, как следует из рис. 4 и 5, форма спектра и средняя энергия в данной геометрии (без сглаживающего фильтра) меняются незначительно (~2%).

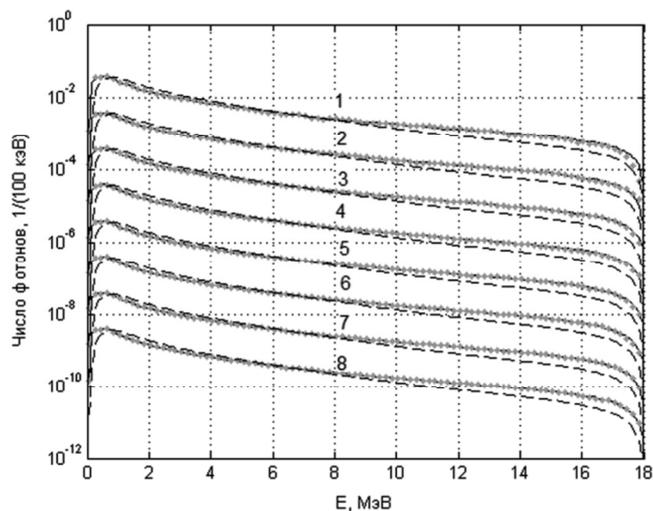


Рис. 4. Энергетические распределения тормозного излучения, проходящего через кольцевые детекторы с разными радиусами. Обозначения: — — расчет по коду Geant4 [8] с использованием физики PENELOPE; ---- — расчет по программному пакету [11]; ◆◆ — расчет по коду Penelope [9]; 1 — интервал по радиусу $\Delta R=0-0,5$ см; 2 — $\Delta R=0,5-1,0$ см, данные умножены на 10^1 ; 3 — $\Delta R=1,0-1,5$ см, данные умножены на 10^2 ; 4 — $\Delta R=1,5-2,0$ см, данные умножены на 10^3 ; 5 — $\Delta R=2,0-2,5$ см, данные умножены на 10^4 ; 6 — $\Delta R=2,5-3,0$ см, данные умножены на 10^5 ; 7 — $\Delta R=3,0-3,5$ см, данные умножены на 10^6 ; 8 — $\Delta R=3,5-4,0$ см, данные умножены на 10^7

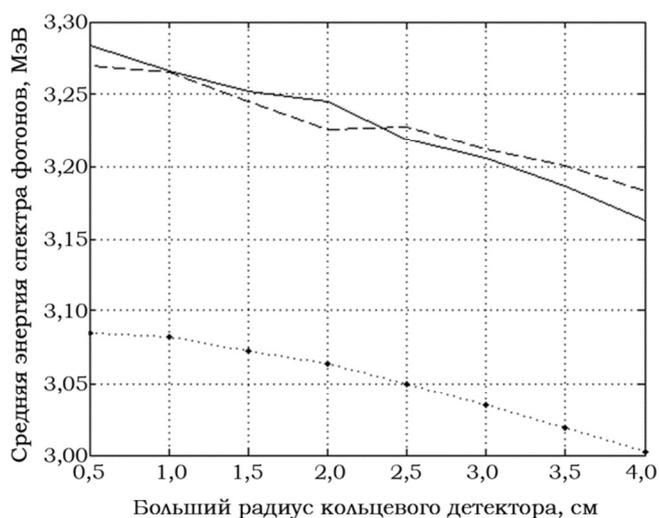


Рис. 5. Зависимость средней энергии тормозных фотонов в пределах кольцевых детекторов от расстояния между внешней границей детекторов и осью пучка: — – расчет по коду Geant4 [8] с использованием физики процессов PENELOPÉ; ---- – расчет по коду PENELOPÉ [9]; ... – расчет по коду [11]

В геометрии, симулирующей основные модулирующие спектр элементы головки ускорителя Varian 18 (рис. 16), расчет спектров тормозного излучения выполняли только по коду Penelope [9]. Исследовали два варианта, отличающиеся размером и формой апертуры основного коллиматора. В первом случае это

был цилиндрический канал в пластине из вольфрама толщиной 8 см радиусом $R_c=1,113$ см, что соответствует размеру поля на поверхности фантома радиусом $R_s=2,5$ см, а во втором – канал с квадратным поперечным сечением. Результаты оказались примерно одинаковыми. Результаты расчета тормозных спектров для цилиндрического канала показаны на рис. 6. На рис. 6а спектры соответствуют детекторам, находящимся в центральной зоне поля на поверхности водного фантома, а на рис. 6б – в области полутени и тени коллиматора. Спектры фотонов в центральной зоне являются более жесткими по сравнению со спектрами в геометрии рис. 1а и со спектрами в области тени коллиматора, что более наглядно видно на рис. 7. Средняя энергия фотонов в центральной зоне повышается до 4,7 МэВ, по сравнению с 3,25 МэВ в геометрии 1а, и с 2,3 МэВ в области тени коллиматора. Причина заключается в фильтрующем действии сглаживающего фильтра и в рассеянии и поглощении излучения в материале основного коллиматора. Отметим, что коэффициент линейного ослабления фотонов для вольфрама, из которого изготовлен основной коллиматор, имеет минимум в районе энергий 3–4 МэВ.

На рис. 8 проведено сравнение спектров фотонов тормозного излучения, усредненных по круговому полю радиусом $R=2,5$ см на поверхности водного фантома на расстоянии

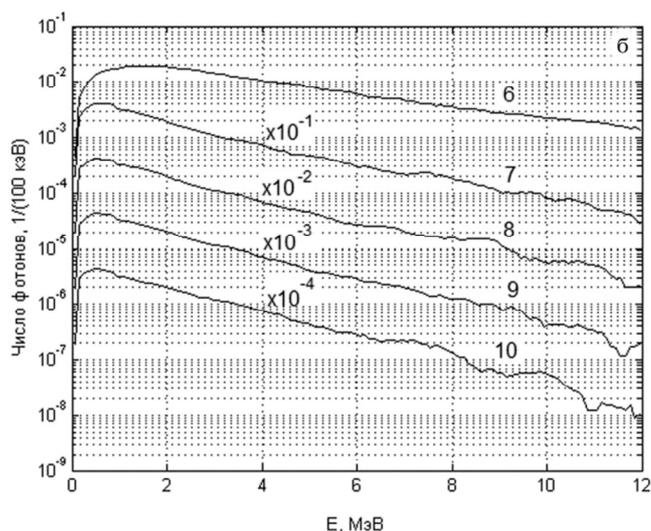
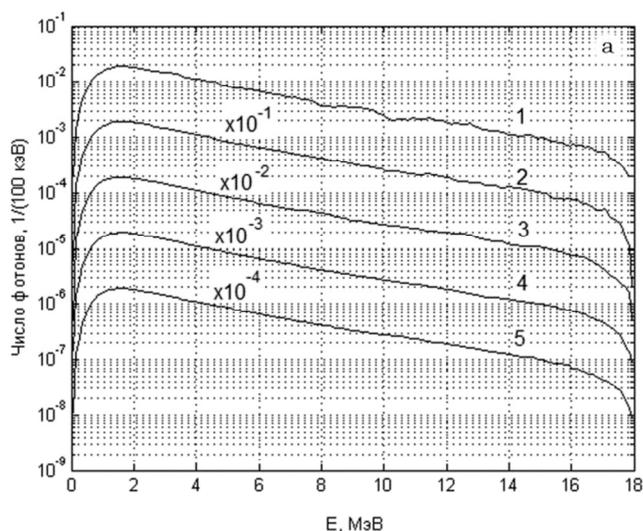


Рис. 6. Энергетические распределения тормозного излучения, проходящего через кольцевые детекторы с разными радиусами, полученные по коду Penelope [9]. Обозначения: 1 – интервал по радиусу $\Delta R=0-0,5$ см; 2 – $\Delta R=0,5-1,0$ см; 3 – $\Delta R=1,0-1,5$ см; 4 – $\Delta R=1,5-2,0$ см; 5 – $\Delta R=2,0-2,5$ см; 6 – $\Delta R=2,5-3,0$ см; 7 – $\Delta R=3,0-3,5$ см; 8 – $\Delta R=3,5-4,0$ см

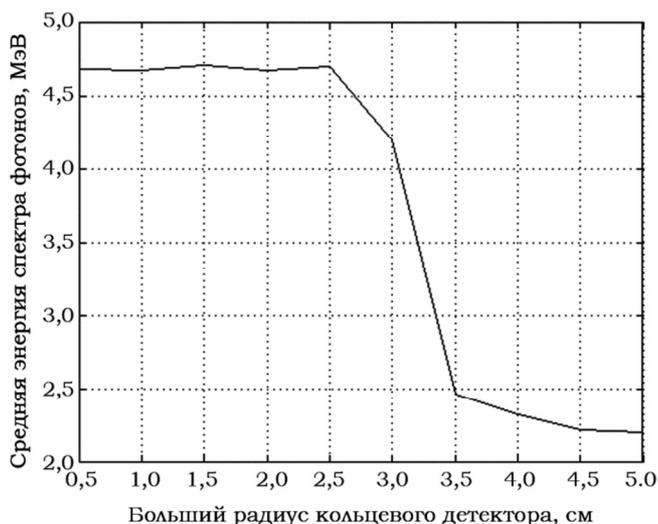


Рис. 7. Зависимость средней энергии тормозных фотонов в пределах кольцевых детекторов от расстояния между внешней границей детекторов и осью, полученная из расчетов по коду Penelope [9]

100 см от мишени, рассчитанных по коду Penelope [9] в настоящей работе (—) и по коду BEAM (...) [10] в работе [3]. На рис. 8 наблюдается небольшое расхождение в спектрах при энергиях фотонов ≥ 16 МэВ, хотя средние энергии спектров практически совпадают (4,71 МэВ против 4,775 МэВ в работе [3]). Причина видимо заключается в том, что хотя в работе [3] и указывается, что приводится тормозной спектр 18 МВ пучка, но на самом деле энергия пучка электронов, генерирующих тормозное излучение, несколько выше. На это указывает наличие в тормозном спектре небольшого количества фотонов с энергией больше 18 МэВ. В настоящей же работе энергия электронов, падающих на мишень, строго равнялась 18 МэВ. Можно считать, что согласие между спектрами с учетом данного момента, является удовлетворительным.

Заключение

Подводя итоги анализа спектров высокоэнергетического тормозного излучения, генерируемого в медицинских ЛУЭ, для случая малых полей на примере ускорителя компании Varian, работающего в режиме генерации пучка 18 МВ, можно сделать следующие выводы.

- ✓ Спектральное распределение фотонов, падающих на водный фантом, для малых полей слабо зависит от размера поля.

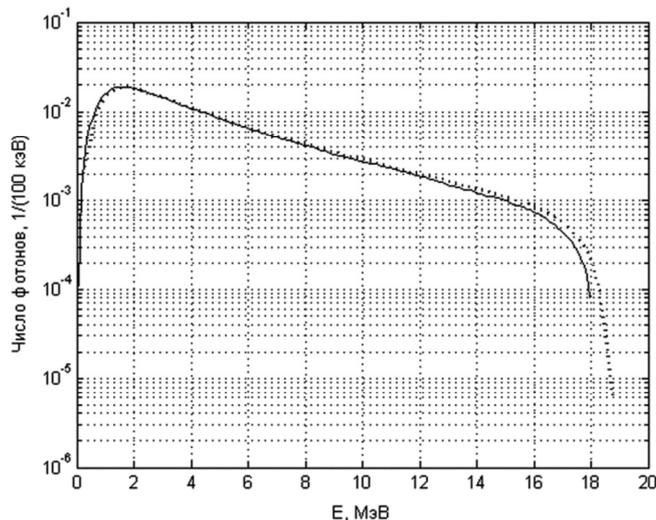


Рис. 8. Сравнение формы спектров тормозного излучения, усредненных по круговому полю радиусом $R=2,5$ см на поверхности водного фантома, рассчитанных по коду Penelope [9] в настоящей работе (—) и по коду BEAM (...) [10] в работе [3]

- ✓ Средняя энергия спектров ускорителя Varian при работе в режиме генерации 18 МВ равна $\sim 4,7$ МэВ для малых полей.
- ✓ Если ускорители в режиме 18 МВ будут работать без сглаживающего фильтра, то средняя энергия уменьшится до $\sim 3,25$ МэВ.
- ✓ При проведении расчетов спектров тормозного излучения высокой энергии по универсальным кодам типа Geant4 существенное значение имеет выбор варианта, настроенного на расчет именно этого типа задач.
- ✓ Результаты расчета энергетических распределений тормозного излучения для электронов 18 МэВ, падающих на мишень из вольфрама, практически совпадают для кодов Geant4, Penelope и EGSnrc (программа BEAM).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и СИТМА в рамках научного проекта № 18-52-34008.

Список литературы

1. IAEA TRS 483. Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Reference and Relative Dose Determination. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2017.

2. Климанов В.А., Кирпичев Ю.С., Кольванова М.А. и соавт. Дозиметрия малых полей высокоэнергетического тормозного излучения медицинских ускорителей электронов // Мед. физика. 2019. №. 2(82), С. 111–127.
3. Sheikh-Bagheria D., Rogers D.W.O. Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code // Med. Phys. 2002. Vol. 29. № 3. P. 391–402.
4. Mohan R., Chui C., Lidofsky L. Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators // Med. Phys. 1985. Vol. 12. P. 592–597.
5. Ahnesjo A., Andreo P. Determination of effective bremsstrahlung spectra and electron contamination for photon dose calculations // Phys. Med. Biol. 1989. Vol. 34. P. 1451–1464.
6. Ulmer W., Harder D. A triple Gaussian pencil beam model for photon beam model // Z. Med. Phys. 1997. Vol. 5. P. 25–30.
7. Yin Z., Hugtenburg R.P., Beddoe A.H. Response corrections for solid-state detectors in megavoltage photon dosimetry // Phys. Med. Biol. 2004. Vol. 49. P. 3691–3702.
8. GEANT4 Collaboration. Geant4 – A simulation toolkit // Nucl. Inst. Meth. A. 2003. Vol. 506. P. 250–303.
9. Salvat F., Jose M., Josep S. PENELOPE-2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport // OECD-NEA, Report 6416, Issy-les-Moulineaux, France, 2009.
10. Rogers D.W.O., Faddegon B.A., Ding G.X et al. BEAM: A Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units // Med. Phys. 1995. Vol. 22. P. 503–524.
11. <https://github.com/RadOncSys/MC>
12. Nelson W.R. The EGS4 Code System // Stanford Linear Accelerator Center, Report SLAC-265, 1985.
13. VARIAN medical systems. Monte Carlo Data Package. High Energy Accelerator // DWG NO. 100040466-02.

**BREMSSTRAHLUNG PHOTON SPECTRA IN SMALL FIELDS CREATED
BY MEDICAL ELECTRON ACCELERATORS IN 18 MV BEAM GENERATION MODE**

V. Klimanov^{1,2}, A. Belousov^{2,3}, G. Gorlachev⁴, Yu. Kirpichov^{4,5}, T. Medjadji¹

¹ National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

² A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

³ Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

⁵ Center of Radiation Therapy “OnkoStop”, Moscow, Russia

A computational study of the spectra of high-energy bremsstrahlung generated by narrow beams of 18 MeV electrons incident on a target, the first layer of which is made of tungsten, for the case of small fields was made. Two geometries were studied: in the first case a target and ring detectors at a distance of 100 cm from it are in the air, in the second case the geometry is as close as possible to the design of the Varian accelerator head operating in the generation mode of 18 MV of the bremsstrahlung beam. Ring detectors are also located as in the first geometry. The calculations were carried out by the Monte-Carlo method using the Geant4, Penelope codes and the Gorlachev’s code, and the data obtained using the EGSnrc code (BEAM program) were also used to compare the results. The reasons for some differences between a series of data calculated by different codes are discussed. In the conclusion a number of distinctive feature based on obtained results are observed in the energy distributions of bremsstrahlung photons for small fields.

Key words: bremsstrahlung, energy distribution, medical electron accelerators, Monte Carlo method, small fields

E-mail: yaklimanov@mail.ru