

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ В ВОДНОМ ФАНТОМЕ УЗКИМИ ПУЧКАМИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СПЕКТРАМИ ОТ 10 ДО 20 МВ

В.А. Климанов¹, А.В. Белоусов¹, Ю.С. Кирпичев²,
М.А. Колыванова¹, Ж.Ж. Смирнова¹

¹ Федеральний медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна, Москва

² ООО Медскан, Москва

В работе анализируются особенности пространственных и энергетических распределений фотонов по глубине, по радиусу и по энергии для малых полей, создаваемых в воде узкими пучками тормозного излучения медицинских ускорителей электронов и мононаправленными моноэнергетическими пучками фотонов высокой энергии. В частности, обсуждаются соотношения между пространственными зависимостями поглощённой дозы, полной кермы и ионизационной кермы. С помощью численного моделирования определены особенности спектров фотонов в малых полях на глубине 10 см в водном фантоме для пучков тормозного излучения с максимальной энергией 10, 15, 18 и 20 МэВ применительно к конструкции головок ускорителей компании Varian. Показано, что в отличие от широких полей энергетическое распределение фотонов в этих полях практически не изменяется в пределах центральной области поля и сильно смягчается при выходе из этой области. При уменьшении размеров малых полей от 4,0×4,0 до 0,5×0,5 см наблюдается некоторое ужесточение спектров в центральной области (средняя энергия возрастает на 2–4 %) и существенно более значительное вне данной области. В работе определены также значения клинических размеров малых полей, создаваемых пучками разных энергий аппаратов компании Varian в водном фантоме на глубине 10 см в зависимости от настроек коллимационной системы.

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

Ключевые слова: дистанционная лучевая терапия, тормозное излучение, малые поля, пространственное и энергетическое распределение фотонов

DOI: 10.52775/1810-200X-2021-92-4-13-23

Введение

Современная лучевая терапия всё больше отходит от традиционного способа облучения для злокачественных новообразований многих локализаций. Всё более востребованными становятся методы IMRT, стереотаксиса, томотерапии, RapidArc, VMAT, в которых доза форми-

руется узкими пучками тормозного излучения, создающими нестандартные и малые поля. В значительной степени это связано с успехами диагностики онкологических заболеваний, которые позволили обнаруживать злокачественные новообразования на ранних стадиях, когда они имеют ещё небольшие размеры. Протоколы для абсолютного и относительного измере-

ния дозы для стандартных полей описаны в серии технических докладов МАГАТЭ, например TRS 398 [1]. Вместе с тем, особенностью ряда ускорителей, используемых для стереотаксического облучения и радиохирургии, является невозможность формирования радиационного поля стандартных размеров, рекомендуемых для калибровки пучков по поглощённой дозе в воде. Первые данные по вопросам дозиметрии малых полей были собраны в 2008 г. в публикации Alfonso et al [2]. Там же был предложен новый формализм для эталонной и относительной дозиметрии нестандартных и малых полей. Позднее некоторым практическим аспектам дозиметрии нестандартных пучков был посвящён доклад IPEM (Report 103) [3].

Первой задачей в дозиметрии узких пучков, создающих малые поля, является определение размера поля, поскольку традиционный подход к классификации полей на основе понятия полной ширины на уровне половины максимума (FWHM) не работает при сильном диффрагмировании пучка. Вторая проблема заключается в том, что размеры наиболее часто используемых детекторов слишком велики для определения дозиметрических параметров в небольших полях. В дополнение к этому, размер детектора и эффекты возмущения могут быть существенными, в отличие от больших полей. Для учёта влияния этих эффектов требуется введение поправочных факторов, которые отсутствуют в рассматриваемой области максимальных энергий спектра пучков. И, наконец, изменения в спектре пучка при значительном уменьшении размера поля (4×4 см) вносят дополнительные неопределённости в абсолютные и относительные измерения дозы на основе существующих дозиметрических протоколов.

В 2017 г. подробный технический отчёт о состоянии исследований по данной теме выпустило МАГАТЭ (TRS № 483) [4]. Авторы работы [4] отметили трудность анализа данных при сборе информации из различных публикаций, вызванную несистематичностью проведенных исследований и разбросом данных в определении размеров полей, особенно для самых мало-размерных полей, а также отсутствие однородности в определении расстояния источник – поверхность (РИП) или расстояния источник – детектор (РИД), глубины измерения или расчёта, определения размера поля на поверхности или на контрольной глубине и т.д. Несмотря на эти трудности, в работе [4] критически проана-

лизированы и систематизированы методические рекомендации для проведения абсолютной и относительной дозиметрии малых полей фотонов до 10 МэВ (в основном пучки 6 МэВ). В клинической же практике применяются также пучки тормозного излучения с максимальной энергией 12, 15, 18, 20 и 24 МэВ. Будем называть этот энергетический диапазон “высоко-энергетическим тормозным излучением (ВТИ)”, включив в него в качестве нижней границы также пучки с максимальной энергией 10,0 МэВ. Имеющаяся в литературе информация по физическим особенностям и дозиметрии таких пучков имеет ограниченный и достаточно противоречивый характер. Поэтому целью настоящей работы является анализ и получение недостающих данных по ряду физических особенностей радиационных полей, создаваемых узкими пучками ВТИ, или малыми полями, в водном фантоме.

Физические особенности малых полей

Критерии малого поля

До публикации TRS-483 [4] не было чётко определения понятия “малое поле”, и к таким полям часто относили поля с размером меньше 4×4 см. Для установки критериев малости поля в TRS-483 предложен подход, учитывающий энергию пучка и плотность вещества. По существу, имеется три фактора равновесия, определяющих размеры, при которых поле считается малым:

- 1) соотношение между пробегом электронов в облучаемом веществе и размером поля;
- 2) размер видимой части источника через коллимирующую систему из точки измерения;
- 3) размер детектора, используемый в измерениях. Физика этих факторов графически иллюстрирована на рис. 1–3. Рассмотрим более подробно первый фактор.

Особенности равновесия заряженных частиц в малых полях

В широких пучках равновесие заряженных частиц (РЗЧ) имеет место с определённой глубины не только в продольном, но и в поперечном направлении. Это происходит потому, что заряженные частицы, образующиеся при взаимодействии фотонов с веществом, из областей, находящихся снаружи центральной оси

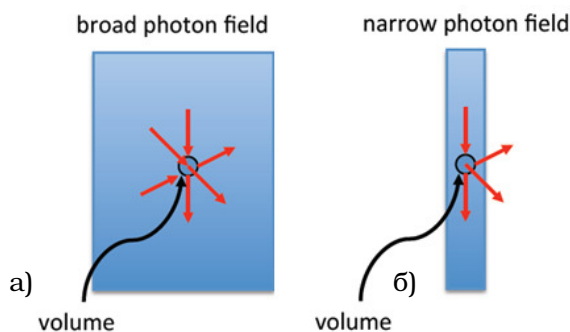


Рис. 1. Соотношение между количеством заряженных частиц, входящих и выходящих из объема, в котором измеряется поглощенная доза, для широкого (а) и узкого (б) пучков. Стрелки условно показывают направления входа и выхода частиц из выделенного объема [3]

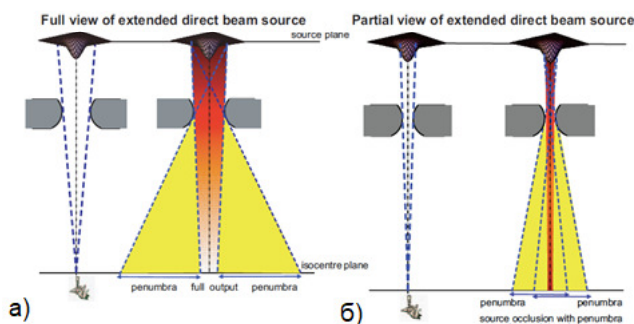


Рис. 2. Схема перекрытия источника (окклюзии): а) источник полностью виден из области измерения и полутени (области частичной видимости источника) разделены; б) источник частично виден из области измерения и полутени перекрываются [3]

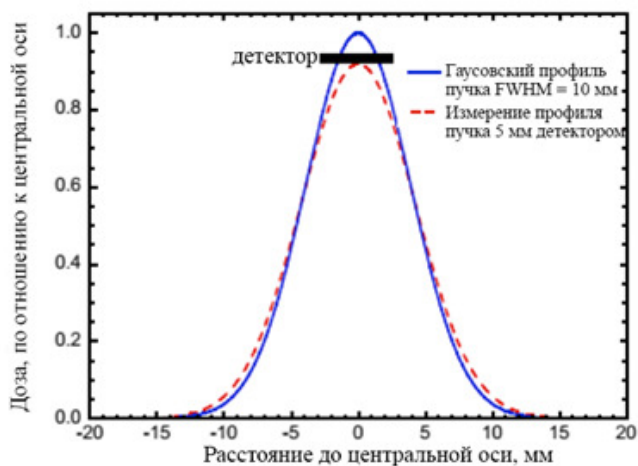


Рис. 3. Влияние усреднения по объёму. Сплошная кривая – гипотетический гауссовский профиль с FWHM (полная ширина на половине высоты) = 10 мм; пунктир – средний профиль, который был бы измерен детектором длиной 5 мм. Площади под кривыми одинаковые [5]

пучка, рассеиваются в центральный район (входящие частицы) и компенсируют таким образом утечку заряженных частиц из этого района (выходящие частицы). Если поперечные размеры пучка на данной глубине являются недостаточными для компенсации утечки заряженных частиц, то происходит нарушение РЗЧ.

В условиях РЗЧ поглощенная доза D и ионизационная керма K (или керма столкновений K_{col}) равны между собой. Однако при облучении среды внешними пучками РЗЧ почти везде отсутствует [6]. В общем случае соотношение между D , K и K_{col} при падении внешних пучков на среду является сложной функцией спектра фотонов, глубины залегания точки интереса и поперечных размеров пучков. В литературе (например, [6]) для отношения поглощенной дозы к ионизационной керме в точке интереса используется обозначение $\beta = D/K_{col}$. В конвенциональной лучевой терапии обычно используются поля, размеры которых, приведенные к квадратным полям, изменяются от 5×5 до 40×40 см. Для таких полей мегавольтовых пучков соотношение между глубинными распределениями D и K_{col} имеет типичный вид, показанный на рис. 4.

Область на рис. 4, где $\beta \leq 1$, обычно называют областью накопления. Здесь наблюдается возрастание поглощенной дозы при уменьшении кермы и ионизационной кермы. Область, где $\beta > 1$ и кривые для D и K_{col} идут близко друг к другу и практически параллельно, называют

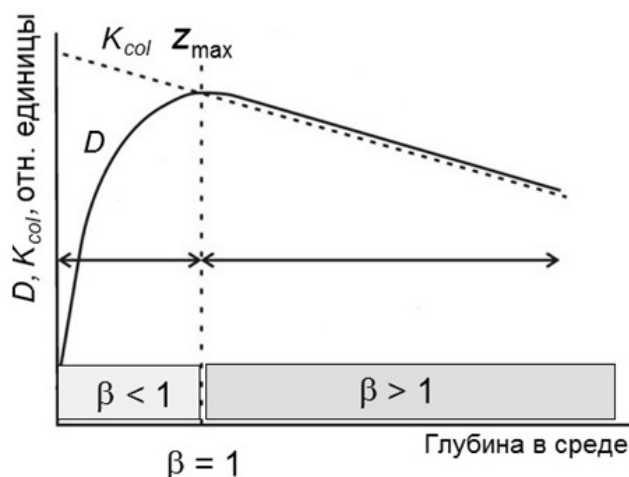


Рис. 4. Пространственные глубинные распределения поглощенной дозы и ионизационной кермы в воде для конвенциональных мегавольтовых пучков с поперечными сечениями не менее 4×4 см

областью динамического равновесия, или областью квази-РЗЧ. Факт близости и параллельности кривых имеет важное значение в клинической дозиметрии. Измерение поглощённой дозы с помощью ионизационных камер базируется на соотношениях Брэгга-Грея, устанавливающих связь между ионизацией в воздушной полости ионизационной камеры и дозой, создаваемой фотонами в стенках камеры. Сами же соотношения получены в предположении существования РЗЧ в полости. Кроме того, ряд используемых детекторов измеряет не поглощённую тканевую дозу, а ионизационную керму. Наличие постоянного соотношения между D и K_{col} позволяет без затруднений пересчитывать показания последней в поглощённую дозу. Однако картина существенно изменяется при переходе к пучкам с малым поперечным сечением, где пропадает и квази-РЗЧ. На данный эффект малых полей обращали внимание авторы ряда работ, например [7]. Однако в работе [7] не приводятся конкретные результаты зависимости соотношения между D , K и K_{col} от поперечных размеров полей в области накопления.

Данная проблема была исследована нами в статье [8] для пучков с круглыми сечениями разных радиусов от 0,1 до 3,0 см для тормозных фотонов 6 МВ в воде с начальным спектром, рассчитанным в работе [9]. Было показано, что в отличие от полей традиционных размеров в малых полях вплоть до $R_0 \leq 1,5$ см для пучков 6 МВ глубинная кривая D с увеличением глубины положения точки интереса не пересекается с глубинными зависимостями для K и K_{col} , т.е. область, где $\beta \geq 1$ отсутствует, в то же время отношение K_{col}/K в области малых полей сохраняется постоянным. Остаётся также практически постоянным, начиная с некоторой глубины, отношение D/K_{col} . Конкретное значение отношения D/K_{col} в области динамического равновесия зависит от размера поля, и это состояние наступает на разных глубинах в зависимости от размера малого поля, причём с увеличением глубины состояние динамического равновесия начинается при больших значениях размеров малых полей. Результаты исследования данной проблемы для пучков ВТИ будут представлены авторами в следующей публикации.

Особенности спектрального распределения фотонов в малых полях

Особенности радиационных полей, создаваемых узкими пучками, в существенной степени связаны с отличием спектрального распределения в малых полях от распределения в широких полях. Энергетическое распределение излучений в широких пучках ВТИ медицинских линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) определяется тремя факторами, а именно, энергией первичных электронов, создающих тормозное излучение, коллимационной системой головки ускорителя и рассеянием в облучаемом объекте. В случае малых полей к этим факторам следует добавить поперечные размеры пучков.

В литературе имеется немало работ, в которых изучались энергетические распределения фотонов в пучках тормозного излучения ЛУЭ с максимальной энергией ≤ 10 МэВ. Обширная библиография по этой тематике имеется в известной публикации [10]. Однако в большей части работ спектр фотонов определялся для широких полей, из работ для малых полей наибольший интерес представляет работа [11]. В ней исследовался спектр фотонов в широких и малых полях для пучков 6 МВ. Из работ, посвящённых изучению спектра фотонов и электронов в малых полях для ВТИ, можно назвать практически только работу [12], в которой с помощью метода Монте-Карло был рассчитан спектр фотонов для пучка 15 МВ. Однако сама головка ЛУЭ в работе [12] при проведении расчётов не моделировалась и результаты были получены косвенным способом. В настоящей работе с помощью расчётов методом Монте-Карло исследованы особенности спектров для малых полей в области ВТИ, генерируемые ускорителями серии Varian с максимальной энергией 10, 15, 18 и 20 МэВ.

Для расчёта спектров применяли коды Geant4 10.4 [13], EGSnrc (программа BEAMnrc) [14] и Penelope [15]. Спектры тормозного излучения, получаемые методом Монте-Карло, и скорость расчёта в определённой степени зависят от входных настроек программ, особенно это относится к низкоэнергетической части спектра. Во всех использованных программах для электронов учитывали процессы ионизации и генерации тормозного излучения, для позитронов – процесс аннигиляции. Для фотонов учитывали процессы рэлеевского и комптоновского рассеяния, рождения электрон-позитронных пар и фотоэлектрический эффект, ис-

пускание характеристического излучения и электронов Оже.

Геометрию головок ускорителей задавали в соответствии с публикацией компании Varian [16]. При моделировании транспорта излучения через головку ЛУЭ использовали следующие значения параметров BEAMnrc: electron and photon cutoffs ECUT=0,7 MeV; PCUT=0,01 MeV; maximum energy-loss fraction per step ESTEPE=0,25; energy threshold ESAVE = 2,0 MeV. Для увеличения количества историй тормозных фотонов применяли технику их направленного расщепления в мишени (DBS) со значением NBRSP=500.

При проведении расчётов 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 были выполнены с использованием набора физических процессов (physics list) Penelope. В данном наборе использован 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). Порог рождения вторичных частиц составлял 0,01 мм, т.е. вторичные частицы, пробег которых в веществе меньше этого значения, не моделировались, и полагалось, что их энергия целиком поглощается в точке образования.

Спектральные распределения фотонов определялись из анализа так называемых PSF-файлов, в которых регистрировались параметры траекторий частиц, пересекающих виртуальные плоскости, расположенные после основных элементов головки ускорителей: тормозной мишени, первичного коллиматора, сглаживающего фильтра и вторичного коллиматора при расположении коллимационных

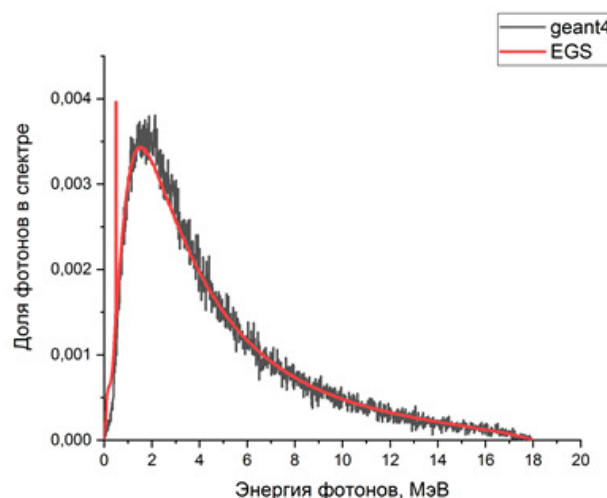


Рис. 5. Сравнение спектров фотонов тормозного пучка 18 МВ ускорителя Varian, полученных по кодам Egsnrc и Geant4 для поля 4×4 на входе в водный фантом

шторок, соответствующих квадратным малым, референсному (10×10) и 20×20 см полям и круглым полям разных размеров. Плоскость последнего PSF-файла располагалась на расстоянии 90 и 100 см от тормозной мишени. В данной работе рассмотрим в основном результаты, полученные для квадратных полей и РИП=100 см.

Результаты расчёта спектров, рассчитанные по разным кодам в пределах статистических неопределенностей согласуются между собой, поэтому далее в разделе не указывается по какой программе получены результаты. В качестве примера на рис. 5 приведено сравнение спектров, рассчитанных по кодам EGSnrc (программа Beam) и коду Geant4.

В широких полях спектр фотонов заметно изменяется в зависимости от расстояния до оси пучка. В качестве иллюстрации на рис. 6 приводится зависимость средних энергий спектра для пучка 18 МВ на разных участках поля 20×20 см на входе в фантом, а на рис. 7 для тормозных спектров с разной максимальной энергией для поля 10×10 см. Напротив, для малых полей средняя энергия в пределах поля остаётся практически постоянной и сильно уменьшается за пределами геометрических размеров поля (рис. 8). Результаты расчётов средней энергии для полей разных размеров в области ВТИ, приводимые в табл. 1, также показывают, что она несколько возрастает при уменьшении размеров малых полей. Это про-

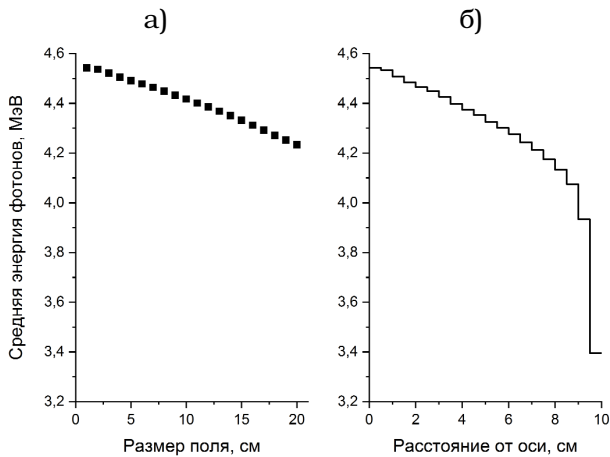


Рис. 6. Изменение средней энергии пучка 18 МВ для поля 20×20 см на входе в фантом в зависимости от размера квадратного участка поля (а) и от положения квадратных колец шириной 1,0 см (б), по площади которых проводится усреднение

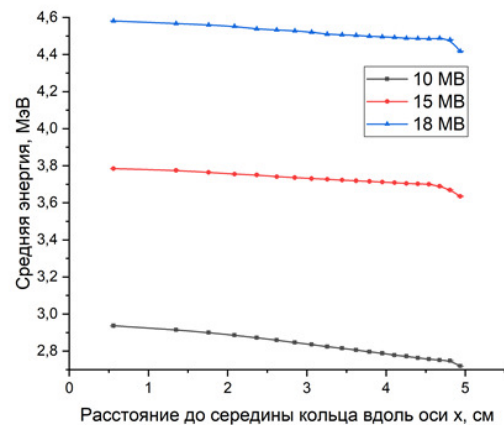


Рис. 7. Зависимость средней энергии пучков 10, 15 и 18 МВ на разных участках поля 10×10 см на входе в фантом от расстояния между осью пучка и серединой (вдоль оси x) квадратных колец равной площади

творечит выводам работ [17, 18] в которых, основываясь на результатах работы [19] для пучка 6 МВ, утверждается, что средняя энергия спектра фотонов в малых полях уменьшается с уменьшением размера поля. Причиной ужесточения спектра фотонов с уменьшением размера поля является уменьшение вклада в спектр фотонов низкой энергии. Этот эффект показан на рис. 9 для тормозного пучка 15 МВ, где приведены спектральные распределения

для малых полей $0,5 \times 0,5$; $3,0 \times 3,0$; $4,0 \times 4,0$ см и референсного поля 10×10 см.

Из рис. 9 видно, что с уменьшением размера поля относительное количество фотонов с низкой энергией уменьшается и максимум плотности распределения смещается в область более высоких энергий. Этот эффект ужесточения спектра более полно виден из данных табл. 1, где представлены средние значения энергии фотонов в малых квадратных полях

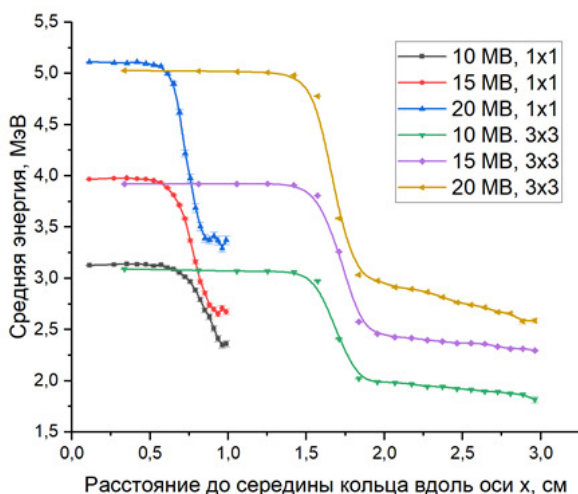


Рис. 8. Зависимость средней энергии пучков 10, 15 и 20 МВ для малых полей 1×1 и 3×3 см от расстояния между осью пучка и серединой (вдоль оси x) квадратных колец равной площади

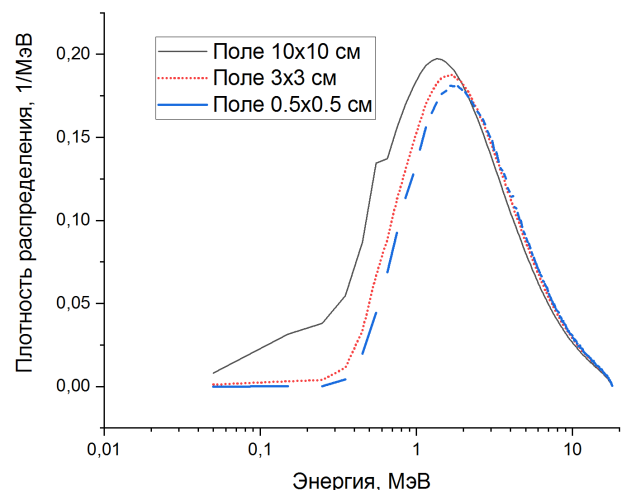


Рис. 9. Спектральные распределения фотонов на входе в водный фантом, создаваемые пучком тормозного излучения 15 МВ, для разных размеров малых полей и референсного поля при $SSD=100$ см

Таблица 1

Средние энергии фотонов на трех разных участках плоских источников в виде квадратных колец равной площади, создаваемых PSF-файлами пучков с разной максимальной энергией, для разных геометрических размеров малых полей

Размер поля, см	Пучок 10 МэВ			Пучок 15 МэВ		
	\bar{E}_0^* , МэВ	\bar{E}_1^{**} , МэВ	\bar{E}_2^{***} , МэВ	\bar{E}_0^* , МэВ	\bar{E}_1^{**} , МэВ	\bar{E}_2^{***} , МэВ
0,5×0,5	3,169	3,146	3,115	3,975	3,978	3,962
1,0×1,0	3,134	3,113	2,931	3,959	3,931	3,881
2,0×2,0	3,107	2,943	2,075	3,946	3,747	2,521
3,0×3,0	3,074	2,733	1,939	3,919	3,522	2,387
4,0×4,0	3,040	2,520	1,806	3,890	3,292	2,579
Размер поля, см	Пучок 18 МэВ			Пучок 20 МэВ		
	\bar{E}_0^* , МэВ	\bar{E}_1^{**} , МэВ	\bar{E}_2^{***} , МэВ	\bar{E}_0^* , МэВ	\bar{E}_1^{**} , МэВ	\bar{E}_2^{***} , МэВ
0,5×0,5	4,908	4,876	4,811	5,119	5,051	4,548
1,0×1,0	4,894	4,535	3,193	5,102	5,044	3,836
2,0×2,0	4,856	3,314	2,949	5,053	4,830	3,203
3,0×3,0	4,812	2,869	2,694	5,013	4,189	2,821
4,0×4,0	4,354	2,645	2,385	4,917	2,665	2,373

* энергия фотонов, усредненная по площади центральной части плоского виртуального источника, размеры которого определялись положением шторок коллиматора при SSD=100 см;

** энергия фотонов, усредненная по площади 1-го квадратного кольца, окаймляющего центральную часть виртуального источника, и имеющего такое же значение площади, как центральная часть;

*** энергия фотонов, усредненная по площади 2-го квадратного кольца, окаймляющего 1-ое квадратное кольцо виртуального источника и имеющего такое же значение площади, как центральная часть

разных размеров, расположенных на поверхности водного фантома при РИП=100 см для пучков тормозного излучения ускорителей Varian с максимальной энергией фотонов 10, 15, 18 и 20 МэВ. Средние значения энергии получены для трёх участков каждого плоского виртуального источника. Первый участок представляет центральную часть поля номинальных размеров, определяемых положением коллимационных шторок ускорителя. Второй и третий участок имеют форму квадратных колец, последовательно окаймляющих центральный участок. Все три участка имеют одинаковую площадь.

Анализ данных табл. 1 показывает:

- ✓ средняя энергия фотонов в центральной части увеличивается на 2–4 % при уменьшении размеров малого поля от 4,0×4,0 до 0,5×0,5 см, т.е. неочень значительно;
- ✓ средняя энергия фотонов на 2-м и 3-м участках, напротив, сильно уменьшается по сравнению с центральной частью, причем степень уменьшения увеличивается с увеличением номинального размера малых полей;
- ✓ особенно сильно значение средней энергии уменьшается на 3-участке для поля 4×4 см.

Причина такого изменения средней энергии фотонов на центральном участке связана с взаимодействием нескольких факторов, а именно:

- ✓ максимальная энергия спектра ВТИ, определяющая степень ослабления пучка и анизотропию рассеяния фотонов;
- ✓ форма и материал сглаживающего фильтра, определяющие модификацию первичного спектра ВТИ;
- ✓ степень видимости пространственно-распределенного источника тормозного излучения с разных точек участка.

Для второго и третьего участков к этим факторам добавляется относительная удаленность участков от оси пучков, так как туда попадает в основном рассеянное излучение, энергия которого значительно уменьшается с увеличением угла рассеяния.

Размер полей узких пучков в водном фантоме на глубине 10 см

В руководстве МАГАТЭ по дозиметрии малых полей [4] неоднократно отмечалось, что одной из проблем использования опубликованных в литературе результатов исследования малых полей является неопределенность ин-

Таблица 2

Значения размера квадратного поля S_{clin} в водном фантоме на глубине 10 см в зависимости от размеров малых полей и референсного поля, устанавливаемых коллимационными шторками на расстоянии 100 см от мишени (S_{col}), которые создаются пучками ВТИ ускорителей компании Varian с разной максимальной энергией фотонов при SSD=100 см

E_{max} , МэВ	S_{col} , см					
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	10,0
10,0	0,61	1,12	2,20	3,31	4,34	10,9
15,0	0,85	1,21	2,19	3,26	4,33	10,8
18,0	0,63	1,13	2,14	3,30	4,40	11,0
20,0	0,63	1,13	2,13	3,31	4,40	11,1

Таблица 3

Значения размера квадратного поля S_{clin} в водном фантоме на глубине 10 см в зависимости от размеров малых полей и референсного поля, устанавливаемых коллимационными шторками на расстоянии 100 см от мишени (S_{col}), которые создаются пучками ВТИ ускорителей компании Varian с разной максимальной энергией фотонов при SSD=90 см

E_{max} , МэВ	S_{col} , см					
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	10,0
10,0	0,55	1,02	2,01	3,02	4,02	10,04
15,0	0,75	1,11	2,00	2,98	3,95	9,90
18,0	0,57	1,04	2,02	3,01	4,00	10,00
20,0	0,57	1,04	2,02	3,01	4,00	10,02

формации по размерам полей на глубинах в водном фантоме, для которых приводятся данные. Наиболее важной в этом направлении является информация о размерах полей в расчётах или в экспериментах на глубине 10 см. Именно на данной глубине рекомендуется проводить калибровку пучков, при этом для малых полей в таком случае применяются поправочные коэффициенты для показаний детекторов, существенно зависящие от размеров поля на конкретной глубине. Значения поправочных коэффициентов в конкретных условиях обычно определяются с помощью полномасштабного моделирования геометрии системы и переноса излучения методом Монте-Карло. Размер поля на заданной глубине при моделировании задаётся раскрытием коллимационных шторок ускорителя. Эти размеры принято называть геометрическими размерами поля и обозначим их как S_{col} . Однако влияние рассеяния, окклюзии источника и других факторов влияют на фактические размеры полей, которые в эксперименте согласно протоколам определяются как полная ширина дозовых профилей в фанто-

ме вдоль осей x или y на половине высоты (англ. $FWHM$) и обозначаются как S_{clin} .

В докладе МАГАТЭ TRS-483 поправочные факторы специфицируются в зависимости от параметра S_{clin} , который для малых полей рассчитывается из значений $FWHM$ вдоль осей x и y на глубине определения поправочного фактора выхода по формуле

$$S_{clin} = (FWHM_x \cdot FWHM_y)^{1/2}. \quad (3)$$

В работе, используя полученные PSF-файлы для разных номинальных геометрических размеров полей как источники тормозного излучения, рассчитаны методом Монте-Карло дозовые профили в водном фантоме на глубине 10 см вдоль осей x и y . Из этих данных были определены значения $FWHM_x$, $FWHM_y$ и далее S_{clin} . Полученные значения S_{clin} для разных спектров тормозного излучения и геометрических размеров полей (S_{col}), устанавливаемых шторками коллиматора, приведены для РИП=100 см в табл. 2 и для РИП=90 см в табл. 3.

Из приведенных в табл. 2 и 3 результатов видно, что размеры поля S_{clin} в водном фантоме

на глубине 10 см при РИП=100 см превышают геометрические размеры, устанавливаемые коллимационными шторками на расстоянии 100 см от мишени, примерно на 10 %. В то же время при, РИП=90 см эти размеры практически совпадают. Причина такого поведения в основном геометрическая. Размер поля S_{col} при расчётах устанавливался шторками коллиматора на расстоянии 100 см от мишени, когда виртуальный источник в виде PSF-файла располагался на поверхности фантома. При РИП=90 см глубина 10 см в фантоме соответствовала как раз расстоянию 100 см от мишени, тогда как при РИП=100 см это расстояние равнялось 110 см. Исключения представляли в обоих случаях значения S_{clin} для самого малого поля $0,5 \times 0,5$ см, которые вследствие эффекта окклюзии существенно превышают значения S_{col} для обоих значений РИП.

Используя дозовые профили, рассчитанные методом Монте-Карло для разных моделей ускорителей, мы определили также поправочные факторы на усреднение показаний по объёму для ряда ионизационных камер при их применении для дозиметрии малых полей. Полученные результаты будут опубликованы в ближайшее время.

Заключение

В работе сформулированы особенности соотношения между глубинными распределениями D , K и K_{col} в области малых полей для спектра тормозных фотонов 6 МВ. В отличие от традиционных размеров полей в малых полях вплоть до $R_0 \leq 1,5$ см для пучков 6 МВ (согласно работе [9]) кривые для D , K и K_{col} с увеличением глубины точки интереса не пересекаются, т.е. область, где $\beta \geq 1$, отсутствует, причем отношение K_{col}/K для рассмотренного спектра фотонов в области малых полей сохраняется постоянным. Остаётся также практически постоянным, начиная с некоторой глубины, и отношение D/K_{col} . Конкретное значение отношения D/K_{col} в области динамического равновесия зависит от размера поля, и это состояние наступает на разных глубинах в зависимости от размера малого поля, причём с увеличением глубины состояние динамического равновесия начинается при больших значениях размеров малых полей.

Изучены особенности спектров фотонов в малых полях, расположенных на входе в водный фантом, для пучков тормозного излучения с максимальной энергией 10, 15, 18 и 20 МэВ применительно к конструкции головки ускорителей компании Varian. Показано, что в отличие от широких полей энергетическое распределение фотонов в этих полях практически не изменяется в пределах центральной области поля и сильно смягчается при выходе из этой области. При уменьшении номинальных размеров полей от $4,0 \times 4,0$ до $0,5 \times 0,5$ см наблюдается некоторое ужесточение спектров в центральной области (средняя энергия возрастает на 2–4 %), существенно более значительное вне данной области, что противоречит выводам работ [13, 15, 19].

Рассмотрены наиболее существенные факторы, влияющие на особенности спектральных распределений фотонов в малых полях в области ВТИ. В силу трудностей учёта взаимодействия связанных между собой факторов, влияющих сложным образом на спектральное распределение фотонов в малых полях, создание аналитической модели для этих спектров представляется мало перспективным. Более продуктивный путь для их получения заключается в численных расчётах методами теории переноса ионизирующих излучений.

В работе определены значения клинических размеров малых полей, создаваемых пучками ускорителей Varian разных энергий в водном фантоме на глубине 10 см в зависимости от настроек коллимационной системы. Оказалось, что при РИП=90 см геометрические и клинические размеры практически совпадают за исключением очень малого поля $0,5 \times 0,5$ см. Однако при РИП=100 см клинические размеры превышают геометрические размеры, устанавливаемые шторками коллиматора на расстоянии 100 см от мишени, примерно на 10 %.

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

Список литературы

1. International Atomic Energy Agency, Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed

- Dose to Water, Technical Reports Series No. 398, IAEA, Vienna 2000.
2. Alfonso R, Andreo P, Capote R, et al. A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. *Med. Phys.* 2008; 35: 5179-86.
 3. Institute of Physics and Engineering in Medicine. Small Field MV Photon Dosimetry, IPEM Rep. 103. York. 2010.
 4. International Atomic Energy Agency, Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Reference and Relative Dose Determination. IAEA TRS 483. Vienna. 2017.
 5. Wuerfel JU. Dose measurements in small fields. *Med. Phys. Int.* 2013; 1: 81-90.
 6. Attix FH. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. New York: Wiley. 1986.
 7. Kumar S, Deshpande DD, Nahum AE. Monte-Carlo-derived insights into dose-kerma-collision kerma inter-relationships for 50keV-25MeV photon beams in water, aluminum and copper. *Phys. Med. Biol.* 2015; 60: 501-19.
 8. Климанов В.А., Галютдинова Ж.Ж., Колыванова М.А. Соотношение между поглощенной дозой, кермой и ионизационной кермой для полей малых размеров. *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2019. 64(3): 74-7. [Relationship between absorbed dose, kerma and ionization kerma for small fields. Klimaniv VA, Galyautdinova ZhZh, Kolyvanova MA. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2019; 64(3): 74-7]
 9. Sheikh-Bagheria D, Rogers DWO. Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code. *Med. Phys.* 2002. 29(3): 391-402.
 10. Sheikh-Bagheria D, Rogers DWO. Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code. *Med. Phys.* 2002; 29(3): 391-402.
 11. Sanchez-Doblado F, Andreo P, Capote R, et al. Ionization chamber dosimetry of small photon fields: a Monte Carlo study on stopping-power ratios for radiosurgery and IMRT beams. *Phys. Med. Biol.* 2003. 48: 2081-99.
 12. Yin Z, Hugtenburg RP, Beddoe AH. Response corrections for solid-state detectors in megavoltage photon dosimetry. *Phys. Med. Biol.* 2004; 49: 3691-702.
 13. Geant4 – A simulation toolkit. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 506. 2003; 250-303.
 14. Rogers DWO, Kawrakow I, Seuntjens JP, et al. National Research Council of Canada Report No. PIRS-702 (rev C) NRC User codes for EGSnrc. 2011. Ottawa: NRCC.
 15. 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.
 16. VARIAN medical systems. Monte Carlo Data Package. High Energy Accelerator. DWG NO. 100040466-02.
 17. Andreo P, Burns DT, Nahum AE, et al. Fundamentals of ionizing radiation dosimetry. Wiley-VCH. 2017.
 18. Seuntjens J, Lartigau EF, Cora S, et al. Prescribing, recording, and reporting of stereotactic treatments with small photons beams. ICRU report No. 91. *J ICRU.* 2014; 14(2): 1-145.
 19. Verhaegen F, Das IJ, Palmans H. Monte Carlo dosimetry study of a 6 MV stereotactic radiosurgery unit. *Phys. Med. Biol.* 1998; 43: 2755-68.

FEATURES OF DISTRIBUTIONS CREATED IN A WATER PHANTOM BY NARROW BREMSSTRAHLUNG RADIATION BEAMS FROM 10 TO 20 MV

V.A. Klimanov¹, A.V. Belousov¹, Yu.S. Kirpichev², M.A. Kolyvanova¹, J. Zh. Smirnova¹

¹ A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

² OOO Medskan, Moscow, Russia

The paper analyzes the features of the spatial and energy distributions of photons in depth, in radius and in energy for small fields created in water by narrow beams of high-energy bremsstrahlung radiation from medical accelerators and mono-directional, monoenergetic beams of photons. In particular, the relationship between the spatial dependences of the absorbed dose, total kerma, and ionization kerma is discussed. Using numerical simulation, the features of photon spectra in small fields at a depth of 10 cm in a water phantom for bremsstrahlung beams with maximum energies of 10, 15, 18 and 20 MeV were determined as applied to the design of Varian accelerator heads. It is shown that, in contrast to wide fields, the energy distribution of photons in these fields practically does not change within the central region of the field and strongly softens when leaving this region. With a decrease in the size of small fields from 4.0×4.0 to 0.5×0.5 cm, a certain hardening of the spectra is observed in the central region (the average energy increases by 2–4 %) and is much more significant outside this region. The work also determined the values of the clinical dimensions of small fields generated by high-energy beams of Varian accelerators of different energies in a water phantom at a depth of 10 cm, depending on the settings of the collimation system.

This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and SITMA within the framework of scientific project No. 18-52-34008.

Key words: *distant radiation therapy, bremsstrahlung, small fields, spatial and energy distribution of photons*

E-mail: yaklimanov@mail.ru