

В.А. Климанов^{1,2}, Ж.Ж. Галяутдинова², М.А. Колыванова²**СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗОЙ, КЕРМОЙ И ИОНИЗАЦИОННОЙ КЕРМОЙ
ДЛЯ ПОЛЕЙ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ**

1. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва. E-mail: vaklimanov@mail.ru;

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

В.А. Климанов – в.н.с., д.ф.-м.н., проф.; Ж.Ж. Галяутдинова – зав. лаб.; М.А. Колыванова – зав. лаб.

Реферат

Цель: Изучение соотношений между пространственными распределениями в воде основных дозиметрических величин, а именно поглощенной дозой, кермой и ионизационной кермой, для полей малых размеров с круглым поперечным сечением, создаваемых расходящимися пучками тормозного излучения с максимальной энергией 6 МэВ.

Материал и методы: Методом Монте-Карло, используя коды EGSnrc и MCNP4C2, проведены расчеты указанных распределений в водном фантоме для пучков с радиусами на поверхности фантома от 0,1 до 3,0 см и для глубин до 40 см. Особенно детально изучены соотношения на глубинах до 5 см, где находится так называемая область накопления дозы (build-up).

Результаты: Показано, что отношение ионизационной кермы к керме для таких пучков при глубинах до 40 см практически постоянно и равно $0,9930 \pm 0,0005$. Отношение же поглощенной дозы к ионизационной керме, в отличие от конвенциональных квадратных пучков с площадью сечений $\geq 20 \text{ см}^2$, существенно меньше единицы при радиусах $\leq 1 \text{ см}$ на всех рассмотренных глубинах.

Закключение: Полученные данные свидетельствуют, что соотношения между поглощенной дозой, кермой и ионизационной кермой для фотонных полей, создаваемых пучками малых поперечных сечений, сильно отличаются от таковых для традиционных пучков. Это обстоятельство следует учитывать при проведении дозиметрии малых полей.

Ключевые слова: клиническая дозиметрия, поглощенная доза, керма, ионизационная керма, малоразмерные поля

Поступила: 11.09.2018. Принята к публикации: 18.04.2019

Введение

Соотношения между поглощенной дозой (D), кермой (K) и ионизационной кермой (K_{col}) для фотонного излучения в различных средах имеют фундаментальное значение в радиационной дозиметрии. На эти соотношения решающее влияние оказывает перенос вторичных электронов, образующихся в среде при взаимодействии фотонов с веществом.

Поглощение энергии в средах при облучении их фотонами происходит в два этапа. На первом этапе фотоны в результате взаимодействия передают свою энергию (или ее часть) орбитальным электронам атомов, или в результате процесса образования пар создают пару электрон/позитрон. На втором этапе эти заряженные частицы в результате кулоновского взаимодействия передают свою энергию орбитальным электронам, производя основную ионизацию атомов и/или их возбуждение. При этом часть орбитальных электронов получают такую значительную кинетическую энергию, что сами, в свою очередь, способны производить ионизацию среды (дельта-электроны). Другим процессом взаимодействия заряженных частиц с веществом является испускание тормозного излучения. В силу сложности процессов взаимодействия и переноса заряженных частиц корректный расчет соотношений между D , K и K_{col} возможен только с помощью численных методов теории переноса излучений и, в частности, метода Монте-Карло.

Понятие «керма» вводится для косвенно ионизирующего излучения, в частности для фотонов. По определению она равна отношению dE_{tr} к dm , где dE_{tr} – средняя кинетическая энергия заряженных частиц, освобождаемых в массе вещества dm падающим

косвенно ионизирующим излучением в результате взаимодействия. Поэтому керма включает энергию, которую заряженные частицы впоследствии могут снова переизлучить в тормозное фотонное излучение. В свою очередь, компонента кермы, называемая ионизационной кермой, наоборот, эту энергию не включает.

Другое фундаментальное понятие радиационной дозиметрии «поглощенная доза» количественно описывает процесс поглощения энергии излучения в среде. Она равна отношению dE_a к dm , где dE_a – средняя энергия, поглощенная (т.е. ушедшая на ионизацию и возбуждение атомов) в массе вещества dm .

В условиях равновесия заряженных частиц (РЗЧ), называемого также электронным равновесием, поглощенная доза и ионизационная керма равны между собой. Однако при облучении среды внешними пучками РЗЧ практически не существует. В общем случае соотношение между D , K и K_{col} при падении внешних пучков на среду является сложной функцией спектра фотонов, глубины точки интереса и поперечных размеров пучков. В литературе (например, [1–4]) для отношения поглощенной дозы к ионизационной керме в точке интереса используется обозначение

$$\beta = D/K_{col}. \quad (1)$$

В конвенциональной лучевой терапии обычно используются поля, размеры которых, приведенные к квадратным полям, изменяются от 4×4 до $40 \times 40 \text{ см}$. Для таких полей соотношение между глубинными распределениями D и K_{col} для мегавольтовых пучков имеет типичный вид, показанный на рис. 1.

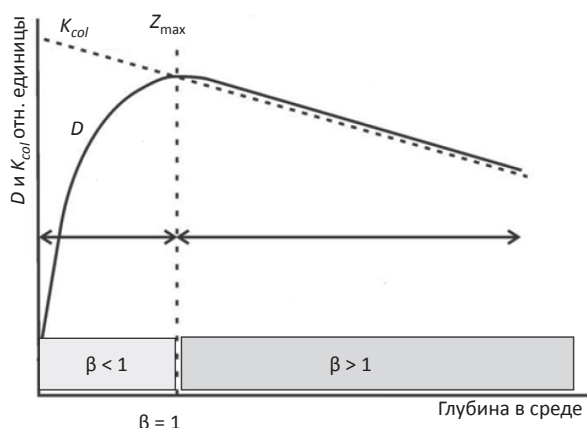


Рис. 1. Пространственные глубинные распределения поглощенной дозы и ионизационной кермы в воде для конвенциональных мегавольтовых пучков с поперечными сечениями более 4×4 см

Область на рис. 1, где $\beta \leq 1$, обычно называют областью накопления дозы. Здесь наблюдается возрастание поглощенной дозы при уменьшении кермы и ионизационной кермы. Область, где $\beta > 1$, а кривые для D и K_{col} идут практически параллельно, называют областью динамического равновесия, или областью квази-РЗЧ. Факт параллельности кривых имеет важное значение в клинической дозиметрии. Дело в том, что, строго говоря, ряд используемых детекторов измеряет не поглощенную тканевую дозу, а ионизационную керму. Наличие постоянного соотношения между поглощенной дозой и ионизационной кермой позволяет корректно пересчитывать показания последней в поглощенную дозу. Однако картина очень существенно изменяется при переходе к пучкам с малыми поперечными сечениями, где пропадает квази-РЗЧ. На данный эффект малых полей обращали внимание авторы ряда работ, например, авторы работы [5]. Однако в работе [5] фактически не приводятся конкретные результаты зависимости соотношения между D , K и K_{col} от поперечных размеров полей в области накопления. Данная проблема была исследована в настоящей работе для пучков тормозных фотонов 6 МВ с малыми круглыми поперечными сечениями в воде со спектром, рассчитанным в работе [6].

Материал и методы

Учитывая специфику проблемы, наиболее подходящим методом исследования дозовых функционалов поля фотонов в условиях отсутствия РЗЧ является метод Монте-Карло. В работе были использованы широко известные коды *EGSnrc* ([7], версия 2016 г.) и *MCNP4C2* [8]. Код *EGSnrc* является общепризнанным «золотым» стандартом расчета дозовых распределений, создаваемых пучками фотонов и электронов. С помощью *EGSnrc* (подпрограмма *DOSRZnrc*) проводился расчет глубинных распределений поглощенной дозы (значения поглощенной дозы и кермы на геоме-

трической оси пучка в воде для пучков радиусами от 0,1 до 3,0 см и глубин от 0,2 до 40 см. Файл сечений был сгенерирован *EGSnrcMP* пакетом из данных *PEGS4*, используя значения параметров $AP = 1$ кэВ, $AE = 512$ кэВ (полная энергия), где AP – граничные энергии образования тормозного излучения и AE – дельта-электронов соответственно. Электроны и фотоны замедлялись до кинетической энергии 1 кэВ ($ECUT = 1$ кэВ и $PCUT = 1$ кэВ). Размер водного фантома, для которого рассчитывались глубинные распределения, был радиусом 25 см и высотой 50 см.

Так как в коде *EGSnrc* нет опции для расчета ионизационной кермы, то для получения ее значений использовался код *MCNP4C2*. В этом коде для расчета транспорта электронов тоже применяется метод укрупненных столкновений, но шаг по энергии между столкновениями более крупный. Чтобы исключить возможное появление различия между результатами, получаемыми по этим двум кодам между собой ввиду данного обстоятельства, из результатов расчета по коду *MCNP4C2* определялось только отношение K_{col}/K . Значение этого отношения в сочетании с результатами расчета кермы по коду *EGSnrc* позволило определить значение ионизационной кермы.

Результаты и обсуждение

Из результатов расчета по коду *MCNP4C2* было получено, что для малых полей с круглыми поперечными сечениями, которые создаются в воде тормозными фотонами 6 МВ со спектром, взятом из работы [6], в изученном интервале размеров пучков и глубин точек интереса отношение K_{col}/K фактически постоянно и равно

$$K_{col}/K = 0,9930 \pm 0,0005. \quad (2)$$

Полученные в работе распределения поглощенной дозы и ионизационной кермы на геометрической оси расходящихся (конусных) пучков с круглыми поперечными сечениями для разных радиусов на поверхности фантома R_0 от 0,1 до 3,0 см показаны на рис. 2 и 3. Кривые для кермы на рис. 2 и 3 отдельно не приводятся, т.к. для рассмотренного спектра они практически совпадают с кривыми для ионизационной кермы.

Представленные результаты наглядно демонстрируют, что для малых полей радиусом $\leq 1,0$ см область, где $\beta \geq 1$, отсутствует. На рис. 2 и 3 показаны результаты для глубин до 5 см, но такая картина наблюдается и для больших глубин. Отметим, что вскоре после точки максимума кривые для глубинных распределений D и K_{col} с увеличением глубины для пучков с $R_0 = 0,1$ и 0,2 см начинают немного сближаться (отношение $\beta = D/K_{col}$ уменьшается). Однако при $R_0 \geq 0,4$ см значение β остается практически постоянным, начиная от глубин, немного превышающих глубину максимальной дозы и далее вплоть до глубины 40 см. Вместе с тем, типичный для конвенциональных полей вид зави-

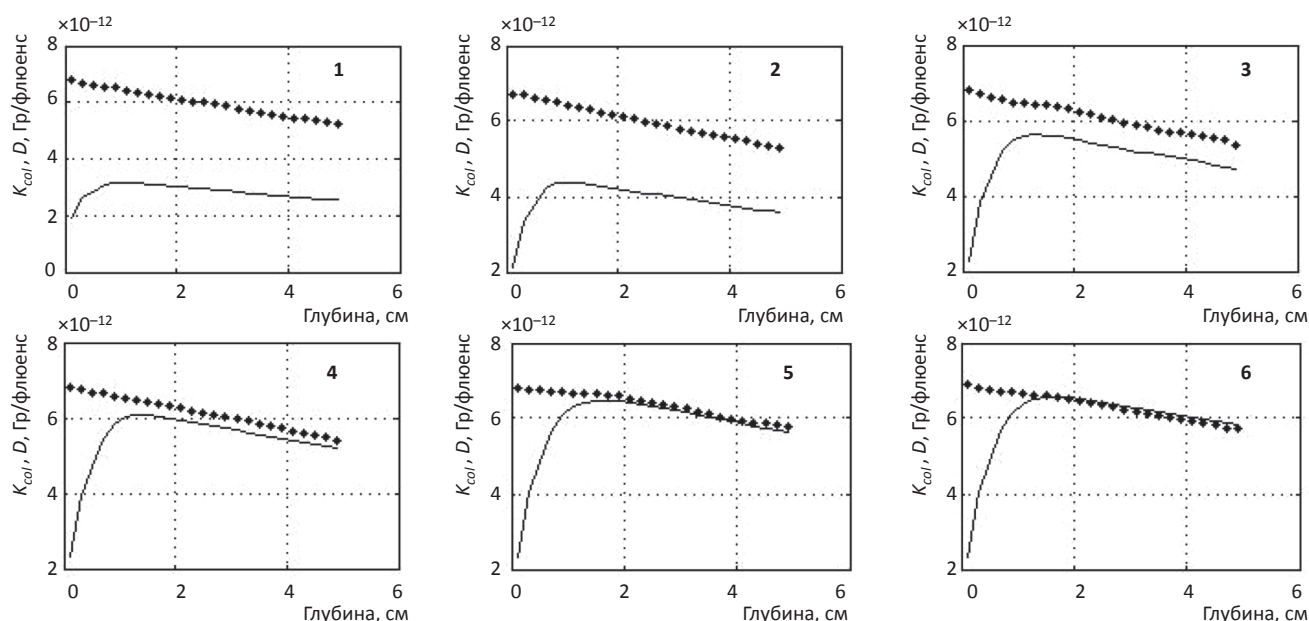


Рис. 2. Глубинные распределения поглощенной дозы (—) и ионизационной кермы (•••), создаваемые в воде конусными расходящимися пучками 6 МВ круглого сечения, при расстоянии от точечного источника до поверхности фантома 100 см для разных значений радиуса сечений на поверхности фантома.
Обозначения: 1 – 0,1 см; 2 – 0,2 см; 3 – 0,4 см; 4 – 0,6 см; 5 – 1,25 см; 6 – 2,0 см

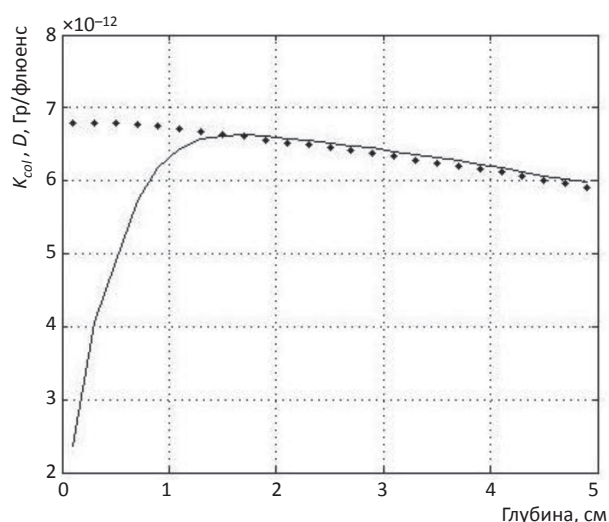


Рис. 3. Глубинные распределения поглощенной дозы (—) и ионизационной кермы (•••), создаваемые в воде конусным расходящимся пучком 6 МВ круглого сечения радиусом 3 см на поверхности фантома, при расстоянии точечный источник – поверхность фантома 100 см

симости отношения D/K_{col} от глубины с постоянным значением $\beta > 1$ после области максимальной дозы фактически наблюдается для пучков 6 МВ при $R_0 \geq 3,0$ см (рис. 3).

Закключение

Таким образом, в работе исследованы особенности соотношения между глубинными распределениями D , K и K_{col} в области малых полей для спектра тормозных фотонов 6 МВ. Оказалось, что в отличие от полей традиционных размеров, в малых полях вплоть до $R_0 \geq 1,0$ см кривые для D , K и K_{col} с увеличением глубины точки интереса не пересекаются, т.е. область, где $\beta \geq 1$, отсутствует. В то же время отношение K_{col}/K для рассмотренного спектра тормозных фотонов в области малых полей сохраняется постоянным.

Полученные в работе результаты представляют определенный интерес для клинической дозиметрии малых полей. Так как в условиях отсутствия электронного равновесия расчет значений кермы, вообще говоря, проще, чем расчет поглощенной дозы, то эти результаты будут также полезны при разработке систем независимого расчета поглощенной дозы для полей малых размеров.

В заключение авторы выражают признательность профессору НИЯУ МИФИ Ромоданову В.А. за помощь в проведении расчетов по коду MCNP4C2.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и СИТМА в рамках научного проекта № 18-52-34008 и программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Для цитирования: Климанов В.А., Галяутдинова Ж.Ж., Колыванова М.А. Соотношение между поглощенной дозой, кермой и ионизационной кермой для полей малых размеров // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64. № 3. С. 74–77.

DOI: 10.12737/article_5cf3e5d39dc746.62423273

The Ratio between Absorbed Dose, Kerma and Ionization Kerma for Small-Size Fields**V.A. Klimanov^{1,2}, J.J. Galjautdinova², M.A. Kolyvanova²**

1. National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia. E-mail: vaklimanov@mail.ru;

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

V.A. Klimanov – Leading Researcher, Dr. Sci. Phys-Math., Prof.; J.J. Galjautdinova – Head of Lab.; M.A. Kolyvanova – Head of Lab.

Abstract

Purpose: Research of the relationships between spatial distributions in water of the main dosimetric values, namely the absorbed dose, kerma and ionization kerma, for small-size fields with a circular cross section created by divergent beams of bremsstrahlung spectrum with a maximum energy of 6 MeV.

Material and methods: Using the Monte-Carlo method with the codes EGSnrc and MCNP4C2, calculations were carried out for these distributions in a water phantom for beam radii on the phantom surface from 0.1 to 3.0 cm and for depths up to 40 cm. The ratio at depths up to 5 cm, where there is a so-called build-up area, is studied in particular detail.

Results: The results of calculations show that the ratio of ionization kerma to kerma for such beams at depths up to 40 cm is practically constant and equal to 0.9930 ± 0.0005 . The ratio of the absorbed dose to the ionization kerma, in contrast to conventional square beams with a cross-sectional area $\geq 20 \text{ cm}^2$, is much less than unity at radii of 1 cm at all the depths considered.

Conclusion: The data obtained show that the relationship between absorbed dose, kerma and ionization kerma for photon fields produced by beams of small cross sections is very different from that for traditional beams. This circumstance should be taken into account when conducting dosimetry of small fields.

Key words: *clinical dosimetry, dose, kerma, ionization kerma, small fields*

Article received: 11.09.2018. Accepted for publication: 18.04.2019

REFERENCES

- Loevinger R. A formalism for calculation of absorbed dose to a medium from photon and electron beams. *Med Phys.* 1981;8:1-12.
- Attix FH. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry.* New York: Wiley. 1986.
- Hannallah D, Zhu TC, Bjarngard DE. Electron disequilibrium in high-energy x-ray beams. *Med Phys.* 1996;23:1867-71.
- Klimanov VA. Radiobiological and dosimetric planning of radiotherapy and radionuclide therapy. Moscow: Izd. NNIU MEPhI. 2011.
- Kumar S, Deshpande DD, Nahum AE. Monte-Carlo-derived insights into dose-kerma-collision kerma inter-relationships for 50 keV–25 MeV photon beams in water, aluminum and copper. *Phys Med Biol.* 2015;60:501-19.
- Sheikh-Bagheria D, Roger DWO. Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code. *Med Phys.* 2002;29(3):391-402.
- Rogers DWO, Kawrakow I, Seuntjens JP, et al. National Research Council of Canada Report No. PIRS-702 (rev C) NRC Usercodes for EGSnrc (Ottawa: NRCC). 2011.
- MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C, Ed. by JF Briesmeister (Los Alamos National Laboratory). 2000.

For citation: Klimanov VA, Galjautdinova JJ, Kolyvanova MA. The Ratio between Absorbed Dose, Kerma and Ionization Kerma for Small-Size Fields. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2019;64(3):74-7. (Russian).

DOI: 10.12737/article_5cf3e5d39dc746.62423273