

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО В ТЕХНОЛОГИИ ФОТОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

*И.В. Щегольков, И.Н. Шейно, В.Ф. Хохлов, А.А. Липенгольц
Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна, Москва*

Рассматривается возможность применения метода Монте-Карло в технологии фотон-захватной терапии для расчета дозовых распределений в тканеэквивалентном фантоме с моделью опухоли, в которой присутствует гадолиний содержащий препарат (типа Магневист™). Результаты расчетов сравниваются с нестохастическими методами расчета переноса излучений и экспериментальными данными.

Ключевые слова: фотон-захватная терапия, рентгеновское излучение, дозиметрия, метод Монте-Карло, MCNP5, EGSnrc

Введение

Высокая избирательность поражения опухолевых тканей является ключевым моментом повышения терапевтической эффективности в современных технологиях лучевой терапии. Одним из таких новых направлений являются бинарные лучевые технологии, когда дополнительное энерговыделение в опухолевой ткани при облучении осуществляется за счет присутствия в ней специальных препаратов, содержащих элементы с высоким сечением взаимодействия излучения с веществом препарата. К таким технологиям относится фотон-захватная терапия опухолей [1], физический принцип которой заключается в увеличении локального энерговыделения, обусловленного электронами фотопоглощения и сопутствующего Оже-каскада при облучении фотонами опухоль, содержащей элементы с высоким атомным номером Z , входящих в состав таких известных препаратов, как йод-содержащие: йод-дезоксисуридин, IUdR (^{53}I); гадолиний-содержащие: магневист, дипентаст (^{64}Gd), содержащие платину: цисплатин, бла-

столеи (^{78}Pt); перспективные препараты, содержащие висмут (^{83}Bi) и другие. Образующееся при таком взаимодействии вторичное излучение распределяется локально и практически следует пространственному распределению препарата. В отличие от других методов лучевой терапии, требующих специальных методов фокусировки пучка, эффект бинарных лучевых технологий выполняется, прежде всего, за счет накопления специальных препаратов в опухоли.

Терапевтический эффект бинарных лучевых технологий в значительной степени зависит от точности дозиметрического планирования облучения, учитывающего как изменение концентрации препарата в биологической ткани, так и соответствующее дозовое распределение в опухоли и в здоровых тканях при облучении. Для этой цели необходимо использовать современные методы расчетов переноса излучения, позволяющие с высокой точностью моделирования процесса формирования дозы в биологической ткани.

Материал и методы

Для проведения сравнительной количественной оценки физического эффекта локального возрастания дозы в биологической ткани при наличии в ней гадолиний-содержащего препарата под действием рентгеновского излучения, были произведены расчетные исследования дозовых распределений в фантоме.

Фантом (рис. 1), представляет собой цилиндр диаметром D_T и высотой H_T из тканеэквивалентного вещества – мягкой биологической ткани четырехкомпонентного состава по ICRU Report 44 (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab2.html>). Внутри фантома имеется цилиндрическая область из того же материала с диаметром D_0 и высотой H_0 . Она расположена на различных расстояниях Z_0 от торцевой поверхности фантома и имитирует опухоль, содержащую 10 мг гадолиния на грамм ткани.

Для расчета распределения дозы по оси фантома были использованы известные программы MCNP5 и EGSnrc [2] метода Монте-Карло и программа RADUGA [3] метода дискретных ординат для решения переноса излучений.

Моделировалось два вида источников излучения фотонов: плоский мононаправленный (рис. 1а) с радиусом R_s и точечный изотропный (диафрагмированный) источник (рис. 1б), расположенный на расстоянии Z_s от поверхности фантома.

Энергетическое распределение потока фотонов соответствовало модельному представлению спектра острофокусной рентгеновской трубки прострельного типа [2] при анодном напряжении 150 кВ и токе 120 мА, использованной в установке РАП-150М [4].

Для сравнения результатов расчета с экспериментальными данными были проведены измерения поглощенной дозы в водном фантоме при облучении на рентгеновской установке РАП-150М. Водный фантом представлял собой полиэтиленовый цилиндрический контейнер диаметром 13 см и высотой 6 см, наполненный водой на 4 см. В него была помещена конструкция из вставленных друг в друга поликарбонатных контейнеров с диаметром 15 мм и высотой 5 мм, наполненных дистиллированной водой. Два контейнера в центре сборки были наполнены водным раствором магневиста™ с содержанием гадолиния 13 мг/мл (рис. 2).

Определение поглощенной дозы производилось с помощью дозиметрических пленок Gafchromic EBT производства ISP Corporation (США), помещенных на дно каждого поликарбонатного контейнера.

Для проведения расчетов по программе MCNP5 была построена полномасштабная расчетная модель рентгеновской трубки и фантома. Модель трубки представляла собой цилиндр с высотой 200 мм и с диаметром 15 мм, состоящий из двойного алюминиевого корпуса

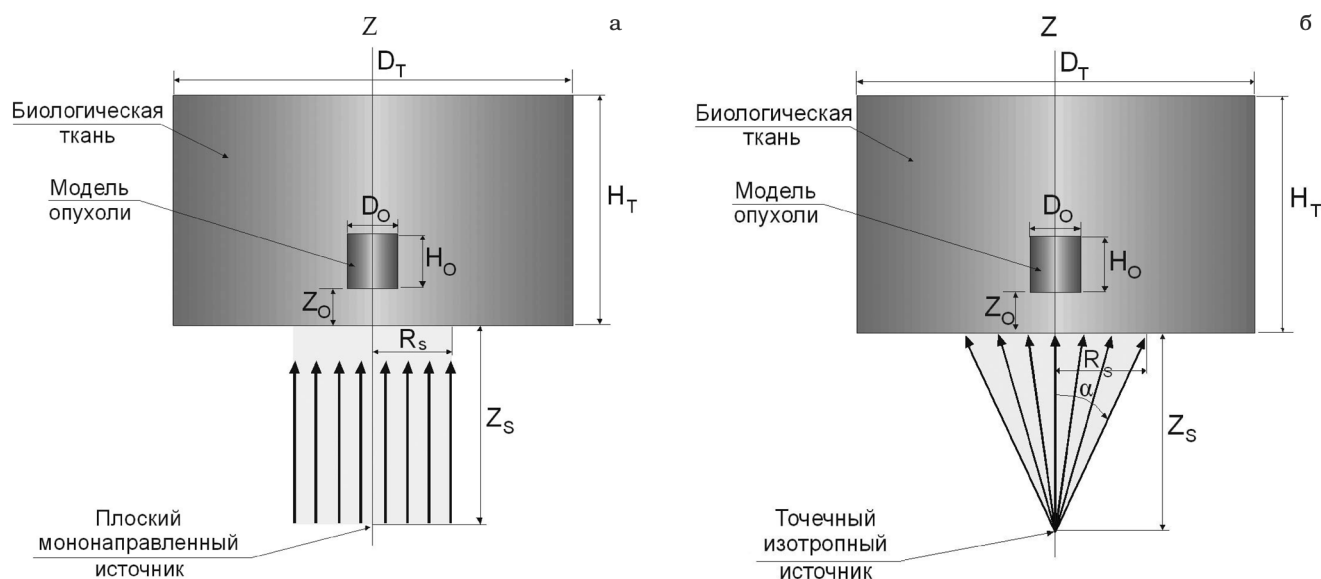


Рис. 1. Расчетные модели с плоским мононаправленным (а) и точечным изотропным (б) источниками фотонов (параметры модели $Z_0=0, 1$ и 2 см, $D_0=1$ см, $H_0=1$ см, $H_T=6$ см, $D_T=10$ см, $R_s=1,73$ см, $Z_s=3$ см, $\alpha=30^\circ$)

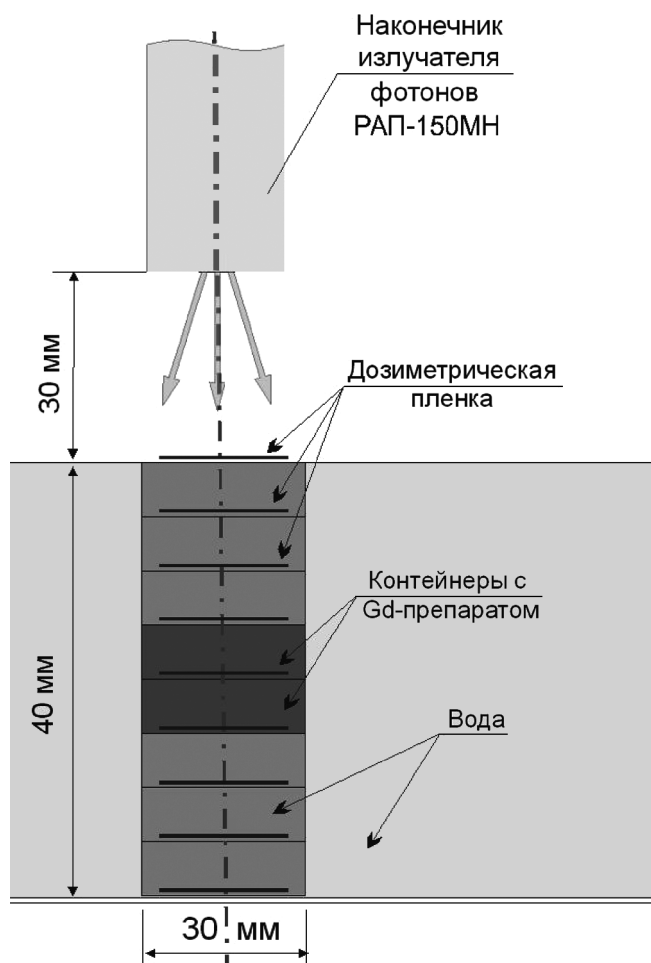


Рис. 2. Схема эксперимента

с водным охлаждением между боковыми стенками. Толщина слоя охлаждающей жидкости 1 мм. Вольфрамовый анод имел толщину 14 мкм, выходное окно из алюминия толщиной 2 мм.

Результаты и обсуждение

По первой модели (рис. 1) с помощью программ EGSnrc и MCNP5 были рассчитаны распределения мощностей поглощенных доз фотонов по оси фантома при добавлении в модель опухоли гадолиний-содержащего препарата и без добавления препарата. Расчеты велись для трех случаев различного местоположения опухоли: поверхностная опухоль с $Z_0=0$ см (расстояние от опухоли до поверхности) и глубинные опухоли с $Z_0=1$ и 2 см.

Результаты расчетов мощностей поглощенных доз вдоль оси фантома для двух видов источников, полученные с помощью программ MCNP5, EGSnrc и RADUGA, приведены на рис. 3 и 4.

Из результатов расчетов мощностей поглощенных доз вдоль тканеэквивалентного фантома без добавления препарата в модель опухоли получено, что программы MCNP5 и EGSnrc имеют расхождение между собой до 2 %. Расчеты программы RADUGA для плоского мононаправленного источника лежат стабильно ниже на 10 % и для точечного изо-

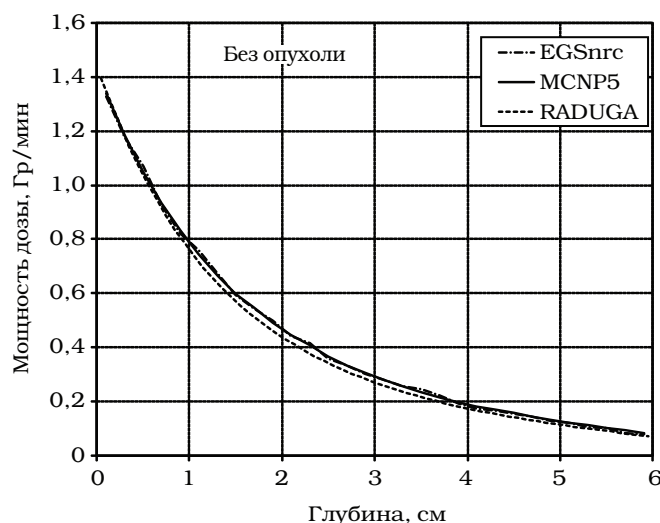
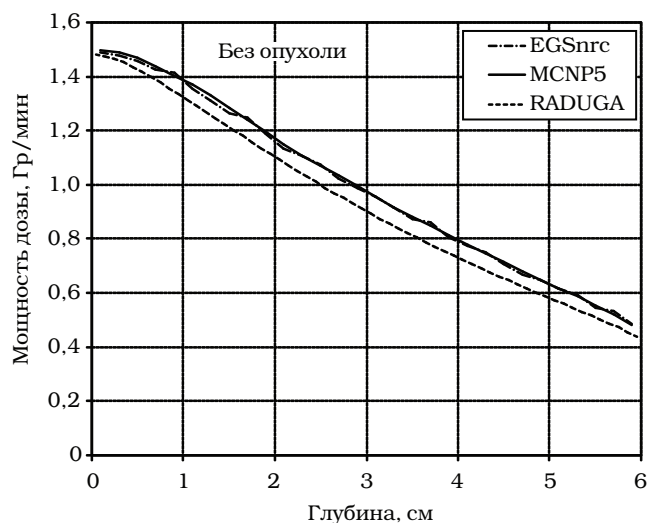


Рис. 3. Распределения мощности поглощенных доз фотонов по оси тканеэквивалентного фантома с использованием: а) — плоского мононаправленного источника (рис. 1а) и б) — точечного изотропного источника (рис. 1б)

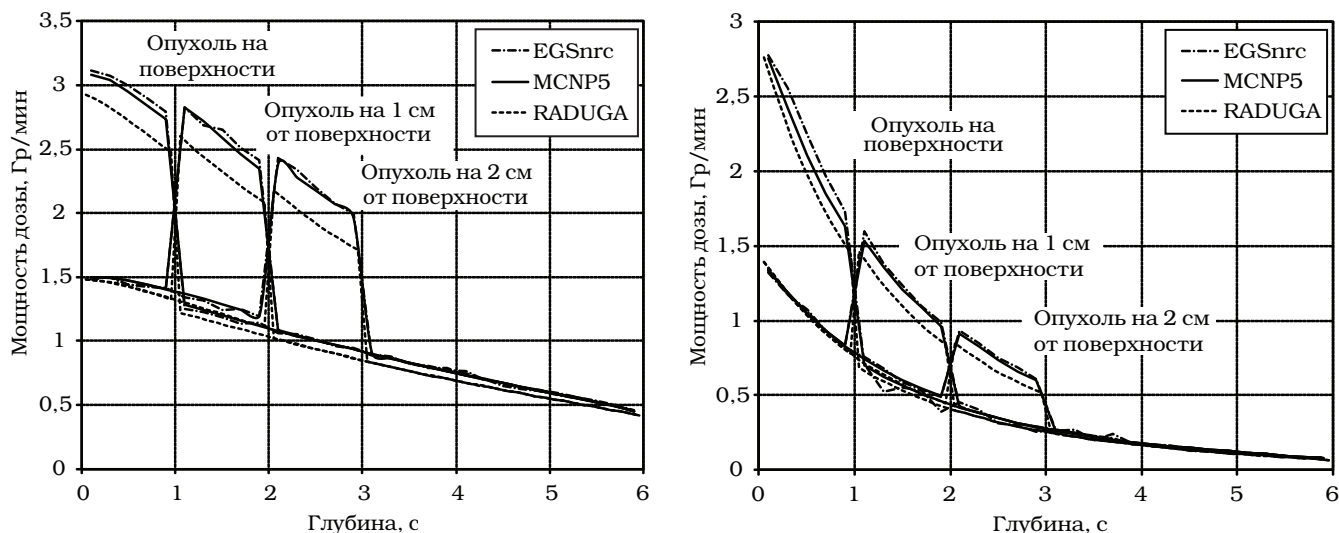


Рис. 4. Распределения мощности поглощенных доз фотонов по оси тканезквивалентного фантома с введением в модель опухоли препарата, содержащего 1 % гадолиния, для различных ее местоположений: $Z_0=0, 1$ и 2 см. а) – плоский мононаправленный источник (рис. 1а); б) – точечный изотропный источник (рис. 1б)

тропного источника различаются не более чем на 4 % с результатами программ MCNP5 и EGSnrc.

В случае присутствия препарата в модели опухоли внутри фантома наблюдалось локальное возрастание дозы в 2 раза для параллельного пучка фотонов. Для расходящегося пучка локальное возрастание дозы до двух раз характерно только на поверхностных опухолях, в глубинных опухолях доза возрастает в меньшее число раз. Расхождение между результатами программ MCNP5 и EGSnrc составило 2–3 %.

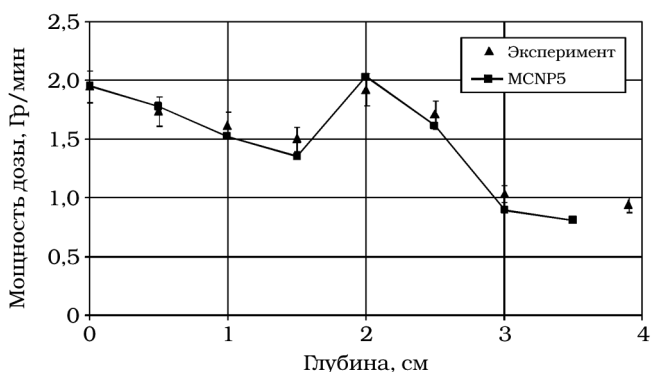


Рис. 5. Сравнение распределений мощности поглощенных доз фотонов в водном фантоме по глубине при добавлении гадолиний-содержащего препарата

Сравнение результатов расчетов по программам EGSnrc, MCNP5 и RADUGA показало, что программа RADUGA несколько занижает результаты (до 10 %) в сравнении с программами, использующими прямой метод расчета поглощенной дозы – метод Монте-Карло.

Результаты измерений мощности поглощенной дозы в водном фантоме, в отдельных секциях которого находился раствор гадолиний-содержащего препарата (схема эксперимента на рис. 2) согласуются с расчетными данными, полученными по программе MCNP5 (рис. 5). Доза рассчитывалась как усредненная по объему выделенного тонкого цилиндра. Максимальное расхождение между результатами расчетов и экспериментальными данными не превышает 11 %.

Форма кривых распределений мощностей поглощенных доз фотонов по глубине фантома в значительной степени подобна тем, которые приведены на рис. 4б для точечного изотропного источника.

Выводы

В результате проведенных расчетных (тремя независимыми методами) и экспериментальных исследований подтверждена и количественно оценена величина физического эффекта локального возрастания по-

глощенной дозы в биологической ткани при наличии в ней элементов с большим атомным номером Z . Это соответствует прогнозируемому результату, что для данной концентрации гадолиний содержащего препарата, введенного в опухоль, и при реализации спектра фотонов в определенном диапазоне энергий, возможно возрастание поглощенной дозы в опухоли до 2 раз.

Показана возможность и преимущество использования метода Монте-Карло для расчета дозовых распределений в технологии фотонно-захватной терапии.

Работы по созданию технологии фотонно-захватной терапии начаты в последние годы. Интерес к этому новому виду лучевой терапии обусловлен необходимостью разработки новых и эффективных методов лучевой терапии со сравнительно низкой стоимостью облучательной аппаратуры, ее возможностью массового применения в медицинских учреждениях.

Список литературы

1. Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Шейно И.Н. и соавт. Способ фотон-захватной терапии опухолей. Патент № 2270045, 2006.
2. Shchegolkov I.V., Sheino I.N. et al. Semiempirical model of X-ray tube facility, in nuclear physics methods and accelerators in biology and medicine, // AIP Conference Proc., 2009, **1204**, New York, P. 188–191.
3. Nikolaeva O.V., Germogenova T.A., Bass L.P., Kuznetsov V.S. The discrete ordinate methods development to the transport equation solving. The 3D code Raduga-5.1 and multiprocessors computers, // Proc. 19th Internat. Conf. on Transport Theory, (19th ICTT), Budapest, 2005, P. 115.
4. Липенгольц А.А., Хохлов В.Ф., Шейно И.Н. и соавт. Облучательное устройство для проведения базовых радиобиологических исследований. // Научная сессия МИФИ-2008, **3**. – М.: МИФИ, 2008, С. 41–42.

SIMULATION OF DOSE RATE DISTRIBUTION BY MONTE CARLO METHOD IN CASE OF PHOTON-CAPTURE THERAPY

*I.V. Shchegolkov, I.N. Sheino, V.F. Khokhlov, A.A. Lipengolts
Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia*

This paper studies the possibility of using the Monte Carlo method in the photon-capture therapy to calculate dose distributions in tissue phantom with a tumor model, which had a gadolinium containing drug (such as Magnevist™). The obtained results are compared with nonstochastic methods for radiation transfer and the experimental data.

Key words: photon capture therapy, X-rays, dosimetry, Monte-Carlo method, MCNP5, EGSnrc

E-mail: igor-555@mail.ru