

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ В ДОЗИМЕТРИЧЕСКОМ ПЛАНИРОВАНИИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

А.В. Далечина¹, Г.Е. Горлачев², А.И. Ксенофонтов¹, А.В. Кистенев²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

² Научно-исследовательский институт нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, Москва

Изучение проблемы повышения эффективности моделирования при расчетах, основанных на методе Монте-Карло, является одной из важнейших задач в лучевой терапии. В представленной работе оценивалась эффективность моделирования источника излучения линейного ускорителя электронов методом Монте-Карло. Проведено сравнение прямого моделирования транспорта частиц и симуляция из модели в комбинации с методами уменьшения дисперсии, а именно с техникой расщепления. По полученным результатам установлено, что использование разработанной модели источника позволяет значительно увеличить скорость расчета.

Ключевые слова: дозиметрическое планирование, метод Монте-Карло, методы уменьшения дисперсии, модель источника излучения, пучки фотонов

Введение

Метод Монте-Карло – алгоритм, позволяющий провести полномасштабное моделирование процессов взаимодействия излучения с веществом, происходящих как в ускорителе, так и в теле пациента, гарантируя тем самым точность вычислений, которая не доступна другим методам [1]. Так как основа этого метода – вероятностный подход к моделированию транспорта частиц, получаемый результат связан с дисперсией. Уменьшение дисперсии – одна из основных задач, которую необходимо решать при вычислении методом Монте-Карло. Изменение дисперсии может влиять на время расчета, что существенно для использования метода Монте-Карло в клинической практике. Поэтому методы уменьшения дисперсии являются важнейшими элементами любой программы дозиметрического планирования, основанной на методе Монте-Карло.

Материал и методы

Показателем эффективности применения того или иного метода уменьшения дисперсии является оценка качества [2]:

$$\varepsilon = 1/(T \cdot \sigma^2), \quad (1)$$

где σ^2 – дисперсия, T – полная продолжительность расчета для количества историй N . Так как дисперсия и продолжительность расчета зависят от N , то при хорошей сходимости метода эта величина становится постоянной и может быть использована для оценки общего компьютерного времени, требующегося для достижения заданной статистической точности. Уравнение (1) позволяет сделать количественную оценку увеличения или уменьшения эффективности, получаемую при использовании того или иного метода снижения дисперсии.

Методы уменьшения дисперсии можно разделить на несколько видов. Одним из них

является фотонное усиление (англ. photon forcing). В схеме фотонного усиления родительский фотон вынужден взаимодействовать с частицами в заданной геометрической области, при этом веса полученных частиц корректируются для поддержания объективного результата [2].

Уменьшение энергетического диапазона и увеличение энергии, при которой происходит завершение электронных историй – методы, улучшающие эффективность путем снижения времени каждой истории без значительного изменения в результате. В методе уменьшения энергетического диапазона история электрона прерывается всякий раз, когда диапазон настолько мал, что частица не может покинуть данную область или достигнуть другой области интереса [3].

Методы расщепления тормозного излучения и русская рулетка вторичных частиц особенно полезны при моделировании терапевтической головки линейного ускорителя. В статье [4] описана техника расщепления, позволяющая увеличивать эффективность моделирования в 20 раз. Метод расщепления применяется там, где необходимо изменить статистику в фазовых областях, которые представляют интерес с точки зрения решения конкретной задачи. Частица, попадая в “интересную” область, расщепляется на n идентичных по фазовому состоянию частиц. Вес каждой дочерней частицы в n раз меньше веса материнской частицы. Суммарный вес пучка образованных частиц сохраняется, далее история каждой частицы продолжается независимо. Метод русской рулетки сокращает статистику частиц в “неинтересных” областях. Примером может служить использование метода для вторичных электронов, появившимся в результате фотонных взаимодействий с элементами конструкции головки ускорителя. Частица, попавшая в “неинтересную” область, с вероятностью p выживает, с вероятностью $1-p$ погибает. Вес выжившей частицы увеличивается в $1/p$ раз [5].

В публикациях [4] представлена новая техника уменьшения дисперсии, названная направленное расщепление тормозного излучения, которая значительно улучшила эффективность моделирования фотонного пучка, применительно к программе BEAM. Авторами было проведено сравнение с другими схемами расщепления (равномерное расщепление, выборочное расщепление). Была изучена разница в эффективности в зависимости от параметра расщепления для различных размеров зон сбо-

ра статистики. В результате работы сделаны выводы о том, что оптимальный параметр расщепления зависит от размера плоскости сбора статистики и возрастает с уменьшением размеров, уменьшается с возрастанием энергии фотонного пучка и размера поля.

Увеличение эффективности при моделировании источника излучения ускорителя CyberKnife

Целью данной работы являлся анализ проблемы точности и скорости генерирования частиц при моделировании транспорта излучения внутри линейного ускорителя CyberKnife (Accuray Inc.) с энергией электронного пучка 6 МэВ [6]. Радиохирургическая система реализации облучения CyberKnife® состоит из малогабаритного линейного ускорителя электронов с максимальной энергией тормозного излучения 6 МэВ, установленного на серийном промышленном роботизированном манипуляторе с 6 степенями свободы. Установка CyberKnife® характеризуется продуманной системой навигации, высокой точностью подведения дозы, возможностью формирования конформных дозовых распределений с высоким градиентом дозы на границе мишени, что особенно важно вблизи критических структур. Лучевое воздействие осуществляется круглыми полями различного диаметра, измеренного на расстоянии 800 мм от источника излучения. Для формирования полей используется 12 вторичных коллиматоров соответствующего диаметра или коллиматор с переменной апертурой Iris. В представленной работе исследовался ускоритель CyberKnife с мощностью дозы 800 МЕ/мин (мониторных единиц/мин) с фиксированными размерами вторичных коллиматоров, установленный в Институте нейрохирургии им. академика Н.Н. Бурденко.

Для моделирования фотонного пучка электронного ускорителя CyberKnife применялся код собственной разработки. Схематическое изображение головки ускорителя представлено на рис. 1.

Геометрия и материалы, использованные в моделировании, были взяты из спецификации производителя. Программное обеспечение воспроизводит физику EGS4 [7]. При этом из EGS4 использованы только алгоритмы расчетов взаимодействий излучения и сечения для них. Для описания процедур переноса частиц

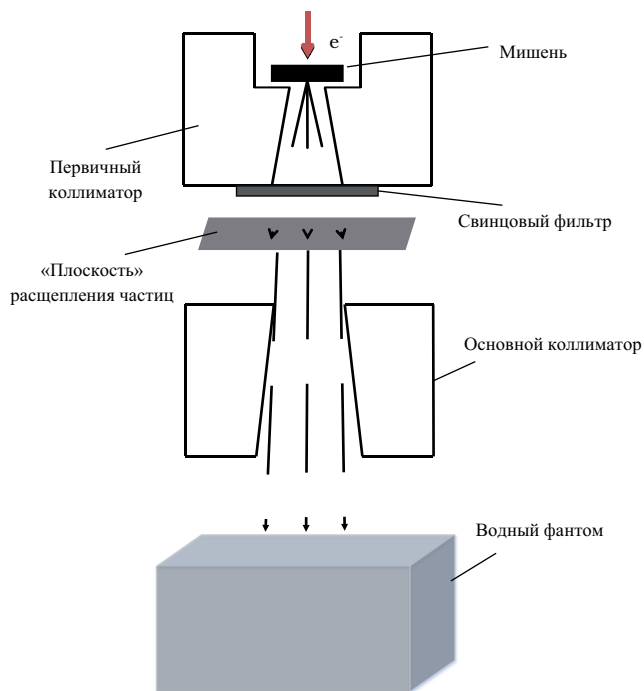


Рис. 1. Схематическое изображение головки ускорителя CyberKnife

применялся язык программирования C++. Для проведения моделирования головки ускорителя CyberKnife программное обеспечение дополнено геометрическими модулями: CYLINDER (мишень), CYLINDER (алюминиевая заглушка), RING (первичный коллиматор), CYLINDER (алюминиевый фильтр), CONICALHOLE (коническая часть первичного коллиматора), CYLINDER (свинцовый фильтр), RING (первая цилиндрическая труба), CONICALHOLE (коллиматор), RING (вторая цилиндрическая труба), PLANEFILTER (плоскость фазового пространства), CONICALHOLE (вторичный коллиматор), SLAB (водный фантом). Условия моделирования задаются двумя XML файлами. Один описывает геометрию аппарата, другой – источник излучения и параметры симуляции. Для визуализации и контроля приложение выводит сцену моделирования в 3D виде в формате VRML [20]. Схема расположения различных компонентов головки ускорителя CyberKnife показана на рис. 2.

В результате статистического анализа получены распределения частиц по энергии, положению в плоскости регистрации (плоскости фазового пространства), угловому распределению. На основании кумулятивных гистограмм создана модель источника излучения, обес-

печивающая генерацию неограниченного числа частиц для последующего дозиметрического планирования.

Использование в качестве модели источника файла фазового пространства с накопленными гистограммами распределений позволяет значительно уменьшить время вычислений в последующем моделировании транспорта частиц. В качестве метода уменьшения дисперсии применялась техника расщепления, нацеленная на увеличение статистики с помощью расщепления частицы на n идентичных по фазовому состоянию частиц. Для оценки эффективности и ускорения расчета при использовании модели источника в работе проведено сравнение прямого моделирования транспорта частиц (от рождения в физическом источнике до поглощения в водном фантоме) и симуляция из модели (от генерации частиц в модельном источнике до поглощения в водном фантоме) с учетом влияния параметра расщепления частиц на описанные выше показатели. Схемы расчетов представлены на рис. 3.

Расчеты были проведены от 10^6 до 10^9 числа историй. Вычисления были выполнены на компьютере Intel (R) Core™ – i7-2600K с применением алгоритма параллельных вычислений на 8 процессорах.

При моделировании из физического и модельного источников была рассчитана эффективность при различных значениях параметра расщепления частиц. Результат представлен на рис. 4.

Увеличение эффективности с помощью техники расщепления зависит от выбора опти-

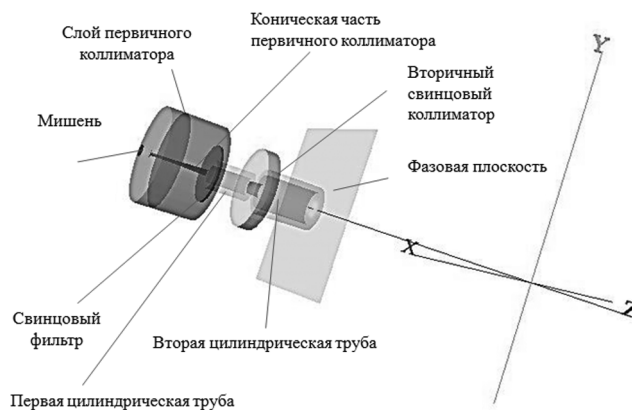


Рис. 2. Схема расположения различных компонентов в условиях моделирования головки ускорителя CyberKnife

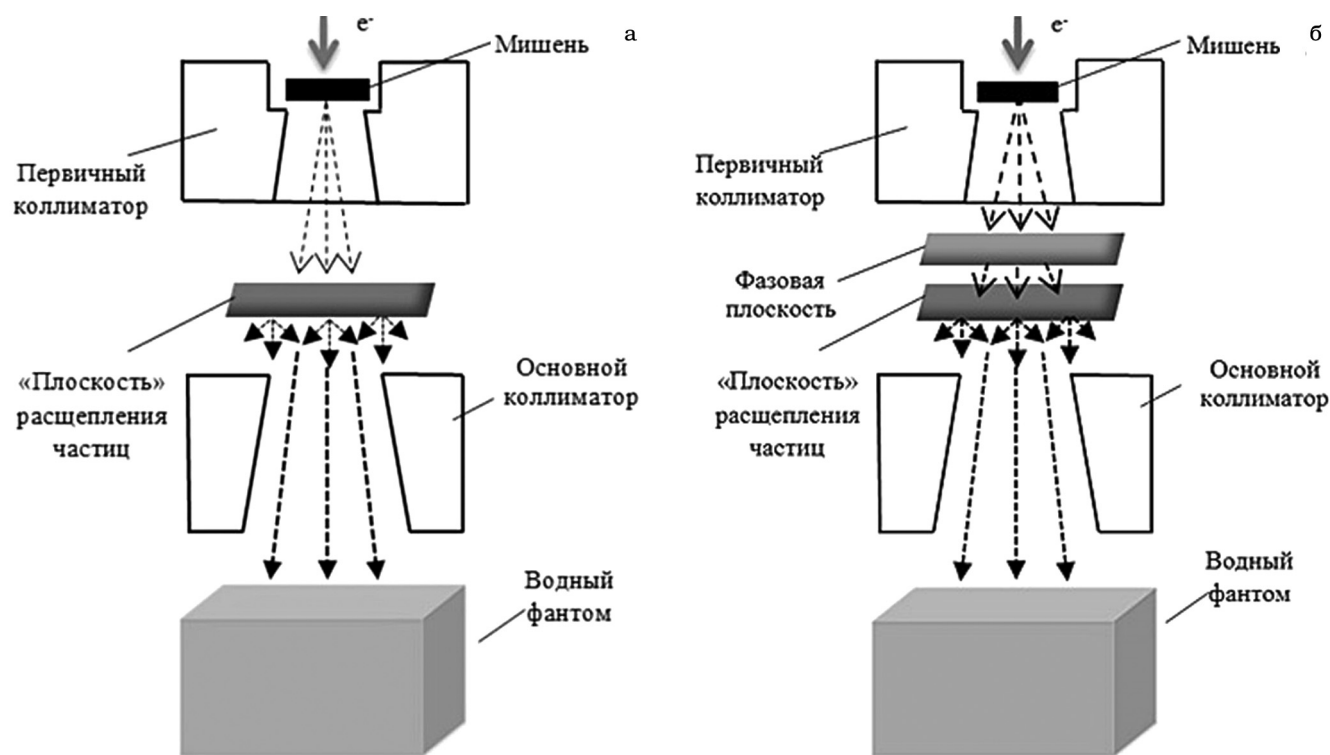


Рис. 3. Условные схемы расчетов при моделировании потоков электронного ускорителя CyberKnife (Accura Inc.): а – прямой расчет, б – расчет с использованием модели источника

мального параметра расщепления. Для прямого расчета эффективность с возрастанием параметра расщепления повышалась почти в 75 раз. Использование расщепления в варианте модели источника влияло на скорость и эффективность расчета несущественно, так как генерация частиц из источника происходила за

время, которое намного меньше прохождения частицы в среде и сопоставимо со временем расщепления. Однако при значительном увеличении параметра расщепления эффективность начинала снижаться. При анализе полученных результатов было определено, что оптимальным значением параметра расщепления является 100. Но даже при идеальной стратегии выбора данного параметра время, затрачиваемое на вычисления, гораздо меньше при модельном представлении источника, реализовать вычисления можно в 100 раз быстрее.

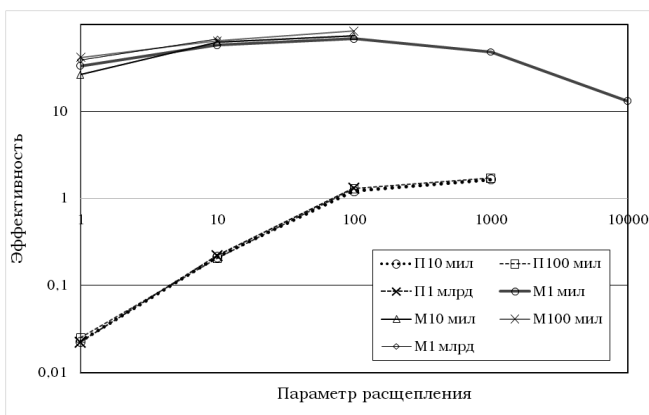


Рис. 4. Эффективность (ϵ) вычислений (П – прямой расчет, М – расчет из модели)

Заключение

Использование методов уменьшения дисперсии является важнейшим условием применения метода Монте-Карло в клинических расчетах. Несмотря на современное развитие компьютерной техники, без них время вычислений было бы достаточно велико в большинстве ситуаций. Однако некорректное использование техники уменьшения дисперсии может приводить к увеличению времени расчета и снижению эффективности. Успешное применение

этих методов делает возможным увеличение эффективности в сотни раз.

В работе было продемонстрировано увеличение эффективности с учетом выбора оптимального параметра для техники расщепления. Также одним из способов значительного ускорения расчетов является создание обобщенной модели источника на основе гистограмм распределений. Модельное представление обеспечивает возрастание эффективности в десятки раз и позволяет выиграть в скорости рутинных расчетов.

В работе была исследован только один метод уменьшения дисперсии, в дальнейшем планируется провести более комплексное сравнение методик уменьшения дисперсии и модельного представления источника излучения.

Список литературы

1. Климанов В.А., Крылова Т.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Часть 1. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Дистанционная лучевая терапия пучками тормозного и гамма-излучения. Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007.
2. Chetty I.J. et al. Report of the AAPM Task Group No. 105: Issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning. // *Med. Phys.*, 2007, **34**, No. 12, P. 4818–4853.
3. Kawrakow I. VMC++ , electron and photon Monte Carlo calculations optimized for radiation treatment planning. // In *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications*. Ed. by A. Kling, F. Barao, M. Nakagawa, L. Tavora, P. Vaz. Proc. of the Monte Carlo 2000, Meeting Lisbon, 2001, P. 229–236.
4. Kawrakow I., Rogers D.W.O., Walters B.R.B. Large efficiency improvements in BEAMnrc using directional bremsstrahlung splitting. // *Med. Phys.*, 2004, **31**, No. 10, P. 2883–2898.
5. Панин М.П. Моделирование переноса излучения. Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008.
6. Francescon P., Cora S., Cavedon C. Total scatter factors of small beams: A multidetector and Monte Carlo study. // *Med. Phys.*, 2008, **35**, No. 2, P. 504–513.
7. Siebers J. V., Keall P. J., Libby B. et al. Comparison of EGS4 and MCNP4b Monte Carlo codes for generation of photon phase space distributions for a Varian 2100C. // *Phys. Med. Biol.*, 1999, **44**, P. 3009–3026.

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE SIMULATION OF THE RADIATION SOURCE OF THE ELECTRON ACCELERATOR IN DOSIMETRIC MONTE CARLO PLANNING

A.V. Dalechina¹, G.E. Gorchachev², A.I. Ksenofontov¹, A.V. Kistenev²

¹ National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

² N.N. Burdenko Neurosurgery Research Institute, Moscow, Russia

The study of the problem of increasing the efficiency of simulation in the calculations based on the Monte Carlo method is one of the major problems in radiation therapy. In the present study we evaluated the efficiency of Monte Carlo simulation of the virtual model of the linear accelerator treatment head. Results of source modelling were verified in comparison with full-scale simulation without model in combination with variance reduction techniques, namely splitting. It was found that the use of the virtual model source could significantly increase the speed of calculation.

Key words: treatment planning, Monte Carlo method, variance reduction techniques, radiation source model, photon beams

E-mail: adalechina@nsi.ru