

Е.М. Мороз, Е.А. Ванина

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ GEANT4 И FLUKA ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ

В статье представлены результаты компьютерных экспериментов моделирования распределений энергии частиц в биологических средах с использованием программных пакетов Geant4 и Fluka. Продемонстрированы возможности этих пакетов для расчетов распределений поглощенной дозы с учетом атомарного состава мишени и вида частиц.

The paper comprises the computer experiments results of simulation of particle energy distribution in biological environment by using of software packages Geant4 and Fluka. The possibilities of these packages for calculation of the absorbed dose distribution with the atomic composition of the target and the type of particles are shown here.

Введение

Современное развитие исследований в сфере взаимодействия излучения с веществом характеризуется широкой многоплановостью и привлечением практически всех разделов физики для интерпретации получаемых результатов [1, 2]. Возрастающая интенсивность деятельности в этой области объясняется прежде всего высокой практической потребностью полученных данных для создания новых информационных, промышленных и медицинских технологий.

Развитие ускорительной техники привело к использованию достижений ядерной физики в медицинских целях. В качестве примера можно привести лучевую терапию – один из наиболее эффективных методов лечения злокачественных опухолей, состоящий в их облучении пучком высокоэнергетических заряженных частиц.

Одним из недостатков использования пучков электронов и гамма-лучей является поражение не только злокачественных, но и здоровых тканей. Уменьшить побочные эффекты позволяет применение пучков адронов (протонов, а также ионов углерода C^{12}). Лечебный эффект в данном случае основан на свойстве заряженных частиц испытывать резкое торможение в конце своего пробега и передавать большую часть энергии поглощающему веществу. Это свойство отражается на графике зависимости потери энергии частицы от глубины проникновения в вещество (кривая Брэгга) в виде выраженного пика незадолго до остановки частицы. Этот пик принято называть пиком Брэгга [3]. Данное явление позволяет локализовать воздействие пучка, ограничив его, главным образом, областью опухоли.

Вместе с тем эффективное лечение требует тщательной предварительной подготовки. Одним из условий такой подготовки является моделирование протекающих процессов в биологических тканях. При этом важен учет физических свойств, химического состава ткани, реальной геометрии облучаемого органа. Источником необходимых данных могут быть предварительные диагностические исследования, а также данные томографического обследования пациента.

Для решения этой задачи предлагается воспользоваться инструментами, которые применяются в ядерной физике. Стандартным средством моделирования здесь являются методы Монте-Карло. Они используются в целом ряде пакетов, предназначенных для моделирования взаимодействия с веществом различных частиц. Широкое применение нашли программные пакеты Fluka и Geant4 [4, 5]. Оба используются для моделирования процессов распространения заряженных частиц и жесткого электромагнитного излучения в веществе и основаны на полуэмпирических моделях ядерной физики.

Пакет Geant4 написан на языке программирования C++ с использованием объектно-ориентированного программирования. Написание пользовательского приложения в этом случае представляет собой последовательный вызов необходимых методов классов с различными параметрами.

Пакет Fluka представляет собой набор подпрограмм, написанных на языке программирования Fortran77. Написание пользовательского приложения в этой программе представляет собой заполнение специальной таблицы, содержащей параметры вычислительного эксперимента.

Программные пакеты Geant4 и Fluka позволяют учесть различные процессы, геометрию моделируемой системы, характеристики частиц, участвующие во взаимодействиях. Вместе с тем время моделирования существенно зависит от параметров эксперимента и может быть достаточно большим. Это значит, что актуальным в данном случае является применение технологий высокопроизводительных параллельных вычислений.

В данной работе получена кривая Брэгга для пучков протонов и однократно ионизированных ионов углерода в биологической ткани при нормальных условиях. В качестве биологической ткани рассматривалась среда плотностью $1,03 \text{ г/см}^3$, эквивалентная по своему атомарному составу реальной биоткани человека [6].

Доля различных элементов в теле человека

Элемент	Атомарное содержание в биоткани, %
^1H	61,7
^{12}C	8,3
^{16}O	26,2
^{14}N	1,7

Получены зависимости длины пробега от энергии и вида частиц, зависимости высоты пика Брэгга от энергии и вида частиц. Построена модифицированная кривая Брэгга для протонов.

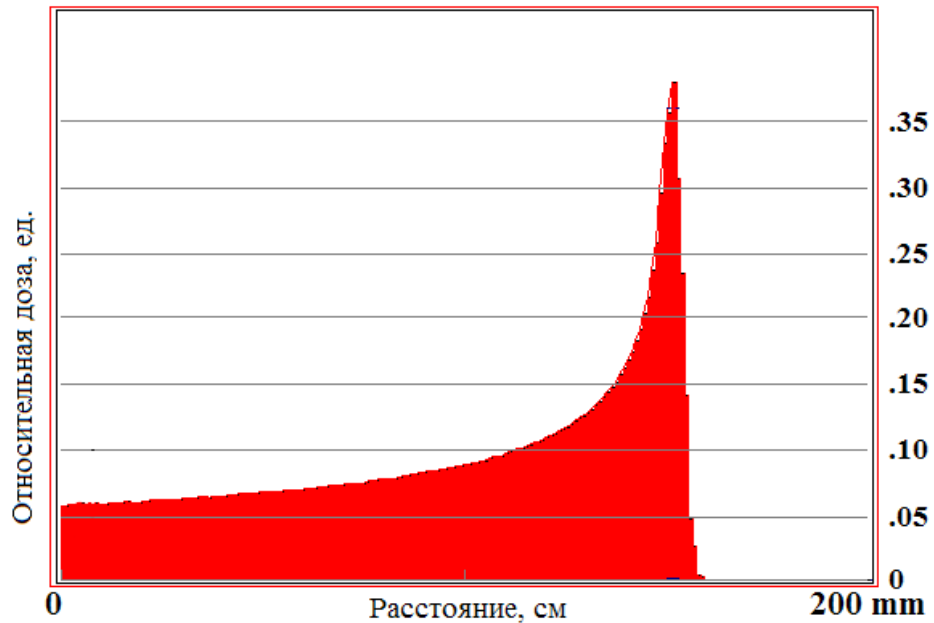


Рис. 1. Зависимость поглощенной дозы от глубины проникновения протонов в биоткань (энергия первичных частиц – 150 МэВ).

Модифицированная кривая Брэгга

Моделирование выполнялось для пучка ионов углерода C^{12+} . На рис. 1 и 2 представлены полученные кривые Брэгга.

На графиках показан хорошо локализованный максимум, соответствующий пику Брэгга. Для применения пучка ионов углерода в лучевой терапии необходимо учитывать, что опухоль имеет протяженную структуру, следовательно, необходимо выполнить ее «сканирование», т. е. облучить, изменяя энергию с достаточно малым шагом. При изменении энергии меняется и глубина локализации пика Брэгга.

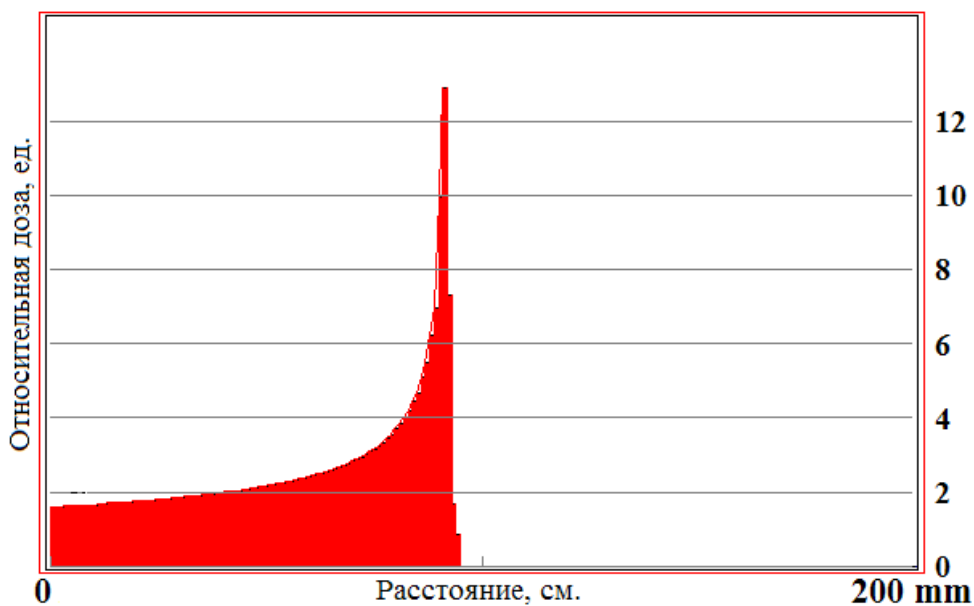


Рис. 2. Зависимость поглощенной дозы от глубины проникновения ионов углерода C^{12+} в биоткань (энергия первичных частиц – 2,5 ГэВ).

График суммарной дозы, которую получают клетки ткани при сканировании, называется модифицированной кривой Брэгга [7]. На рис. 3 представлены кривые Брэгга для протонов в

диапазоне энергий от 100 до 110 МэВ, с шагом по энергии 1 МэВ, а также модифицированная кривая Брэгга.

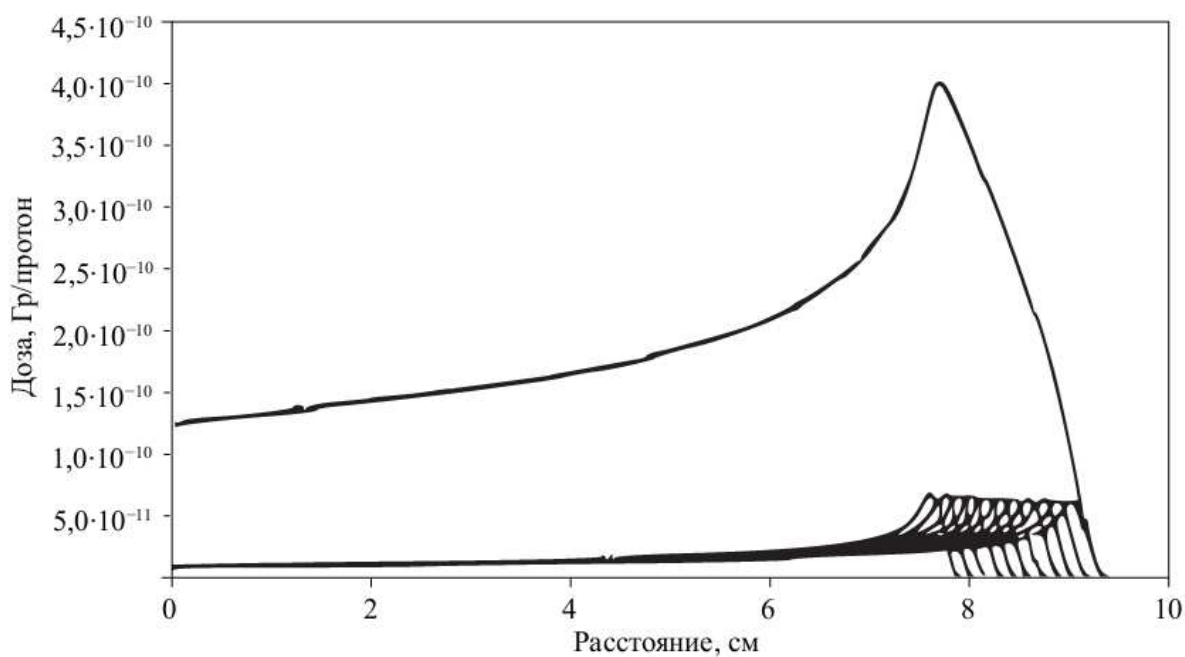


Рис. 3. Модифицированная кривая Брэгга для протонов (диапазон энергий – 100–110 МэВ).

На рис. 3 показано, что суммарная доза имеет явно выраженный максимум. Оптимальным является случай, когда пик Брэгга представляет собой «плато» с размером, равным размеру опухоли. Это необходимо для того, чтобы все клетки опухоли получили одинаковую дозу облучения. Для получения «плато» следует просуммировать дозы от отдельных пиков Брэгга с разными весами. Веса определяются числом частиц при облучении. Таким образом, возникает задача оптимизации, состоящая в расчете этих весов.

На рис. 4 представлены графики «взвешенных» пиков Брэгга и суммарной дозы.

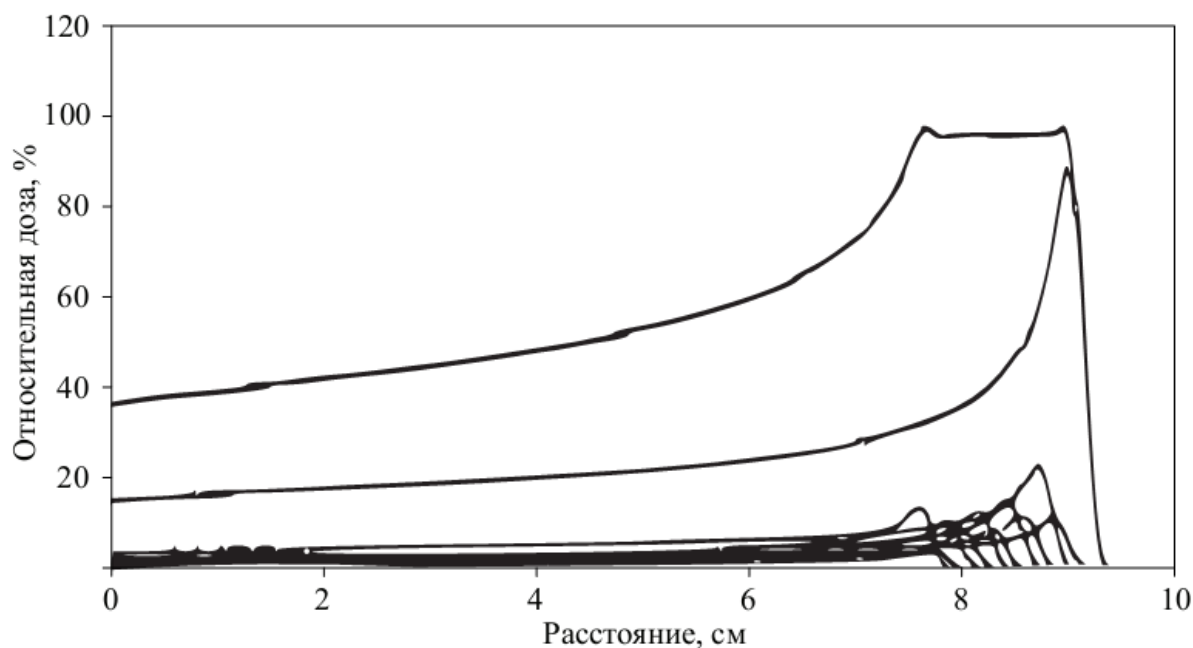


Рис. 4. Оптимизированная модифицированная кривая Брэгга для протонов (диапазон энергий – 100–110 МэВ).

Заключение

В настоящей работе представлены результаты исследований, связанных с решением задач, возникающих в адронной терапии. Построены зависимости поглощенной дозы от глубины проникновения пучка. Построены модифицированные кривые Брэгга. Установлено, что применение для адронной терапии ионов углерода C^{12} вместо протонов позволяет значительно усилить повреждающий эффект облучения и увеличить эффективность лечения.

-
1. Хорошков, В.С., Акулиничев, С.В., Кленов, Г.И. Развитие адронной терапии в мире и в России // Альманах клинической медицины. – 2006. – С. 98.
 2. Соловьев, А.Н. Автоматизированная распределенная система планирования лучевой терапии // Информационные и телекоммуникационные технологии. – 2013. – С. 48-60.
 3. Василенко, О.И., Ишханов, Б.С., Капитонов, И.М., Селиверстова, Ж.М., Шумаков, А.В. Радиация. – М.: Изд-во МГУ, 1996.
 4. Официальный сайт FLUKA. URL: <http://www.fluka.org>.
 5. Официальный сайт GEANT4. URL: <http://geant4.cern.ch>.
 6. Березов, Т.Т., Коровкин, Б.Ф. Биологическая химия. – М.: Медицина, 2002. – 704 с.
 7. Ананько, С.С., Кавригин, П.С., Мерц, С.П., Немнюгин, С.А., Толушкин, С.Г. Моделирование процессов распространения заряженных частиц и жесткого электромагнитного излучения с использованием технологий высокопроизводительных и распределенных вычислений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика, телекоммуникации, управление». – СПб., 2009. – С. 246-250.