

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

Владимир Олегович Карпунин, ведущий инженер-физик,

E-mail: karpunin@itep.ru,

*НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ ГНЦ РФ – Институт теоретической
и экспериментальной физики,*

<http://www.itep.ru>

В статье рассматривается экспериментальная верификация учёта процесса рассеяния протонного пучка при моделировании в отечественной системе моделирования методом Монте-Карло IThMC. Показано, что в IThMC достаточно корректно выбрана и реализована модель многократного рассеяния, что позволяет использовать эту систему для верификации расчётов в системах планирования облучения.

Ключевые слова: протонная лучевая терапия, система планирования облучения, верификация, моделирование, метод Монте-Карло, дозовое распределение

Введение

На протяжении всей истории развития лучевой терапии (ЛТ) существовали две клинически важные проблемы, вытекающие одна из другой [1]. Первая проблема – уменьшение лучевой нагрузки на здоровые ткани для снижения уровня постлучевых осложнений. Второй, и не менее важной задачей является максимально возможное увеличение дозы, доставляемой к облучаемому новообразованию, что заметно повышает вероятность локального контроля опухоли. Решение первой проблемы обеспечивает выполнение второй задачи, поскольку именно лучевая нагрузка на здоровые ткани ограничивает, как правило, дозу, подводимую к мишени. Наибольшие возможности для решения этих клинических проблем предоставляет лучевая терапия пучками ускоренных тяжёлых заряженных частиц (протонов и более тяжёлых ионов).



В.О. Карпунин

Протонная ЛТ обладает ещё одним важным достоинством [2]. Особенности прохождения пучка протонов через вещество позволяет на границах дозового распределения высочайшие, недостижимые для других применяемых в ЛТ типов излучения (гамма-излучение, пучки ускоренных электронов) градиенты дозы. Это, в свою очередь, открывает возможность облучать опухоли, прилегающие вплотную к критическим, боящимся облучения органам и структурам. В то же время, применяемые расчётные методы не позволяют обеспечить необходимую точность описания дозовых распределений. Особенно неприятны эти неточности, искажения на краю дозового поля, поскольку исключают возможность уверенно и безопасно облучать целый класс подобных опухолей. Особенно сильно на такого рода искажения влияет плохой учёт существующими расчётными методами процесса кулоновского рассеяния ускоренных частиц при прохождении через вещество. Всё это заставляет искать новые подходы и методы расчёта дозовых распределений.

Технологические этапы лучевой терапии

Реализация технологии лучевой терапии, а особенно, протонной – это сложный процесс, требующий вовлечения больших аппаратных, программных и информационных ресурсов на каждом из этапов лучевого лечения пациентов [3]:

- полная диагностика заболевания, сбор данных о топологии новообразования, а также окружающих его тканях и органах (топометрия);
- изготовление средств иммобилизации;

- дозно-анатомическое планирование облучения;
- симуляция облучения и облучение;
- постлучевой контроль заболевания и наблюдение за пациентом.

Среди этапов лучевого лечения необходимо особо выделить дозно-анатомическое планирование облучения, которое состоит из собственно «планирования облучения» (компьютерного моделирования облучения), а также из подготовки данных для проведения этого планирования, анализа и визуализации его результатов. Для проведения компьютерного моделирования облучения важен выбор адекватного алгоритма расчёта 3D дозовых распределений. В настоящее время в системах планирования облучения (СПО) используются различные аналитические алгоритмы расчёта дозовых распределений, каждый из которых (метод эквивалентной радиологической длины, метод карандашного пучка и др.) обладает своими преимуществами и недостатками для реализации конкретной задачи, однако, точность этих методов не всегда, как отмечалось, позволяет в полной мере реализовывать достоинства самого метода лечения. Поэтому, в условиях сложной геометрии облучения для повышения точности расчётов, а также для верификации расчётов, произведённых СПО, всё чаще используется метод Монте-Карло.

Метод Монте-Карло

Из всех существующих методов расчёта дозовых распределений, метод Монте-Карло наиболее адекватно описывает реальный процесс переноса излучения через вещество, так как строится на статистическом розыгрыше элементарных актов взаимодействия каждой из громадного количества (10^7 и более) ускоренных частиц с веществом. Однако у метода есть один существенный недостаток – очень медленная «сходимость» для достижения приемлемой статистической точности результата моделирования. Для того чтобы получить, приемлемые погрешности при расчёте дозы необходимо затратить несколько часов машинного времени на компьютерах современного уровня, что совершенно недопустимо в рутинных расчётах, применяемых в отделениях лучевой терапии. Поэтому на практике этот метод применяется не всегда, а либо для тестирования (верификации) систем планирования, либо для уточнения лучевого плана в сложных и ответственных случаях.

В отделе «Медицинской физики» ИТЭФ совместно с ВНИИТФ (г. Снежинск) была разработана система IThMC (Ion Therapy Monte-Carlo) для МК-моделирования дозовых распределений при ионном (в частности, протонном) облучении. Основные направления её использования: создание и верификация плана облучения, а также верификация собственно алгоритмов численного моделирования, реализованных в СПО. Задание геометрии расчёта в IThMC основано на теоретико-множественном подходе (комбинаторное представление), на основании таких примитивов, как поверхности и логических операций. Для возможности описания геометрически сложных объектов, описание которых затруднено в теоретико-множественном подходе, используется воксельное представление, в котором каждый воксель несёт информацию не только о геометрических параметрах, но и имеет ссылку на материал, которым он заполнен.

Учёт процесса рассеяния протонного пучка при моделировании дозовых распределений, является важным элементом корректной оценки поглощённой дозы в тканях пациента. В IThMC используется модель многократного кулоновского рассеяния в приближении Фокера-Планка, с коррекцией длины пробега по модели Ферми-Эйгера. Многократное рассеяние хорошо оценивается при анализе формы поперечного дозового распределения на различных глубинах эталонного для протонного излучения материала – воды или оргстекла.

Верификация метода

Целью данной работы являлась экспериментальная верификация учёта рассеяния

протонного пучка при численном моделировании дозовых распределений в системе IThMC. В качестве фантома, в котором верифицировался учёт рассеяния, использовался объект из оргстекла.

В процедурную кабину выводился пучок с энергией 130 МэВ. На расстоянии 197,8 см от выхода из протонопровода в атмосферу располагался стальной коллиматор с апертурой диаметром 3 мм, вплотную к которому был приставлен фантом из оргстекла. Поперечные дозовые распределения протонного пучка измерялись с помощью кусочков радиохромной плёнки (РП) Gafchromic EBT II, расположенных в фантоме на фиксированном расстоянии друг от друга. Для получения дозовых распределений с радиохромных плёнок использовалась разработанная ранее методика денситометрической обработки с использованием профессионального планшетного сканера.

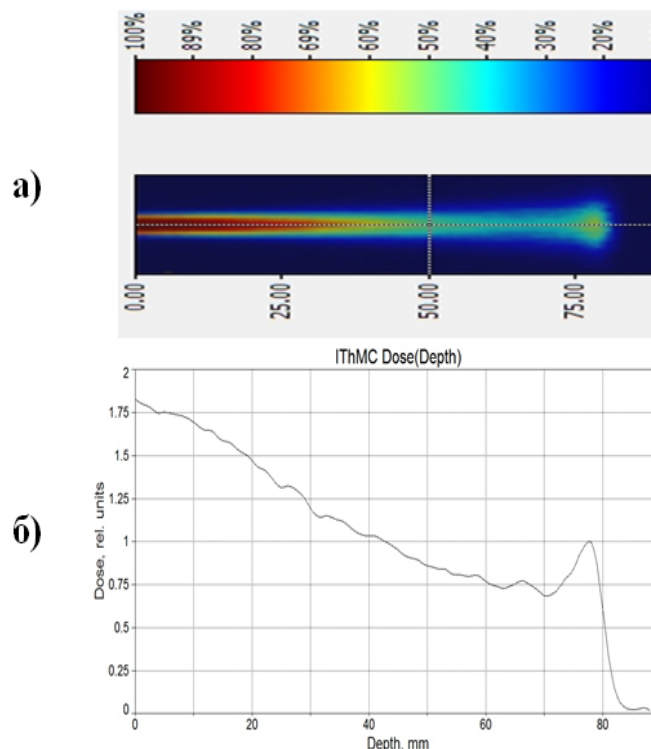


Рисунок 1– Двумерное дозовое распределение (а) и глубинная кривая (б) в оргстекле после моделирования в IThMC (коллиматор 3 мм)

Выбор коллиматора малого диаметра и большой длины позволяет пренебречь исходной угловой расходимостью протонного пучка: протоны, изначально летящие непараллельно оси пучка, в основном поглощаются стенками коллиматора. В результате эксперимента в итоге был получен набор профилей дозовых распределений пучка для различной глубины его проникновения в оргстекло. В той же геометрии эксперимент был промоделирован в системе IThMC, результатом чего явилось расчётное трёхмерное распределение поглощённой дозы в оргстекле. Для верификации учёта эффекта рассеяния при численном моделировании в IThMC был получен набор двумерных дозовых распределений: глубинная кривая и профили пучка на тех же глубинах в оргстекле, что и в эксперименте с использованием РП. На рисунке 1а представлено двумерное дозовое распределение, полученное при моделировании в IThMC, и глубинное распределение (рисунок 1б) вдоль оси пучка. Кривая на рисунке 1б наглядно демонстрирует широко известный феномен вырождения кривой Брэгга узкого пучка протонов. За счёт рассеяния в веществе плотность частиц в поперечном сечении с глубиной падает. Этот эффект «конкурирует» с повышением линейных потерь энергии частиц по мере уменьшения их энергии, которое, собственно, и определяет возрастание дозы к концу пробега и характеризует вид кривой Брэгга для широкого пучка (рисунок 2, кривая А): чем уже

пучок, тем больше относительное (к изначальному поперечному сечению) уширение пучка, тем больше падает плотность частиц. Этот эффект начинает преобладать над повышением дозы от каждой частицы: их просто становится на единицу площади поперечного сечения в конце пробега (где мы ожидаем появление пика Брэгга) в несколько раз меньше, чем на входе в объект. Кривая Брэгга вырождается (рисунок 2, кривая Б).

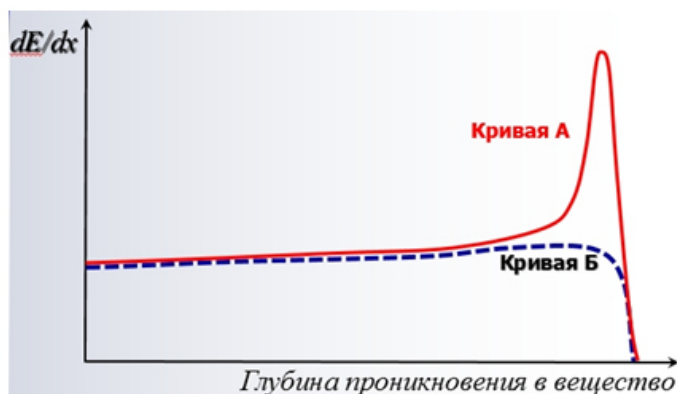


Рисунок 2 – Нормальная (А) и вырожденная (Б) кривые Брэгга

Для анализа корректности учёта рассеяния в IThMC на рисунке 3 приведены профили пучка, рассчитанные в программе IThMC и полученные в эксперименте на входе пучка в фантом из оргстекла (рисунок 3а, глубина 0 мм) и в пике Брэгга (рисунок 3б, глубина 77 мм). Из графика на рисунке 3а видно, что в IThMC несущественно (0,5 %) происходит недоучёт рассеяния протонов в стенках коллиматора. Ближе к пику Брэгга это ни-

велируется за счёт рассеяния пучка в оргстекле. И непосредственно в самом пике (рисунок 3б) распределения как в IThMC, так и в эксперименте становятся шире в 2,2 раза (6,6 мм на уровне 50 % изодозы). По форме оба профиля становятся близки с уровнем достоверности $r^2=0,99$ к Гауссовому распределению. Единственное отличие идёт ниже уровня 15 % изодозы, что показывает небольшую переоценку рассеяния в IThMC.

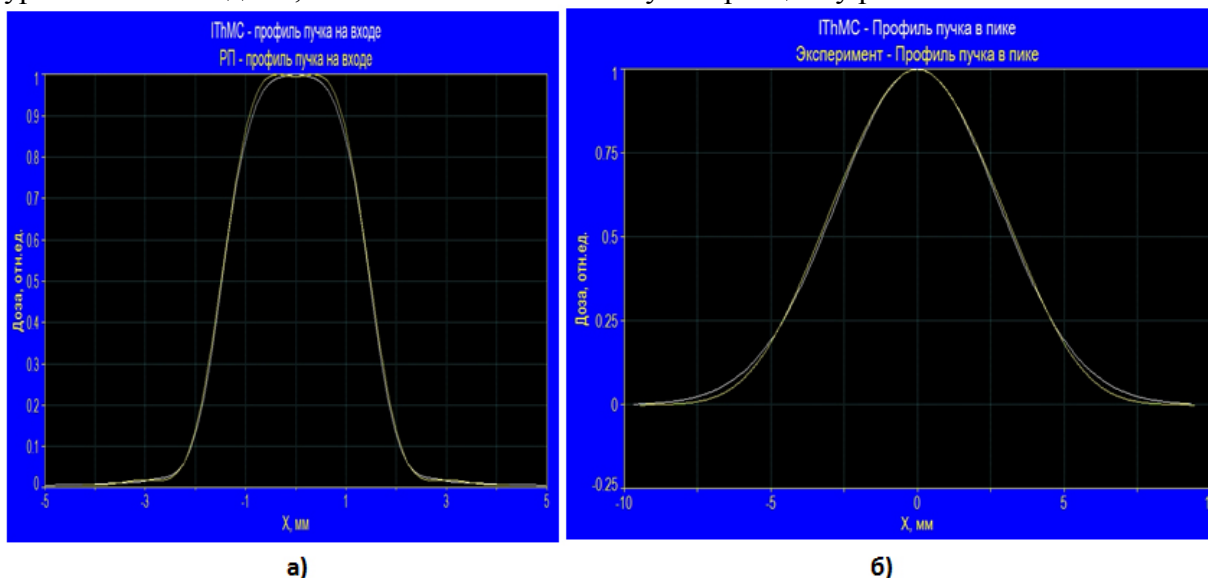


Рисунок 3 – Иллюстрация совпадения профилей протонного пучка, полученных в IThMC и в эксперименте на входе в фантом (а) и в пике Брэгга (б)

Выводы

Анализ расчёта трёхмерного дозового распределения в IThMC и учёта рассеяния в эталонном для лучевой терапии фантомном материале (оргстекло) показывает, что эту систему МК-моделирования на данном этапе уже можно использовать для верификации дозовых расчётов в системах планирования протонного облучения. В IThMC достаточно корректно выбрана и реализована модель многократного рассеяния. Это актуально в ПЛТ, т.к. стоимость проведения экспериментов непосредственно на лучевой установке очень высока. А в клинических ЦПЛТ с трёхсменным лечением пациентов и пропускной способностью 1000–1500 человек/год вообще не находится свободное время для физических исследований (за исключением рутинных дозиметрических измерений).

Литература

1. Клёнов Г.И., Хорошков В.С. Развитие протонной лучевой терапии в мире и в России // Медицинская физика. 2005. № 4. С. 5–23.
2. Хорошков В.С. Эволюция технологий лучевой терапии: от рентгена к адронам // Ядерная физика. 2006. Т. 69. № 10. С. 1760–1780.
3. Карпунин В.О., Клёнов Г.И., Хорошков В.С. Первый в России специализированный клинический центр протонной лучевой терапии // Альманах клинической медицины. 2008. № 17-1. С. 316–319.

Experimental verification of the dose distributions simulation for proton therapy

Vladimir Olegovich Karpunin, Principal Engineer-Physicist, NRC Kurchatov Institute SSC RF – Institute for Theoretical and Experimental Physics

Experimental verification of the proton beam dose distributions Monte-Carlo calculation in IThMC code is considered. The scattering model is shown to be chosen and implemented in IThMC code correctly, and this code could be used to verify dose distributions calculation in treatment planning systems for proton therapy.

Keywords: proton radiation therapy, treatment-planning system, verification, simulation, Monte-Carlo method, dose distribution

УДК 528.2/.5 528.8 528.02

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТАХ

*Андрей Олегович Куприянов, канд. техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной геодезии,
E-mail: miigaiknir@yandex.ru,*

*Московский государственный университет геодезии и картографии,
<http://www.miiigaik.ru>*

Дается описание геодезического и геоинформационного обеспечения при строительстве трассы туннелей. Раскрываются особенности работ данного вида. Описано применение методов геоинформатики и спутниковой навигации при проведении данных работ. Дается обобщение работ в области геодезического обеспечения. Отмечена необходимость использования методов прикладной геоинформатики для комплексного использования разных методов при ведении подземных работ.

Ключевые слова: прикладная геоинформатика, геодезическое обеспечение, цифровое моделирование, геодезическое плановое и высотное обоснования, подземные работы

Введение. Современная прикладная геоинформатика решает прикладные задачи на основе интеграции наук о Земле и методов информатики [1]. Это свойство приносит



А.О. Куприянов

большой эффект при подземных геодезических работах [2], которые требуют интеграции геодезических измерений, геоинформационного моделирования [3] и применения спутниковых навигационных систем [4]. С одной стороны геодезическое обеспечение изысканий в своей основе опирается на проверенные временем и практикой методы [5–7]. В то же время развитие наук о Земле привело к внедрению новых методов – методов цифрового моделирования. При сборе информации говорят уже не о сборе данных, а о сборе геоданных [8, 9]. Это обусловлено интеграцией данных и измерений в геоданные, а главное то, что геоданные являются системным информационным ре-