**Разработка программы расчета параметров распределения поглощенной дозы по глубине в однородных объектах при радиационной обработке   
электронами с энергией до 20 МэВ**

***Соколов С.А.1*, *Близнюк У.А.1,2, Борщеговская П.Ю.1,2, ЗолотовС.А.1, Иванченко В.Н.3, КречетовН.Д.1, СтуденикинФ.Р.1,2, Черняев А.П.1,2***

*Студент, 3 курс специалитета*

*1Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,*   
*физический факультет, Москва, Россия,*  
 *2Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*   
*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,*   
*Москва, Россия,  
 3Томский государственный Университет, физический факультет, Томск, Россия*

E–mail : *sokolov.sa20@physics.msu.ru*

Радиационные технологии получили широкое распространение в мире, став неотъемлемой частью научного и технологического развития. В настоящее время радиоизотопы и ускорители заряженных частиц, помимо применения в проведении фундаментальных исследований в области атомной и ядерной физики, радиобиологии и радиохимии, широко используются в медицине, промышленности и сельском хозяйстве [1].

Более чем в 70 странах мира действуют промышленные центры радиационной обработки продуктов питания, биообъектов и медицинских изделий [1]. Для планирования радиационной обработки в промышленности и научных исследованиях важным критерием эффективности применения технологии является однородность распределения поглощенной дозы по объему обрабатываемого объекта [2, 3].

Для моделирования взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, получили распространение транспортные коды на основе метода Монте-Карло [1], такие как MCNPX, PENELOPE, GEANT4, EGSnrc [4]. Одним из преимуществ пакета программ GEANT4 [5, 6] по сравнению с другими транспортными кодами является универсальность и возможность адаптации моделирования для конкретной задачи. Физические модели, лежащие в основе работы транспортного кода регулярно дополняются и подтверждаются экспериментальными данными [7]. Однако, для работы с транспортным кодом GEANT4 пользователь должен обладать достаточно высокими навыками и компетенциями не только в области ядерной физики, но и в области программирования на языке С++. Кроме того, для получения точных результатов и набора удовлетворительной статистики событий потребуется компьютерное моделирование, которое может занимать от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от расчетной мощности используемого компьютера.

Представляется интересным разработка программы, позволяющей на основе базы данных, подготовленной с использованием предварительно выполненного детального моделирования, получать распределение поглощенной дозы по глубине облучаемых объектов за несколько секунд, что позволит существенно сократить время и сложность планирования экспериментальных исследований без значительных потерь в точности получаемых данных.

Целью данной работы являлась разработка программы расчета распределения поглощенной дозы по глубине в однородных объектах в форме параллелепипеда при облучения электронами с энергией от 0.1 МэВ до 20 МэВ на основе базы данных, полученной при помощи детального моделирования с использованием GEANT4.

Моделирование выполнялось для возможных условий работы промышленных и медицинских ускорителей электронов, которые генерируют пучки с энергией до 20 МэВ. Поперечный размер пучка составлял 30 см × 30 см, энергия частиц варьировалась в диапазоне от 0.1 МэВ до 20 МэВ с шагом 0.1 МэВ, количество электронов в пучке составляло 106, погрешность моделирования составляла не более 2%. Расстояние между объектом облучения и выходом пучка составляло 1 мм и было заполнено воздухом.

Моделировалось одностороннее облучение куба с ребром 30 см. Рассматривались кубы из воды, алюминия и полипропилена. Для расчета распределений поглощенной дозы по глубине куба вдоль оси X, параллельной первоначальному движению электронов в пучке, в нем выделялся объем в форме параллелепипеда, который разбивался на 3000 слоев толщиной 0.1 мм для фиксации в них поглощенной энергии.

По результатам, полученным в ходе выполнения компьютерного моделирования, была получена база данных, состоящая из значений поглощенной дозы в каждом слое толщиной 0.1 мм при облучении электронами с энергией от 0.1 МэВ до 20 МэВ.

Была разработана программа, позволяющая при задаваемых пользователем значениях начальной энергии электронов (до 20 МэВ), толщины объекта в форме параллелепипеда (до 300 мм) и материала объекта (вода, полипропилен или алюминий) получать распределение поглощенной дозы по глубине.

Также программа позволяет получать распределение поглощенной дозы по глубине при моделировании не только пучками моноэнергетических электронов, но и пучками с заданным спектром энергии.

В дальнейшем функционал программы был дополнен возможностью получения распределения поглощенной дозы по глубине объектов, облучаемых с двух сторон пучками электронов заданных энергий.

Было проведено сравнение значений распределения поглощенной дозы по глубине объекта, полученных в результате работы созданной программы со значениями, полученными путем прямого компьютерного моделирования с использованием GEANT4. Показано, что максимальное отклонение от результатов моделирования составляет не более 3% во всем диапазоне рассматриваемых энергий, толщин и материалов. При этом, расчеты при помощи разработанной программы выполнялись в среднем за 2 секунды, в то время как на расчет при помощи GEANT4 потребовалось около 7 часов с использованием персонального компьютера средней мощности.

*Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».*

**Список литературы:**

1. *Черняев А.П.* Радиационные технологии: наука, народное хозяйство, медицина. М.: КДУ, 2018
2. The Physics of Radiation Therapy / Khan F. M. // 2nd edition, 542 pages.
3. *Miller R.B.* Electronic Irradiation of Foods: An Introduction to the Technology // Springer - Food engineering series. 2005.
4. The Irradiation Panel, Review of Monte Carlo Modelling Codes, London. (2007)
5. Geant4 - A Simulation Toolkit, S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 506 250-303 (2003).
6. Recent Developments in Geant4, J. Allison et al., Nucl. Instrum. Meth. A 835 186-225 (2016)
7. Anthology of the Development of Radiation Transport Tools as Applied to Single // IEEE Transactions on Nuclear Science 60(3):1876-1911. DOI:10.1109/TNS.2013.2262101.