**Обзор исследований влияния вторичных частиц в процессе лучевой терапии**

С.А. Зеленова1, И.Ф.Жаринов1, А.А.Щербаков1,2, Ф.Р. Студеникин1,2

*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*

E–mail: zelenovasa@my.msu.ru

В настоящее время протонная лучевая терапия является одним из перспективных методов лечения онкологических заболеваний. Главным преимуществом данного метода лучевой терапии является возможность обеспечения более точного доставки дозы к целевому объему, минимизируя воздействие ионизирующего излучения на окружающие здоровые ткани. Такой результат возможен благодаря особенности взаимодействия тяжелых заряженных частиц с веществом: они отдают основную часть своей энергии в конце своего пути, стремительно ионизируя атомы среды. Для протонов эта особенность описывается пиком Брэгга. Однако при прохождении пучка протонов через элементы коллимационной системы и ткани пациента в результате ядерных реакций могут рождаться вторичные частицы: фотоны, протоны и нейтроны. Поскольку нейтроны обладают высокой относительной биологической эффективностью, они могут  вносить неучтённый вклад в эквивалентную дозу, получаемую пациентом. В связи с этим точная оценка доз вторичных нейтронов является критически важной задачей для оптимизации протонной терапии и минимизации рисков для пациентов.

Моделирование методом Монте-Карло является одним из основных инструментов для оценки вторичных нейтронов. Программные пакеты MCNPX, Geant4 и TOPAS позволяют моделировать транспорт протонов и вторичных частиц в сложных системах.

Исследования, посвященные данной проблеме, направлены на оценку корректности используемых моделей: MC-моделирование корректно воспроизводит спектры нейтронов и распределения доз вторичных нейтронов, однако наблюдаются расхождения между смоделированными и измеренными значениями, особенно для высокоэнергетических нейтронов.[1, 2] Также проводится сравнение различных физических моделей для  более точного воспроизведения углов рассеяния распределения доз[3, 4]

Настоящая работа посвящена обзору современных тенденций в изучении вторичных нейтронов в протонной лучевой терапии при помощи моделирования с использование метода Монте-Карло.

1. Farah, J., Martinetti, F., Sayah, R., et al. (2014). Monte Carlo modeling of proton therapy installations: a global experimental method to validate secondary neutron dose calculations. *Physics in Medicine & Biology*, 59(10), 2747.
2. Han, S.-E., Cho, G., & Lee, S. B. (2017). An Assessment of the Secondary Neutron Dose in the Passive Scattering Proton Beam Facility of the National Cancer Center. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(4), 801–809.
3. Lin, Y.-C., Lee, C.-C., Chao, T.-C., & Tsai, H.-Y. (2017). Ambient neutron dose equivalent during proton therapy using wobbling scanning system: Measurements and calculations. *Radiation Physics and Chemistry*, 140, 290–294.
4. Fuchs, H., Vatnitsky, S., Stock, M., Georg, D., & Grevillot, L. (2017). Evaluation of GATE/Geant4 multiple Coulomb scattering algorithms for a 160 MeV proton beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 410, 122–126.