

ФИЗИЧЕСКОЕ ЯДРО СИСТЕМЫ ДОЗНО-АНАТОМИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ЛУЧ-У70 НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» — ИФВЭ

**И.И. Дегтярев^{1,2}, Д.А. Цветков^{1,2}, А.Р. Селезнева^{1,2},
А.А. Ларионов^{1,2}**

¹Филиал «Протвино» государственного университета «Дубна»

²Институт физики высоких энергий имени А.А. Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

E-mail: Igor.Degtyarev@ihep.ru

Представлено описание прецизионной и полуаналитических математических моделей физических ядер разрабатываемой автоматизированной системы дозно-анатомического планирования комплексов протонной (Луч-Протон) и ионной (Луч-У70, Луч-Туп-Ион) лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт».

Ключевые слова: адронная терапия, система планирования облучения, перенос ионизирующих излучений в средах, математическое моделирование

Введение

Дистанционная лучевая терапия злокачественных новообразований является одним из наиболее востребованных и быстроразвивающихся высокотехнологичных методов лечения онкологических заболеваний. На основании Постановления и Распоряжения Правительства Российской Федерации [2,3] на базе НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ создается новейший отечественный научно-образовательный медицинский центр ядерной медицины, включающего комплекс ионной (углеродной) — лучевой дистанционной терапии (ЦИЛТ У70). В рамках реализации Технического задания ЦИЛТ У70 разработан проект медицинского канала №26 с 2 процедурными кабинами (рис. 1), размещенного в экспериментальном зале 1БВ.

Неотъемлемой частью ЦИЛТ У70 является автоматизированная система дозно-анатомического планирования облучения пациента (СПИЛТ).

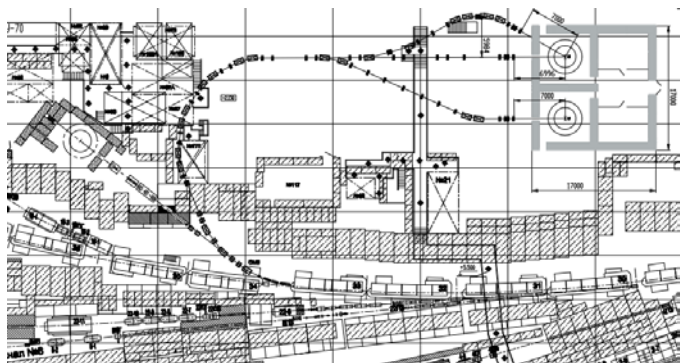


Рис. 1. Расположение канала №26 в экспериментальном зале 1БВ

Общие подходы к построению математической модели физического ядра СПИЛТ

В существующей мировой практике при разработке математических моделей физических ядер систем планирования на текущий момент прослеживаются 3 подхода:

1. прецизионный (микроскопический). В рамках данного подхода физическое ядро основано на прецизионном моделировании максимального (или выборочного) числа дискретных процессов взаимодействия излучения с веществом среды с использованием микроскопических моделей (теоретических адронных генераторов) hA - и AA -взаимодействий на основе программных комплексов статистического моделирования переноса многокомпонентного излучения в средах общего назначения (GEANT4 [9], FLUKA [10], MCNP6 [19], RHITS [11], SHIELD-HIT [12], MARS15 [13], RTS&T [1,7]);
2. полуэмпирический (полумикроскопический). Включает элементы прецизионного моделирования совместно с выборками ряда характеристик переноса из распределений, полученных, как правило, на основе теоретических моделей со свободными параметрами, уточненными на основе экспериментальных данных или прецизионных расчетов (например, ECLIPSE [8]);
3. эмпирический (макроскопический). Полностью феноменологический подход, основанный на прямом использовании в модели переноса излучения экспериментальных данных [16].

Микроскопический (прецизионный) подход к построению физического ядра СПИЛТ на основе обновленного кода RTS&T

Программный комплекс RTS&T реперного класса точности предназначен для статистического моделирования связанного переноса многокомпонентного (200 типов элементарных частиц и ядер) излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных средах в диапазоне низких, промежуточных и высоких энергий в присутствии электромагнитных полей. В сравнении с предыдущей версией (RTS&T-2014 [7]) RTS&T-2021 [1] содержит ряд модификаций и расширений, касающихся применения 4 пакетов подготовки файлов оцененных ядерных данных для их использования в качестве константного обеспечения моделирования переноса в диапазонах низких и промежуточных энергий (включая данные Файла 7 формата ENDF-6 для обработки взаимодействий тепловых нейтронов и ковариационных данных для построения коридора ошибок оцененных данных), расширения набора программных реализаций микроскопических (теоретических) моделей (адронных генераторов) комплекса RTS&T-2021, развития системы представления (описания и визуализации) геометрии, расширения набора программных реализаций микроскопических моделей γ A-, hA- и AA-взаимодействий в диапазоне промежуточных и высоких энергий, моделей расчета микродозиметрических параметров, используемых в системах планирования облучения пациента на установках протонно- и ионно-лучевой дистанционной терапии (усредненных по потоку или поглощенной дозе линейных передач энергии, относительной биологической эффективности рассматриваемого типа излучения на заданном уровне выживаемости клеточных структур [5], биологической дозы).

Полуэмпирический подход к построению физического ядра СПИЛТ

Для моделирования переноса протонного и ионного излучения в пакете RIPLAN2023 реализованы 2 полуэмпирических метода, основанные на методах Бортфельда [6] и Ульмера [8,18], разработанных для расчета поглощенной дозы от протонного пучка в водном фантоме. Результаты первой попытки развития метода Бортфельда на перенос ионного излучения

были опубликованы в [17]. Однако приведенные в данной публикации константы модели для взаимодействующих ионов ^{12}C были получены параметризацией результатов расчетов в рамках кода FLUKA [19] без их совместного анализа с доступными экспериментальными результатами. В физическое ядро комплекса были включены уточненные константы моделей Бортфельда и Ульмера, полученные на основе совместного анализа данных 36 опубликованных экспериментов и результатов статистического моделирования переноса ионов ^{12}C в водном фантоме, выполненных на основе программного комплекса RTS&Tc использованием адронных генераторов JQMD 2.0 (JAERI Quantum Molecular Dynamics code) [15] и CASCADE (Cascade-Excitonmodel) [4, 14]. В рамках использованных моделей реализована генерация ядерных фрагментов как в послекаскадной, так и в быстрой стадии реакции (вплоть до полного развала ядра). Численное моделирование переноса вторичных нуклонов и легких фрагментов производилось на основе прямого использования нейтронной, протонной и фотоядерной частей библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VIII.0, дополненной файлами библиотеки TENDL 2021 для описания взаимодействий d , t , ^3He , ^4He в диапазоне энергий ниже 200 МэВ. В процессе моделирования переноса рассматривались процессы распада метастабильных фрагментов с последующим переносом продуктов распада.

В RIPLAN2023 реализации обоих полуэмпирических методов отличаются способами параметризации вкладов компонент вторичного излучения в распределения поглощенной дозы. В обеих реализациях макроскопических моделей производится раздельное описание вкладов первичных и вторичных частиц межъядерного каскада.

В модифицированном методе Бортфельда в процессе моделирования переноса рассматриваются вклады в поглощенную дозу 2 компонент излучения: первичного ^{12}C -излучения и протонов отдачи, образованных в упругих ^{12}C - ^1H — взаимодействиях с ядрами водорода воды, а также вторичных протонов совместно с вторичными ядрами, рожденными в неупругих ^{12}C - ^{16}O — взаимодействиях. В модифицированном методе Ульмера в процессе моделирования переноса рассматриваются вклады в поглощенную дозу 3 компонент излучения: первичного ^{12}C -излучения, протонов отдачи, образованных в упругих

от ^{12}C - ^1H — взаимодействиях с ядрами водорода воды, а также вторичных протонов, рожденных в неупругих ^{12}C - ^{16}O — взаимодействиях и вторичных ядер.

В обеих моделях пространственное распределение поглощенной дозы от вторичных частиц и ядерных фрагментов описывается зависимостью

$$D(z, r) = D(z) \cdot K_{(\text{Lat}, \text{sec})}(z, r), \quad (1)$$

где $D(z)$ — глубинное распределение поглощенной дозы от вторичных частиц и ядерных фрагментов, $K_{(\text{Lat}, \text{sec})}(z, r)$ — радиальное распределение поглощенной дозы от вторичных частиц и фрагментов относительно направления первичного иона ^{12}C .

На рис. 2 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных глубинного распределения энергосвечения «карандашного» пучка ионов ^{12}C ($E_0=200$ МэВ/и, $R_{\text{csda}}=8.575$ см) в гомогенном водном фантоме.

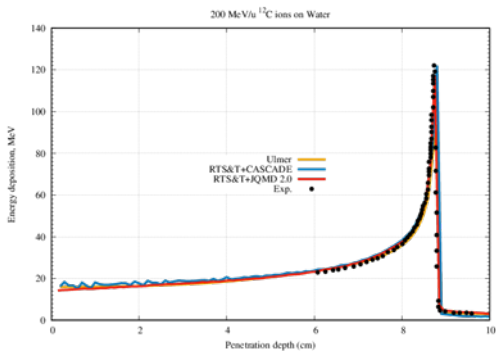


Рис. 2. Глубинное распределение энергосвечения нитевидного пучка ионов ^{12}C ($E_0=200$ МэВ/и, $R_{\text{csda}}=8.575$ см) в гомогенном водном фантоме

Заключение

В работе изложены основные подходы, использованные в разработке физического ядра системы дозно-анатомического планирования протонной и ионной лучевой терапии. Приведены выборочные результаты верификации физического ядра СПИЛТ.

Список литературы:

1. Дегтярев И.И., Новоскольцев Ф.Н., Ляшенко О.А., Синюков Р.Ю., Алтухова Е.В., Блохин А.И., Блохин П.А., Пряничников

- A.A. // RTS&T-2021 — Обновленный комплекс программ статистического моделирования связанного переноса многокомпонентного излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных средах, Сборник трудов XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва, 26—29 октября 2021 года, т. 3, с. 148.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 16.03.2020 № 287 "Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы".
 3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21.07.2021 № 2027-п.
 4. Barashenkov V.S., Zheregry F.G., Musulmanbekov G. // Preprint JINR P2-83-117, 1983, Dubna.
 5. Blomquist E., Russell K. R., Stenerloew // Relative biological effectiveness of intermediate energy protons: Comparisons with ^{60}Co gamma-radiation using two cell lines // *Radiother. Oncol.* 1993, Vol. 28, pp. 44–51.
 6. Bortfeld T. // An analytical approximation of the Bragg curve for therapeutic proton beams, *Physics in Medicine & Biology*, Volume 41, Number 8.
 7. Degtyarev I.I., Novoskoltsev F.N., Liashenko J.A., Gulina E.V., Morozova L.V. // RTS&T-2014 code status, *Nuclear Energy and Technology*, Volume 1, Issue 3, November 2015, Pages 222-225.
 8. Eclipse Proton Algorithms Reference Guide, P1026475-001-A, August 2019.
 9. Faddegon B., Ramos-Méndez J., Schümann J., McNamara A., Shin J., Perl J., Paganetti H. // The TOPAS Tool for Particle Simulation, a Monte Carlo Simulation Tool for Physics, Biology and Clinical Research, *Phys Med.* 2020 Apr. 02; 72:114-121.
 10. Ferrari A., Sala P. R., Fass'o A., Ranft J. // FLUKA: a multi-particle transport code (Program version 2021, Revision 151), CERN–2005–010, INFN TC 05/11, SLAC–R–773.
 11. Furuta T., Sato T. // Medical application of particle and heavy ion transport code system PHITS, *Radiol. Phys. Technol.* 14, 215-225 (2021).
 12. Hansen D.C, Lühr A., Sobolevsky N., and Bassler N. // Optimizing SHIELD-HIT for carbon ion treatment; *Physics in Medicine and Biology*, 2012, Vol. 57, No. 8, Pages 2393.
 13. Mokhov N., Aarnio P., Eidelman Yu. et al. // MARS15 code developments driven by the intensity frontier needs, *Progress in*

- Nuclear Science and Technology 4:496-501, DOI: 10.15669/pnst.4.496.
14. Musulmanbekov G., Haidary A.Al. // Fragmentation of Nuclei at Intermediate and High Energies in Modified Cascade Model, arXiv:nucl-th/0206054, Phys. Atom. Nucl. 66 (2003) 1671-1679; Yad.Fiz. 66 (2003) 1719-1727.
 15. Ogawa T., Sato T., Hashimoto S., Satoh D., Tsuda S., Niita K. // Phys. Rev. C 92, 024614 (2015).
 16. Parodi K., Mairani A. and Sommerer F. // Monte Carlo-based parametrization of the lateral dose spread for clinical treatment planning of scanned proton and carbon ion beams, Journal of Radiation Research, 2013, 54, 191–196.
 17. Tuomanen S., Moskvina V., For J. // SAFT-144: Analytical Closed Form Approximation for Carbon Ion Bragg Curves in Water, Medical Physics 43(6):3495-3495.
 18. Ulmer W. and Schaffner B. // Foundation of an analytical proton beamlet model for inclusion in a general proton dose calculation system, Radiation Physics and Chemistry, 80 (2011), 378–389.
 19. Werner Ch.J. // MCNP® User's Manual Code Version 6/LA-UR-17-29981.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ КРИТЕРИЕВ МНОЖЕСТВЕННЫХ СРАВНЕНИЙ, ПРИМЕНЁННЫХ К ВЫБОРКАМ С НЕГАУССОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

В.Н. Алдобаев¹, А.А. Масликов², М.С. Скворцова²

¹*Отдел химических разработок, Протвинского
филиала АО «НИИ НПО «ЛУЧ»*

²*Филиал «Протвино» государственного университета «Дубна»*

E-mail: masspref@yandex.ru

Методом Монте-Карло исследуется влияние ненормальности выборок небольшого объёма на эффективность критериев множественных сравнений (ANOVA, апостериорный критерий Тьюки). В качестве ненормальных распределений использовались хи-квадрат и, ограниченное, содной стороны, распределение Джонсона. Получены зависимости мощностей указанных критериев от величины эффекта, часть которых представлены в виде графиков. Сделаны выводы о применимости и свойствах критериев.