

## ТРЕХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ И ДОПОЛНЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗ В ЛУЧЕВОЙ КАБИНЕ НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ НА БАЗЕ ГЕНЕРАТОРА НГ-24МТ

**А.Е. Чернуха\***, **В.О. Сабуров\***, **А.И. Адарова\***, **А.Н. Соловьев\*,\*\***,  
**Я.В. Кизилова\***, **С.Н. Корякин\*,\*\***

\* МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России  
249036, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, 4

\*\* ИАТЭ НИЯУ МИФИ  
249039, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1



Задача обеспечения радиационной защиты при нейтронном облучении является комплексной проблемой, решение которой предполагает использование строгого математического аппарата и понимания физических основ. Предлагается способ оценки полей нейтронов и гамма-излучения в трехмерных моделях лучевой кабины (каньона) с размещаемым оборудованием. Для проведения оценок радиационных полей и полей нейтронов, определяемых качеством барьерной защиты, геометрией и материалом стен и защитных конструкций, все трехмерные модели реализованы дополнением геометрии, теоретико-множественным дополнением в виде тонкого слоя решетки ячеек воды, расположенным на определенной высоте по отношению к каньону. Приводятся оценки доз рассеянных нейтронов методом Монте-Карло в процессе работы генератора НГ-24МТ, которые можно считать оценками сверху при различной направленности оси генератора. Представлены оценки доз гамма-излучения после выключения генератора, определяемых наведенной активностью конструкционных материалов протяженного расположения из нержавеющей стали и материалов из композита вольфрама, а также оценки доз в каньоне и за его пределами, в местах пребывания медицинских работников при работе с пациентом и технического персонала при обслуживании нейтронного пучка.

**Ключевые слова:** моделирование, метод Монте-Карло, наведенная активность, дополнение геометрии, радиационная гигиена.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет усилиями специалистов ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л. Духова, АО «НИИТФА» и МРНЦ им. А.Ф. Цыба ведутся работы по созданию установки для проведения дистанционной лучевой терапии нейтронами с энергией 14 МэВ, получаемыми на компактном нейтронном генераторе НГ-24МТ. Размещение установки планируется в каньоне № 109 экспериментального сектора МРНЦ

© А.Е. Чернуха, В.О. Сабуров, А.И. Адарова, А.Н. Соловьев, Я.В. Кизилова,  
С.Н. Корякин, 2022

им. А.Ф. Цыба в г. Обнинске.

Общая проблематика задач защиты от нейтронного излучения обусловила необходимость расчетных и экспериментальных исследований радиационной обстановки как в самом каньоне, так и в ближайшем его окружении, например, в местах нахождения медицинского персонала и операторов установки. Оценки поглощенных доз нейтронов и гамма-квантов имеют первостепенное значение как для проведения терапии, так и для выполнения работ, связанных с обслуживанием генератора и всего вспомогательного оборудования, размещаемого в каньоне.

В работе проводились оценки доз методом Монте-Карло при достаточно хорошей статистике и близости расчетных моделей к реальным элементам конструкции согласно проектным данным. Метод Монте-Карло в виде пакета прикладных программ MCNP (Monte Carlo N-Particle code [1]), реализует перенос нейтронов, фотонов и электронов со свободными условиями на внешней границе или связанных нейтрон/фотон/электронных  $N$ -ансамблей и допускает некоторую свободу в описании геометрии тел всевозможной формы. Структура геометрии трехмерной модели (гомогенная или гетерогенная) строилась таким образом, чтобы при моделировании реальных конструкций оценки доз соответствовали худшим ситуациям в местах пребывания медицинского и технического персонала, являясь оценками сверху в смысле значений дозы, например, в силу общих свойств численного решения вблизи границ раздела. В ряде случаев поверочные оценки наведенной активности образцов стен (тяжелый бетон) и образцов вольфрама, полученной в нейтронном потоке генератора НГ-14 (экспериментальный сектор МРНЦ им. А.Ф. Цыба), подтверждают предположения о некотором асимптотическом доминировании оценок дозы над измерениями.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Трехмерные модели

В рамках реализации проекта по созданию установки для дистанционной нейтронной терапии проводились оценки доз нейтронов и гамма-квантов в границах каньона лучевой терапии и за его пределами. В связи с этим разработаны модели реальных конструкций. Эти модели, в том числе защитной стенки скошенной геометрии, созданы А.И. Адаровой в рамках графического редактора MCNP.

Геометрия модели защитной стенки (рис. 1) построена с проемом для терапевтического стола, который установлен на цепном транспортере с несущими профилями из толстостенной круглой профильной стали.

Модель поворотного механизма (рис. 2) разработана в соответствии с типовым проектом, причем геометрия модели соответствует реальному расположению элементов конструкции. В этой модели генератор, коллиматор и биологическая защита общей массой 1200 кг размещены на поворотной раме с опорой на основание стола и раму-противовес с двумя диагональными консолями массой 1000 кг, изготовленными из профильной стали 200×200 мм, что позволяет получать оценки дозы с учетом наведенной активности материалов протяженного расположения.

Модель генератора (НГ-24МТ, разработка ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л. Духова) на рис. 3 представлена компонентами: гомогенной зоной – медь ( $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{65}\text{Cu}$ ), железо ( $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ) в равных массовых долях и трансформаторное масло  $\text{CH}_2$  с плотностью 0,8. Модель использовалась для получения оценки скоростей реакций активации при значительных нейтронных потоках в нижнем опорном фланце, который является элементом узла крепления генератора на поворотном механизме.

Источником нейтронов в модели генератора является D-T-реакция на подложке медной мишени вакуумной трубки радиусом 12,5 мм с напылением пористого тита-

на, содержащего тритий. Согласно модели, нейтроны испускаются в 4π с круглой площадки того же радиуса, энергия нейтронов  $\approx 14,5$  МэВ, выход –  $2 \cdot 10^{11}$  1/с.

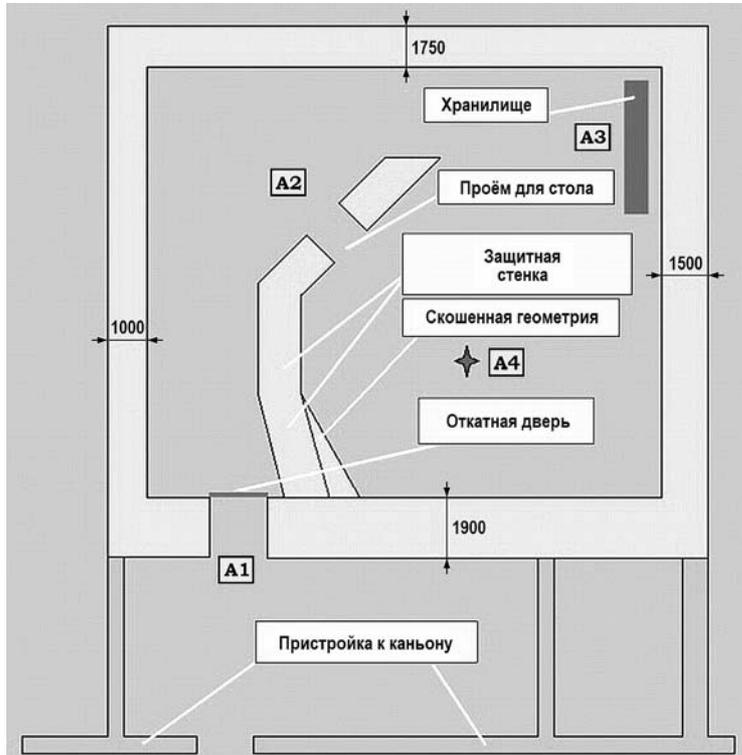


Рис. 1. Геометрия модели каньона № 109 с пристройкой

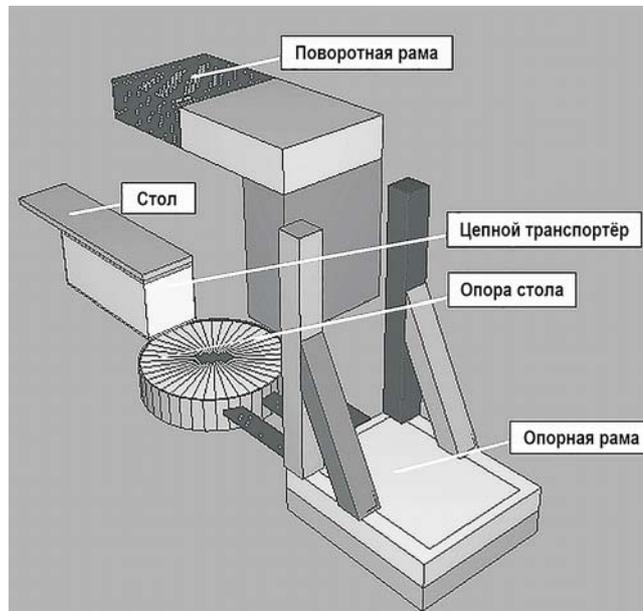


Рис. 2. Геометрия модели поворотного механизма

Модель коллиматора разработана гетерогенной с засыпкой зерна вольфрама и

заливкой борированного полиэтилена между каналом и корпусом коллиматора для получения реальных оценок дозы с учетом неупругого замедления на ядрах вольфрама и упругого на ядрах водорода. При этом значение дозы в пяти сантиметрах от экстраполированной границы пучка на поверхности водного фантома под коллиматором может составлять до 3 – 5% от максимального против 7 – 10% для гомогенного коллиматора из композита (W-Fe-Ni).

Модель биологической защиты разработана гетерогенной с засыпкой зерна железа и заливкой борированного полиэтилена для моделирования «из зерна» при получении оценки дозы, обусловленной активностью зерен. Общая высота биологической защиты – 1200 мм, диаметр – 800 мм.

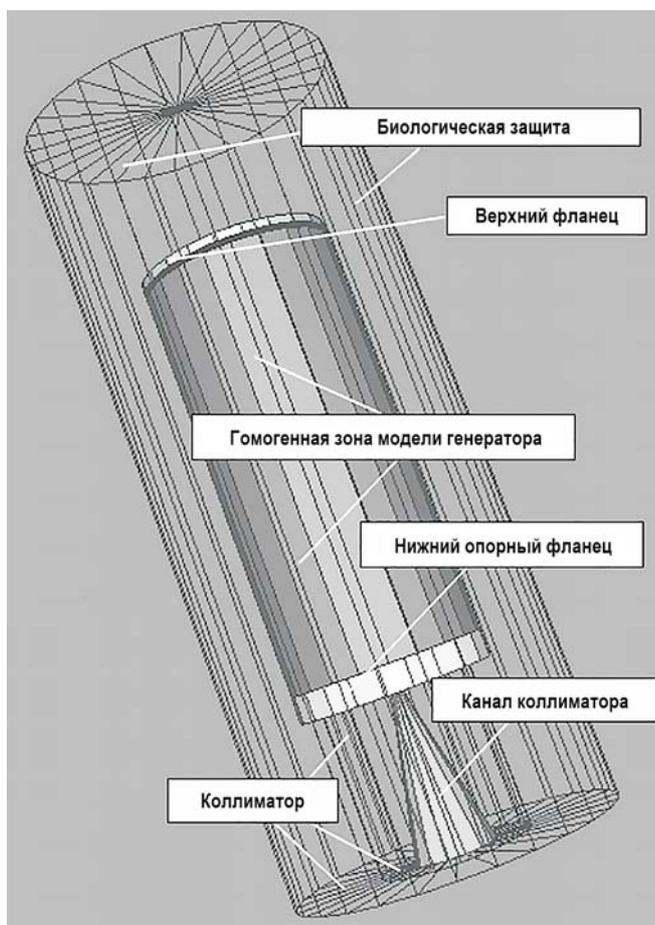


Рис. 3. Геометрия модели генератора, коллиматора и биологической защиты с полигональным отображением поверхностей

### Конформная геометрия

Для уменьшения дозовых нагрузок на персонал и улучшения радиационной обстановки в целом, в модели каньона введены откатная дверь, покрытая борированным полиэтиленом толщиной 100 мм и свинцом толщиной 20 мм, а также хранилище радиоактивных узлов коллиматора (см. рис. 1). Кроме того, в результате проведения оценок стала очевидной необходимость введения защитной стенки скошенной геометрии, перекрывающей вход в каньон. Вариант барьерной защиты скошенной геометрии предложен В.О. Сабуровым, и имеет сходство с коническим вариан-

том защиты, успешно применяемым в космических аппаратах с ядерным реактором в качестве двигателя.

Скошенная геометрия стенки (см. рис. 1) соответствует физике рассеяния нейтрона в материале защитной конструкции: фазовая функция рассеяния, индикатриса элементарного объема материала изотропна с небольшими по площади лепестками [2]. При этом существует конус возможных направлений рассеяния нейтрона (конус рассеяния), который конформно покрывает скошенную геометрию [3]–[5]. Конформная (в указанном смысле) геометрия скошенной стенки обеспечивает низкие значения дозы на входе в каньон – на порядок ниже против оценок с обычной защитной стенкой (см. рис. 1).

### Дополнение геометрии

Для оценок и последующей визуализации радиационного поля в рамках ROOT [6] в каньоне и за его пределами геометрия модели стен и моделей реальных конструкций средствами графического редактора MCNP связана со своим дополнением (теоретико-множественное дополнение) в виде тонкого слоя решетки ячеек (рис. 4).

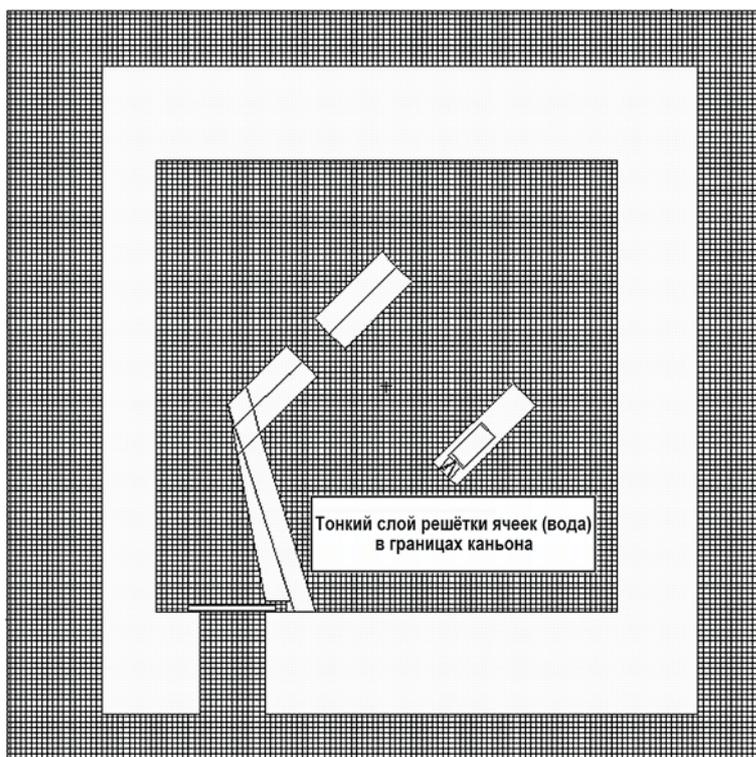


Рис. 4. Дополнение конформной геометрии в границах каньона, скошенной стенки и генератора

При этом размер ячеек 10×10 см, толщина слоя воды много меньше средней длины пробега нейтрона. (То, что понимается под «дополнением геометрии» можно пояснить на наглядном примере. Представим совокупность шаров, закрепленных на плоскости в произвольном порядке. Вырежем плоский слой через эту совокупность и построим в нем поверх всего решетку ячеек. Удалим из слоя внутренности шаров, оставляя границы. Оставшаяся решетка плоского слоя в границах совокупности (окружности) и есть дополнение указанной совокупности до полного слоя. Дополнение геометрии относительно слоя – см. в [7].)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе проведения оценок достаточность тех или иных защитных конструкций, допустимость радиационной обстановки в каньоне лучевой терапии, на входе каньон и за его пределами оценивались в соответствии с нормами радиационной безопасности для персонала групп А и Б с эффективным коэффициентом качества дозы нейтронов, равным 10; при этом допустимые дозовые нагрузки на персонал таковы: группа А – 12 мкЗв/ч, группа Б – 3 мкЗв/ч.

Оценки доз нейтронов и гамма-излучения проводились в решетке ячеек 10×10 см на высоте 110 см от поверхности пола. Оценки дозы, обусловленной наведенной активностью стен каньона и конструкционных материалов, получены при отсутствии выгорания активных компонентов материалов путем моделирования распределенного источника гамма-квантов в зонах интереса. Источник определялся в два этапа:

- определение реакций образования активных компонентов на один нейтрон на базе данных библиотек активации ACTL (MCNP);
- вычисление активности (Бк) при известном выходе нейтронов генератора на основе аналитического решения уравнений Бейтмана [8, 9], с учетом схем и постоянных распада (The Lund/LBNL Nuclear Data Search, см. табл. 1), выходов гамма-квантов, масс и долей в материалах (MCNP).

Таблица 1

**Основные реакции**

	Реакция	Период полураспада, $T_{1/2}$	Схема распада
Fe	$^{54}\text{Fe} (n, n') p \ ^{53}\text{Mn}$	3.7 г.	$\beta^+$
	$^{54}\text{Fe} (n, p) \ ^{54}\text{Mn}$	312.05 сут	$\beta^+$
	$^{54}\text{Fe} (n, d) \ ^{53}\text{Mn}$	3.7 г.	$\beta^+$
	$^{54}\text{Fe} (n, \alpha) \ ^{51}\text{Cr}$	27.7 сут	$\beta^+$
	$^{54}\text{Fe} (n, \gamma) \ ^{55}\text{Fe}$	2.74 г.	$\beta^+$
	$^{56}\text{Fe} (n, 2n) \ ^{55}\text{Fe}$	2.74 г.	$\beta^+$
	$^{56}\text{Fe} (n, n') \ ^{56}\text{Mn}$	2.57 ч	$\beta^-$
Cu	$^{63}\text{Cu} (n, 2n) \ ^{62}\text{Cu}$	9.74 мин	$\beta^+$
	$^{63}\text{Cu} (n, \alpha) \ ^{60}\text{Co}$	5.27 г.	$\beta^-$
	$^{63}\text{Cu} (n, \alpha) \ ^{60}\text{Co}$	5.27 г.	$\beta^-$
	$^{63}\text{Cu} (n, \gamma) \ ^{64}\text{Cu}$	12.7 ч	$\beta^+$
	$^{65}\text{Cu} (n, 2n) \ ^{64}\text{Cu}$	12.7 ч	$\beta^+$
	$^{65}\text{Cu} (n, n') \alpha \ ^{61}\text{Co}$	1.65 ч	$\beta^-$
	$^{65}\text{Cu} (n, p) \ ^{65}\text{Ni}$	2.52 ч	$\beta^-$
W	$^{182}\text{W} (n, 2n) \ ^{181}\text{W}$	121.2 сут	$\beta^+$
	$^{182}\text{W} (n, p) \ ^{182}\text{Ta}$	114.7 сут	$\beta^-$
	$^{182}\text{W} (n, \alpha) \ ^{179}\text{Hf}$	25.02 сут	$IT^*$
	$^{183}\text{W} (n, n') p \ ^{182}\text{Ta}$	114.7 сут	$\beta^-$
	$^{186}\text{W} (n, \gamma) \ ^{187}\text{W}$	23.72 ч	$\beta^-$

\*  $IT$  – изомерный переход

Оценки доз нейтронов и гамма-квантов определялись также положением генератора – вертикальным или горизонтальным; генератор (положение центра симметрии отмечено четырехполюсной звездочкой, см. рис. 1) в горизонтальном положении имел два направления – на вход в каньон (наихудшая радиационная обстановка

ка) и в противоположную сторону от входа.

Значения мощности дозы на входе в каньон (точка А1 на рис. 1), при различных позициях нейтронного генератора представлены в табл. 2 (мощность дозы нейтронов и гамма-квантов, Гр/ч). Значения дозы гамма-квантов в точках А1, А2, А3 (см. рис. 1) после 15-ти минут работы генератора равны 0,26, 3,41 и 2,10 мкЗв/ч соответственно.

Согласно оценкам, наведенная активность стен каньона из бетона с плотностью  $2,2 \text{ г/см}^3$  составила  $(4,5 - 45,0) \cdot 10^3$  Бк; несущих профилей транспортера –  $(8,0 - 84,0) \cdot 10^2$  Бк; опорного фланца генератора –  $(1,7 - 98,6) \cdot 10^8$  Бк; мишени генератора с медной подложкой –  $(5,3 - 21,9) \cdot 10^7$  Бк; стальных элементов поворотного механизма –  $(1,4 - 16,0) \cdot 10^3$  Бк; поворотной рамы –  $(1,7 - 19,3) \cdot 10^3$  Бк.

Таблица 2

**Мощность дозы нейтронов и гамма-квантов на входе в каньон, Зв/ч**

Толщина защитной стенки, мм	Направление оси генератора		
	вниз	на вход	от входа
400	7.09E-8	1.54E-6	8.74E-8
600	2.17E-8	3.43E-7	7.35E-8
800	1.02E-9	5.82E-8	3.74E-8
Толщина скошенной защитной стенки, мм			
400	2.17E-8	3.43E-7	7.35E-8

Дополнительно были проведены поверочные оценки активности образцов конструкционных материалов и бетонных стен в поле нейтронного генератора НГ-14. Согласно полученным данным, через 30 минут после выключения генератора НГ-14 с выходом  $0,9 \cdot 10^{10}$  н/с поглощенная доза расчетная/измеренная (мкГр/ч, ДКС-96) на поверхности образцов стен каньона (тяжелый бетон) и вольфрама составила соответственно 120/157 и 1,5/1,0.

Таким образом, была продемонстрирована эффективность применяемых технологических решений в части обеспечения защиты персонала лучевой установки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лучевая терапия онкологических заболеваний с использованием быстрых нейтронов является, пожалуй, незаслуженно забытым в последние два десятилетия методом лечения [10], который, однако, имеет существенные перспективы, в том числе в рамках развития современных информационных технологий [11]. Огромный класс новообразований, обладающих внутренними характеристиками радиорезистентности к конвенциональному излучению, может быть успешно пролечен с использованием комбинированных фотонно-нейтронных [12], электронно-нейтронных и протонно-нейтронных схем, что открывает дорогу к существенному повышению эффективности оказываемых медицинских услуг.

Проектно-изыскательные работы, направленные на определение технологических схем помещения с учётом соблюдения требований радиационной гигиены, являются важной и неотъемлемой вехой в задаче создания терапевтической установки медицинского назначения.

## Литература

1. Sood A. The Monte Carlo Method and MCNP - A Brief Review of Our 40 Year History. // Int. Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement – Applications Conference, Chicago IL – 2017 Электронный ресурс: <https://mcnp.lanl.gov/>

- pdf\_files/la-ur-17-26533.pdf (дата обращения: 17.06.2022).
2. Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика, – 2005. – Т. 5. – № 1. – С. 39-53. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2005-5-1-39-53>.
  3. Норден А.П. Краткий курс дифференциальной геометрии. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы. – 1958. – 244 с.
  4. Гермогенова Т.А. Избранные труды. Том 2. – М.: ИПМ им.М.В. Келдыша. – 2017. – 260 с.
  5. Орлов И.В. Компактные субдифференциалы и метрика Хаусдорфа. / Труды семинара по конструктивному негладкому анализу и недифференцируемой оптимизации «CNSA & NDO». 2017. Электронный ресурс: [http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/pdf/2017/OrlovI\\_30nov2017.pdf](http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/pdf/2017/OrlovI_30nov2017.pdf) (дата обращения: 17.06.2022).
  6. Brun R. Rademakers F. ROOT – An object oriented data analysis framework. // Nucl. Instrum. Meth. A. – 1997. – Vol. 389. – PP. 81-86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X).
  7. Садовничий В.А. Теория операторов: учебник для вузов. – М.: Дрофа. – 2001. – 381 с.
  8. Коровин Ю.А., Максимушкина А.В. Расчет изотопного состава и наведенной активности облученных материалов инновационных электроядерных установок. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 51-61. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.06>.
  9. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Комаров С.Ю. Атомные ядра. Основные характеристики: учебное пособие. – М.: Университетская книга. – 2010. – 334 с.
  10. Jones B. Clinical Radiobiology of Fast Neutron Therapy: What was Learned? // Front. Oncol. – 2020. – Vol. 10. – No 1537. DOI: <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.01537>.
  11. Гордон К.Б., Сабуров В.О., Корякин С.Н. и др. Расчет биологической эффективности протонной компоненты при нейтронном облучении 14.8 МэВ методами вычислительной биологии с использованием видеокарт. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. – 2022. – Т. 173. – № 2. – С. 263-267. DOI: <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2022-173-2-263-267>.
  12. Родионов М.В., Корякин С.Н., Сабуров В.О. и др. Облучение быстрыми нейтронами как способ преодоления радиорезистентности плоскоклеточного рака полости рта кошек: пилотное исследование. // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2022. – Т. 31. – № 1. – С. 115-126. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-1-115-126>.

Поступила в редакцию 22.06.2022 г.

#### Авторы

Чернуха Александр Евгеньевич, ведущий инженер  
E-mail: [chernukha903@gmail.com](mailto:chernukha903@gmail.com)

Сабуров Вячеслав Олегович, научный сотрудник  
E-mail: [vosaburov@gmail.com](mailto:vosaburov@gmail.com)

Адарова Алевтина Игоревна, инженер  
E-mail: [alya.adarova@mail.ru](mailto:alya.adarova@mail.ru)

Соловьев Алексей Николаевич, заведующий лабораторией, канд. физ.-мат. наук  
E-mail: [salonf@mrrc.obninsk.ru](mailto:salonf@mrrc.obninsk.ru)

Кизилова Яна Владимировна, инженер  
E-mail: [cobaltcorsair@yandex.ru](mailto:cobaltcorsair@yandex.ru)

Корякин Сергей Николаевич, заведующий отделом, канд. биол. наук  
E-mail: [korsernic@mail.ru](mailto:korsernic@mail.ru)

## THREE-DIMENSIONAL MODELS AND COMPLIMENTARY GEOMETRY FOR DOSE EVALUATION IN NG-24MT-BASED NEUTRON RADIOTHERAPY CABINET

Chernukha A.E. \*, Saburov V.O. \*, Adarova A.I. \*, Solovev A.N. \*, \*\*, Kizilova Yu.V. \*, Koryakin S.N. \*, \*\*

\* A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center of the Russian Ministry of Health  
4 Korolev Str, 249036 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

\*\* IATE MPhI

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

### ABSTRACT

The neutron radiation shielding problem is a comprehensive challenge which requires the strong mathematical methodology and physics background. The current work proposes neutron and residual gamma fields' estimation inside the three-dimensional model of the radiotherapy canyon together with allocated equipment. The canyon geometrical model and conformal barrier shielding implemented as complimentary grid cell layer. The results contain the Monte-Carlo based dose calculation for NG-24MT portable neutron generator realistic model. The absorbed dose estimated both during the irradiation process as well as after generator shutdown taking into account induced radioactivity inside the walls and the facility elements from stainless steel and tungsten composite. These values assessed inside the canyon and outside on the operator and medical stuff working site. The key elements of the facility structure are the gantry system, the movable positioner system, the collimation system and the neutron generator itself. Some innovative engineering solutions were proposed, including but not limited to the wall geometry and material. All the resulted estimated values show the acceptable dose rate level for A-group of personnel on their workplaces and entering the canyon after the required time gate tolerance. Overall, the research and development stage is an essential and crucial component of project design and engineering, and the radiation hygiene properties are pivotal for successful implementation of radiation treatment procedures planned on this machine. Overall, the fast neutron therapy offers its technological advances while its noteworthy biological efficiency serves the higher tumor kill probability, providing the improved patients' survival and higher quality of life.

**Key words:** model, Monte Carlo method, induced activity, complimentary geometry, radiation hygiene.

### REFERENCES

1. Sood A. The Monte Carlo Method and MCNP – A Brief Review of Our 40 Year History. *Int. Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement – Applications Conference, Chicago IL, July, 2005*. Available at: [https://mcnp.lanl.gov/pdf\\_files/la-ur-17-26533.pdf](https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-17-26533.pdf) (accessed Jun. 17, 2022).
2. Tuchin V.V. Optical biomedical diagnostics. *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya seriya. Seriya Fizika*. 2005, v. 5, no 1, pp. 39-53; DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2005-5-1-39-53> (in Russian).
3. Norden A.P. *A Short Course of Differential Geometry*. Moscow. Gosudarstvennoe Izdatel'stvo Fiziko-Matematicheskoy Literatury Publ., 1958, 244 p. (in Russian).
4. Hermogenova T.A. Selected Works. Volume 2. Moscow. IPM im. M.V. Keldysha Publ., 2017, 260 p. (in Russian).

5. Orlov I.V. Compact Subdifferentials and Hausdorff Metrics. *Proc. of the Seminar on Constructive Non-Smooth Analysis and Non-Differentiable Optimization «CNSA & NDO»*, 2017. Available at: [http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/pdf/2017/OrlovI\\_30nov2017.pdf](http://www.apmath.spbu.ru/cnsa/pdf/2017/OrlovI_30nov2017.pdf) (accessed Jun. 17, 2022) (in Russian).
6. Brun R., Rademakers F. ROOT – An Object Oriented Data Analysis Framework. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1997, v. 389, pp. 81-86; DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X).
7. Sadovnichy V.A. *Theory of Operators: a Textbook for Universities*. Moscow. Drofa Publ., 200, 381 p. (in Russian).
8. Korovin Yu.A., Maksimushkina A.V. Calculation of Isotopic Composition and Induced Activity of Irradiated Materials of Innovative Electronuclear Installations. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 2, pp. 51-61; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.06> (in Russian).
9. Varlamov V.V., Ishhanov B.S., Komarov S.Yu. *Atomic Nuclei. Main Properties: Textbook*. Moscow. Universitetskaya Kniga Publ., 2010, 334 p. (in Russian).
10. Jones B. Clinical Radiobiology of Fast Neutron Therapy: What was Learnt? *Front. Oncol.* 2020, v. 10, no. 1537; DOI: <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.01537>.
11. Gordon K.B., Saburov V.O., Koryakin S.N., Gulidov I.A., Fatkhudinov T.Kh., Arutyunyan I.V., Kaprin A.D., Solov'ev A.N. Calculation of the Biological Efficiency of the Proton Component from 14.8 MeV Neutron Irradiation in Computational Biology with Help of Video Cards. *Byulleten' Eksperimental'noj Biologii i Meditsiny*. 2022, v. 173, no. 2, pp. 263-267; DOI: <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2022-173-2-263-267> (in Russian).
12. Rodionov M.V., Koryakin S.N., Saburov V.O., Moiseev A.S., Petrova Yu.V., Ivanov S.A., Shegay P.V., Kaprin A.D. Fast Neutrons Irradiation as a Way to Overcome Feline Squamous Cell Carcinoma Radioresistance: a Pilot Study. *Radiatsiya i Risk. Byulleten' Natsional'nogo Radiatsionno-Epidemiologicheskogo Registra*. 2022, v. 31, no. 1, pp. 115-126; DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-1-115-126> (in Russian).

#### Authors

Chernukha Alexander Evgenievich, Leading Engineer

E-mail: [chernukha903@gmail.com](mailto:chernukha903@gmail.com)

Saburov Vyacheslav Olegovich, Researcher

E-mail: [vosaburov@gmail.com](mailto:vosaburov@gmail.com)

Adarova Alevtina Igorevna, Engineer

E-mail: [alya.adarova@mail.ru](mailto:alya.adarova@mail.ru)

Solovev Aleksey Nikolaevich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Phys.-Math.).

E-mail: [salonf@mrrc.obninsk.ru](mailto:salonf@mrrc.obninsk.ru)

Kizilova Yana Vladimirovna, Engineer

E-mail: [cobaltcorsair@yandex.ru](mailto:cobaltcorsair@yandex.ru)

Koryakin Sergey Nikolatvich, Head of Department, Cand. Sci. (Biol.).

E-mail: [korsernic@mail.ru](mailto:korsernic@mail.ru)