

ХИМИЧЕСКАЯ ДОЗИМЕТРИЯ БОРОЗАХВАТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА РАССЕЯННОМ ПУЧКЕ НЕЙТРОНОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КАНАЛА РЕАКТОРА ВВР-ц

**Чернуха А.Е.¹, Соловьев А.Н.^{1,2}, Кузнецов Н.В.³, Корякина Е.В.¹, Кочнов О.Ю.³,
Васильев А.В.⁴, Корякин С.Н.^{1,2}**

¹ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России
249036, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, 4

² ИАТЭ НИЯУ МИФИ

249039, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1

³ АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»

249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш., 6

⁴ ООО «Центр высокотехнологичной диагностики»

115230, г. Москва, Варшавское ш., д. 46



Исследовательские реакторы позволяют реализовывать широкий класс проектов, включая осуществление радиобиологических экспериментов в различных диапазонах физических условий, благодаря нейтронному спектру в каждом из отводимых каналов. Представлены расчетно-теоретические данные и результаты экспериментальных дозиметрических исследований, выполненных с использованием химического дозиметра Фрикке с добавлением борной кислоты для получения раствора с заданной концентрацией ^{10}B . Расчеты с целью оценки покомпонентного вклада в дозу выполнялись с применением программного обеспечения Монте-Карло моделирования общего назначения. Экспериментальная работа проводилась на горизонтальном экспериментальном канале № 1 реактора ВВР-ц, обеспечивающем смешанное гамма-нейтронное поле излучения, в том числе с компонентами доз от быстрых и тепловых нейтронов. Результаты исследования показывают удовлетворительное соответствие расчетных и измеренных значений исследуемых величин и обуславливают необходимость и потребность в проведении дальнейших исследований, направленных на корректировку экспериментальных методов дозиметрии смешанных пучков. В целом, полученные результаты представляют практический интерес как мультидисциплинарная основа проведения разнородных физико-дозиметрических и радиобиологических экспериментов в смешанных радиационных полях, а также являются неотъемлемым звеном соз-

© Чернуха А.Е., Соловьев А.Н., Кузнецов Н.В., Корякина Е.В., Кочнов О.Ю., Васильев А.В.,
Корякин С.Н., 2024

дания перспективного медицинского комплекса нейтронной и нейтронозахватной терапии на действующем реакторе ВВР-ц.

Ключевые слова: моделирование, метод Монте-Карло, химическая дозиметрия, реакторные нейтроны, нейтронозахватная терапия

Для цитирования: Чернуха А.Е., Соловьев А.Н., Кузнецов Н.В., Корякина Е.В., Кочнов О.Ю., Васильев А.В., Корякин С.Н. Химическая дозиметрия борзахватных процессов на рассеянном пучке нейтронов горизонтального канала реактора ВВР-ц. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 170 – 181. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.14>

ВВЕДЕНИЕ

Использование плотноионизирующих излучений [1], в частности, нейтронов [2, 3], в лучевой терапии открывает огромные перспективы в лечении онкологических больных [4]. Еще более значительным эффектом могут обладать бинарные технологии воздействия [5], при которых широко эксплуатируются как свойства самих химических соединений [6, 7], так и спектр возникающих физических событий [8, 9] захвата, возбуждения и последующей дополнительной ионизации вещества. Нейтронозахватная терапия с использованием подобных технологий [10] на исследовательских реакторах [11], установках на базе ускорителей [12, 13], развитие систем доставки нейтронных пучков [14] позволяют получать поля необходимого качества для организации лечебной деятельности. В этой связи не теряет значимости проект медицинского комплекса нейтронной терапии на базе реактора ВВР-ц (АО «НИФХИ им. Л.Я. Карлова») с учетом уже имеющегося опыта эксплуатации медицинского блока на реакторе БР-10 [15]. Возросший интерес к проведению нейтронозахватной терапии на этом реакторе делает актуальным проведение и радиобиологических исследований на горизонтальном канале реактора ВВР-ц, в том числе на животных с модельными опухолями при введении в очаг поражения нуклида бора.

Исследование посвящено вопросам изучения эффективности вклада в дозу захватной компоненты от ^{10}B с использованием химических дозиметров Фрикке путем сравнительного анализа результатов математического моделирования и натурального эксперимента. Работа выполнена на горизонтальном экспериментальном канале №1 (ГЭК-1) в модифицированном спектральном поле излучения реактора в рабочем режиме. Целью работы являлась верификация поглощенных доз. Задачами работы являлись расчетно-теоретическое моделирование поглощенных доз, практическая отработка технологии облучения на специфическом пучке, включая оценку времени экспозиции и эффекты усиления дозы нейтронов за счет захватных событий, оценка потенциала использования канала для последующих радиобиологических испытаний и перспективного использования в лучевой терапии онкологических заболеваний.

МЕТОДЫ

Средства химической дозиметрии

Наибольшее распространение в химической дозиметрии получила водная система на основе неорганических соединений – ферросульфатный дозиметр, предложенный еще

в 1927 – 1929 гг. Г. Фрикке и С. Морзе [16]. Она представляет собой водный раствор железо-аммонийных квасцов (соль Мора) либо раствор сульфата двухвалентного железа в серной кислоте с добавлением хлорида натрия, насыщенный воздухом. При действии на раствор ионизирующего излучения происходит окисление ионов $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ по механизму радиолитического превращения. Радиационно-химический выход реакции пропорционален поглощенной дозе. При приготовлении химических дозиметров необходимо использовать реактивы марки «х.ч.» (химически чистый) и трижды перегнанную дистиллированную воду, хранить дозиметры в посуде из кварцевого стекла для снижения влияния примесей. Ферросульфатный дозиметр Фрикке и в настоящее время остается наиболее используемым и надежным из всех химических дозиметров. Для анализа образующихся при облучении ионов Fe^{3+} применяется спектрофотометрический метод по поглощению света этими ионами при заданной длине волны. Эксплуатационные характеристики этого химического дозиметра таковы, что он может использоваться в качестве образцового дозиметра при мощности дозы до $1.5 \cdot 10^4$ Гр/ч в диапазоне доз 5 сГр – 2 кГр, но наиболее удобно его применять для диапазона доз 10 – 400 Гр [17].

В работе использовали химический дозиметр с конечными концентрациями сульфата железа (II) – $3 \cdot 10^{-3}$ М (навеска 550 мг на 1 л раствора), серной кислоты – 0.8 М (объем концентрированной кислоты 22 мл на 1 л раствора), хлорида натрия – 10^{-3} М (55 мг на 1 л раствора). Раствор готовили с использованием тридистиллированной воды. После приготовления в него добавляли навески борной кислоты, доводя концентрацию ^{10}B в растворе до 60 и 180 мкг/мл.

Математическое моделирование эксперимента

Моделирование формирования дозного поля и боронейтронозахватных процессов проводили с использованием среды Монте-Карло моделирования общего назначения MCNP (Monte Carlo N-Particle code [18]) версии 5. Среда реализует перенос нейтронов, фотонов и электронов со свободными условиями на внешней границе или связанных нейтроно-фотоно-электронных N-ансамблей [19]. Спектральные характеристики реактора в канале ГЭК-1 получены по каналам персональной коммуникации. Нормировка расчетных значений проводилась на основании предварительных экспериментальных данных активационного анализа в канале ГЭК-1, получение которых аналогично методикам, предложенным в [20, 21], плотность потока нейтронов с энергий более 0.5 МэВ на выходе из канала составила $4 \cdot 10^9$ см⁻²с⁻¹, мощность дозы γ -излучения – около 10 Р·с⁻¹. При разработке расчетной модели эксперимента полагали, что

- остаточная активность железа в процессе эксперимента незначительно влияет на дозу рассеянного пучка и потому во внимание не принимается;
- геометрия модели достаточно точно отображает реальное рассеяние нейтронов и γ -квантов на железе конструктивных элементов;
- возможные отклонения центра графитового куба от оси пучка канала ГЭК-1 незначительны;
- положение фантома с водой (мишень) вдоль отводного канала оптимизировали как по времени экспозиции (расстояние от центра графитового куба), так и дозы нейтронов и γ -квантов в прямой видимости горизонтального канала;
- при расчете захватного компонента дозы нейтронов учитывали процесс термализации нейтронов в воде, производили нормировку расчетов на поток тепловых нейтронов,

измеренный активационным методом по кадмиевому отношению образцов золотой фольги, а также нормировку на мощность реактора.

В качестве оценки использовали стандартное tally f6. Дисперсия расчетных значений находилась в диапазоне 1 – 3%.

Экспериментальные исследования на ГЭК-1

Формирующееся на выходе канала радиационное поле имеет значительный вклад γ -излучения, поэтому для обеспечения проведения комплекса физико-дозиметрических исследований в дозном поле с заданными характеристиками спектра необходимо было создать открытый отводной канал длиной ~ 1 м, расположенный под углом 45° к оси канала ГЭК-1, выполненный вместе с защитой из пустотелых толстостенных железных конструкций, заполненных парафином. Для формирования поля смешанного облучения, включающего в себя γ -кванты, быстрые и тепловые нейтроны, на пересечении осей отводного и горизонтального каналов устанавливали симметрично графитовый куб $13 \times 13 \times 13$ см ребром к оси ГЭК-1 и гранью к оси отводного канала. На пролете основного пучка частиц размещали свинцовую ловушку размером $30 \times 30 \times 30$ см. Дополнительная защита от γ - и нейтронного излучений представляла собой две стенки (одна из которых находилась на оси отводного канала), выполненных из аналогичных железных конструкций и расположенных на расстоянии 1,5 м от обреза отводного канала. На рисунке 1а представлена фотография отводного канала с защитой, на рис. 1б – схематичное представление модели эксперимента, наружное пространство заполнено воздухом.

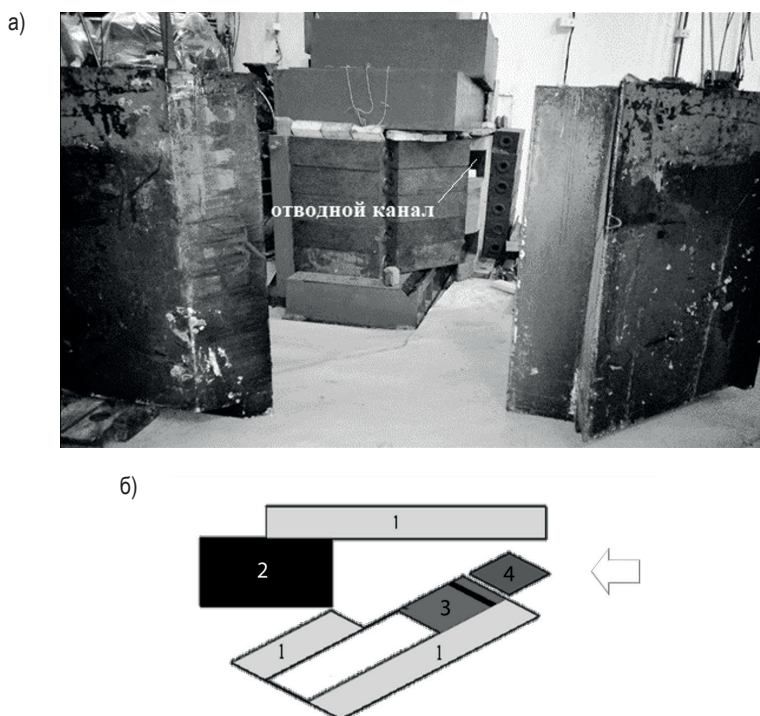


Рис. 1. Фотография геометрии отводного канала и защитных блоков (а); схема эксперимента (б): 1 – железные пластины; 2 – свинцовая ловушка; 3 – графитовый куб; 4 – фантом для расположения объектов, заполненный водой; объемной стрелкой показана ось пучка ГЭК-1

Подготовленный согласно описанию химический дозиметр Фрикке наливали по 5 мл в пробирки типа Эппендорф (диаметр 16 мм, высота 55 мм) и располагали в фантоме (7×12×20 см), изготовленном путем объемной аддитивной печати из ABS-пластика (акрилонитрил-бутадиен-стирол) и заполняемом водой. Пробирки располагали на расстоянии 3,5 см от передней стенки фантома симметрично по три пробирки в одном ряду (рис. 2). Фантом дистанционно устанавливали в 2 см от соответствующей грани графитового куба в створе с его нижним обрезом.

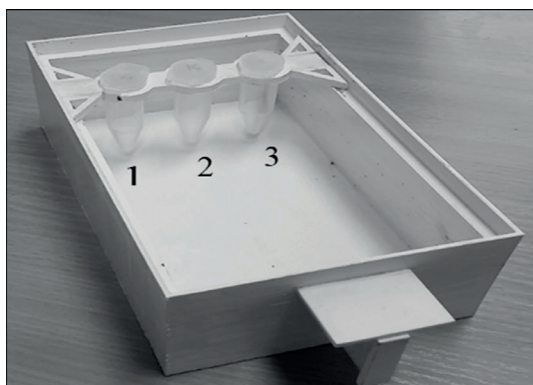


Рис. 2. Расположение и нумерация объектов в фантоме

Химические дозиметры каждого состава облучали в представленной геометрии отводного канала в трех повторениях по три пробирки, продолжительность каждого облучения составляла 30 мин. Измерения оптической плотности облученных растворов проводили на спектрофотометре СФ-56 при длине волны 304 нм и ширине светового луча 1 нм в кюветках из кварцевого стекла с шириной поглощающего слоя 1 см. Контрольным раствором для измерения служила необлученная дозиметрическая система того же состава. Погрешность измерений оптической плотности не превышала 4%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дизайн канала и математическое моделирование эксперимента позволило обеспечить различные расчетные компоненты доз в каждой из облученных пробирок в предлагаемой геометрии в рамках одного эксперимента. На рисунке 3а представлено оцененное дозное поле по фантому в плоскости размещения пробирок от быстрой нейтронной компоненты, на рис. 3б – профиль поглощенной дозы в центральном сечении, обусловленный наличием захвата тепловых нейтронов атомами ^{10}B при концентрации 60 мкг/мл.

В таблице 1 представлены расчетные и экспериментальные данные по облучению химического дозиметра Фрикке в условиях отсутствия борной кислоты и при ее наличии в установленных концентрациях.

Дизайн эксперимента был построен таким образом, чтобы в пробирках № 1 и № 3 наблюдался одинаковый захват тепловых нейтронов на ^{10}B , а пробирка № 2 имела бы чуть более высокий показатель захватной дозы. При этом трехкратное увеличение концентрации бора в растворе должно было приводить к такому же трехкратному увеличению вклада в дозу от захватных событий.

Как было показано ранее [22], прямое использование чистых или модифицированных дозиметров Фрикке на реакторных пучках для измерения поглощенных доз при их сличении с методами активационного анализа может давать результаты в пределах погрешности 20–30%. При этом сами измерения оптической плотности растворов дозиметра обладают отличной воспроизводимостью, а чувствительность раствора при сравнении с эталонным излучением ^{60}Co составляет 60% в непрерывном и 40% в импульсном режимах [22]. Однако нельзя не отметить то, что в работе [22] исследования проводили на реакторе

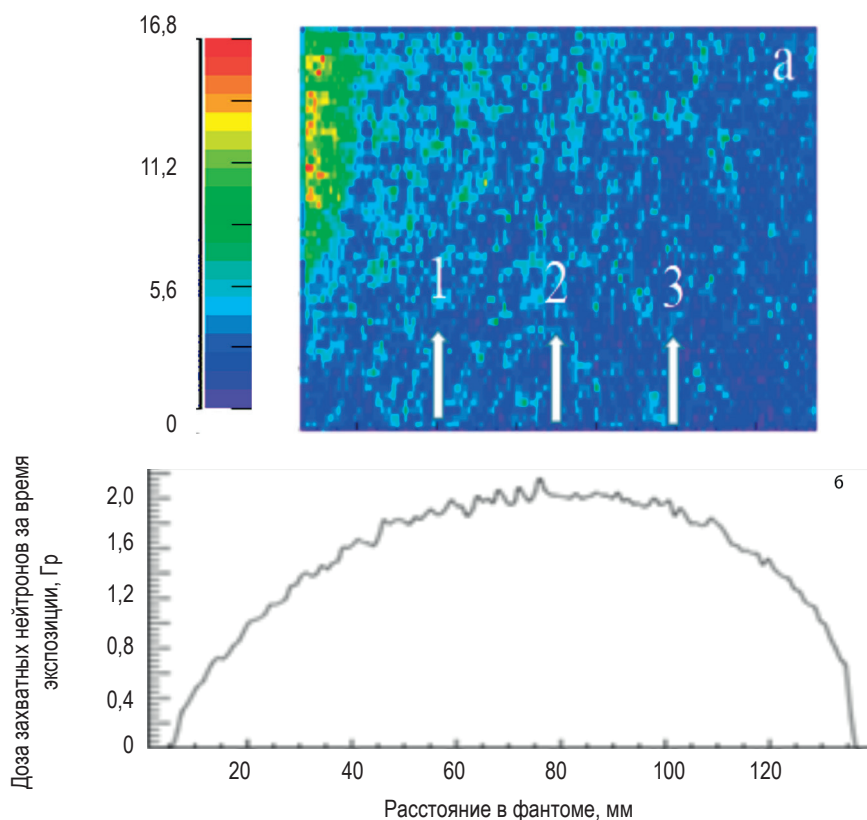


Рис. 3. Расчетные значения доз в двухмерном поле в центральной плоскости установки пробирок, по осям – мм (а); осевое сечение значения дополнительного вклада от нейтронозахватных событий (б). Значения поглощенных доз приведены в Гр за 30 минут экспозиции

Таблица 1

Расчетные и измеренные значения поглощенных доз излучения рассеянного пучка ГЭК-1 для каждой позиции пробирки в фантоме

Компоненты дозы	Расчетные значения дозы, Гр			Измеренные значения дозы, Гр		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
Гамма-излучение	3,0	2,5	1,5	–	–	–
Быстрые нейтроны	4,7	3,1	2,8	–	–	–
Быстрые нейтроны + гамма	7,7	5,6	4,3	6,1	5,1	2,1
60 мкг (¹⁰ B)/мл						
Захват тепловых нейтронов на ¹⁰ B (60 мкг/мл)	1,5	1,7	1,5	–	–	–
Суммарная доза от всех компонентов	9,2	7,3	5,8	8,5	5,3	2,3
180 мкг (¹⁰ B)/мл						
Захват тепловых нейтронов на ¹⁰ B (180 мкг/мл)	4,5	5,1	4,5	–	–	–
Суммарная доза от всех компонентов	12,2	10,7	8,8	11,0	7,0	2,7

БАРС-6, при этом вклад γ -излучения составлял около 5%. В работе оцененный в модели вклад γ -излучения с учетом вышеописанных методов перенормировки потока в местах расположения пробирок составлял 34–44%. Таким образом, главным выводом исследования является демонстрация возможности качественной оценки дополнительного вклада от захвата на ^{10}B с использованием модифицированного химического дозиметра Фрикке, при этом трехкратный рост концентрации ^{10}B в растворе обеспечивает рост интегральной измеренной дозы в диапазоне от 17 до 35% в зависимости от места расположения пробирки с раствором против оцененного в модели прироста интегральной дозы от 32 до 51%. Основной причиной такого различия, по всей видимости, является вклад компонентов γ -излучения, причем как от рассеянного излучения на графитовом блоке, так и неопределенности в измерении начального потока γ -излучения канала ГЭК-1. Дополнительную неопределенность вносит непосредственно эффективность регистрации химическим дозиметром всего спектра короткопробежных вторичных частиц, возникающих в результате реакций на ^{10}B . Таким образом, настоящая работа обуславливает необходимость продолжения исследований, направленных на всестороннюю верификацию пучка исследуемого реактора, обозначает потребность в модификации спектральных характеристик под контролем расчетных модельных данных, а также открывает дорогу к дальнейшему использованию методов нейтронозахватной терапии в радиобиологических исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие современных информационных технологий, направленных на моделирование физических [19] и радиобиологических [23] характеристик ионизирующего излучения, позволяет успешно прогнозировать и предсказывать ожидаемые наблюдаемые эффекты с достаточной достоверностью [24]. В статье приведены результаты сравнения модельных и измеренных значений поглощенных доз, полученных с помощью модифицированного дозиметра Фрикке, в спектре смешанного гамма-нейтронного излучения горизонтального канала ГЭК-1 реактора ВВР-ц. Можно отметить удовлетворительное совпадение расчетных и измеренных значений по качественным характеристикам, в то время как количественные измерения обозначают потребность в продолжении исследований, в первую очередь, с целью снижения погрешности измерений. В целом, интеграция средств и методов вычислительной техники в задачи экспериментальной дозиметрии показывает существенный потенциал, без реализации которого невозможно решить вопросы дальнейшего использования исследовательского реактора ВВР-ц в медицинской практике.

Коллектив авторов выражает благодарность Литяеву В. М. за идеологию расчетного эксперимента, Маркиной М.А. за помощь в осуществлении измерений.

Литература

1. Соловьев А.Н., Гулидов И.А., Мардынский Ю.С., Ульяненко С.Е., Галкин В.Н., Каприн А.Д. Современные тенденции в мире частиц. Краткие итоги конференции РТСОГ56. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017. – Т. 57. – № 5. – С. 548–550. Электронный ресурс https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30291010_82832162.pdf (дата доступа 27.07.2023).
2. Ульяненко С.Е., Корякин С.Н., Успенский С.А., Хабаров В.Н. XV Международный конгресс по нейтронозахватной терапии: подведение итогов и взгляд в будущее. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2013. – Т. 53. – № 1. – С. 110. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869803113010165>

3. *Gulidov I., Koryakin S., Fatkhudinov T., Gordon K.* External beam fast neutron therapy: Russian clinical experience and prospects for further development. // *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*. – 2023. – Vol. 115. – № 4. PP. 821–827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2022.11.004>
4. *Каприн А.Д., Ульяненко С.Е.* Адронная терапия: точки развития. // *Медицина: целевые проекты*. – 2016. – № 23. – С. 56–59.
5. *Бушманов А.Ю., Шейно И.Н., Липенгольц А.А., Соловьев А.Н., Корякин С.Н.* Перспективы применения комбинированных технологий в протонной терапии злокачественных новообразований. // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2019. – Т. 64. – № 3. С. 11–18. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5cf237bf846b67.57514871
6. *Корякин С.Н., Иванов П.Л., Хабаров В.Н., Ядровская В.А., Исаева Е.В., Бекетов Е.Е., Зеленецкий А.Н., Успенский С.А., Селянин М.А., Ульяненко С.Е.* Синтез и использование для нейтронозахватной терапии полихелатов гиалуроновой кислоты и бора-10. // *Химико-фармацевтический журнал*. – 2013. – Т. 47. – № 6. – С. 14–18. DOI: <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2013-47-6-14-18>
7. *Шейно И.Н., Ижевский П.В., Липенгольц А.А., Кулаков В.Н., Вагнер А.Р., Сухих Е.С., Варлачев В.А.* Разработка бинарных технологий лучевой терапии злокачественных новообразований: состояние и проблемы. // *Бюллетень сибирской медицины*. – 2017. – Т. 16. – № 3. – С. 192–209. DOI: <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2017-3-192-209>
8. *Koryakin S.N., Yadrovskaya V.A., Beketov E.E., Isaeva E.V., Ulyanenko S.E., Uspenskiy S.A., Khabarov V.N., Selyanin M.A.* The study of hyaluronic acid compounds for neutron capture and photon activation therapies. // *Central European Journal of Biology*. – 2014. – Vol. 9. – № 10. – PP. 922–930. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11535-014-0329-7>
9. *Ульяненко С.Е., Соловьев А.Н., Литяев В.М., Федоров В.В., Корякин С.Н.* Математическое моделирование фотон- и протонно-захватной терапии с использованием препаратов золота. // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2016. – Т. 61. – № 5. – С. 59–64.
10. *Barth R.F., Mi P., Yang W.* Boron delivery agents for neutron capture therapy of cancer. // *Cancer Commun*. – 2018. – Vol. 38. – Iss. 1. – PP. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40880-018-0299-7>
11. *Кураченко Ю.А., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Критерии качества нейтронных пучков для лучевой терапии. // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. – 2008. – № 1. – С. 139–149.
12. *Kreiner A.J., Baldo M., Bergueiro J.R., Cartelli D., Castell W., Thatar Vento V., Gomez Asoia J., Mercuri D., Padulo J., Suarez Sandin J.C., Erhardt J., Kesque J.M., Valda A.A., Debray M.E., Somacal H.R., Igarzabal M., Minsky D.M., Herrera M.S., Capoulat M.E., Gonzalez S.J., del Grosso M.F., Gagetti L., Suarez Anzorena M., Gun M., Carranza O.* Accelerator-based BNCT. // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2014. – Vol. 88. – PP. 185–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.064>
13. *Aleynik V., Bashkirtsev A., Kanygin V., Kasatov D., Kuznetsov A., Makarov A., Schudlo I., Sorokin I., Taskaev S., Tiunov M.* Current progress and future prospects of the VITA based neutron source. // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2014. – Vol. 88. – PP. 177–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.132>
14. *Farhooda B., Samadianb H., Ghorbanic M., Zakariaeed S.S., Knaupe C.* Physical, dosimetric and clinical aspects and delivery systems in neutron capture therapy. // *Reports of practical oncology and radiotherapy*. – 2018. – Vol. 23. – PP. 462–473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2018.07.002>
15. *Mardynsky Y.S., Sysoyev A.S., Andreyev V.G., Gulidov I.A.* Preliminary results of clinical application of reactor fast neutrons in radiation and combined therapy of patients with laryngeal carcinoma. // *Strahlenther Onkol*. – 1991. – Vol. 167. – № 3. – PP. 169–171. PubMed: 1901671.
16. *Лукаев А.К.* Дозиметрия в радиационной химии. – М.: Наука, 1975. – 312 с.
17. *Соколова Н.К.* Химические методы дозиметрии в радиобиологии. – М.: Атомиздат, 1972. – 120 с.
18. *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/TechReport_2017_LANL_LA-UR-17-25633_Sood.pdf (дата доступа: 27.07.2023).

19. Чернуха А.Е., Сабуров В.О., Адарова А.И., Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Корякин С.Н. Трехмерные модели и дополнение геометрии для оценки доз в лучевой кабине нейтронной терапии на базе генератора НГ-24МТ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 3. – С. 158–167. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.14>

20. Лычагин А.А., Ульяненко Л.Н., Корякин С.Н., Трошина М.В., Ульяненко С.Е. Определение поглощенной дозы в радиационных полях нейтронного генератора. // Медицинская техника. – 2018. – Т. 311. – № 5. – С. 21–24.

21. Бак М.А., Романов Ю.Ф. Измерение потока тепловых нейтронов по одновременной активации двух различных детекторов. // Атомная энергия. – 1969. – Т. 24. – № 6. – С. 550–552.

22. Потетня В.И., Корякина Е.В., Трошина М.В., Корякин С.Н. Применение химического дозиметра Фрикке и его модификаций для дозиметрии гамма-нейтронного излучения импульсного реактора. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 2. – С. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.10>

23. Гордон К.Б., Сабуров В.О., Корякин С.Н., Гулидов И.А., Фатхудинов Т.Х., Арутюнян И.В., Каприн А.Д., Соловьев А.Н. 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>

24. Solovov A., Troshina M., Pikalov V., Saburov V., Chernukha A., Moiseev A., Koryakina E., Potetnya V., Koryakin S., Soldatov A., Kaprin A. In vitro modified microdosimetric kinetic model-based predictions for B14-150 cells survival in 450 MeV/u carbon ion beam with aluminum ridge filter for biologically optimized spread-out Bragg peak. // Biomedical Physics & Engineering Express. – 2022. – Vol. 8. – № 3. – P. 035030. DOI: <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac414f>

Поступила в редакцию 01.11.2023

Авторы

Чернуха Александр Евгеньевич, ведущий инженер,

chernukha903@gmail.com

Соловьев Алексей Николаевич, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.,

E-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru

Кузнецов Никита Васильевич, начальник участка дозиметрии и радиационного контроля реактора и производства радиофармпрепаратов,

E-mail: kuznetsov@karpovipc.ru

Корякина Екатерина Владимировна, старший научный сотрудник, к.биол.н.,

E-mail: ek-koryakina@mail.ru

Кочнов Олег Юрьевич, главный инженер, профессор, д.т.н.,

E-mail: kochnov@karpovipc.ru

Васильев Андрей Викторович, главный инженер,

E-mail: AndreViktorVasilyev@rosatom.ru

Корякин Сергей Николаевич, заведующий отделом, канд. биол. наук,

E-mail: korsernic@mail.ru

UDC 53.044:519.856.3

Chemical Dosimetry with Boron Compounds in Mixed Neutron Fields on Horizontal Channel of VVR-c Reactor**Chernukha A.E.¹, Solovov A.N.^{1,2}, Kuznetsov N.V.³, Koryakina E.V.¹, Kochnov O.Yu.³, Vasilyev A.V.⁴, Koryakin S.N.^{1,2}**¹ A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation,

4 Korolev Str, 249036 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

² IATE MEPhI,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

³ Karpov Research and Development Institute for Physical Chemistry,

6 Kievskoye Sh., 249035 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

⁴ High-tech diagnostics centre,

46 Varshavskoe Sh., 115230 Moscow, Russia

Abstract

The widespread application of research reactors provides multiple opportunities, including radiobiological studies within wide range of physical properties due to specific energy spectrum in each research channels. The article contains numerically estimated theoretical predictions and the experimentally obtained results for chemical dosimeter Fricke with addition of boron acid to perform the evaluation using given ¹⁰B concentration. The simulation used the general-purpose Monte-Carlo code to estimate the dose influence from each component. The experiments were taken on the horizontal experimental channel No. 1 of VVR-c reactor at Karpov Research and Development Institute for Physical Chemistry, Obninsk, Russia, which provided mixed gamma-neutron field together with fast and thermal neutron components. The research found the satisfactory correspondence between simulated and measured values, but also the requirements and necessity of further studies was demonstrated in order to adjust experimental dosimetry methods for mixed field evaluation. Generally, the obtained results are of practical use as multidisciplinary basis for multiple physical- and radiobiological-oriented studies in the mixed radiation field, and are an integral part in future opportunities aimed on the building medical-oriented facility for neutron and neutron-capture techniques on the VVR-c reactor.

Key words: simulation, Monte-Carlo method, chemical dosimetry, reactor neutrons, neutron-capture therapy

For citation: Chernukha A.E., Solovov A.N., Kuznetsov N.V., Koryakina E.V., Kochnov O.Yu., Vasilyev A.V., Koryakin S.N. Chemical Dosimetry with Boron Compounds in Mixed Neutron Fields on Horizontal Channel of VVR-c Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 1, pp. 170–181;

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.14> (in Russian).**References**

1. Soloviev A.N., Gulidov I.A., Mardynsky Yu.S., Ulyanenko S.E., Galkin V.N., Kaprin A.D. Modern trends in the world of particles. Summary results of PTCOG56 conference. *Radiation Biology. Radioecology = Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2017, vol. 57, no. 5, pp. 548–550. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30291010_82832162.pdf (accessed date Jul. 27, 2023) (in Russian).

2. Ulyanenko S.E., Koryakin S.N., Uspenskiy S.A. Khabarov V.N. XV international congress on neutron-capture therapy: summarizing and looking to the future. *Radiation Biology. Radioecology = Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2013, vol. 53, no. 1, pp. 110–112 (in Russian).

DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869803113010165>

3. Gulidov I., Koryakin S., Fatkhudinov T., Gordon K. External beam fast neutron therapy: Russian clinical experience and prospects for further development. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*. 2023, vol. 115, no. 4, pp. 821 – 827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2022.11.004>
4. Kaprin A.D., Ulyanenko S.E. Hadron therapy: key points. *Medicina: celevye proekty*. 2016, no. 23, pp. 56–59 (in Russian).
5. Bushmanov A.Yu., Sheino I.N., Lipengolts A.A., Solovov A.N., Koryakin S.N. Prospects of proton therapy combined technologies in the treatment of cancer. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 11 – 18. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5cf237bf846b67.57514871 (in Russian).
6. Koryakin S.N., Yadrovskaya V.A., Isaeva E.V., Beketov E.E., Ivanov P.L., Zelenetskii A.N., Khabarov V.N., Uspenskii S.A., Selyanin M.A., Ulyanenko S.E. Synthesis and use of hyaluronic acid-10B polymeric chelates for neutron-capture therapy. *Pharmaceutical chemistry journal*. 2013, vol. 47, no. 6, pp. 299 – 302. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11094-013-0947-9>
7. Sheino I.N., Izhevskij P.V., Lipengol'ts A.A., Kulakov V.N., Vagner A.R., Suhiih E.S., Varlachev V.A. Development of Binary Technologies for Radiation Therapy of Malignant Neoplasms: Status and Problems. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2017, vol. 16, no. 3, pp. 192 – 209. DOI: <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2017-3-192-209> (in Russian).
8. Koryakin S.N., Yadrovskaya V.A., Beketov E.E., Isaeva E.V., Ulyanenko S.E., Uspenskiy S.A., Khabarov V.N., Selyanin M.A. The study of hyaluronic acid compounds for neutron capture and photon activation therapies. *Central European Journal of Biology*. 2014, vol. 9, no. 10, pp. 922 – 930. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11535-014-0329-7>
9. Ulianenko S.E., Soloviev A.N., Lityaev V.M., Fedorov V.V., Koryakin S.N. Monte-carlo simulation of photon and proton capture therapy with gold compounds. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2016, vol. 61, no. 5, pp. 59 – 64 (in Russian)
10. Barth R.F., Mi P., Yang W. Boron delivery agents for neutron capture therapy of cancer. *Cancer Commun*. 2018. 38:35. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40880-018-0299-7>
11. Kurachenko Yu. A., Kazanskiy Yu. A., Matusevich E.S. Neutron therapy beams performance criteria. *Izvestia Wysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2008, no. 1, pp. 139 – 149 (in Russian).
12. Kreiner A.J., Baldo M., Bergueiro J.R., Cartelli D., Castell W., Thatar Vento V., Gomez Asoia J., Mercuri D., Padulo J., Suarez Sandin J.C., Erhardt J., Kesque J.M., Valda A.A., Debray M.E., Somacal H.R., Igarzabal M., Minsky D.M., Herrera M.S., Capoulat M.E., Gonzalez S.J., del Grosso M.F., Gagetti L., Suarez Anzorena M., Gun M., Carranza O. Accelerator-based BNCT. *Applied Radiation and Isotopes*. 2014, vol. 88, pp. 185 – 189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.064>
13. Aleynik V., Bashkirtsev A., Kanygin V., Kasatov D., Kuznetsov A., Makarov A., Schudlo I., Sorokin I., Taskaev S., Tiunov M. Current progress and future prospects of the VITA based neutron source. *Applied Radiation and Isotopes*. 2014, vol. 88, pp. 177 – 179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.132>
14. Farhooda B., Samadianb H., Ghorbanic M., Zakariaeed S.S., Knaupe C. Physical, dosimetric and clinical aspects and delivery systems in neutron capture therapy. *Reports of practical oncology and radiotherapy*. 2018, vol. 23, pp. 462 – 473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2018.07.002>
15. Mardynsky Y.S., Sysoyev A.S., Andreyev V.G., Gulidov I.A. Preliminary results of clinical application of reactor fast neutrons in radiation and combined therapy of patients with laryngeal carcinoma. *Strahlenther Onkol*. 1991, vol. 167, no. 3, pp. 169 – 171. PubMed: 1901671.
16. Pikaev A.K. *Dosimetry in radiochemistry*. Moscow. Nauka publ., 1975. 312 p. (in Russian)
17. Sokolova N.K. *Chemical methods of dosimetry in radiobiology*. M.: Atomizdat publ., 1972. 120 p. (in Russian).
18. 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 Available at: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/laur1726533.pdf (accessed date: Jul. 27, 2023).

19. Chernukha A.E., Saburov V.O., Adarova A.I., Solov'ev A.N., Kizilova Yu.V., Koryakin S.N. Three-Dimensional Models and Complimentary Geometry for Dose Evaluation in NG-24MT Based Neutron Radiotherapy Cabinet. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 3, pp. 158–167. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.14> (in Russian).
20. Lychagin A.A., Ulyanenko L.N., Koryakin S.N., Troshina M.V., Ulyanenko S.E. Determination of the absorbed dose in radiation fields of neutron generator. *Biomedical Engineering*. 2019, vol. 52, no. 5, pp. 320–325. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10527-019-09839-7>
21. Bak M.A., Romanov Y.F. Measuring a flux of thermal neutrons by simultaneous activation of two different detectors. *Atomic Energy*. 1969, vol. 26, no. 6, pp. 636–638. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01218788>
22. Potetnya V.I., Koryakina E.V., Troshina M.V., Koryakin S.N. Use of the chemical Fricke dosimeter and its modifications for dosimetry of gamma neutron radiation of a pulsed reactor. *Nuclear Energy and Technology*. 2021, vol. 7, no. 3, pp. 231–237. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.7.74149>
23. 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. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2022, vol. 173, pp. 281–285. <https://doi.org/10.1007/s10517-022-05534-y>
24. Solov'ev A., Troshina M., Pikalov V., Saburov V., Chernukha A., Moiseev A., Koryakina E., Potetnya V., Koryakin S., Soldatov A., Kaprin A. In vitro modified microdosimetric kinetic model-based predictions for B14-150 cells survival in 450 MeV/u carbon ion beam with aluminum ridge filter for biologically optimized spread-out Bragg peak. *Biomedical Physics & Engineering Express*. 2022, vol. 8, no. 3, p. 035030. DOI: <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac414f>

Authors

Aleksandr E. Chernukha, Lead Engineer,

E-mail: chernukha903@gmail.com

Aleksei N. Solov'ev, head of laboratory, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru

Nikita V. Kuznetsov, chief of department,

E-mail: kuznetsov@KarpovIPC.ru

Ekaterina V. Koryakina, lead researcher, Cand. Sci. (Biology),

E-mail: ek-koryakina@mail.ru

Oleg Yu. Kochnov, chief engineer, professor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: kochnov@karpovipc.ru

Andrey V. Vasilyev, chief engineer,

E-mail: AndreViktorVasilyev@rosatom.ru

Sergey N. Koryakin, head of department, Cand. Sci. (Biology),

E-mail: korsernic@mail.ru