

УДК: 539.163:504.069

Хасанов Шахбоз Хасанович

Самаркандский государственный университет имени Шарафа Рашидова,
доктор философии по физико-математическим наукам (PhD), старший научный сотрудник
ядерно физической лаборатории имени акад. Т.Муминова

shakhbozkhasanov93@gmail.com

Маматкулов Орифжон Бахромович

Самаркандский государственный университет имени Шарафа Рашидова,
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ядерной физики и астрономии

orifjon.m1974@gmail.com

Тухтаев Улугбек Уктамович

Самаркандский государственный университет имени Шарафа Рашидова,
доктор философии по техническим наукам (PhD), ассистент кафедры ядерной физики и
астрономии

Хакимов Дилшод Абдухолимович

Самаркандский государственный университет имени Шарафа Рашидова,
доктор философии по техническим наукам (PhD), ассистент кафедры ядерной физики и
астрономии

НАВЕДЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ И ОБЛУЧЕНИЕ ПЕРСОНАЛА ПРИ ТЕРАПИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Ионная радиотерапия с использованием тяжёлых ионов обеспечивает высокую точность лечения, но сопровождается наведенной радиоактивностью, которая может стать источником облучения для медицинского персонала. В этой работе проведён анализ наведенной радиоактивности в ионной лечебной комнате с использованием моделирования Монте-Карло (код FLUKA). Исследование включает краткосрочные и долгосрочные сценарии облучения для оценки радиационного воздействия на персонал. Результаты показали образование множества радионуклидов, что позволило предложить меры по снижению профессионального облучения и повышению безопасности в центрах ионной терапии.

Ключевые слова: ионная радиотерапия, наведенная радиоактивность, моделирование Монте-Карло, радионуклиды.

Xasanov Shaxboz Xasanovich

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti akad. T.Mo'minov nomidagi Yadro fizikasi
laboratoriyasi katta ilmiy xodimi, fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

shakhbozkhasanov93@gmail.com

Mamatqulov Orifjon Bahromovich

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti dotsenti, fizika-matematika fanlari nomzodi

orifjon.m1974@gmail.com

To'xtayev Ulug'bek O'ktamovich

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti assistenti,
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Hakimov Dilshod Abduxolimovich

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti assistenti,
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

**OG'IR IONLAR TERAPIYASIDA QOLDIQ RADIOAKTIVLIK VA XODIMLARNING
NURLANISHI: MODELLASHTIRISH USULI YORDAMIDA TADQIQOT**

Annotatsiya. Og'ir ionlardan foydalanilgan ionli radioterapiya yuqori aniqlikdagi davolashni ta'minlaydi, biroq u tibbiyot xodimlari uchun nurlanish manbayi bo'lishi mumkin bo'lgan qoldiq radioaktivlik bilan kechadi. Ushbu ishda FLUKA kodidan foydalangan holda Monte-Karlo modellash tirish yordamida ionli davolash xonasida qoldiq radioaktivlikning tahlili o'tkazildi. Tadqiqot qisqa muddatli va uzoq muddatli nurlanish stsenariylarini o'z ichiga olib, xodimlarga bo'lgan radiatsion ta'sirni baholashga qaratilgan. Natijalar ko'plab radionuklidlarning hosil bo'lishini ko'rsatdi, bu esa ion terapiyasi markazlarida kasbiy nurlanishni kamaytirish va xavfsizlikni oshirish bo'yicha chora-tadbirlarni taklif qilishga imkon berdi.

Kalit so'zlar: *ion radioterapiyasi, indusiralangan radioaktivlik, Monte-Karlo simulyatsiyasi, radionuklidlar.*

Khasanov Shakhboz Khasanovich

Senior researcher at the Nuclear physics laboratory named after Acad. T. Muminov,
Samarkand State University named after Sharof Rashidov
PhD in Physical and Mathematical Sciences
shakhbozkhasanov93@gmail.com

Mamatkulov Orifjon Bahromovich

Associate Professor at Samarkand State University named after Sharof Rashidov
Candidate of Physical and Mathematical Sciences
orifjon.m1974@gmail.com

Tukhtayev Ulugbek Uktamovich

Assistant at Samarkand State University named after Sharof Rashidov
PhD in Technical Sciences

Hakimov Dilshod Abdukholimovich

Assistant at Samarkand State University named after Sharof Rashidov
PhD in Technical Sciences

INDUCED RADIOACTIVITY AND PERSONNEL EXPOSURE IN HEAVY ION THERAPY: A SIMULATION STUDY

Annotation. Heavy-ion radiotherapy provides high treatment precision but is accompanied by induced radioactivity, which can be a source of radiation exposure for medical staff. This study analyzes induced radioactivity in a heavy-ion treatment room using FLUKA Monte Carlo simulations code. The research includes short-term and long-term irradiation scenarios to assess radiation exposure for staff. The results revealed the formation of numerous radionuclides, which helped propose measures to reduce occupational exposure and improve safety in heavy-ion therapy centers.

Keywords: *ion radiotherapy, induced radioactivity, Monte Carlo simulation, radionuclides.*

ВВЕДЕНИЕ.

Ионная радиотерапия стала высокоэффективным и точным методом лечения рака, благодаря уникальным физическим и биологическим свойствам тяжёлых ионов, таких как углерод. В отличие от традиционных методов, использующих фотонную или протонную терапию, ионная терапия обеспечивает превосходное распределение дозы с резким пиком Брага, что позволяет доставлять высокие дозы радиации непосредственно в опухоли, минимизируя воздействие на окружающие здоровые ткани [1, 2]. Эта особенность делает ионную терапию особенно полезной для лечения радиорезистентных опухолей и тех, которые расположены рядом с критически важными органами [3, 4].

Однако такой передовой метод, как ионная терапия, также сопряжён с новыми проблемами, в частности с наведенной радиоактивностью, возникающей в ходе лечения [5]. Когда высокоэнергетические ионы взаимодействуют с различными материалами в лечебной комнате, включая тело пациента, воздух и медицинское оборудование, происходят ядерные реакции, которые производят широкий спектр радионуклидов [3, 6, 7]. Эти радионуклиды, в основном являющиеся бета-излучателями, способствуют созданию общего радиационного фона в лечебной комнате даже после завершения процедуры лечения. Индуцированная радиоактивность является значительным источником радиационного воздействия на медицинский персонал, поскольку они часто должны заходить в комнату вскоре после облучения для помощи пациентам, настройки оборудования или подготовки к следующей процедуре [8-10].

Риски для здоровья, связанные с наведенной радиоактивностью, стали объектом растущего внимания, особенно в условиях увеличения числа центров, предлагающих ионную терапию по всему миру [5, 11, 12]. Существующие исследования показали, что уровень наведенной радиоактивности в помещениях для ионной терапии может значительно варьироваться в зависимости от таких факторов, как энергия пучка ионов, материалы, используемые при строительстве помещения, и конкретные операционные протоколы учреждения [13].

В данном исследовании применяются современные методы Монте-Карло моделирования, в частности код FLUKA, для анализа распределения наведенной радиоактивности в лечебной комнате ионного центра в Ганьсу (Китай) [1, 14]. Моделирование краткосрочных и долгосрочных сценариев облучения позволяет оценить воздействие на персонал и определить меры по снижению рисков. Полученные результаты способствуют разработке оптимизированных протоколов безопасности для защиты медицинского персонала и безопасной эксплуатации центров ионной терапии.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ.

Моделирование.

FLUKA – всесторонний код Монте-Карло, широко применяемый для моделирования транспортировки частиц и их взаимодействия с материалами [15, 16]. В данном исследовании использована версия FLUKA 2020.0 вместе с библиотекой Idpmqmd для симуляции ядерных реакций с тяжёлыми ионами в лечебной комнате. Особое внимание уделено мультилистевому коллиматору (MLC) и крепёжным элементам сопла, подвергающимся воздействию экранирующей стены. Упрощённые модели MLC и компенсатора позволили обеспечить эффективный расчёт. На рисунке 1 представлена модель FLUKA для горизонтального направления облучения.

В моделировании рассмотрены два сценария: кратковременное облучение (10 минут) и долгосрочное (15 лет). Для долгосрочного сценария средняя интенсивность пучка, равная $7,1 \times 10^6$ частиц в секунду, была определена как отношение общего числа облучённых частиц к рабочему времени установки с учётом минимальных интервалов отдыха и периодов полураспада долгоживущих радионуклидов.

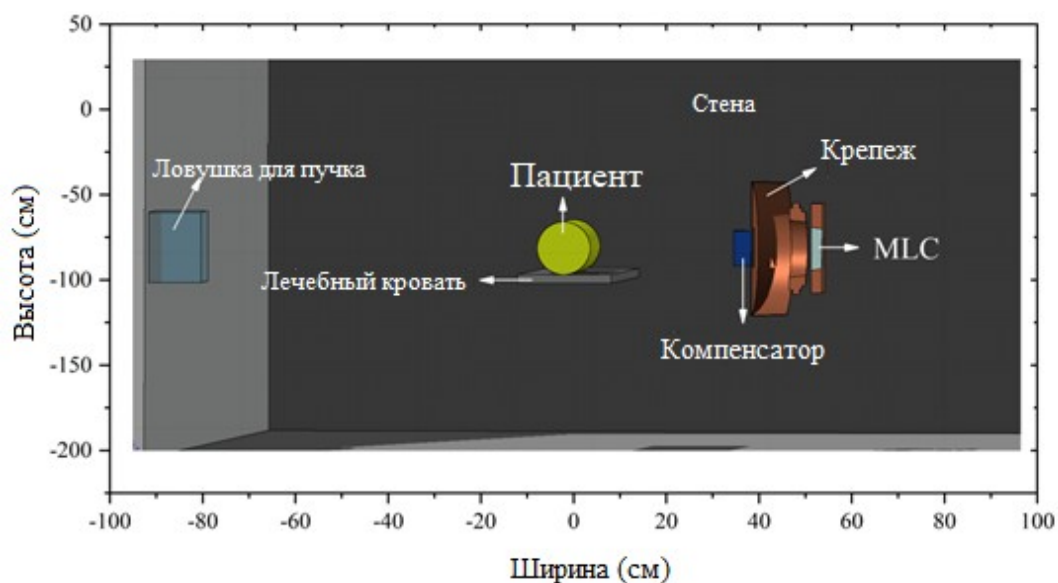


Рисунок 1. Модель FLUKA лечебной комнаты в горизонтальном направлении облучения.

Таблица 1.

Основные радионуклиды и их вклад в дозу облучения компонентов после 1 минуты охлаждения.

Компонент	Нуклид	Период полураспада	Однократное облучение		Долговременное облучение	
			Активность *10 ⁵ (Бк)	Вклад γ-дозы (%)	Активность *10 ⁵ (Бк)	Вклад γ-дозы (%)
Пациент (ткань)	C-11	20,33 мин	2,780	35,07	*	*
	N-13	9,965 мин	0,344	3,97	*	*
	O-15	122,24 сек	4,790	60,96	*	*
Кровать	C-11	20,33 мин	0,774	100,00	0,210	100,00
	H-3	12,33 год	0,158	*	0,158	*
Ловушка для пучка	C-11	20,33 мин	0,118	15,49	1,980	47,73
	N-13	9,965 мин	0,037	4,41	0,228	5,00
	O-15	122,24 сек	0,608	80,11	1,900	46,02
	H-3	12,33 год	*	*	2,000	*
	Be-7	53,12 день	*	*	1,160	1,25
Воздух	C-11	20,33 мин	0,063	24,48	*	*
	N-13	9,965 мин	0,106	37,18	*	*
	O-15	122,24 сек	0,089	34,57	*	*
	Ar-41	109,61 мин	0,010	3,77	*	*
Компенсатор	C-11	20,33 мин	1,190	57,24	*	*
	N-13	9,965 мин	0,146	6,40	*	*
	O-15	122,24 сек	0,333	16,07	*	*
	F-18	109,77 мин	0,361	20,29	*	*
Стена	C-11	20,33 мин	5,280	2,52	3,700	2,60
	O-15	122,24 сек	25,900	12,45	5,390	3,81
	Al-28	2,24 мин	134,00	80,09	26,800	23,49
	Na-24	14,96 час	1,390	1,80	34,500	65,67

	H-3	12,33 год	*	*	5,090	*
	Na-22	2,60 год	*	*	1,850	2,34
	другие	—	*	3,14	*	2,09
MLC	C-11	20,33 мин	1,120	5,87	*	*
	Dy-149	4,20 мин	0,382	2,94	*	*
	Lu-165	10,74 мин	0,651	3,49	*	*
	Hf-167	2,05 мин	1,120	3,53	*	*
	Hf-169	3,24 мин	1,730	5,72	*	*
	Ta-170	6,76 мин	1,230	6,61	*	*
	Ta-172	36,8 мин	0,609	4,92	*	*
	Ta-178 ^m	2,36 час	0,890	5,12	6,370	13,93
	W-177	132 мин	0,837	3,74	3,430	5,82
	W-179	37,05 мин	5,440	2,14	*	*
	Re-179	19,5 мин	0,776	4,01	*	*
	Re-180	2,44 мин	1,910	11,21	*	*
	W-187	23,72 час	*	*	4,990	4,79
	Lu-170	2,012 день	*	*	0,895	3,20
	Lu-172	6,70 день	*	*	1,420	4,54
	Ta-172	36,8 мин	*	*	0,957	2,93
	Ta-174	1,05 час	*	*	1,920	3,35
	Ta-175	10,5 час	*	*	2,530	4,96
	Ta-176	8,09 час	*	*	3,680	13,74
	Ta-182	114,43 день	*	*	1,180	2,47
	другие	—	*	40,7	*	40,27
Крепеж	Fe-53	8,51 мин	0,296	37,17	0,097	5,67
	Mn-51	46,2 мин	0,024	2,56	0,031	1,56
	Mn-52 ^m	21,1 мин	0,177	42,37	0,128	14,16
	Mn-56	2,58 час	0,110	15,50	0,459	32,48
	Cr-49	42,3 мин	0,023	2,41	0,032	1,54
	Mn-54	312,3 день	*	*	1,240	0,44

* Вклад γ -дозы радионуклидов в этом столбце составляет менее 1% или 2%, и их соответствующая активность не была указана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.

Формирование и распределение радионуклидов.

Результаты моделирования показали, что в лечебной комнате образуется множество радионуклидов, главным образом в результате процессов β^+ и β^- -распада. Основными источниками внешнего радиационного облучения оказались γ -лучи, возникающие при аннигиляции позитронов и распаде радионуклидов. В таблице 1 приведены основные радионуклиды, выявленные в результате моделирования, а также их периоды полураспада и вклад в дозу облучения.

Особое внимание было уделено радионуклидам, образующимся в теле пациента, воздухе, компенсаторе и ловушке для пучка, среди которых преобладали ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O и ^{41}Ar . В течение длительного периода облучения накапливаются долгоживущие радионуклиды, такие как ^3H , ^7Be , ^{22}Na и ^{182}Ta , периоды полураспада которых варьируются от нескольких лет до десятилетий. В

стенах лечебной комнаты основными радионуклидами оказались ^{28}Al и ^{24}Na , тогда как в крепежных элементах преобладали ^{53}Fe , $^{52\text{m}}\text{Mn}$ и ^{56}Mn . В МЛС было обнаружено более 1300 индуцированных радионуклидов, причем долгосрочное накопление таких радионуклидов, как $^{178\text{m}}\text{Ta}$, ^{176}Ta и ^{187}W , значительно увеличивает потенциальное облучение медицинского персонала из-за их относительно длительных периодов полураспада, составляющих от нескольких часов до дней.

Оценка профессионального облучения

Оценка проводилась на основе моделирования с использованием FLUKA для сценариев *b* и *c*. Для позиции А при сценарии *b* доза составила 0,048 мкЗв (FLUKA1) и 0,064 мкЗв (FLUKA2), а для позиции В – 0,034 мкЗв (FLUKA1) и 0,045 мкЗв (FLUKA2). При сценарии *c* значения немного выше: для позиции А – 0,049 мкЗв (FLUKA1) и 0,066 мкЗв (FLUKA2), для позиции В – 0,037 мкЗв (FLUKA1) и 0,049 мкЗв (FLUKA2). Соответственно, общая доза за сеанс составляет 0,097 мкЗв для позиции А и 0,071 мкЗв для позиции В (FLUKA1), либо 0,130 мкЗв и 0,094 мкЗв (FLUKA2). Ежегодные дозы составляют 0,728 мЗв для позиции А и 0,533 мЗв для позиции В по модели FLUKA1, а по модели FLUKA2 – 0,650 мЗв и 0,470 мЗв для позиций А и В соответственно, что значительно ниже рекомендованного предела в 20 мЗв/год. Результаты сопоставлены с данными, приведёнными Тузии и соавторами [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Это исследование моделирования представляет собой всесторонний анализ наведенной радиоактивности и её влияния на профессиональное облучение в медицинском центре тяжёлых ионов. Полученные результаты подчёркивают важность оптимизации рабочих схем и поддержания безопасных расстояний от облучённых компонентов для защиты медицинского персонала. Как показано в этом исследовании, использование моделирования Монте-Карло предлагает мощный инструмент для оценки и снижения радиационных рисков в условиях терапии частицами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Battistoni G, Bauer J, Boehlen TT, et al (2016) The FLUKA Code: An Accurate Simulation Tool for Particle Therapy. *Frontiers in Oncology* 6.
2. Ando K, Kase Y (2009) Biological characteristics of carbon-ion therapy. *International journal of radiation biology* 85:715-728.
3. Schardt D, Elsässer T, Schulz-Ertner D (2010) Heavy-ion tumor therapy: Physical and radiobiological benefits. *Reviews of modern physics* 82:383-425.
4. Durante M, Debus J, Loeffler JS (2021) Physics and biomedical challenges of cancer therapy with accelerated heavy ions. *Nature Reviews Physics* 3:777-790.
5. Thomadsen B, Nath R, Bateman FB, et al (2014) Potential hazard due to induced radioactivity secondary to radiotherapy: The report of task group 136 of the American Association of Physicists in Medicine. *Health physics* 107:442-460.
6. Suzuki M, Kase Y, Yamaguchi H, et al (2000) Relative biological effectiveness for cell-killing effect on various human cell lines irradiated with heavy-ion medical accelerator in Chiba (HIMAC) carbon-ion beams. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics* 48:241-250.
7. Yonekura Y, Tsujii H, Hopewell JW, et al (2016) Radiological protection in ion beam radiotherapy: practical guidance for clinical use of new technology. *Annals of the ICRP* 45:138-147.
8. Schulz-Ertner D, Tsujii H (2007) Particle radiation therapy using proton and heavier ion beams. *Journal of clinical oncology* 25:953-964.
9. Khasanov S, Yang B, Su Y, et al (2021) Induced radioactivity at particle accelerators: a short review. *Radiation Detection Technology and Methods*.

<https://doi.org/10.1007/s41605-021-00292-3>.

10. Patterson HW (2012) Accelerator health physics. Elsevier.
11. Schlaff CD, Krauze A, Belard A, et al (2014) Bringing the heavy: carbon ion therapy in the radiobiological and clinical context. *Radiation oncology* 9:1-19.
12. Vaiserman A, Koliada A, Zabuga O, Socol Y (2018) Health impacts of low-dose ionizing radiation: current scientific debates and regulatory issues. *Dose-Response* 16:1559325818796331.
13. Luo Y, Huang S-C, Zhang H, et al (2023) Assessment of the induced radioactivity in the treatment room of the heavy-ion medical machine in Wuwei using PHITS. *Nuclear Science and Techniques* 34:29. <https://doi.org/10.1007/s41365-023-01181-8>.
14. Furuta T, Sato T (2021) Medical application of particle and heavy ion transport code system PHITS. *Radiological Physics and Technology* 14:215-225.
15. Brugger M, Ferrari A, Roesler S, Ulrici L (2006) Validation of the FLUKA Monte Carlo code for predicting induced radioactivity at high-energy accelerators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 562:814-818.
16. Böhlen TT, Cerutti F, Chin MPW, et al (2014) The FLUKA code: developments and challenges for high energy and medical applications. *Nuclear data sheets* 120:211-214.
17. Tujii H, Akagi T, Akahane K, et al (2009) Research on radiation protection in the application of new technologies for proton and heavy ion radiotherapy. *Japanese Journal of Medical Physics (Igakubutsuri)* 28:172-206.