

УДК 51-73; 53.043

ВЕРИФИКАЦИЯ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗКОГО РАСХОДЯЩЕГОСЯ ПУЧКА ПРОТОНОВ НА КПТ “ПРОМЕТЕУС”

Г. В. Мерзликин^{1,2}, Н. А. Скотникова¹, А. И. Адарова¹, А. Е. Чернуха¹,
А. Н. Соловьев^{1,3}, С. А. Иванов^{1,4}, С. Н. Корякин^{1,3}, А. П. Канавин⁵,
В. О. Сабуров¹

В данной работе рассмотрена методика определения угловых характеристик разлёта узкого пучка протонов, связанных с неоднородным распределением начальных моментов частиц. Учёт этого явления важен при планировании облучения пациентов и проведения радиобиологических экспериментов, так как угловые характеристики напрямую влияют на размер поля по мере транспорта частиц в воздухе или среде. Также в работе приведено сравнение экспериментальных данных с Монте-Карло расчётами в программном пакете TOPAS MC с использованием полученных параметров. Результат показывает хорошую согласованность и состоятельность описанной методики.

Ключевые слова: протонная терапия, дозиметрия, радиохромные плёнки, метод Монте-Карло, TOPAS MC.

¹ Медицинский радиологический научный центр имени А. Ф. Цыба – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства Здравоохранения Российской Федерации, 249031, Калужская область, г. Обнинск, ул. Маршала Жукова, 10; e-mail: vosaburov@gmail.com.

² ИЯИ РАН, 108840 Россия, Москва, г. Троицк, ул. Физическая, вл. 27.

³ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «НИЯУ «МИФИ», 249039 Россия, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, 1.

⁴ РУДН имени Патриса Лумумбы, 117198 Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

⁵ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

Введение. Протонная терапия онкологических заболеваний является современным направлением терапевтической радиологии [1, 2] с широкими показаниями к применению. Российский опыт протонной терапии включает, но не ограничивается, повторные курсы терапии [3, 4], лечение новообразований головы-шеи широких этиологий [5], колоректального рака [6]. Внедрение установки “Прометеус” в клиническую практику сопровождалось обширным рядом работ [7–12], направленных на верификацию выходных параметров ускорителя и медицинской части обеспечения терапии. В процессе рутинной эксплуатации медицинского ускорителя остаются важными задачи обеспечения регламентного контроля [13] гарантий качества терапии, исследовательских работ и минимизация трудозатрат, времени выполнения верификационных процедур. В связи с этим в настоящей работе был предложен расчетный метод определения параметров поперечного нормального распределения тонкого сканирующего пучка, выводимого из ускорителя на различных энергиях в разных координатах по оси пучка, а также экспериментальная верификация данного метода.

Теоретический анализ. Известная теорема Лиувилля гласит, что фазовый объём данного ансамбля механических систем с обобщённо-потенциальными силами в отсутствие диссипативных сил сохраняется. Данное утверждение справедливо при любом числе точек в системе и поэтому может служить основой для изучения систем с большим количеством частиц, таких как пучок заряженных частиц [14]. Таким образом, распределения координат частиц пучка и их углов вылета в фазовом пространстве могут изменяться с продвижением по направлению его распространения, а эффективная область, занимаемая пучком (эмиттанс) в фазовом пространстве, будет оставаться неизменной [15].

Описанный в настоящей работе метод опирается на восстановление значения эмиттанса и параметров Твисса [16] в фиксированной, поперечной движению пучка плоскости, в системе его транспортировки. Используя параметры Твисса и эмиттанс пучка на произвольном расстоянии в качестве неизвестных коэффициентов, можно построить фазовый портрет в плоскости поперечных координат частиц пучка x и их углов вылета x' , имеющих форму эллипса с центром на оси пучка [16]:

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \varepsilon. \quad (1)$$

Последнее уравнение может быть записано в матричной форме с использованием симметричной матрицы согласно [17], как:

$$(x, x') * \begin{pmatrix} \gamma & \alpha \\ \alpha & \beta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \varepsilon. \quad (2)$$

Для большей наглядности обозначим матрицу, описывающую эллипс, как $\hat{\sigma}$. Нетрудно показать, что:

$$(x_2, x'_2) * \hat{\sigma}_2 * \begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = \varepsilon, \quad (3)$$

$$(x_1, x'_1) * \hat{\sigma}_1 * \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = \varepsilon. \quad (4)$$

Тогда:

$$\hat{\sigma}_2 = \left((\hat{M}^{-1})^T * \hat{\sigma}_1 * \hat{M}^{-1} \right), \quad (5)$$

где \hat{M} – матрица перехода из одной системы координат в другую.

Опираясь на вышеупомянутые утверждения, Е. D. Courant и Н. S. Snyder предложили свою теорию синхротрона с переменным градиентом [18]. В соответствии с этой теорией σ -матрица параметров пучка в любой точке, лежащей на оси Z (ось распространения пучка), пренебрегая рассеянием и диффузией частиц, может быть описана согласно [19], как:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_x \sigma_x \sigma_{x\theta} \\ \rho_x \sigma_{x\theta} & \sigma_{x\theta}^2 \end{bmatrix}_{z=Z} = \begin{bmatrix} 1 & -Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_x \sigma_x \sigma_{x\theta} \\ \rho_x \sigma_x \sigma_{x\theta} & \sigma_{x\theta}^2 \end{bmatrix}_{z=0} \begin{bmatrix} 1 & -Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (6)$$

где σ_x – размер пучка в горизонтальном направлении, $\sigma_{x\theta}$ – параметр, определяющий угловой разлёт, ρ_x – коэффициент корреляции.

После перемножения матриц перепишем уравнения первого столбца в явном виде, так как именно они вызывают практический интерес:

$$\sigma_x^2(Z) = \sigma_x^2(0) - 2\rho_x(0)\sigma_{x\theta}(0)Z + Z^2\sigma_{x\theta}^2(0), \quad (7)$$

$$\rho_x(Z) = \frac{\rho_x(0)\sigma_x(0)\sigma_{x\theta}(0) - Z\sigma_{x\theta}^2(0)}{\sigma_x(Z)\sigma_{x\theta}(Z)}. \quad (8)$$

Так как параметр $\sigma_{x\theta}$, определяющий угловой разлёт, медленно изменяется по мере транспорта пучка в воздухе, можно считать:

$$\sigma_{x\theta}(Z) = \sigma_{x\theta}(0) = \text{const}. \quad (9)$$

Принимая во внимание данное предположение, перепишем уравнения:

$$\sigma_x^2(Z) = \sigma_x^2(0) - 2\rho_x(0)\sigma_{x\theta}Z + Z^2\sigma_{x\theta}^2, \quad (10)$$

$$\rho_x(Z) = \frac{\rho_x(0)\sigma_x(0) - Z\sigma_{x\theta}}{\sigma_x(Z)}. \quad (11)$$

Таким образом, измерив размер пучка в горизонтальном направлении σ_x в двух вспомогательных точках и в нуле, что в случае сканирующего пучка является математической абстракцией, можно в явном виде найти значения искомым коэффициентов $\sigma_{x\theta}$ и ρ_x , которых достаточно для полного описания источника.

Методика. Методика исследования состояла из двух частей: экспериментальной дозиметрии с применением радиохромных плёнок и математического моделирования с использованием средств Монте-Карло общего назначения.

Математическое моделирование эксперимента проводили в программном пакете TOPAS MC [20, 21]. Данный пакет представляет собой готовое исполняемое приложение для сред на основе операционных систем Linux и построен на базе проекта с открытым исходным кодом Geant4 [22]. В отличие от исходных кодов системы Geant4, пакет TOPAS MC не требует от конечного пользователя знания языков программирования, а предоставляет удобный вид текстовых входных файлов. Источником излучения в среде TOPAS MC являлся источник вида Gauss с параметрами, приведёнными в табл. 1, где z_{rastr} обозначает координату вывода пучка из вакуумного канала и используется с целью наиболее точного согласования с тем расстоянием, которое протонный пучок проходит в воздухе до мишени на КПТ “Прометеус”. Точка старта пучков z_0 в модели была смещена от раструба на расстояние 24 мм, так как нам не удалось экспериментально разместить радиохромные пленки ближе к раструбу. Значения на расстояниях $z_0 = 24$ мм, $z_1 = 522$ мм, $z_2 = 722$ мм, $z_3 = 919$ мм определялись по показаниям радиохромных пленок, разбитых на пиксели размером 0.1×0.1 мм². Размеры плёнок подбирались индивидуально для каждой точки измерений в соответствии с ожидаемым размером пучка.

Т а б л и ц а 1

Перечень основных входных параметров TOPAS MC

Параметр TOPAS MC	Значение величины
s:So/Beam/BeamPositionDistribution	Gaussian
s:So/Demo/BeamPositionCutoffShape	Ellipse
s:So/Beam/BeamPositionSpreadX	$\sigma_x(z_{\text{rastr}})$
s:So/Beam/BeamAngularSpreadX	$\sigma_{x\theta}(z_{\text{rastr}})$

Обработка результатов дозиметрии радиохромными пленками проводили с использованием самостоятельно разработанного программного обеспечения [23] с открытым исходным кодом EBT_films_dose на языке программирования Python

(https://github.com/cobaltCorsair/EVT_films_dose). Программа позволяет получать двумерные профили распределения оптической плотности и доз в зависимости от выбранного метода калибровки, а также проекции в ортогональных сечениях. Входными данными программы является TIFF-скан облучённой плёнки, полученный на сканере EPSON Expression 12000XL, с глубиной цвета 16 bit для каждого уровня RGB разрешением 150 dpi и скан необлучённой плёнки при наличии. В качестве выходных данных, помимо визуального отображения непосредственно в интерфейсе (см. рис. 1), могут быть файлы, выгруженные в форматах .txt или .xls (Microsoft Excel).

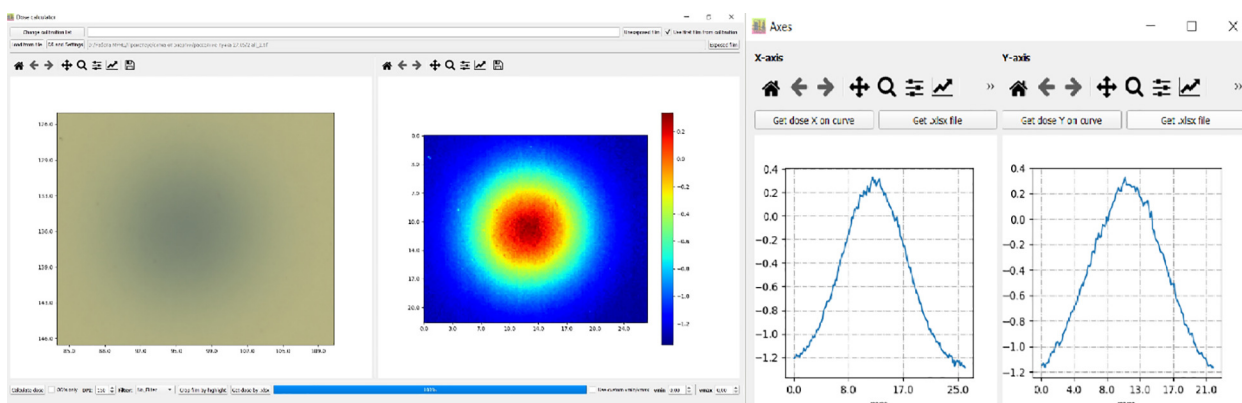


Рис. 1: Пример визуального интерфейса программы *EVT_films_dose* при работе с радиохромными плёнками. Слева направо – TIFF-скан облучённой плёнки, двумерная тепловая карта поглощённой дозы, профиль по оси X в центральном сечении, профиль по оси Y в центральном сечении.

В настоящей работе выгруженные в .xls профили анализировались в программе Origin 2019 с использованием аппроксимирующей функции типа Gauss с целью получения финальных значений σ распределения Гаусса. На данном этапе в программе *EVT_films_dose* доработана функция быстрого анализа распределений, имеющих форму Гаусса, что позволяет сразу оценить значения всех параметров, однозначно задающих такое распределение.

Экспериментальная часть. Работы проводили на КППТ “Прометеус”, расположенном в МРНЦ им. А.Ф. Цыба. Параметры ускорителя задавались согласно управляющему файлу в режиме терапии. В состав файла входят описания для каждого набора пучков, которые содержат информацию об углах отклонения пучка в сканирующих магнитах по горизонтали и вертикали, соответственно, значение энергии, которое, по сути, отвечает за сканирование по третьей координате, а также интенсивность, опреде-

ляющая интегральное количество выпущенных протонов. Однако стоит отметить, что все пучки в данной работе были выгружены в изоцентр установки и как следствие $\tan\varphi$ и $\tan\psi \rightarrow 0$. Специально для реализации данной задачи был изготовлен стенд с использованием аддитивных технологий, 3D макет которого представлен на рис. 2. Раструб ускорителя находится на расстоянии 725 мм от изоцентра установки: в нем заканчивается вакуумный канал и далее транспорт пучка происходит в воздухе, где имеется возможность дозиметрического определения пространственных характеристик пучка.

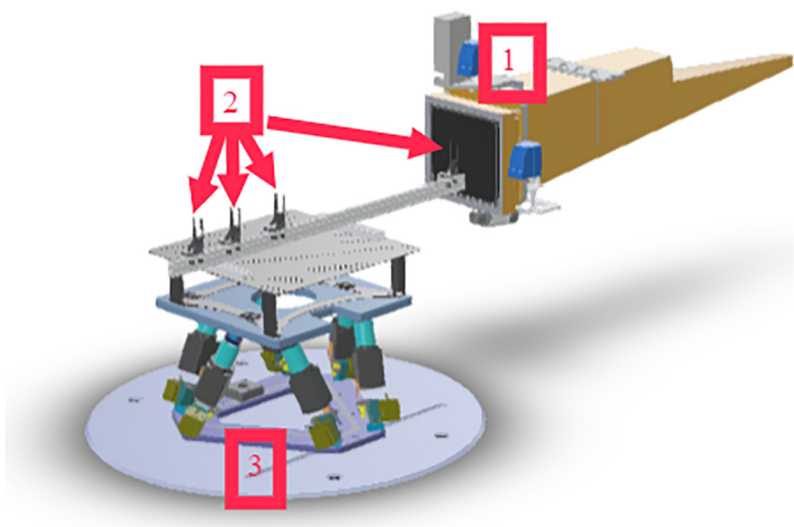


Рис. 2: Схематическое изображение экспериментального стенда: 1 – раструб, 2 – пленка, 3 – механизированное основание кресла пациента.

В первых итерациях эксперимента в качестве системы координатного перемещения объектов использовали фантом РТW МР3-Р, трехмерный движущийся механизм которого позволяет перемещать объекты с точностью в 0.1 мм. На каретки штатного крепления фантома устанавливались крепления для радиохромных плёнок, изготовленные собственными силами с использованием FDM технологий, которые полностью интегрируются со штатной системой крепления Trufix, таким образом система координат воспроизводится с точностью 0.1 мм при смене систем детектирования [24]. Однако в конечном счёте было принято решение о разработке стенда с целью обеспечить возможность точной повторяемости данного эксперимента. Для полной реализации задачи потребовалось последовательное облучение порядка 100 радиохромных плёнок, что является трудноосуществимой задачей в рамках одного рабочего дня. Разработанный стенд позволяет повторять эксперимент по уточнению параметров, если возникнет та-

кая необходимость. Для определения поперечных размеров пучка протонов использовались радиохромные пленки Gafchromic EBT3 (лот №12121703, калибровка лота по ^{60}Co). Измерения проводились в четырёх плоскостях, перпендикулярных оси распространения пучка. Первые три измерения использовались для аналитического восстановления параметров, последняя плоскость была выбрана для проведения дополнительной верификации. Сканирование образцов проводили на планшетном сканере EPSON Expression 12000XL с глубиной цвета 16 bit для каждого уровня RGB и 150 dpi.

Результаты и их обсуждение. В результате анализа распределений с плёночных детекторов экспериментально были определены поперечные размеры пучков для различных энергий в диапазоне от 40 МэВ до 250 МэВ с шагом 10 МэВ. Данные по двум осям представлены на графике (рис. 3).

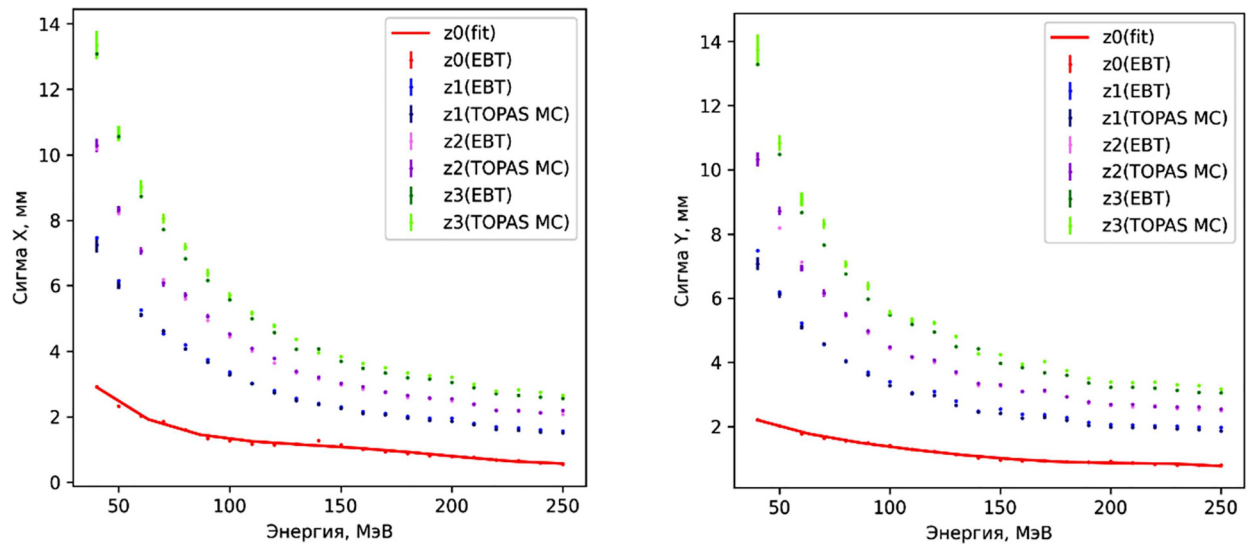


Рис. 3: Зависимость горизонтальных (слева) и вертикальных (справа) размеров пучка от энергии на различных расстояниях от раструба. $z_0 - z_3$ – расстояние от раструба. EBT – экспериментальное значение, TOPAS MC – расчётное значение.

Данные в плоскости z_0 аппроксимировались на весь энергетический диапазон полиномом пятой степени (кривая $z_0(\text{fit})$), так как полученные значения используются для преобразования планов из исходного формата (.dfa) в пучки для симуляций методом Монте-Карло в программном пакете TOPAS MC. Энергии в таком плане принимают любые значения, таким образом важно иметь предположительные значения размеров пучка в промежуточных точках.

Принимая во внимание уравнение (9), по полученным значениям для каждой из энергий были рассчитаны аналитически по формулам (10) и (11) параметры $\sigma_{x\theta}$ ($z_0 = 24$ мм) и $\sigma_{y\theta}(z_0)$. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Значения сигм распределения Гаусса для энергий в диапазоне от 40 до 250 МэВ на расстоянии 24 мм от раструба и в точке, близкой к изоцентру установки, представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Размеры пучка для энергий 40–250 МэВ в координате 24 мм и в изоцентре

Энергия, МэВ	Сигма X (24 мм)	Сигма Y (24 мм)	Сигма X (722 мм)	Сигма Y (722 мм)
40	2.92	2.21	10.18	10.34
50	2.33	2.02	8.21	8.20
60	2.02	1.77	7.09	7.13
70	1.85	1.64	6.19	6.12
80	1.61	1.57	5.60	5.44
90	1.34	1.50	4.94	4.90
100	1.27	1.42	4.44	4.42
110	1.17	1.29	4.01	4.14
120	1.15	1.23	3.64	4.00
130	1.17	1.14	3.33	3.65
140	1.28	1.03	3.15	3.28
150	1.15	0.97	2.98	3.27
160	1.01	0.94	2.84	3.11
170	0.93	0.93	2.73	3.09
180	0.88	0.91	2.60	2.94
190	0.82	0.90	2.56	2.73
200	0.79	0.92	2.49	2.65
210	0.77	0.87	2.36	2.61
220	0.68	0.83	2.20	2.65
230	0.65	0.81	2.16	2.56
240	0.59	0.80	2.12	2.54
250	0.55	0.80	2.08	2.50

С использованием данных параметров в качестве входных для каждой выбранной энергии проведена симуляция в TOPAS MC с целью верификации, полученных значений размеров пучка. Результаты расчётов также приведены на рис. 3.

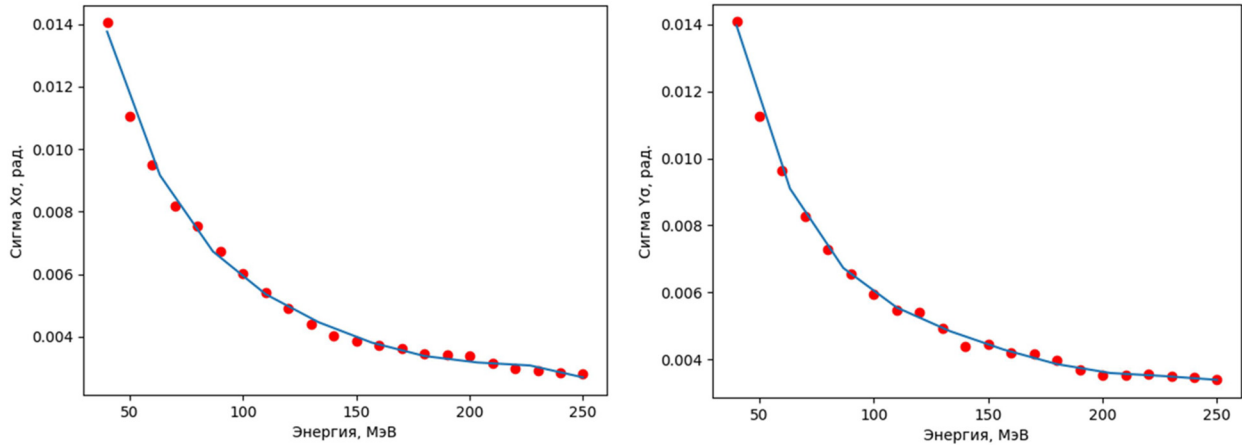


Рис. 4: Зависимость сигм угловых распределений Гаусса от энергии. Красными точками показаны полученные данные, синей линией – аппроксимация полиномом пятой степени.

Параметры $\rho_{x,y}$ в результате анализа эксперимента принимают различные значения, которые трудно однозначным образом оценить и предложить методику их определения. Результаты показали, что для дефокусирующегося и рассеивающегося одновременно пучка, принимая во внимание поправку на $\sigma_{x\theta,y\theta}$, параметры можно принять за:

$$\rho_{x,y}(z) = \rho_{x,y}(0) = -1.$$

Таким образом, модель показывает хорошее согласование с экспериментом. Описанный подход подтверждает гипотезу о том, что измерение поперечных размеров пучка уже в трёх плоскостях позволяет с высокой достоверностью определить параметры разлёта пучка.

Заключение. В ходе работы разработана и реализована методика определения угловых параметров разлёта узкого пучка по измерениям в трёх плоскостях. Проведено сравнение экспериментальных данных с Монте-Карло расчётом с полученными параметрами в качестве входных. В результате выполненного исследования можно сделать вывод, что созданная метаматематическая модель пучка протонов КПТ “Прометеус” хорошо согласуется с экспериментом. Полученные результаты позволяют с высокой точностью проводить вычисления физико-дозиметрических параметров, таких как линейная передача энергии (ЛПЭ), энергетические распределения частиц, δ -электроны и

т. д., что как следствие в значительной степени улучшит качество проводимых клинических и экспериментальных работ. Можно также отметить и возможность математического моделирования облучения вне предполагаемого места облучения (окрестность изоцентра) таких как в непосредственной близости и наоборот вдали от изоцентра по оси пучка. Такие способы облучения могут быть интересны для высоких градиентов в случае, например, маленьких мишеней или для низких доз облучения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (соглашение от 5 октября 2021 года № 075-15-2021-1347, внутренний номер соглашения 15.СИН.21.0017).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. Н. Соловьев, И. А. Гулидов, Ю. С. Мардынский и др., Радиационная биология. Радиоэкология **57**(5), 548 (2017). <https://elibrary.ru/item.asp?id=30291010>.
- [2] А. Каприн, Ю. Мардынский, С. Банов, *Терапевтическая радиология. Национальное руководство* (ГЭОТАР-Медиа, 2018).
- [3] Д. И. Смык, И. А. Гулидов, К. Б. Гордон и др., Вопросы онкологии **69**(1), 127 (2023). <https://elibrary.ru/item.asp?id=50391755>.
- [4] Д. И. Смык, И. А. Гулидов, К. Б. Гордон, Радиация и риск (бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра) **32**(1), 72 (2023). <https://elibrary.ru/item.asp?id=50370362>.
- [5] К. Б. Гордон, Д. И. Смык, И. А. Гулидов, Современные технологии в медицине **13**(4), 70 (2021). <https://elibrary.ru/item.asp?id=46488734>.
- [6] И. В. Козлова, Ю. Д. Удалов, Л. А. Данилова и др., Тазовая хирургия и онкология **13**(1), 33 (2023). <https://elibrary.ru/item.asp?id=50749121>.
- [7] И. Н. Завестовская, А. Е. Шемяков, А. А. Пряничников и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(5), 41 (2022). <https://elibrary.ru/item.asp?id=48239187> [in Russian].
- [8] А. Е. Чернуха, А. И. Шестопапов, А. И. Адарова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(10), 36 (2023). DOI: 10.3103/s1068335623100056.
- [9] Е. Е. Бекетов, Е. В. Исаева, Н. В. Наседкина и др., Вопросы онкологии **65**(4), 532 (2019). <https://elibrary.ru/item.asp?id=41065694>.
- [10] M. V. Troshina, K. G. Vasilev, E. V. Koryakina, et al., Journal of Physics: Conference Series **1701**, 012028 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1701/1/012028.

- [11] Е. В. Корякина, М. В. Трошина, В. И. Потетня и др., Труды регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований **3**, 42 (2020).
- [12] С. Е. Ульяненко, А. А. Лычагин, С. Н. Корякин и др., Медицинская физика **77**(1), 68 (2018).
- [13] А. Н. Соловьев, В. О. Сабуров, Р. В. Шершнева и др., Направления работ по автоматизации регламентных процедур контроля гарантий качества протонной лучевой терапии. В: Современные проблемы физики и технологий. VII Международная молодежная научная школа-конференция. Тезисы докладов. Часть 2. 12-21 апреля 2018 года, Москва (2017). С. 123. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36306153>.
- [14] И. И. Ольховский, *Курс теоретической механики для физиков*. 2-е изд., перераб. и доп. (изд-во Московского ун-та, 1974).
- [15] M. Syphers, Overview of Essential Beam Physics and Transport. USPAS 2019 Winter Session. 2019. <https://uspas.fnal.gov/materials/19Knoxville/g-2/lectures/L13BeamDynamicsOverview.pdf>.
- [16] И. А. Каньшин, А. А. Солодовников, Приборы и техника эксперимента, № 3, 30 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220030118.
- [17] M. Berz, M. Kyoko, W. Wan, *An Introduction to Beam Physics (Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation)*, 1st Edition (CRC Press, 2016).
- [18] E. D. Courant, H. S. Snyder, Annals of Physics **3**(1), 1 (1958). DOI: 10.1016/0003-4916(58)90012-5.
- [19] S. Huang, M. Kang, K. Souris, et al., Journal of Applied Clinical Medical Physics **19**(5), 558 (2018). DOI: 10.1002/acm2.12420.
- [20] J. Perl, J. Shin, J. Schumann, et al., Med. Phys. **39**(11), 6818 (2012). DOI: 10.1118/1.4758060.
- [21] B. Faddegon, J. Ramos-Mendex, J. Schuemann, et al., Physica Medica **72**, 114 (2020). DOI: 10.1016/j.ejmp.2020.03.019.
- [22] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **835**, 186 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
- [23] Я. В. Кизилова, А. Н. Соловьев, В. О. Сабуров, С. Н. Корякин, Разработка программного комплекса автоматизированной обработки результатов радиохромной плёночной дозиметрии В: Перспективные направления в онкологии, радиологии и радиобиологии: материалы VIII конференции молодых ученых, посвященной

памяти академика А. Ф. Цыба. 2 декабря 2022 года, Обнинск (2022) С. 52-53.
https://new.nmicr.ru/wp-content/uploads/2022/12/abstracts_young-2022.pdf.

- [24] С. С. Дюженко, О. Ю. Голованова, В. О. Сабуров и др., Метод оценки средних поглощённых доз с применением аддитивных технологий. Будущее атомной энергетики. XIV Международная научно-практическая конференция. Тезисы докладов (ч. 2), Обнинск (2019), с. 92-93. DOI: 10.18502/keg.v3i3.1617.

Поступила в редакцию 2 августа 2024 г.

После доработки 22 сентября 2024 г.

Принята к публикации 1 октября 2024 г.