

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С УСТРОЙСТВАМИ ФОРМИРОВАНИЯ РАСШИРЕННОГО ПИКА БРЭГГА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

А. А. Абдувалиев<sup>а, б, 1</sup>, Ж. Х. Хушвактов<sup>а</sup>, Т. Н. Тран<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Институт ядерной физики АН Узбекистана, Ташкент

Для облучения новообразований, расположенных вблизи жизненно важных радиочувствительных структур и органов, необходимо обеспечить точное пространственное совмещение пучка с мишенью в сеансах протонной терапии. При этом доза резко падает за границами мишени, что позволяет проводить облучение недоступных ранее для лучевой терапии локализаций. Демонстрируются возможности программных пакетов FLUKA и Geant4 для моделирования пробега пучков протонов для численных расчетов в области дозиметрии и лучевой терапии.

To irradiate neoplasms located near radiosensitive structures and organs, it is necessary to ensure an accurate spatial alignment of the beam with the target in proton therapy sessions. At the same time, the dose drops sharply beyond the boundaries of the target, which makes it possible to irradiate localities that were not previously available for radiation therapy. In this work were demonstrated the capabilities of FLUKA and Geant4 software packages for simulating the path of proton beams for numerical calculations in the field of dosimetry and radiation therapy.

PACS: 87.55.K-; 87.55.Qr

## ВВЕДЕНИЕ

Для облучения опухоли необходимо обеспечить однородность дозы. Характерные размеры опухоли при облучении — порядка  $\simeq 10$  см. Ширина пика Брэгга при этом составляет несколько миллиметров. Чтобы обеспечить требуемую однородность дозы при облучении мишени, варьируют энергию протонов и формируют так называемый расширенный пик Брэгга (Spread-Out Bragg Peak SOBP). Пучки разных диапазонов добавляются либо путем изменения начальной энергии ускорителя, либо путем добавления материала в линию пучка.

---

<sup>1</sup>E-mail: abduvaliev@jinr.ru

Правило Брэгга–Климана дает соотношение между энергией  $E$  (в МэВ) частицы и результирующим диапазоном [1]. Для пучка, проходящего через воду, пробег протонов  $R$  (в см) определяется уравнением (1):

$$R = aE^b. \tag{1}$$

Здесь  $a = 0,022$  и  $b = 1,77$ .

Для получения SOBP необходимо определенным образом сложить несколько пучков с разной начальной энергией. Для получения плоского плато дозы на максимальной глубине  $R_0$  с заданной шириной долей  $\chi$  от максимальной глубины, состоящей из  $n$  различных энергетических интервалов, диапазон каждого вносимого пучка ( $k = 0, 1, \dots, n$ ) определяется уравнением

$$R_k = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{k}{n} \right) \chi \right] R_0. \tag{2}$$

Соответствующая энергия каждого пучка задается уравнением

$$E_k = \left( \frac{R_k}{a} \right)^{1/b}. \tag{3}$$

Форма SOBP зависит от весового фактора пучка. Дистальный пик Брэгга имеет наибольший вес, а проксимальный пик наименьший. Вес  $\omega_k$  приведен в уравнении

$$\omega_k = \begin{cases} 1 - \left( 1 - \frac{1}{2n} \right)^{1-1/p}, & k = 0, \\ \left[ 1 - \frac{1}{n} \left( k - \frac{1}{2} \right) \right]^{1-1/p} - \left[ 1 - \frac{1}{n} \left( k + \frac{1}{2} \right) \right]^{1-1/p}, & k = 1, \dots, n-1, \\ \left( \frac{1}{2n} \right)^{1-1/p}, & k = n. \end{cases} \tag{4}$$

Параметр  $p$  будет незначительно меняться в зависимости от энергии, глубины и ширины SOBP. Используя эти уравнения, можно создать SOBP. Для данного исследования был выбран  $p = 1,35$ , максимальная глубина  $R_0 = 15$  см для плато дозы и ширина SOBP 5 см ( $\chi = 1/3$ ). Это было выполнено методами пассивного и динамического облучения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гребенчатый фильтр является статическим компонентом пассивного метода, расположенным на линии пучка (рис. 1, *a*). Высота и ширина гребней определяют форму SOBP [2]. Материал с низким  $Z$ , такой как алюминий, углерод или даже пластик, обычно применяется в гребенчатых фильтрах.

Замедлитель переменной толщины (ЗПТ), выполненный из оргстекла, — один из основных устройств метода динамического облучения [3]. В ЗПТ при движении

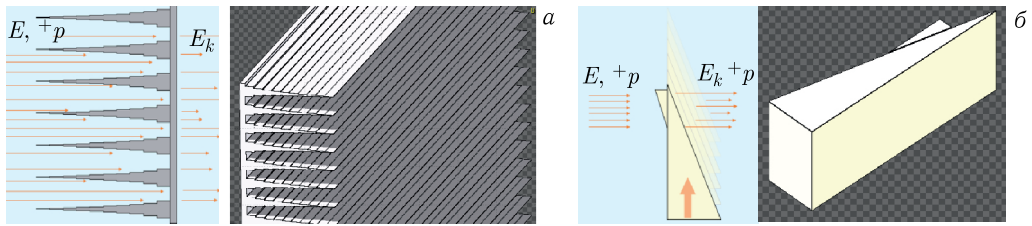


Рис. 1. Вид гребенчатого фильтра и замедлителя переменной толщины

основного клина относительно неподвижного вспомогательного клина изменяется общая толщина оргстекла на пути пучка, следовательно, пик Брэгга будет менять свое положение (рис. 1, б).

В качестве фантома выбран параллелепипед размерами  $10 \times 10 \times 22$  см, заполненный водой, который служит стандартной дозиметрической средой.

Энергия пучка, доставляемого в процедурный кабинет, имеет гауссову форму со средним значением 172,5 МэВ и стандартным отклонением 2,7 МэВ. Представленная модель энергетического спектра достаточна для описания реального пучка протонов в моделировании [4, 5]. Форма пучка в прямоугольном виде — размерами  $5 \times 5$  см.

В моделировании применялись пакеты Монте-Карло FLUKA [6, 7] и Geant4 [8]. Метод Монте-Карло представляет собой точный способ исследования взаимодействия частиц в среде и считается «золотым стандартом» компьютерного моделирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки работы программ FLUKA и Geant4 проведено сравнение средних пробегов протонного пучка в водном фантоме. На оси протонного пучка, перед фантомом, с помощью пластин из оргстекла были выставлены толщины замедлителя 4 и 8 см (рис. 2).

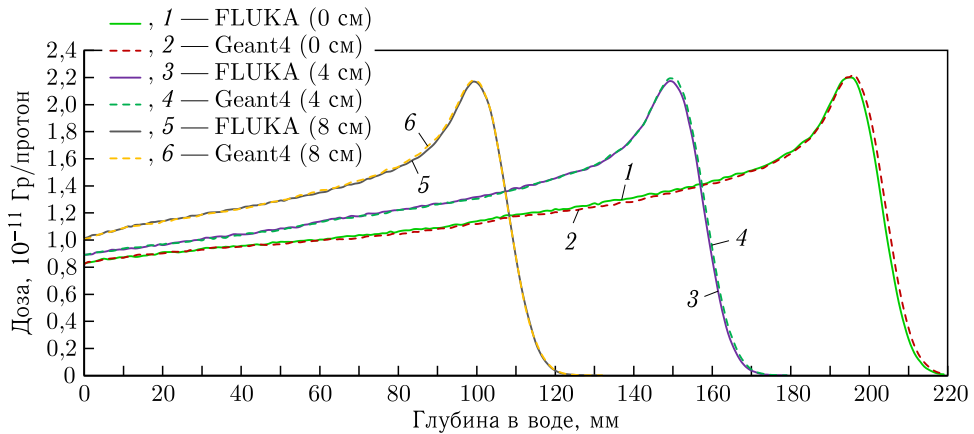


Рис. 2. Глубинно-дозовые распределения пучка протонов при толщине замедлителя 0, 4 и 8 см

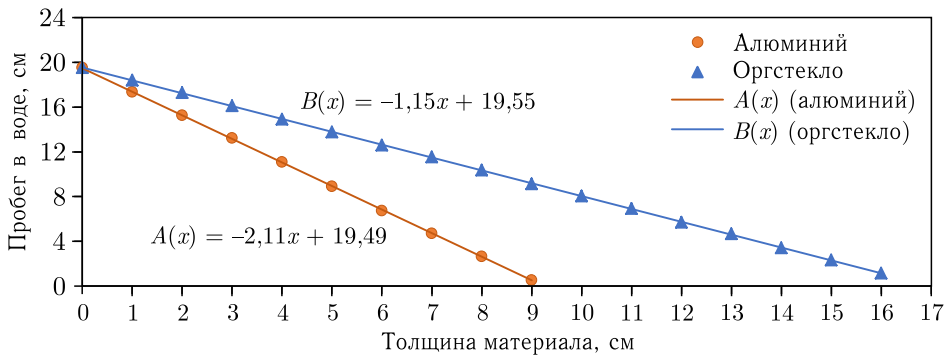


Рис. 3. Зависимость между толщиной материалов и пробегом протонов в воде

Пробег для протонов по программе Geant4 отличается от полученного в FLUKA на 0,36, 0,15 и 0,01 % соответственно.

Следовательно, размеры гребенчатого фильтра, используемого в моделировании, были рассчитаны на основе приведенной выше формулы. Чтобы оценить, как толщина алюминия и оргстекла влияет на пробег протонов в воде, было проведено моделирование пучка при применении блоков алюминия и оргстекла различной толщины перед водным фантомом. Обнаружена линейная зависимость между толщиной материалов и результирующим пробегом протонов в воде, показанная на рис. 3.

На основе этого соотношения толщины алюминия (оргстекла) и пробега, с формулами SOBП, глубиной, шириной модуляции и весовыми коэффициентами можно спроектировать гребневой фильтр (ЗПТ).

Каждая пластина имеет высоту, соответствующую пробегу  $R_k$ , и ширину, соответствующую весу  $\omega_k$  данного пробега пучка. В табл. 1 приведены размеры для каждой из 11 ступеней гребня.

Таблица 1

Параметр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота, мм	45,0	40,26	40,2	37,9	35,5	33,1	30,8	28,4	26,0	23,6	21,3
Ширина, мм	0,1	0,4	0,7	1,0	1,4	1,9	2,4	3,0	3,9	5,4	10,0

Для ЗПТ толщина замедлителя  $d$  соответствует данному пробегу пучка, время облучения в этом положении соответствует весу  $\omega_k$ . В табл. 2 приведены толщины и вес для каждой из 51 позиции замедлителя.

С использованием этих данных были получены двумерные дозовые распределения протонов в FLUKA (рис. 4).

В методе динамического облучения дозовое поле более однородное по сравнению с пассивным методом.

Поглощенная доза в методе пассивного облучения в глубине 100 и 150 мм составляет  $1,41 \cdot 10^{-11}$  и  $1,36 \cdot 10^{-11}$  Гр/протон, а в динамическом методе  $1,40 \cdot 10^{-11}$  и  $1,38 \cdot 10^{-11}$  Гр/протон соответственно (рис. 5). Из графика, полученного в FLUKA, пробег для протонов в методах пассивного и динамического облучения отличается на 0,08 %.

Таблица 2

$k$	$d$ , мм	$\omega_k$	$k$	$d$ , мм	$\omega_k$	$k$	$d$ , мм	$\omega_k$
0	83,0	0,0002	17	68,3	0,0071	34	53,5	0,0121
1	82,2	0,0053	18	67,4	0,0072	35	52,6	0,0127
2	81,3	0,0053	19	66,5	0,0074	36	51,7	0,0133
3	80,4	0,0054	20	65,7	0,0076	37	50,9	0,0141
4	79,6	0,0055	21	64,8	0,0078	38	50,0	0,0149
5	78,7	0,0056	22	63,9	0,0080	39	49,1	0,0159
6	77,8	0,0057	23	63,0	0,0082	40	48,3	0,0171
7	77,0	0,0058	24	62,2	0,0084	41	47,4	0,0185
8	76,1	0,0059	25	61,3	0,0087	42	46,5	0,0202
9	75,2	0,0060	26	60,4	0,0089	43	45,7	0,0223
10	74,4	0,0061	27	59,6	0,0092	44	44,8	0,0250
11	73,5	0,0062	28	58,7	0,0095	45	43,9	0,0286
12	72,6	0,0064	29	57,8	0,0099	46	43,0	0,0338
13	71,7	0,0065	30	57,0	0,0102	47	42,2	0,0410
14	70,9	0,0066	31	56,1	0,0106	48	41,3	0,0570
15	70,0	0,0068	32	55,2	0,0111	49	40,4	0,0999
16	69,1	0,0069	33	54,4	0,0115	50	39,6	0,3030

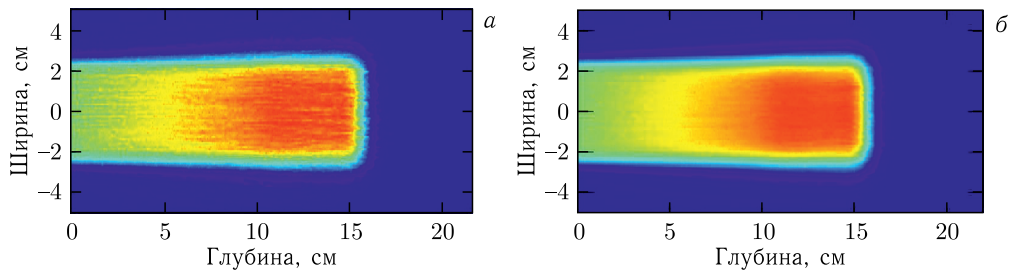


Рис. 4. Двумерные дозовые распределения методов динамического (а) и пассивного (б) облучения

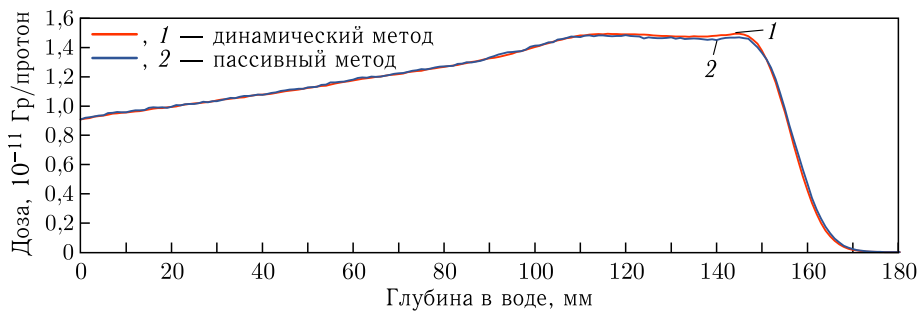


Рис. 5. Расширенные пики Брэгга для пассивного и динамического метода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Медико-техническом комплексе Объединенного института ядерных исследований разработан и создан автоматизированный ЗПТ, который будет использован как одно из основных устройств в новой системе динамического облучения глубоко расположенных мишеней сложной формы. Этот метод позволяет облучать опухоль более конформно по сравнению с пассивной методикой.

Следует отметить, что, увеличивая числа ступени фильтра ( $k$ ), можно обеспечить однородности дозы. Гребенчатый фильтр также будет применяться в перспективном направлении — флэш-терапии.

Результаты модельных расчетов могут быть полезными в проектировании таких устройств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jette D., Chen W.* Creating a Spread-Out Bragg Peak in Proton Beams // *Phys. Med. Biol.* 2011. V. 56, No. 11. P. N131–N138.
2. *Agapov A. V., Gaevsky V. N., Gulidov I. A., Iglin A. V., Luchin E. I., Mytsin G. V. et al.* Technique of 3D Conformal Proton Therapy // *Part. Nucl. Lett.* 2005. V. 2, No. 6. P. 80–86.
3. *Agapov A. V., Mitsyn G. V.* A Dynamic Irradiation Method for Proton Radiotherapy // *Biomed. Engin.* 2021. No. 4. P. 139–144.
4. *Rajcan M., Molokanov A. G., Mumot M.* Simulations of Proton Beam Depth-Dose Distributions. JINR Commun. E18-2007-91. Dubna, 2007.
5. *Mumot M., Agapov A. V.* Modeling of Dose Distribution for a Proton Beam Delivering System with the Use of the Multiparticle Transport Code “FLUKA” // *AIP Conf. Proc.* 2003. V. 958, Iss. 1. P. 294–297.
6. *Ferrari A., Sala P. R., Fassó A., Ranft J.* FLUKA: a Multiparticle Transport Code. CERN-2005-10. INFN/TC 05/11, SLAC-R-773. 2005.
7. *Fassó A., Ferrari A., Roesler S. et al.* The Physics Models of FLUKA: Status and Recent Developments // *CHEP 2003 Conf.*, La Jolla, CA, USA, 2003.
8. *Allison J. et al.* Recent Development in Geant4 // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 835. P. 186–225.

Получено 14 ноября 2022 г.