

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОУГЛОВОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ПУЧКА ИОНОВ УГЛЕРОДА

*А. А. Григорьева<sup>а, 1</sup>, А. А. Булавская<sup>а</sup>, Е. А. Бушмина<sup>а</sup>,  
А. П. Воробьев<sup>б</sup>, А. Г. Васильева<sup>б</sup>,  
И. А. Милойчикова<sup>а, в</sup>, С. Г. Стучебров<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>б</sup> Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия

<sup>в</sup> Научно-исследовательский институт онкологии Томского национального исследовательского медицинского центра, Томск, Россия

Представлены результаты экспериментальной реализации метода многоугольного сканирования пучка ионов углерода на временном радиобиологическом стенде ускорительного комплекса У-70. При помощи метода многоугольного сканирования получены поперечные распределения интенсивности ионного пучка углерода  $^{12}\text{C}$  с энергией 300 МэВ/нуклон, а также проведено сравнение полученных результатов с данными, измеренными пленочными дозиметрами.

The paper presents the results of an experimental implementation of the multiangle scanning method for a carbon ion beam on a temporary radiobiological stand of the U-70 accelerator complex. The transverse intensity distributions of the  $^{12}\text{C}$  carbon ion beam with an energy of 300 MeV/nucleon were obtained using multiangle scanning method, and the results were compared with data measured by dosimetry films.

RACS: 07.77.-n; 29.20.Lq; 29.40.Mc; 41.75.Ak

### ВВЕДЕНИЕ

Появление новых ускорителей протонов и ионов для медицинских целей обусловлено усовершенствованием подходов к лечению радиорезистентных злокачественных новообразований. Однако на сегодняшний день не существует единого стандартизированного подхода к контролю характеристик медицинских пучков ионов и протонов [1]. К устройствам измерения характеристик терапевтических пучков ионов

---

<sup>1</sup>E-mail: agrigorieva@tpu.ru

предъявляются следующие требования: возможность определения параметров в реальном времени, высокое пространственное разрешение, отсутствие расходных материалов и невнесение изменений в параметры пучка. Имеющиеся на сегодняшний день устройства [2, 3] позволяют осуществлять такой мониторинг с использованием набора измерительных систем, каждая из которых отвечает тому или иному требованию, но не всем вместе.

В предыдущей работе [4] авторами были показаны этапы разработки измерительного устройства для реализации метода многократного сканирования сцинтилляционным элементом под разными углами для измерения характеристик пучков ионизирующего излучения в поперечном сечении. В данной работе описаны результаты реализации метода и его проверки на пучке ионов углерода ускорительного комплекса У-70 НИЦ «Курчатовский институт»–ИФВЭ.

## МЕТОД МНОГОУГЛОВОГО СКАНИРОВАНИЯ

Метод многоугольного сканирования основан на реконструкции данных математическими методами, полученных в процессе многократного поперечного сканирования пучка ионизирующего излучения тонким детектирующим элементом под разными углами. В ранних работах авторов [4] была предложена концепция прибора, реализующая данный метод. Прибор позволяет измерить распределение интенсивности пучка ионов углерода в поперечной плоскости поля облучения объекта за время облучения объекта на пучке, оценить однородность поля облучения и с хорошей пространственной точностью определить дозовые нагрузки в различных областях поля облучения.

## ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА

Схема установки, реализующей метод многоугольного сканирования, представлена на рис. 1. Данная установка обеспечивает поступательное и вращательное перемещение тонкого детектирующего элемента в поперечной плоскости, перпендикулярной оси пучка. Поступательное перемещение детектора обеспечивает линейный транслятор Standa Motorized Translation Stages, вращательное движение — моторизованная поворотная платформа Standa Motorized Rotation Stage.

В качестве детектора частиц используется сцинтилляционное оптоволокно Saint-Gobain Crystals VCF-20 [5], которое размещено в углублении корпуса с внутренней резьбой кремниевого фотоэлектронного умножителя (SiPM) KETEK PE3315-WB-TIA-TP [6]. Сцинтиллятор и SiPM выделены рамкой на рис. 1. Между сцинтиллятором и активной областью SiPM обеспечен оптический контакт.

В качестве преобразователя сигнала, получаемого от SiPM, в цифровой вид используется цифровой программируемый осциллограф Hantek DSO-6104BD.

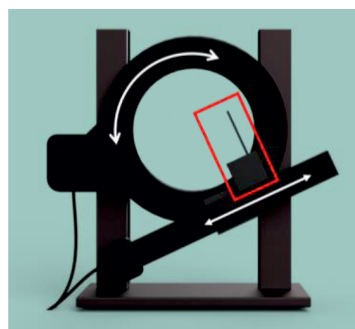


Рис. 1. Схема установки, реализующей метод многоугольного сканирования

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования метода многоугольного сканирования. В качестве источника излучения использовался пучок ионов углерода временного радиобиологического стенда ускорительного комплекса У-70 [7]. Схема эксперимента показана на рис. 2.

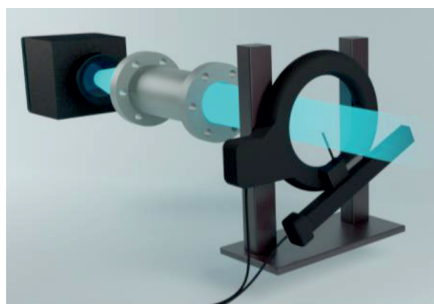


Рис. 2. Схема эксперимента

Эксперимент проводился при следующих параметрах: энергия углеродного пучка составила 300 МэВ/нуклон, длительность сброса 0,6 с, среднее количество ядер углерода за сброс до  $1,4 \cdot 10^9$ . Сцинтилляционное оптоволоконно линзовое устройство толщиной 500 мкм при каждом его повороте на угол  $18^\circ$  поступательно перемещалось в плоскости, перпендикулярной оси пучка, на расстояние 60 мм с шагом 4 мм, полное угловое смещение оптоволоконна —  $180^\circ$ .

В качестве пленочного дозиметра были использованы дозиметрические пленки Gafchromic EBТ3 [8]. Пленочный дозиметр в ходе проведения экспериментов устанавливался на том же расстоянии от выходного окна вакуумного ионпровода пучка ионов углерода, где находилось сцинтилляционное оптоволоконно линзовое устройство. Последующая обработка пленок проводилась по стандартному методу: оцифровке на планшетном сканере и обработке при помощи специально разработанного программного кода в MATLAB.

В результате многоугольного сканирования пучка были получены зависимости интенсивности излучения, попавшего в детектор, от положения детектора. Данные зависимости далее реконструировались. Подробно процесс сбора и обработки данных описан в работе [4].

На рис. 3 представлены пространственные распределения интенсивности пучка ионов углерода в поперечном сечении, полученные методом многоугольного сканирования и с помощью дозиметрической пленки.

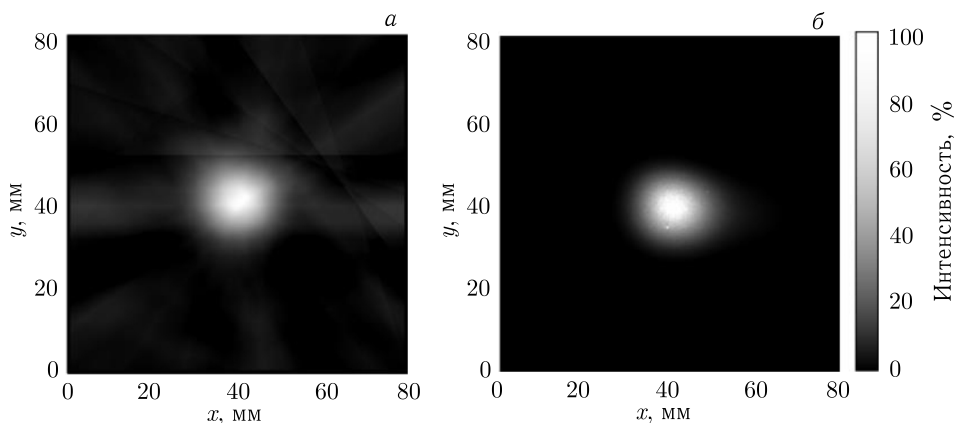


Рис. 3. Поперечные распределения интенсивности пучка ионов, полученные при помощи: а) метода многоугольного сканирования; б) пленочной дозиметрии

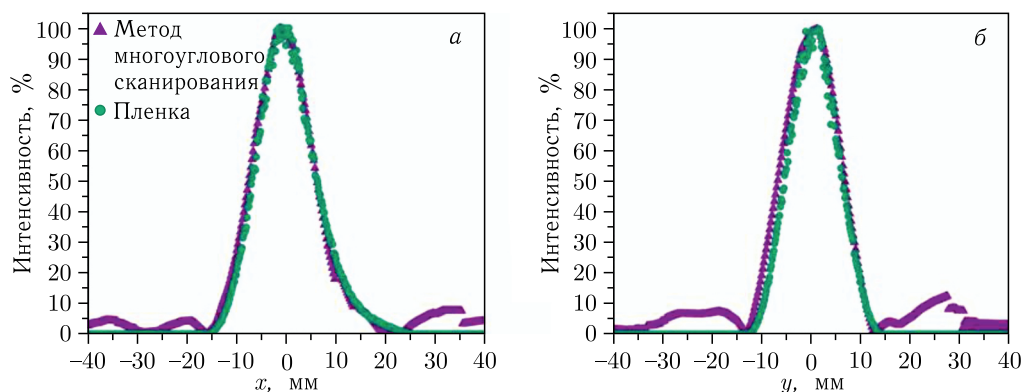


Рис. 4. Зависимости интенсивности углеродного пучка от  $x$  (при  $y = 40$  мм) (а),  $y$  (при  $x = 38$  мм) (б)

Рис. 3 показывает, что профиль пучка, полученный методом многоугольного сканирования, повторяет форму и размеры профиля, полученного пленками. На рис. 3, а видны светлые полосы в области, где пучок отсутствовал. Такие полосы называются артефактами, которые обусловлены особенностями метода реконструкции данных.

Для сравнения результатов, полученных двумя методами измерения поперечного профиля пучка, на рис. 4 представлены значения интенсивностей вдоль горизонтальной и вертикальной линий, проходящих по центру пучка (см. рис. 3).

Из рис. 4 видно, что при использовании метода многоугольного сканирования присутствуют небольшие пики вне области пучка. Это обусловлено артефактами реконструкции, для устранения которых можно изменить количество угловых проекций, подобрать сцинтиллятор и фоточувствительный элемент для увеличения статистической значимости исходных данных, а также применить их предварительную фильтрацию. Однако формы самих зависимостей, полученных с помощью метода многоугольного сканирования и пленок, полностью совпадают, что говорит о пригодности предложенного метода и созданной экспериментальной установки для измерения пространственного распределения интенсивности углеродных пучков в поперечном сечении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробирован метод измерения поперечного профиля пучка, основанный на математической реконструкции данных, полученных с помощью многоугольного сканирования пучка тонким детектирующим элементом, на пучке ионов углерода. Измерения проводились на стенде ускорителя У-70 НИЦ «Курчатовский институт»–ИФВЭ. Получены поперечные профили пучка ионов углерода с энергией 300 МэВ/нуклон. Проведено сравнение результатов с результатами, полученными общепринятым методом, — пленочной дозиметрией. Полученные в работе данные свидетельствуют о возможности эффективного применения метода многоугольного сканирования для измерения характеристик пучков ионов углерода.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-00252).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor P. A., Kry S. F., Alvarez P., Keith T., Lujano C., Hernandez N., Followill D. S.* Results from IROC Houston's Anthropomorphic Proton Phantoms Used for Clinical Trial Credentialing // *Intern. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2016. V. 95. P. 242.
2. *Patera V., Sarti A.* Recent Advances in Detector Technologies for Particle Therapy Beam Monitoring and Dosimetry // *IEEE Trans. Radiat. Plasma Med. Sci.* 2019. V. 4. P. 133–146.
3. *Karger C. P., Jäkel O., Palmans H., Kanai T.* Dosimetry for Ion Beam Radiotherapy // *Phys. Med. Biol.* 2010. V. 55. P. R193.
4. *Bulauskaya A. A., Cherepennikov Y. M., Grigorieva A. A., Miloichikova I. A., Stuchebrov S. G.* Multiangle Scanning for Measuring Radiation Beam Profiles with a Typical Size of 10 Millimetres — Proof-of-Principle Experiments // *J. Instrum.* 2022. V. 17. P. T07004.
5. Saint-Gobain Crystals BCF-20. <https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/fibers> (дата обращения: 05.11.2022 г.).
6. Silicon Photomultiplier Module PE3315-WB-TIA-TP. <https://www.ketek.net/wp-content/uploads/КЕТЕК-РЕ3315-WB-TIA-TP.pdf> (дата обращения: 05.11.2022 г.).
7. *Антипов Ю. М., Солдатов А. П.* Создание центра ионной лучевой терапии // *Мед. физика.* 2016. № 2 (70). С. 5–9.
8. Gafchromic EBT3. <http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiotherapy-films/EBT/index.asp> (дата обращения: 05.11.2022 г.).

Получено 14 ноября 2022 г.