

УДК 621.382.8

РЕГИСТРАЦИЯ ПИКОВ БРЭГГА В РЕЖИМЕ СКАНИРОВАНИЯ МИШЕНИ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТ МЕДИЦИНСКОГО УСКОРИТЕЛЯ “ПРОМЕТЕУС”

В. В. Сиксин, В. А. Рябов, А. Е. Шемяков

*В работе рассматривается использование цифрового детектора получения изображений (ЦДПИ) для калибровки протонного ускорителя “Прометеус” перед сеансом лучевой терапии. Впервые приводятся результаты работы детектора ЦДПИ в режиме регистрации спотов (импульсов с малой интенсивностью), полученные во время сеанса на пучке ускорителя “Прометеус”. Детектор ЦДПИ позволяет за несколько импульсов ускорителя в режиме *on-line* увидеть, как энергосыделение каждого спота распределяется по области облучаемой мишени.*

Ключевые слова: цифровой детектор получения изображений, пик Брэгга, калибровка протонного ускорителя.

В настоящее время в медицинских центрах, применяющих протонные ускорители, используются различные системы диагностики и сопровождения по проведению сеансов протонной терапии. При калибровке пучка протонов от ускорителя “Прометеус” на место пациента, сохраняя привязку к единой системе координат x , y , z , устанавливался детектор ЦДПИ. В результате регистрации событий проверяется правильность настройки параметров ускорителя и сканирующих магнитов перед облучением пациента. Детектор ЦДПИ калибрует ускоритель в режиме сканирования так же, как и по “плану облучения” пациента сканирующим пучком.

Принцип работы ЦДПИ совместно с камерой МИК заключается в том, что при сканировании каждого спота в водном фантоме ЦДПИ определяет точно координату глубины пика Брэгга и его профиль по ширине, а МИК определяет дозу и число протонов, прошедших через спот за вывод.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: antktech@yandex.ru.

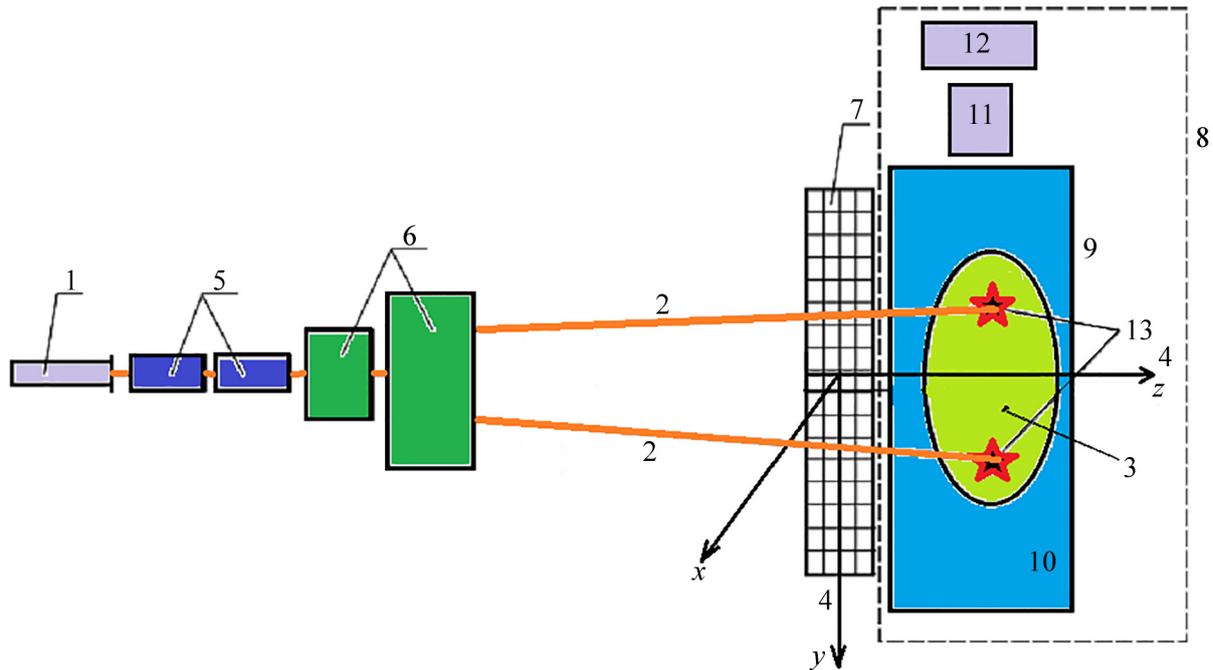


Рис. 1: Общая схема работы детектора ЦДПИ для контроля параметров пучка на установке с применением ускорителя “Прометеус”. Пояснения в тексте.

На рис. 1 приведена схема совместной работы ЦДПИ и МИК. Детектор ЦДПИ позволяет перед сеансом протонной терапии откалибровать ускоритель “Прометеус”, работающий в режиме сканирующего пучка. Откалибровать – значит проверить, что траектории сканирующего пучка, проходящие через МИК, не выходят за границу облучаемой мишени и энергия пучка выделяется внутри мишени. Если это условие выполняется, то ускоритель настроен правильно и может считаться откалиброванным. Общая схема работы “Детектора” на ускорителе “Прометеус” приведена на рис. 1. Вся установка для испытаний ЦДПИ состоит из ускорителя типа синхротрона 1 с протонным пучком 2 для облучения мишени 3 (напр., опухоли). Для привязки положения мишени 3 к оси пучка введена неподвижная система координат x, y, z – 4. Пучок протонов 2, выведенный из ускорителя, фокусируется двумя квадрупольными линзами 5 и проходит через сканирующие магниты 6.

Координатно-чувствительная камера МИК 7 выставлена своим центром по оси z . Плоскость камеры МИК перпендикулярна оси z . Оси x и y также проходят через центральную ось камеры МИК. Камера МИК располагается перед входом в детектор ЦДПИ (или перед пациентом).

Схематически на рис. 1 элементы, входящие в ЦДПИ, попадают в область, обозначенную на рис. 1 пунктирной линией 8, и состоят из: светозащитного герметичного корпуса 9, внутри которого располагается водный фантом 10, обращенный своей поверхностью на объектив 11, и адаптивный электронный тракт ЦДПИ с зарядово-чувствительной матрицей 12. Ось z проходит через центр водного фантома 10, и входная плоскость водного фантома, в которую входит пучок, параллельна плоскости x, y . ЦДПИ по измеренному координатному энерговыделению пучка в водном фантоме определяет область дозного поля и точку 13 остановки пучка – пик Брэгга.

Детектор ЦДПИ в рабочих сеансах доказал возможность регистрации пиков Брэгга от пучка протонов ускорителя “Прометеус” с интенсивностью 10^9 протонов [1, 2]. Ускоритель “Прометеус” при практическом применении не использует весь выведенный из ускорителя пучок в одну точку мишени, а, как правило, сканирует объект пучком с небольшой долей от общего 100% “вывода” пучка. В настоящей работе впервые представлены результаты регистрации пиков Брэгга детектором ЦДПИ не только в режиме работы с полным “выводом” пучка при максимальной интенсивности ускорителя, но и в режиме сканирования мишени малоинтенсивным пучком за один спот. Спот – это доля суммарного пучка, выделенная сканирующими магнитами из полного вывода ускорителя за весь импульс. Например, полный выпуск ускорителя, составляющий 10^9 протонов за полный выпуск, можно разбить на 100 спотов по 10^7 протонов.

События с регистрацией импульсного прохождения пучка протонов через водный фантом, представленные в работах [1, 2], относятся к 100% “выводу” пучка из ускорителя. В этих работах длительность вывода протонов из ускорителя “Прометеус” устанавливалась равной 300 мс, а количество выведенных протонов составляло 10^9 протонов за этот полный “вывод” ускорителя. Такие параметры “вывода” устанавливались и сохранялись в течение всего сеанса при различных энергиях в диапазоне от 30 до 295 МэВ.

В настоящей работе были проведены измерения пиков Брэгга с интенсивностью до 1% от полного “вывода”, равного 10^9 протонов. Конструкция детектора ЦДПИ позволяла с помощью циклограммы внутренней системы запуска регистрировать и записывать события, соответствующие только части от общего “вывода”, равного 100%.

Детектор ЦДПИ регистрирует энерговыделение в водном фантоме при прохождении пучка протонов за импульсы разной интенсивности. Из записанных событий были отобраны события с разными долями от полного “вывода” пучка протонов. На рис. 2 приведены события, зарегистрированные ЦДПИ на ускорителе “Прометеус” при энергиях

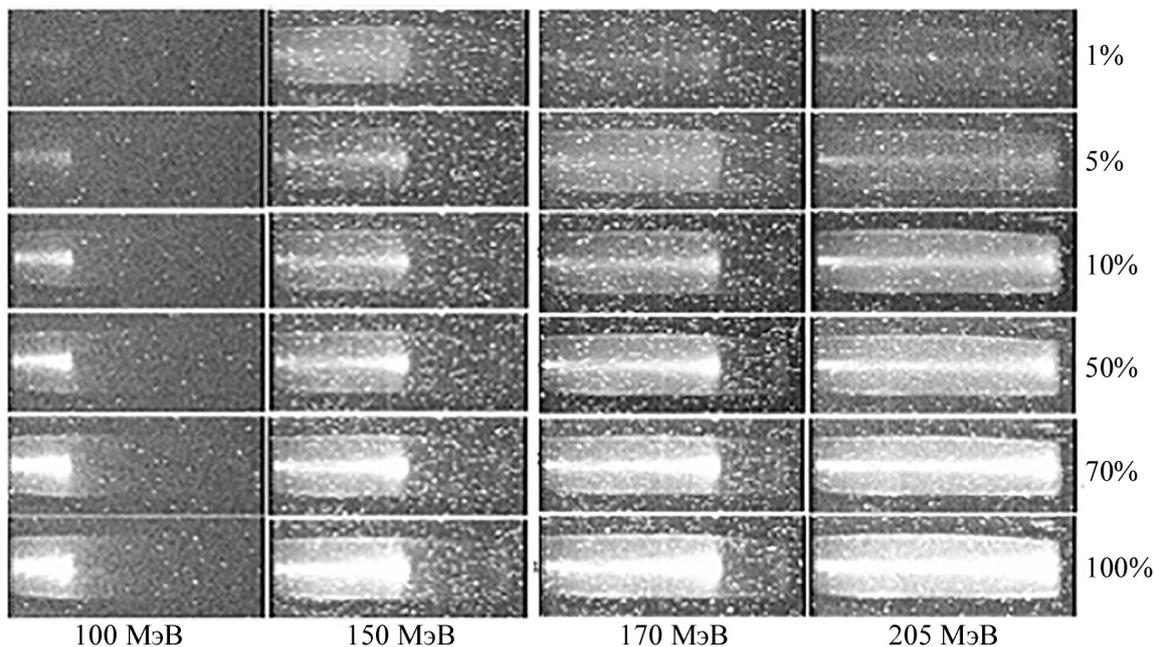


Рис. 2: События с разной долей “вывода” (в процентах) от полного “вывода” протонов из ускорителя “Прометейс”, равного 10^9 протонов. Верхнее событие соответствует доле в 1% от полного “вывода”. Далее последовательно сверху вниз представлены события, соответствующие 5, 10, 50, 70 и 100% от полного “вывода” пучка на детектор ЦДПИ для энергий 100, 150, 170 и 205 МэВ.

протонов соответственно 100, 150, 170 и 205 МэВ и “выводах” пучка, соответствующих различной доле (в %) от полного “вывода”, составлявшего 10^9 протонов. Последовательно от верхнего события вниз идут события, содержащие 1, 5, 10, 50, 70 и 100% от полного “вывода”.

Как видно из рис. 2, яркость событий возрастает от доли в 1% до 100% “вывода”, однако очевидно, что детектор ЦДПИ гарантированно регистрирует пучок и “видит” пик Брэгга при интенсивности 10^7 протонов за импульс. Таким образом подтверждается возможность использования детектора ЦДПИ при калибровках ускорителя “Прометейс” при малых интенсивностях пучка, выводимого на мишень.

Калибровка при помощи ЦДПИ может проводиться в варианте со сканирующим пучком. В качестве иллюстрации этой возможности был смоделирован процесс регистрации пиков Брэгга детектором ЦДПИ на реально зарегистрированных им событиях для энергии 170 МэВ сканирующего пучка протонов с интенсивностью 10^8 протонов за один спот ускорителя. На рис. 3 представлено пять сканирующих пиков Брэгга, смо-

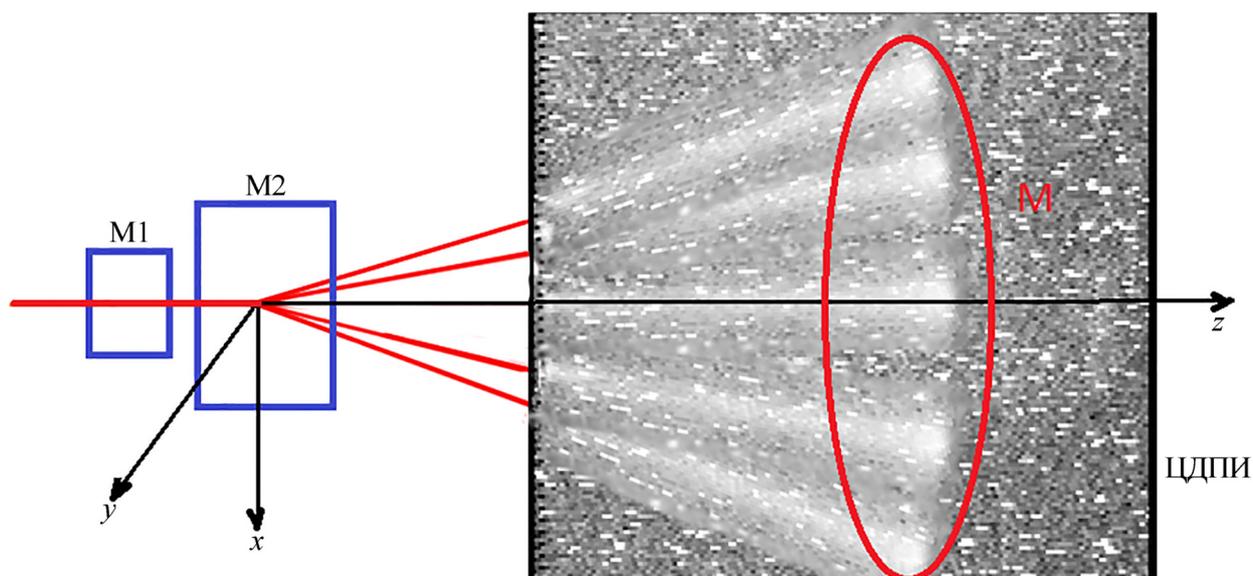


Рис. 3: Пять сканирующих пиков Брэгга – области энерговыведения, зарегистрированные детектором ЦДПИ при энергии протонов 170 МэВ с интенсивностью, соответствующей 10% от полного “вывода”. M1 и M2 – сканирующие магниты, магнит M2 сканирует пучок по горизонтали в плоскости xz . M – область мишени в фантоме ЦДПИ, сканируемая пучком с энергией 170 МэВ за импульс ускорителя. Овалом представлена условная граница мишени.

делированных в фантоме ЦДПИ при “выводе” пучка, составляющем 10% от полного “вывода”, равного 10^9 протонов. Каждый пик Брэгга на рис. 2 соответствует энерговыведению пучка протонов с интенсивностью 10^8 в споте.

Также отметим, что возможна калибровка и прямым пучком без сканирования, когда пучок проходит вдоль оси z и вся энергия выделяется за полный “вывод”, равный 10^9 протонов.

Совместное применение ЦДПИ и МИК позволит улучшить конформность протонной терапии за счет более точного измерения подводимой высокой дозы к мишени во время сеанса протонной терапии с точностью, рекомендуемой МАГАТЭ [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2021-1347.

Авторы выражают благодарность В. Е. Балакину за обсуждение предлагаемого варианта совместной работы детектора ЦДПИ и камеры МИК; А. И. Львову за консультации по проведению испытаний электронного тракта СЭ камеры МИК на ускорителе

“Пахра”; А. В. Колобову за консультации по дальнейшему внедрению камеры МИК на протонных терапевтических ускорителях.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(12), 78 (2018). DOI: 10.3103/S1068335619010068.
- [2] В. В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(2), 47 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619020076.
- [3] Серия технических докладов № 398. Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. При поддержке IAEA, WHO, РАНО и ESTRO. МАГАТЭ. Вена, 2004. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS398r_web.pdf (дата доступа 12.11.2020).

Поступила в редакцию 26 октября 2021 г.

После доработки 29 октября 2021 г.

Принята к публикации 30 октября 2021 г.