УДК 533.9.08:534.8

ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПИКА БРЭГГА ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ РРС-40 И ЦИФРОВЫМ ДЕТЕКТОРОМ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В. В. Сиксин 1 , А. Е. Шемяков 2

Проведено сравнение экспериментального измерения глубины пика Брэгга двумя методами – воздушной ионизационной камерой и цифровым детектором получения изображения (ЦДПИ) для энергии протонов 50, 100 и 170 МэВ. Рассмотрен принцип работы нового класса детекторов – ЦДПИ для регистрации области энерговыделения при прохождении пучка протонов через водный фантом. Детектор ЦДПИ является координатным измерителем профиля пика Брэгга по глубине, который, по известной энергетической зависимости дозы – "кривой качества" – может пересчитать координату в дозный профиль по глубине (при контроле стабильности вывода ускорителя). Отмечено, что режим бининга (сложения пикселей) является наиболее важным для сбора света от радиолюминесценции. При измерении координатной области энерговыделения (пика Брэгга) детектором результат получается практически мгновенно и с точностью, регламентируемой МАГАТЭ.

Ключевые слова: режим бининга, адаптивный электронный тракт, водный фантом, пики Брэгга, детектор ЦДПИ, ионизационная камера PPC-40.

Введение. В работах [1, 2] было осуществлено уверенное наблюдение протонного пучка в водном фантоме цифровым детектором получения изображения (ЦДПИ, в предыдущих работах ДТеТ), были получены профили энерговыделения протонных пучков в водном фантоме в диапазоне энергий от 30 до 250 МэВ. В 2019 году было проведено до-

 $^{^1}$ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: antktech@yandex.ru.

 $^{^2}$ Физико-технический центр ФИАН, 142281 Россия, Московская обл., г. Протвино, пр-д Академический, 2; e-mail: alshemyakov@yandex.ru.

полнительное испытание одного из вариантов электронного тракта детектора ЦДПИ – для изучения способов определения дозы, выделяюшейся за импульс при прохождении пучка протонов в водном фантоме. Было проведено сравнение результатов измерения детектором ЦДПИ и сертифицированной в РФ немецкой плоскопараллельной ионизационной камерой РРС-40.

Для разработки высокочувствительного электронного тракта, имеющего пороговую чувствительность $E_{\text{пор}} = (1.0 \div 3.0) \cdot 10^{-5}$ лк, необходимо применить особые режимы работы электронных схем повышения чувствительности электронного тракта. Для этого в электронном тракте детектора должны быть реализованы как минимум два специальных режима повышения чувствительности – бининг (объединение пикселей) и суммирование кадров – накопление [3].

Принцип работы детектора ЦДПИ. Принцип работы детектора ЦДПИ описан в работах [1, 2]. Работа детектора построена на регистрации сверхслабого излучения (в видимой области спектра), возникающего от радиолюменисценции в водном фантоме [4]. При прохождении пучка ионизирующего излучения через водный фантом возможно возникновение фотонов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра в результате двух основных явлений – свечения Вавилова–Черенкова и радиолюминесценции, вследствие образования электронно-возбужденных частиц.

Отмечено [4], что продолжительность послесвечения люминесценции воды составляет $\tau = 1.8$ нс. В терапевтическом диапазоне энергий протонных пучков в водном фантоме отсутствует излучение Вавилова–Черенкова, так как максимальное значение терапевтической энергии протонного пучка, которое мы используем на практике, равно 250 МэВ и ниже порога Черенкова в воде для протонов. Проведенные расчеты показали необходимость разработки электронного тракта с чувствительностью на уровне $3 \cdot 10^{-5}$ лк.

Одной из особенностей ПЗС фотоприемника (который подключен к нашему специальному электронному тракту детектора ЦДПИ) также является возможность регистрации сверхкоротких импульсов длительностью в единицы нс.

Точность измерения длины пробега частиц детектором ЦДПИ [5] определяется из соотношения:

$$\frac{d_{\pi}}{v_{\rm oc}} \le \Delta z_{\rm gr} \le \frac{n_{\pi} \cdot d_{\pi}}{v_{\rm oc}},\tag{1}$$

где $\Delta z_{\rm gr}$ – точность измерения длины пробега частиц; $d_{\rm n}$ – размер пикселя матричного телевизионного ПЗС фотоприемника; $n_{\rm n}$ – число пикселей матричного телевизионного

ПЗС фотоприемника, объединяемых в один; $v_{\rm oc}$ – параксиальное увеличение оптики сопряжения.



Рис. 1: Схематическое устройство детектора ЦДПИ: ПЗС – твердотельный высокочувствительный адаптивный электронный тракт с матрицей ПЗС, ОБ – объектив с повышенной светосилой, ВФ – водный фантом, PPC-40 – ионизационная камера PPC-40, ПБ – пик Брэгга регистрируемый ЦДПИ, $Z_{изм}$ – глубина пика Брэгга измеряемая ЦДПИ и камерой PPC-40, УС – ускоритель, БП – блок питания, контраст-4USB – устройство видеоввода наблюдаемых событий в ПК.

Детектор ЦДПИ устанавливается непосредственно в зоне вывода протонного пучка из ускорителя, а дополнительные блоки и персональный компьютер со специализированным программным обеспечением для оператора располагаются в пультовой, удаленной от ускорителя (рис. 1). Красной рамкой на рис. 1 обведены все устройства, входящие в комплект детектора ЦДПИ.

Совокупность перечисленных решений позволяет детектору ЦДПИ визуализировать свечение, вызываемое радиолюминесценцией в водном фантоме при прохождении через него пучка протонов от ускорителя.



Рис. 2: Рабочий кадр процесса измерения зафиксированной траектории пучка протонов с энергией 100 МэВ в водном фантоме детектором ЦДПИ и программой OSC-16.

Сравнения экспериментального измерения глубины пиков Брэгга детектором ЦД-ПИ и камерой PPC-40 для энергии протонов 50, 100 и 170 МэВ. На ускорителе "Прометеус" было проведено испытание одного из вариантов электронного тракта детектора ЦДПИ – при трех энергиях 50, 100 и 170 МэВ. Испытания электронного тракта, где отрабатывался алгоритм сложения пикселей (бининг) – показали возможность применения полученных событий для координатных измерений глубины пика Брэгга и ее пересчета в дозу с точностью, соответствующей требованиям МАГАТЭ [6]. На рис. 2 показан рабочий кадр детектора ЦДПИ с результатом попиксельного измерения длины "области свечения" при энергии пучка протонов 100 МэВ в сеансе 2019 года, вычислитель которого определяет величину Z (точку остановки протона в водном фантоме, зафиксированную детектором ЦДПИ в конце пути протона). Программа обработки вычисляет сначала глубину пика Брэгга в пикселях, а затем по калибровочной кривой переводят их в мм. В таблице 1 приведены измеренные ЦДПИ с программой OSC-16 (встроенной в вычислитель ЦДПИ) величины глубины пика Брэгга $Z_{изм}$ и расчетные величины координат – Z_p (полученные программой FLUKA) для энергий 50, 100 и 170 МэВ.

Таблица 1

Координаты по глубине пика Брэгга, измеренные по рабочим кадрам ЦДПИ и рассчитанные программой FLUKA. Сеанс – июль 2019 г.

Энергия,	$Z_{\mu_{3M}}$	Z_p , MM	Инструментальная	Отклонение от
МэВ	координата,	расчетное	погрешность	расчетного значения
	пкс/мм	значение	измерения $\Delta Z, \%$	Z_p от $Z_{{}_{\!$
		FLUKA [8, 9]		
50	39/22.0	22.5	1.7	2.2
100	152/77.2	77.1	0.5	0.1
170	449/196.0	195.8	0.2	0.1

Расчетные значения глубины пика Брэгга – Z_p определялись из расчетов, проведенных численными методами программой FLUKA [7]. Погрешность измерения ΔZ оценивалась по аналитической формуле (1) для детектора ЦДПИ, учитывающей размер пикселя фотоприемника и параксиальное увеличение оптической системы.

Экспериментально измеренные значения осевых координат, характеризующие спад относительной дозы на выборке кадров, совпадают с расчетными значениями в пределах инструментальной погрешности детектора ЦДПИ, что характеризует высокую точность осевых координатных измерений и позволяет стабильно определять положение пика Брэгга.

На ускорителе "Прометеус" был также проведен эксперимент по измерению дозных профилей пиков Брэгга в водном фантоме – идентичном по параметрам водному фантому применяемому в детекторе ЦДПИ. Измерялась поглощенная доза (ПД) сертифицированной в РФ немецкой плоскопараллельной ионизационной камерой РРС-40 применяемой для измерения дозного профиля в водных фантомах в лучевой терапии. В нашем случае измерялась поглощенная доза для статистики на основе 2 · 10⁹ протонов, прошедших по оси водного фантома.

 Для каждой точки кривой Брэгга набиралась статистика за несколько импульсов, полное количество протонов, прошедших через водный фантом при одной фиксированной энергии падающего пучка 2 · 10⁹.



Рис. 3: Кривая пика Брэгга для энергии 50 МэВ, измеренная камерой PPC-40. Красная вертикальная линия показывает глубину пробега – она начинается от уровня d80. Параметр d80 – уровень 80% дозы в дистальной (правой части) пика Брэгга.

2) Водный фантом при измерениях камерой PPC-40 совпадал по геометрии с водным фантомом для детектора ЦДПИ.

 Параметры пучка также совпадали – ширина пучка на полувысоте была 3 мм, длительность импульса равнялась 300 мсек и интенсивность пучка была не более 1 · 10⁹ протонов за импульс.



Рис. 4: Кривая пика Брэгга для энергии 100 МэВ, измеренная камерой РРС-40.



Рис. 5: Кривая пика Брэгга для энергии 170 МэВ, измеренная камерой РРС-40.

При измерениях использовался фантом, идентичный детектору ЦДПИ. Входное окно у детектора ЦДПИ и у фантома, где проводились измерения камерой PPC-40, были идентичны.

Результаты измерений для энергий 50, 100 и 170 МэВ камерой PPC-40 приведены на рис. 3–5. На рис. 3–5 приведены также кривые, аппроксимирующие эти экспериментальные точки.

В таблице 2 приведены измеренные детектором ЦДПИ глубины пиков Брэгга $Z_{изм}$ и глубины пиков Брэгга, измеренные ионизационной камерой PPC-40 – Z_{PPC-40} , для энергий 50, 100 и 170 МэВ.

Таблица 2

Результат измерений детектором ЦДПИ глубины пиков Брэгга $Z_{uзм}$ и результат измерений глубины пиков Брэгга ионизационной камерой PPC-40 – Z_{PPC-40} для энергий 50, 100 и 170 МэВ. Сеанс – июль 2019 г.

Энергия,	$Z_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{$	$Z_{\rm PPC-40}$, MM	Инструментальная	Отклонение между
МэВ	измеренная	измеренное	погрешность	значениями $Z_{\rm PPC-40}$
	координата,	значение,	измерения $\Delta Z, \%$	и $Z_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{}_{{$
	пкс/мм, ЦДПИ	PPC-40		
50	39/22.0	22.2	1.7	0.9
100	152/77.2	77.0	0.5	0.26
170	449/196.0	195.5	0.2	0.25

Значения глубины пика Брэгга Z_{PPC-40} в таблице 2 определялись из экспериментальных измерений камерой PPC-40. На уровне параметра d80 – на дистальной части пика Брэгга – проводилась вертикальная линия до пересечения с осью глубины Z и определялась глубина Z_{PPC-40} для каждой фиксированной энергии. Отклонение измерений детектором ЦДПИ и камерой PPC-40 приведена в таблице 2.

Результаты, приведенные в таблице 1 и таблице 2 показали совпадение в пределах требований МАГАТЭ [6] двух способов измерения – камерой РРС-40 и детектором ЦД-ПИ. Экспериментально измеренные значения осевых координат, которые совпадают с результатами численных методов – расчетами программой FLUKA [7], характеризует высокую точность осевых координатных измерений и позволяет стабильно определять положение пика Брэгга.

Выводы. Подтверждено совпадение измеренной глубины пиков Брэгга камерой PPC-40 и детектором ЦДПИ в пределах ошибки, допускаемой требованиями МАГАТЭ [7]. Применение режима бининга и других особенностей адаптивного электронного тракта детектора ЦДПИ позволили с точностью, рекомендуемой МАГАТЭ [6], измерять профили пиков Брэгга при калибровке ускорителя перед сеансами лучевой терапии.

Авторы выражают благодарность В. Е. Балакину за возможность испытаний электронного тракта детектора ЦДПИ в ceancax 2019 г. на ускорителе "Прометеус".

Авторы выражают благодарность А.И. Львову за консультации по проведению испытаний электронного тракта детектора ЦДПИ в г. Протвино в сеансах 2019 г. и за поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(12), 78 (2018). https://doi.org/10.3103/S1068335619010068].
- [2] В.В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН 46(2), 47 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619020076.
- [3] А. К. Цыцулин, Д. Ю. Адамов, А. А. Манцветов и др., Твердотельные Телекамеры: Накопление качества информации (Санкт-Петербург, Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014). https://search.rsl.ru/ru/record/01007886419.
- [4] В. П. Казаков, Г. Л. Шарипов, *Радиолюминесценция водных растворов* (М., Наука, 1986), 136 с. https://search.rsl.ru/ru/record/01001295055.

- [5] В. В. Сиксин, "Способ измерения энерговыделения от ионизирующих излучений", Патент на изобретение РФ № 2654838 С1, Бюллетень изобретений, опубл. 22.05.2018.
- [6] Серия Технических Докладов № 398. Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. При поддержке IAEA, WHO, PAHO и ESTRO, Международное агентство по Атомной энергии, Вена, 2004. https://wwwpub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs398r_web.pdf
- [7] Официальный сайт пакета FLUKA http://www.fluka.org.

Поступила в редакцию 13 июня 2019 г. После доработки 27 июля 2020 г. Принята к публикации 28 июля 2020 г.