

## ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПИКОВ БРЭГГА ДЕТЕКТОРОМ ДТеТ

В. В. Сиксин

*Проведены измерения профилей пиков Брэгга детектором телевизионного типа ДТеТ. Осуществлены двухкоординатные измерения области энерговыведения в фантоме с водой, проведен эксперимент с дополнительной водной насадкой при импульсном облучении водного фантома пучком протонов с энергией до 260 МэВ.*

**Ключевые слова:** область энерговыведения, водный фантом, водная насадка, профили пика Брэгга, детектор телевизионного типа.

*Введение.* В работе [1] осуществлено уверенное наблюдение протонного пучка в водном фантоме детектора телевизионного типа (ДТеТ), получены яркие, четкие траектории протонных пучков в диапазоне энергий от 30 до 200 МэВ непосредственно на исходных кадрах видеозаписи, не требующих дополнительной компьютерной обработки.

В настоящей работе рассматриваются результаты измерения профилей пиков Брэгга по видеокадрам, полученным в работе [1], а также результаты нового эксперимента, проведенного в декабре 2018 года на протонном терапевтическом ускорителе “Прометеус” для диапазона энергий от 210 до 260 МэВ. В новом эксперименте для измерений использовалась дополнительная водная насадка длиной 148 мм, что, в совокупности с длиной основного водного фантома ДТеТ (280 мм), позволило осуществить измерения профилей пиков Брэгга при энергиях до 260 МэВ (рис. 1).

Учет воздушного промежутка (650 мм) от ускорителя 1 до водной насадки 2, длины водной насадки 2, зазора (33 мм) между водной насадкой 2 и основным фантомом 3 детектора ДТеТ осуществлялся по результатам расчетов Монте-Карло. Основной целью эксперимента являлось получение дополнительной информации в терапевтическом диапазоне энергий, необходимой для проектирования рабочего варианта ДТеТ.

Позиционирование детектора ДТеТ и водной насадки относительно пучка ускорителя “Прометеус” показано на рис. 2.

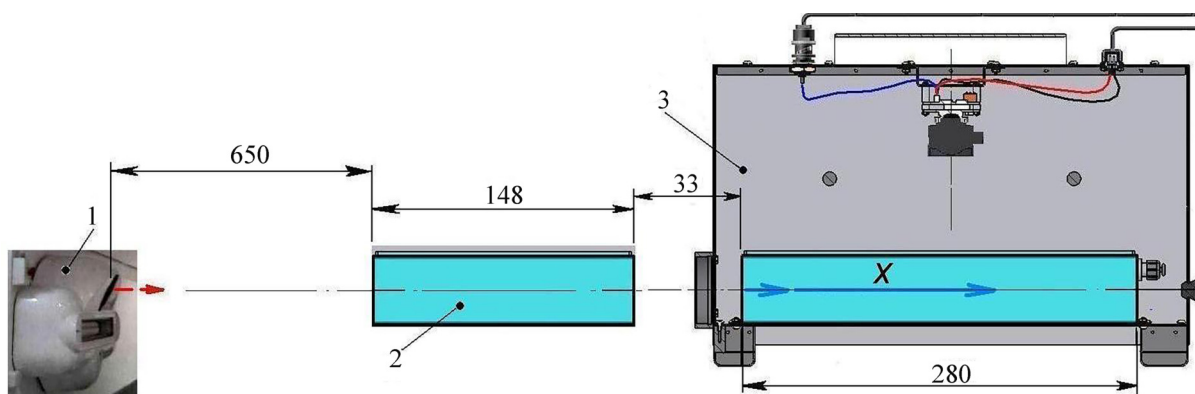


Рис. 1: Детектор ДТсТ с насадкой – дополнительным водным фантомом.



Рис. 2: Позиционирование детектора ДТсТ и водной насадки на ускорителе “Прометеус”.

Юстировка положения оси водной насадки осуществлялась по световому перекрестию от ускорителя (центр протонного пучка) при предварительно выставленном детекторе ДТсТ, после чего осуществлялась покадровая цифровая видеозапись событий.

Попиксельные измерения глубины пика Брэгга, т.е. точки максимума пика Брэгга по  $X$  координате, и диаметра головки профиля пика Брэгга по  $Y$  координате проведены с помощью программы OSC-16 (рис. 3).

В таблицах 1 и 2 приведены измеренные величины глубины  $X$  и диаметра  $Y$ , а также расчетные величины координат  $X$ , проведенные по методике [4].

Таблица 1 содержит результаты измерения траекторий протонных пучков в диапазоне энергий от 30 до 200 МэВ при использовании одного основного водного фантома длиной 280 мм, встроенного в детектор ДТсТ [1], на сеансе от 7 ноября 2018 г.

Т а б л и ц а 1

Сеанс от 7 ноября 2018 г. с детектором ДТеТ

Энергия, МэВ	X координата, пкс/мм	X, мм (расчетное значение)	Y координата, пкс/мм	Масштабный коэффициент для Y, пкс/мм	Погрешность измерения $\Delta X$ , %
30	16/9.25	9.10	70/39.7	1.76	4.0
40	26/14.9	15.0	66/36.7	1.80	2.5
50	39/22.0	22.5	46/24.9	1.85	1.7
60	55/30.6	31.0	46/24.2	1.90	1.2
70	76/41.4	41.2	47/23.8	1.98	0.9
80	98/52.3	52.4	49/23.7	2.07	0.7
90	124/64.6	64.6	58/26.9	2.16	0.6
100	152/77.3	77.1	57/25.3	2.26	0.5
110	184/91.2	91.3	47/20.2	2.36	0.4
120	222/106.9	106.5	50/20.0	2.47	0.3
130	258/121.2	122.0	51/20.0	2.55	0.3
140	306/139.8	139.6	53/20.3	2.60	0.3
150	351/157.1	157.5	46/17.7	2.60	0.2
160	400/176.2	176.3	45/17.8	2.55	0.2
170	449/196.0	195.8	42/17.5	2.40	0.2
180	496/216.2	216.2	39/17.4	2.24	0.2
190	541/237.2	237.2	37/17.9	2.06	0.2
192.5	553/243.1	242.6	34/16.9	2.00	0.2
195	565/249.0	248.0	31/15.8	1.96	0.1
200	589/261.6	261.8	41/21.0	1.88	0.1

Погрешность измерения  $\Delta X$  оценивалась по аналитическим формулам для детектора телевизионного типа, учитывающим размер пикселя фотоприемника [2] и параксиальное увеличение оптической системы, и она составляет  $\sim 0.37$  мм.

Таблица 2 содержит измерения траекторий протонных пучков в диапазоне энергий от 210 до 260 МэВ при использовании детектора ДТеТ и дополнительного водного фантома – водной насадки, как показано на рис. 1, на сеансе от 7 декабря 2018 г.

Погрешность измерения  $\Delta X$  при использовании дополнительной водной насадки оценивалась как сумма погрешности детектора ДТеТ [2] и дополнительных погрешностей, вносимых водной насадкой и воздушными зазорами.

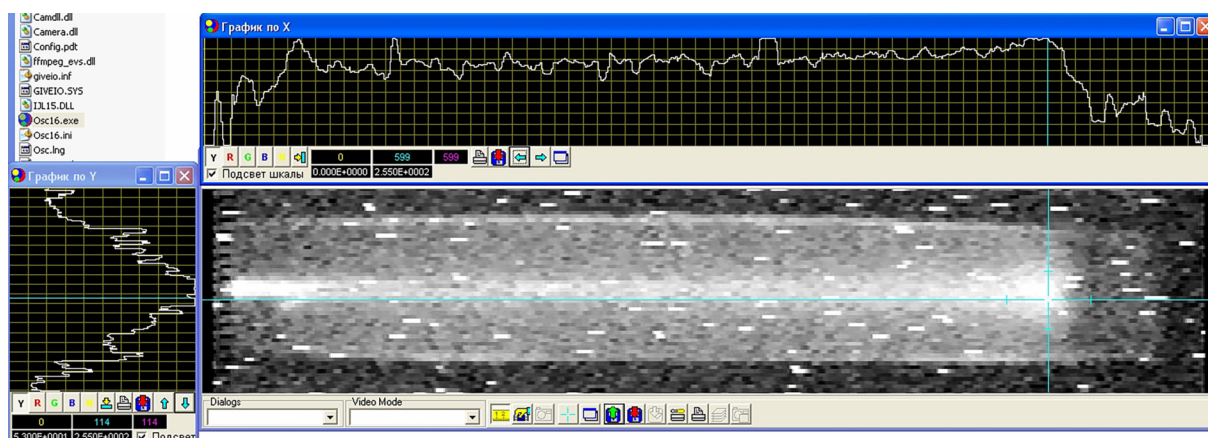


Рис. 3: Окно программы OSC-16 (энергия пучка 195 МэВ).

Т а б л и ц а 2

Сеанс от 7 декабря 2018 г. с детектором ДТеТ и водной насадкой

Энергия, МэВ	X координата, пкс/мм	X, мм (расчетное значение)	Y координата, пкс/мм	Масштабный коэффициент для Y, пкс/мм	Погрешность измерения $\Delta X$ , %
210	288/281.0	281.3	35/13.5	2.60	0.4
220	348/304.0	304.3	45/17.3	2.59	0.2
230	408/327.3	327.8	37/14.9	2.48	0.2
240	468/352.0	351.8	34/14.9	2.28	0.2
250	523/376.6	376.4	32/15.6	2.05	0.2
255	548/388.6	388.8	32/16.5	1.94	0.2
260	574/401.8	401.4	31/16.9	1.82	0.2

Одной из целей эксперимента 7.12.2018 являлось определение предельных условий, при которых влияние наведенной радиации приводило бы к нарушению работоспособности электронной аппаратуры детектора ДТеТ.

Электронные блоки адаптивной телевизионной камеры [3] расположены на расстоянии  $\sim 200$  мм от оси водного фантома и подвергаются облучению вторичными частицами при прохождении протонного пучка через водный фантом. В процессе экспериментов фиксировалось время непрерывной работы ускорителя, после которого на видеокдрах цифровой записи появлялись характерные артефакты в виде возрастания количества пикселей ПЗС фотоприемника с аномальным шумом.

Экспериментально определено, что для появления видимых изменений на кадрах цифровой записи требуется время непрерывного облучения более 2-х часов (рис. 4).



Рис. 4: Пример видеокadra при обычной работе ускорителя (верхний кадр 7.11.2018) и видеокadra с артефактами после длительного (2.5 часа) непрерывного облучения (7.12.2018).

На рис. 4 приведены кадры цифровой записи при обычном режиме применения детектора ДТет – с длительностью разовых сеансов  $\sim 10$  мин с перерывом  $\sim 30$  мин (верхний кадр для энергии 195 МэВ), и после проведения испытаний на радиационную устойчивость – при непрерывном облучении длительностью  $\sim 2.5$  часа без перерывов в работе ускорителя (нижний кадр для энергии 260 МэВ с водной насадкой). Важно отметить, что режим длительного многочасового непрерывного излучения не является рабочим режимом ускорителя.

Результаты испытаний позволили сделать вывод, что работоспособность электронных блоков ДТет будет гарантированно обеспечена на любых значениях терапевтического диапазона энергий от 30 до 260 МэВ при многолетней эксплуатации в обычных режимах работы, основанных на реальном времени калибровки, когда длительность сеанса редко превышает время более 10 мин.

По результатам сеансов определено, что ширина пучка протонов, равная  $\sim 6$  сигма в пике Брэгга для энергии 260 МэВ, составила  $\sim 16.9$  мм, что говорит о ценности протонной терапии. Практически энергии больше 250 МэВ в протонной терапии применяются редко.

*Основные результаты.* Подтверждена возможность визуально наблюдать траектории протонных пучков в реальном времени и измерять профили – координаты пика Брэгга во всем диапазоне терапевтических значений энергии излучения.

Геометрические размеры области энерговыделения по  $X$  координате, зафиксированные и измеренные на видеокдрах для 27-ми значений энергий, совпадают с расчетными величинами с точностью инструментальной ошибки, не превышающей заданную в нормативных актах МАГАТЭ [5].

Полученные результаты демонстрируют возможности ДТеТ по его применению для точного определения области энерговыделения в максимуме кривой Брэгга при калибровке ускорителя, а также для других задач при подготовке к сеансу протонной терапии.

Автор выражает благодарность В. Е. Балакину за возможность испытаний рабочего варианта ДТеТ в сеансе 7 декабря 2018 г. на ускорителе “Прометеус” и А. Е. Шемякову за помощь в управлении ускорителем при работе с детектором ДТеТ; А. Шестопалову за разработку программного обеспечения для ДТеТ, которое позволяет осуществить практическое внедрение детекторов телевизионного типа при планировании лучевой терапии; А. И. Львову за консультации по проведению сеанса в г. Протвино в декабре 2018 г. и за поддержку работы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. В. Сиксин, Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(12), 78 (2018).
- [2] В. В. Сиксин, Патент РФ №2654838. Опубликовано 22.05.2018, бюлл. № 15 (2018).
- [3] [www.evs.ru](http://www.evs.ru)
- [4] J. F. Janni, At. Data Nucl. Data Tables **27**, 147 (1982).
- [5] Серия Технических Докладов №3 98. 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).

Поступила в редакцию 24 декабря 2018 г.

После доработки 15 января 2019 г.

Принята к публикации 12 февраля 2019 г.