

ДЕТЕКТОР ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ФАНТОМЕ С ВОДОЙ НА ПУЧКЕ ПРОТОНОВ РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

А.В. Гринкевич¹, В.В. Сиксин²

¹ ООО “ЭВС”, Санкт-Петербург

² Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, Москва

Разработан и испытан детектор телевизионного типа на пучке протонов радиотерапевтического ускорителя г. Протвино для визуализации области энерговыделения в фантоме с водой. Экспериментально определены размеры области энерговыделения в виде кривых Брэгга в фантоме при импульсном облучении фантома пучком протонов с энергией от 60 до 170 МэВ, проведено сравнение полученных результатов с модельными расчетами для определения пространственного распределения энерговыделения в водных фантомах.

Ключевые слова: протоны, пик Брэгга, водный фантом, область энерговыделения, визуализация, адаптивная телевизионная камера

Введение

Впервые применен и испытан на пучке протонов медицинского радиотерапевтического ускорителя в г. Протвино (в дальнейшем ускоритель) новый вид детектора “peakfinder” – детектор телевизионного типа с тканеэквивалентным фантомом (в дальнейшем – детектор). Детектор снабжен микропроцессором с математической моделью, по которой рассчитывается поглощенная доза на глубине остановки протона в режиме работы on-line.

Использовался ускоритель, разработанный и изготовленный чл.-корр. РАН В.Е. Балакиным и сотр. Ускоритель позволяет перестраивать энергию в диапазонах от 30 до 330 МэВ, перестраивать длительность импульса и определять поглощенную дозу за импульс, отпускаемую пациенту.

Основные характеристики ускорителя:

- ✓ длительность импульса – от 10 до 1000 мс;

- ✓ флюенс пучка протонов в импульсе – от $1 \cdot 10^8$ до $1 \cdot 10^9$;
- ✓ диаметр пучка в районе медицинского кресла – 10 мм;
- ✓ обеспечивается изменение положения кресла пациента относительно пучка, вращение кресла вокруг вертикальной оси и перемещение его по высоте.

На левой части рис. 1 показан детектор с водной кюветой диаметром 100 мм, закрепленные в кресле вместо пациента, центр пучка наводился на водный фантом. Показано окно вывода пучка, представляющее собой тонкую металлическую мембрану, отделяющую вакуумную систему ускорителя от процедурного помещения.

На правой части рис. 1 показан детектор с кюветой диаметром 280 мм, расположенные в кресле, находящемся в опущенном состоянии.

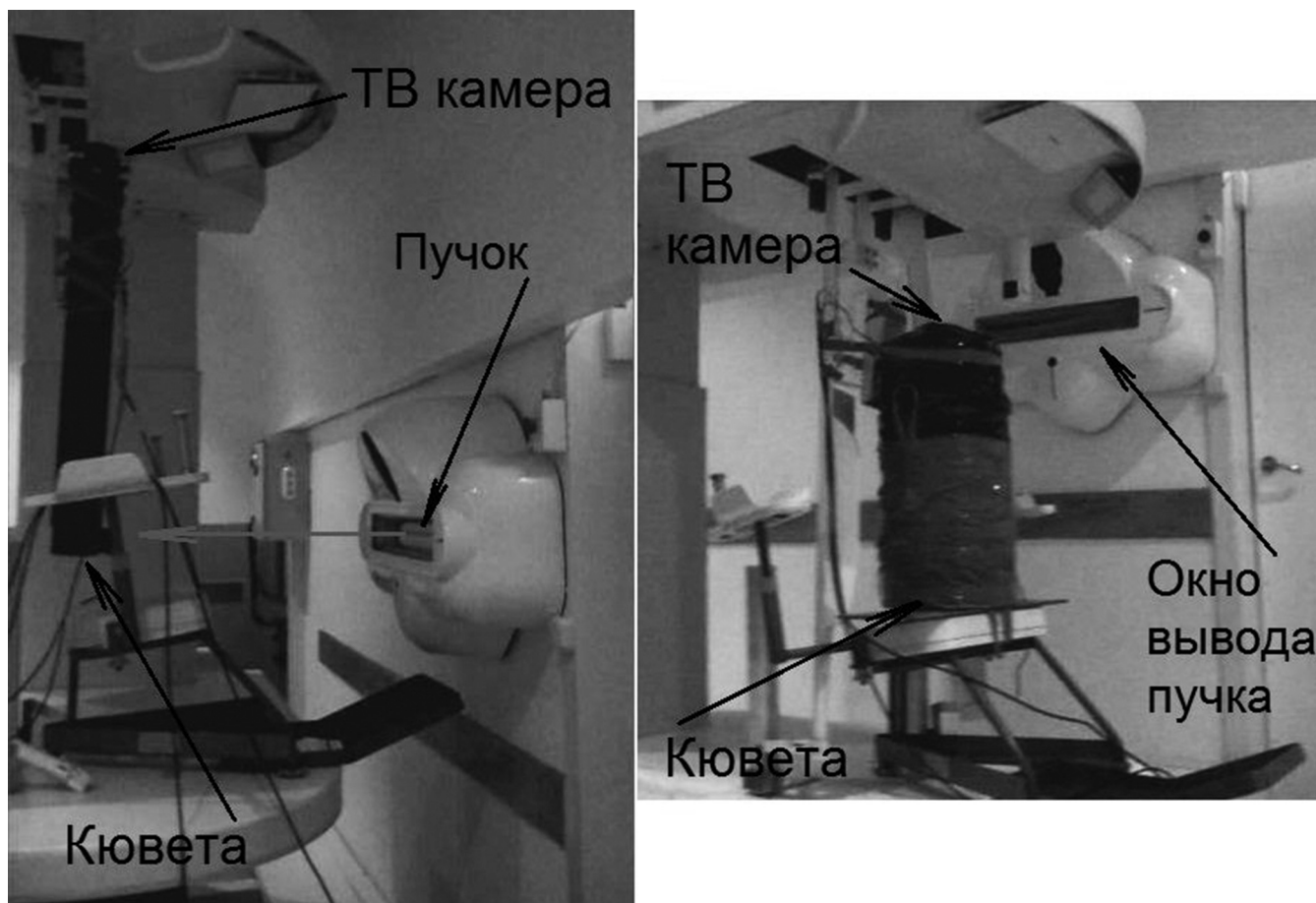


Рис. 1. Кресло пациента с кюветами диаметром 100 мм (слева) и 280 мм (справа)

Детектор, закрепленный в кресле по центру пучка облучался по заданной программе в импульсном режиме для энергий 60, 80, 100, 150 и 170 МэВ при флюенсе $8 \cdot 10^8$ протонов за импульс и длительности импульса, равной 300 мс.

Механизм энерговыделения в воде протонов достаточно хорошо изучен [1], в связи с чем целью данной работы являлась проверка точности результатов измерения глубинных дозных кривых Брэгга детектором телевизионного типа в сравнении с результатами известных теоретических расчетов и методик, применяемых на ускорителе.

Полученные результаты позволили с допустимой неопределенностью (не более 3 %) определить дозное распределение для протонов в воде по экспериментальному значению глубины пробега протонов в воде (L , мм).

Описание детектора

Детектор содержит телевизионную камеру (ТВК) и тестовый монитор со встроенным видеорегистратором, осуществляющим запись изображения в формате 320×240 пикселей с частотой 25 кадров в секунду. Подробно описание детектора и принципов его работы приведено в работах [2–4]. Для проведения экспериментов с протонами нижняя часть детектора была доработана с обеспечением возможности смены кювет. Сменные кюветы имеют разный диаметр внутренней части – первая кювета имеет диаметр 100 мм, вторая – диаметр 280 мм. Расстояние от входного окна кюветы до ионопровода составляет ~ 35 см. На фантом за один импульс поступает $8 \cdot 10^8$ протонов. Поперечный размер пучка при входе во входное окно кюветы имеет диаметр 10 мм, пучок выставлен по центру кюветы.

Для работы со сменными кюветами использовались два объектива. Объектив с фокусным расстоянием 25 мм использовался для кюветы диаметром 100 мм, а для кюветы диаметром 280 мм использовался объектив с фокусным расстоянием 8 мм, обеспечивающий соответственное увеличение (в ~ 3 раза) линейного поля зрения и наблюдение более длинных пробегов при более высоких значениях энергии пучка протонов. Объективы фокусировались на середину кюветы.

В верхней части трубы закреплена ТВК на расстоянии 65 см от кюветы, которое обеспечивает предохранение электронных узлов ТВК от воздействия пучка протонов. В связи со слабыми регистрируемыми световыми сигналами при визуализации пика Брэгга детектор был экранирован от постороннего света.

Ускоритель включался на несколько минут для каждой из перечисленных выше энергий. Интервал между импульсами ускорителя составлял 2 с.

По кадрам видеорегистратора на тестовом мониторе проводилась фиксация положения и размеров “области свечения” – кривой Брэгга, начиная от входа пучка в кювету и кончая пиком Брэгга – более яркой вспышкой в конце. По известному масштабу кадра видеорегистратора процессор детектора определял экспериментальную длину L (мм) пробега в фантоме, которая затем сравнивалась с расчетным значением L мм [5]. Неопределенность определения длины составляла $\sim 3\%$ для данного эксперимента.

Была установлена повторяемость результатов в сеансах, все последующие кадры практически повторяли предыдущие при каждом значении энергии.

Анализ экспериментальных данных

Первый эксперимент проводился со сменной кюветой диаметром 100 мм, с объективом ТВК при $F=25$ мм для энергий 60 и 80 МэВ (рис. 2 и 3).

Для более высоких энергий, при которых длина “области свечения” начинала превышать размер первой кюветы, был проведен второй эксперимент со сменной кюветой диаметром 280 мм, с объективом ТВК при $F=8$ мм при энергиях 100 и 150 МэВ (рис. 4 и 5).

На нижних фоновых (шумовых) кадрах рис. 2–5 после входного окна кюветы 100 мм и

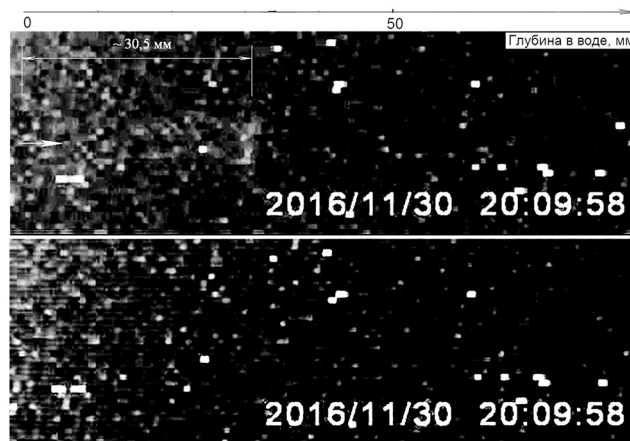


Рис. 2. Область свечения для энергии 60 МэВ. Кювета 100 мм. $F=25$ мм

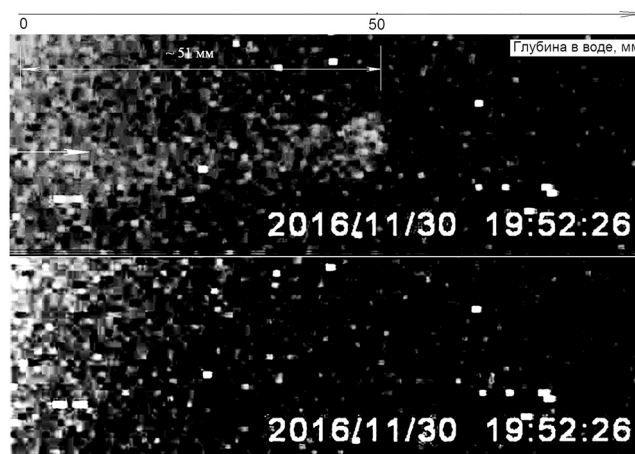


Рис. 3. Область свечения для энергии 80 МэВ. Кювета 100 мм. $F=25$ мм

кюветы 280 мм присутствует фон. Здесь следует отметить, что кюветы изготавливались из черной пластмассы PLA. Толщина стенок кюветы составляла 4 мм, а толщина входного окна составляла 0,7 мм. Выяснилось, что стенки пропускают фоновое ИК излучение в ближнем ИК диапазоне 0,8–1,05 мкм, который является спектральным диапазоном чувствительности ТВК [2]. На выходном окне ускорителя устанавливалась линейка красных светодиодов, формирующая изображение в виде креста, указывающее направление пучка, который совмещался с центром входного окна кюветы. Таким образом, вследствие наличия ИК составляющей в спектре излучения светодиодов, часть ИК излучения проникала через

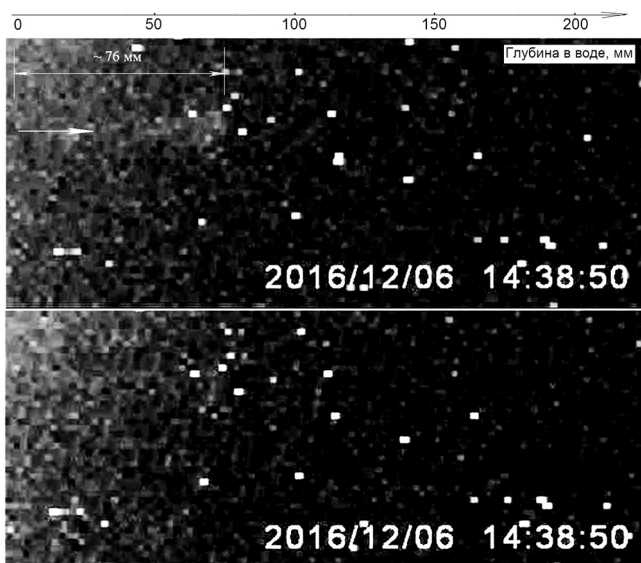


Рис. 4. Область свечения для энергии 100 МэВ. Кювета 280 мм. $F=8$ мм

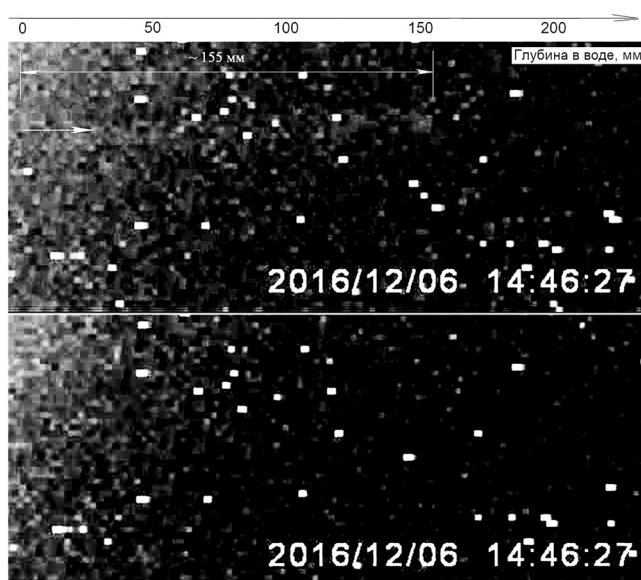


Рис. 5. Область свечения для энергии 150 МэВ. Кювета 280 мм. $F=8$ мм

входное окно кюветы, из-за чего на всех кадрах видеорегистратора (включая темновые кадры), эта составляющая проявлялась как фоновое свечение со стороны входного окна кюветы.

На рисунках стрелкой показано направление пролета и положение оси пучка протонов. Визуальная фиксация “области свечения” имела более наглядный эффект за счет интегрирующих свойств зрительного анализатора –

глаза человека. Для лучшего восприятия отдельных кадров проведено контрастирование программными методами.

На кадрах хорошо фиксируется меньшая яркость области свечения во втором эксперименте, обусловленная как уменьшением энерговыделения, так и 3-кратным уменьшением масштаба за счет применения более короткофокусного объектива.

Оценка поглощенной дозы в фантоме

Как видно из рисунков, глубинное дозное распределение для пучка протонов имеет достаточно протяженную область медленного роста дозы с увеличением глубины (область “плато”) и далее с крутым пиком, который называют пиком Брэгга, а всю кривую – кривой Брэгга (в честь английского ученого У.Г. Брэгга). Амплитуда этого пика в несколько раз превышает дозу на поверхности. За пиком Брэгга доза падает практически до нуля. Положение пика Брэгга определяется энергией частицы и ее пробегом.

Используя пакет программ Монте-Карло MNCP [5], был произведен расчет определения глубинных дозных распределений протонов в воде для энергий эксперимента и проведено сравнение с экспериментально измеренной величиной L . Результаты расчетов приведены на рис. 6 для энергий 60, 80, 100 и 150 МэВ.

В литературе [6] были определены соотношения пробег – энергия, которые использованы для сравнения с полученными на детекторе экспериментальными значениями пробега L (мм). Также было проведено сравнение полу-

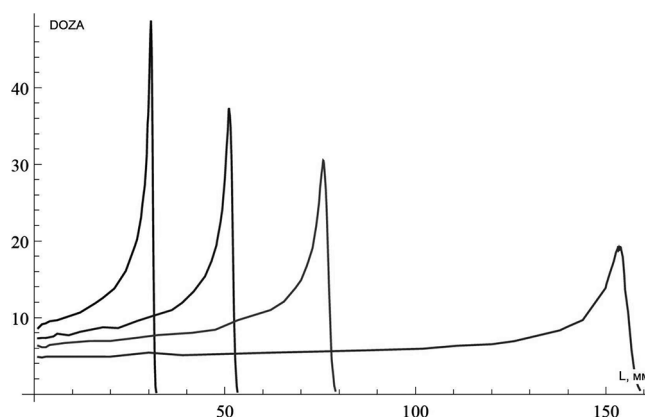


Рис. 6. Распределение поглощенной дозы в фантоме с водой из расчетов MNCP для энергий эксперимента

Таблица 1
Зависимость пробега протона в воде L
от энергии протона E

E , МэВ	L , мм
60	31
80	52
100	77
150	157

ченных данных с расчетами, проведенными по моделям [6]. Выявлено совпадение пробегов, измеренных в водном фантоме на детекторе с расчетами Монте-Карло с расхождением $\sim 3\%$.

Для каждой измеренной энергии детектор визуализировал кривую Брэгга и проводилось сравнение экспериментальных данных с расчетами по методу Монте-Карло по моделям [5] и [6]. Результаты расчетов, которые основываются на соотношениях пробег–энергия [6], приведены в табл. 1.

Проведенные расчеты [6] совпадают с полученными результатами, что позволяет сделать вывод о том, что детектором телевизионного типа возможно определение положения пиков Брэгга с неопределенностью $\sim 3\%$ относительно расчетных значений.

Основные результаты

1. Геометрические размеры области свечения, зафиксированные на кадрах рис. 2–5 и измеренные по известной системе координат, совпадают с областью энерговыделения из кривой Брэгга и табл. 1 с неопределенностью до 3% .
2. Положение и форма пика Брэгга, зафиксированные детектором телевизионного типа и определенные численным методом [5, 6], согласуются между собой с расхождением не более 3% .
3. Проведено моделирование переноса пучка в процедурном кресле в водном фантоме методом Монте-Карло с помощью программы MNCP [5].
4. Определена способность детектора телевизионного типа регистрировать световые импульсы короткой длительности и сверхмалой интенсивности на уровне $0,00004\text{--}0,00006$ люкса в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

5. Полученные результаты показывают, что метод “peakfinder” – детектора телевизионного типа для визуализации кривой Брэгга при подготовке пациентов к сеансам лучевой терапии, может использоваться аналогично методам, применяемым на ускорителе в настоящий момент.

Применение детектора телевизионного типа

Разработанный детектор телевизионного типа предназначен для применения в биологических экспериментах и перед терапевтическими сеансами для проверки области энерговыделения и верификации дозных полей в тканеквивалентных фантомах.

Авторы выражают благодарность В.Е. Балакину за консультации и возможность тестирования детектора телевизионного типа с проведением цикла исследований на терапевтическом ускорителе, а также сотрудникам ф. “Протом”, обеспечивающим режимы ускорителя в экспериментах, проведенных в ноябре и декабре 2016 в г. Протвино.

Авторы выражают благодарность сотруднику “Протом” А.В. Шевякову за консультации по методике верификации длины пробега протонов в фантоме перед терапевтическими процедурами.

Авторы выражают благодарность А.И. Львову за консультации и поддержку работы.

Авторы выражают благодарность А.В. Кольцову за построение графиков пиков Брэгга.

Авторы выражают благодарность сотруднику Медицинского радиологического научного центра А.Е. Чернуха (г. Обнинск) за помощь в написании статьи.

Список литературы

1. Марков Н.В. Дозиметрия импульсных пучков тяжелых ионов для радиобиологических исследований на ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН. Дисс. к.ф.м.н. Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 2014.
2. Гринкевич А.В., Сиксин В.В. Установка для визуализации области формирования погло-

- ценных доз в фантоме на пучке электронов для проведения биологических экспериментов // Мед. физика. 2017. № 2(74). С. 61–67.
3. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь. 1991. 264 с.
 4. Хромов Л.И., Лебедев Н.В., Цыцулин А.К., Куликов А.Н.. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. – М.: Радио и связь. 1986. 183 с.
 5. Briesmelster J.F., MNCP–A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 4C. Report LA-13709-M (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2000).
 6. Stopping Power and Range for Protons and Alpha Particles: ICRU Report 49. ICRU, Bethesda, 1993.

APPARATUS FOR VISUALIZING THE ENERGY RELEASE IN A WATER PHANTOM IRRADIATED WITH THE PROTON BEAM OF THE RADIOTHERAPEUTIC ACCELERATOR

A.V. Grinkevich¹, V.V. Siksin²

¹ *EVS Open Company, St. Petersburg, Russia*

² *P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

An apparatus for visualizing the energy release region in a water phantom is developed and tested on the proton beam of the radiotherapeutic accelerator. The shape and sizes of the emission region during pulsed irradiation of the phantom with the proton beam (60–170 MeV) is experimentally determined in the form of Bragg curves. The results are compared with model calculations.

Key words: *proton beam, Bragg's peak, energy release region, water phantom, imaging, adaptive television camera*

E-mail: lyu1455@yandex.ru