



ПРЕПРИНТ

16

А. В. ГРИНКЕВИЧ, В. В. СИКСИН

**УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ФАНТОМЕ С ВОДОЙ НА
ПУЧКЕ ПРОТОНОВ РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО
УСКОРИТЕЛЯ г. ПРОТВИНО**

ПРЕПРИНТЫ ФИАН им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

ISSN 2410-4914

Главный редактор В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус,
научный секретарь С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

Редакционная коллегия: В. С. Бескин, А. А. Горбачевич, О. Д. Далькаров,
Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский,
Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин,
Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес редакции: Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН

Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;

E-mail: pavel@sci.lebedev.ru

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:

<http://preprints.lebedev.ru/>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

А. В. Гринкевич, В. В. Сиксин

**УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ
В ФАНТОМЕ С ВОДОЙ НА ПУЧКЕ ПРОТОНОВ
РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ г. ПРОТВИНО**

№ 16

ФИАН 2016

А.В. Гринкевич¹, В.В.Сиксин²

¹ООО "ЭВС" г. Санкт-Петербург, E-mail: lyu1455@yandex.ru

²Физический институт им. П.Н.Лебедева, РАН, г. Москва, E-mail: antktech@yandex.ru

Разработана и испытана на пучке протонов радиотерапевтического ускорителя г. Протвино установка с высокочувствительной телевизионной камерой для визуализации области энерговыведения в фантоме с водой. Экспериментально определены геометрическая форма и размеры области свечения в виде кривых Брегга в фантоме при импульсном облучении фантома пучком протонов с энергией от 60 до 170 МэВ, проведено сравнение полученных результатов с другими экспериментальными методами и с модельными расчетами для определения пространственного распределения энерговыведения в водных фантомах.

Ключевые слова: Область энерговыведения, водный фантом, адаптивная телевизионная камера, пик Брегга, глубинное дозное распределение.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Впервые применена и испытана на пучке протонов радиотерапевтического медицинского ускорителя в г. Протвино (в дальнейшем ускоритель) – установка с тканеэквивалентным фантомом с водой и высокочувствительной телевизионной камерой, в дальнейшем (установка). Использовался ускоритель, разработанный и изготовленный В.Е. Балакиным на фирме ОАО «Протом». На данном ускорителе проходят лечение пациенты из медицинских клиник. Ускоритель является уникальным и единственным в мире инструментом для лечения методом брахитерапии. По сравнению с другими он обладает чрезвычайно малыми размерами и возможностью быстрой перенастройки в автоматическом режиме. Важным отличием ускорителя В.Е. Балакина является узкий регулируемый пучок и отсутствие пассивных поглотителей для формирования энергетического профиля, что сильно влияет на медицинскую эффективность используемых в настоящее время медицинских терапевтических ускорителей протонов. Ускоритель позволяет быстро перестраивать энергию в диапазонах от 30 до 330 МэВ, быстро перестраивать длительность импульса и быстро определять поглощенную дозу за импульс, отпускаемую пациенту.

Основные характеристики ускорителя:

- длительность импульса – от 10 до 1000 мс;
- интенсивность пучка протонов в импульсе – от 1×10^8 до 1×10^9 ;
- размер пучка в районе медицинского кресла – 10 мм;
- автоматическое быстрое изменение положения кресла (в котором располагается пациент) по отношению к пучку, возможность вращать кресло вокруг вертикальной оси и двигать его по высоте.



Рис. 1. Зал ускорителя (слева) и кресло пациента (справа).

На левой части Рис.1 приведено фото зала ускорителя.

На правой части Рис. 1 приведено фото медицинского кресла, в котором располагается пациент, к которому выводится с большой точностью пучок протонов в импульсном режиме, в кресле закреплена установка с кюветой диаметром 280 мм. Кресло находится в опущенном состоянии. Кресло показано сзади со стороны места входа пучка, обозначенного стрелкой. Все автоматизировано – с отдельного пульта задаются интенсивность и количество импульсов, “отпускаемых” пациенту в область, подвергаемую брахиотерапии.

На левой части Рис.2 показана “установка” с кюветой диаметром 100 мм, которая была закреплена в кресле вместо пациента, а центр пучка наводился на водный фантом.



Рис. 2. Кресло пациента с кюветами диаметром 100 мм (слева) и 280 мм (справа).

Стрелкой показано окно вывода пучка и его направление.

На правой части Рис. 2 показана установка с кюветой диаметром 280 мм в опущенном состоянии, стрелкой показано окно вывода пучка из ускорителя. Окно представляет собой тонкую металлическую мембрану, отделяющую вакуумную систему ускорителя от комнаты, где проводится сеанс терапии. Ускоритель полностью автоматизирован и управляется в режиме реального времени.

“Установка”, закрепленная в кресле и выставленная кюветой на центр пучка, облучалась по заданной программе в импульсном режиме для энергий 60, 80, 100, 150 и 170 МэВ. Для каждой энергии на пульте ускорителя выводи-

лась интенсивность за импульс и длительность импульса. Интенсивность настраивалась на 8×10^8 протонов за импульс, а длительность сброса настраивалась на 300 мс. В эксперименте использовались две установки – с кюветой диаметром 100 мм и с кюветой диаметром 280 мм (Рис.2).

Механизм энерговыделения в воде для пучка протонов достаточно хорошо изучен [1]. “Установка” в данной работе применялась для исследования возможностей телевизионной камеры (ТВК), подробно описанной в работе [2], на терапевтическом ускорителе. Целью данной работы являлась проверка точности результатов измерения глубинных дозных кривых Брэгга предлагаемым методом в сравнении с результатами известных теоретических расчетов и методик, уже применяемых на ускорителе.

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

В разделе 2 описана установка для измерения кривых Брегга в водном фантоме по измерению длины пробега протонов в воде для исследуемых энергий.

Целью настоящей работы является создание установки визуализации зоны энерговыделения (кривой Брэгга) в реальном режиме времени и определение глубинного дозного распределения протонов для энергий в диапазоне ускорителя для сравнения результатов с данными по другим методикам и теориям.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ.

Установка включает телевизионную камеру (ТВК) и тестовый монитор с встроенным видеорегистратором, осуществляющим запись изображения в формате 320×240 пикселей с частотой 25 кадров в секунду. Подробно описание установки приведено в работе [2]. Для проведения экспериментов с протонами нижняя часть установки была доработана и представляет собой сменную кювету, которая переходит в трубу к верхней части. Сменные кюветы имеют разный диаметр внутренней части – первая кювета имеет диаметр 100 мм, вторая – диаметр 280 мм. В верхней части трубы закреплена ТВК. В связи со слабыми регистрируемыми световыми сигналами при визуализации пика Брэгга установка была экранирована от постороннего света (Рис. 2).

На рисунке видна кювета (фантом), расстояние от входного окна которой до ионопровода составляет ~ 35 см. На фантом за один импульс поступает 8×10^8 протонов. Поперечный размер пучка при входе во входное окно кюветы имеет

диаметр 10 мм. Пучок попадает по высоте в центр кюветы.

Все детали узла кюветы изготовлены из непрозрачной черной пластмассы. В кювету залита дистиллированная вода, верхний ее край открыт для ТВК, которая располагается на расстоянии 65 см выше верхнего слоя воды. 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 (в ~ 3 раза) увеличение линейного поля зрения и наблюдение более длинных пробегов при более высоких значениях энергии пучка протонов. Объективы фокусировались на середину кюветы. Расстояние 65 см обеспечивает предохранение электронных узлов ТВК от воздействия пучка протонов.

3. ОПИСАНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ.

В соответствии с требованиями эксперимента требовалась ТВК, обеспечивающая регистрацию слабого свечения в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра с усилением, эквивалентным электронно-оптическим преобразователям не хуже второго поколения, и обладающая адаптивными возможностями в автоматическом режиме без вмешательства оператора. Это необходимо для обеспечения гарантированного результата в опасной зоне ускорителя.

Для эксперимента была применена ТВК типа VNA-753-НЗ, разработанная для спецприменений предприятием ООО “ЭВС” (г. Санкт-Петербург), и обладающая высокой чувствительностью – до 0,00003 лк. В качестве фотоприемника в ТВК VNA-753-НЗ используется ПЗС матрица типа ICX-659AL.

Особенностями ПЗС фотоприемников является принцип накопления сигнала, практическое отсутствие инерционности и возможность регистрации сверхкоротких импульсов длительностью в единицы нс [3]. Особенностью матрицы ICX-659AL является высокая чувствительность и малый уровень шумов. Спектральная характеристика ПЗС фотоприемника типа ICX-659AL показана на Рис. 3.

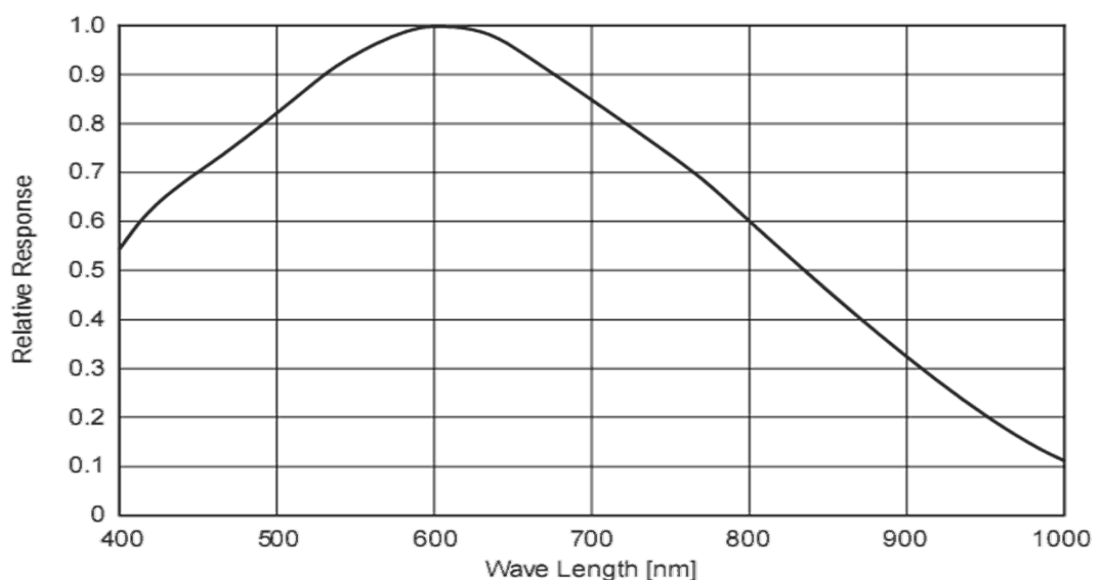


Рис. 3. Спектральная чувствительность фотоприемника ICX-659AL.

Подробное описание ТВК VNA-753-НЗ и основные аспекты ее работы, необходимые для регистрации кадров, приведены в работе [2]. В ТВК VNA-753-НЗ используется 2 вида режимов повышения чувствительности, в которых работает накопление сигнала [4].

Первый режим заключается в автоматическом обмене разрешающей способности камеры на чувствительность при малых уровнях освещённости. Максимальное число сложений, равное 12 (12 пикселей объединяется в 1), приводит к пропорциональному росту чувствительности в 12 раз.

Второй режим заключается в увеличении времени накопления телевизионной камеры – в сложении 16 телевизионных кадров в 1 (1 такой суммарный кадр будет иметь длительность 0,32 с) при уменьшении освещённости. Суммарное увеличение чувствительности при одновременном использовании обоих режимов достигает 100 раз и автоматически регулируется программой встроенного в ТВК микропроцессора в зависимости от изменения яркости наблюдаемого объекта.

Еще одной особенностью ПЗС типа ICX-659AL являются малые тепловые шумы, токи утечки и шумы, обусловленные термоэлектронной эмиссией. При разработке ТВК VNA-753-НЗ практически было установлено, что для ПЗС типа ICX-659AL влияние этих шумов становится заметным только при временах накопления более нескольких секунд. В этом случае дает эффект охлаждения ПЗС фотоприемника. В нашем случае время накопления ограничено длительностью 0,32 с, поэтому охлаждения фотоприемника в ТВК VNA-753-НЗ не потребовалось. Но такой малокадровый режим с длительность суммарного кадра 0,32 с,

потребовал введения в состав ТВК преобразователя телевизионного стандарта [4].

Преобразователь телевизионного стандарта содержит запоминающее устройство, которое осуществляет непрерывную выдачу накопленного кадра на экран монитора (видеорегистратора) в стандартном телевизионном режиме, т.е. в течение 0,32 с (времени накопления каждого последующего суммарного кадра) происходит непрерывная выдача предыдущего кадра со стандартной частотой ТВ сигнала. Преобразование малокадрового режима в стандартный телевизионный позволяет вести запись изображения и осуществлять наблюдение на экране тестового монитора со стандартной частотой кадров 25 Гц, при этом обновление информации будет происходить с частотой 3 Гц. Такая искусственно введенная инерционность позволяет визуализировать любые по длительности накопленные импульсы, что требуется при проведении эксперимента.

В условиях эксперимента ограничение постороннего света вводит камеру VNA-753-НЗ в режим максимальной чувствительности, что хорошо заметно по шумам, проявляющимся в виде белых точек, хаотично расположенных и перемещающихся от кадра к кадру. При отсутствии освещенности адаптивный механизм телевизионной камеры VNA-753-НЗ «держит» ее в режиме максимальной чувствительности – это объединение 12 пикселей в 1 и сложение 16 кадров длительностью 20 мс в один суммарный кадр, т.е. здесь мы регистрируем изображение, эквивалентное времени накопления 0,32 с.

При пролете пучка протонов появляется слабое свечение в кювете с водой. Интенсивность такого свечения пучка в фантоме составляет около $0,00004 \div 0,00006$ лк, поэтому фиксация свечения осуществляется ТВК в режиме предельной чувствительности с отношением сигнал/шум (ОСШ) порядка $1,5 \div 2$.

Для автоматического адаптивного механизма камеры, анализирующего прошедший кадр и изменяющего при необходимости количество складываемых пикселей и кадров в каждом последующем суммарном кадре, сигнал такой величины является малым и недостаточным для изменения режима ТВК. Поэтому на всех режимах сеанса процессор ТВК «держал» ее в режиме максимальной чувствительности – 12 пикселей объединены в 1 и одновременно 16 телевизионных кадров складываются в 1 кадр, при этом паспортное значение чувствительности ТВК составляет 0,00003 лк.

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.

По кадрам видеорегистратора проведена 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 определялась экспериментальная длина L мм на “установке”, которая затем сравнивалась с расчетным значением L мм [6]. Точность определения длины составляла $\sim 3\%$ для данного эксперимента.

Система координат базировалась от границы стенки кюветы. Область свечения привязывалась к этой системе координат для дальнейшего анализа по определению области энерговыделения.

Ускоритель включался на несколько минут для каждой из перечисленных выше энергий. Интервал между импульсами ускорителя составлял 2 с. Длительность импульса составляла 300 мс. Была установлена повторяемость результатов в сеансах, практически последующие кадры повторяли предыдущие на каждом значении энергии.

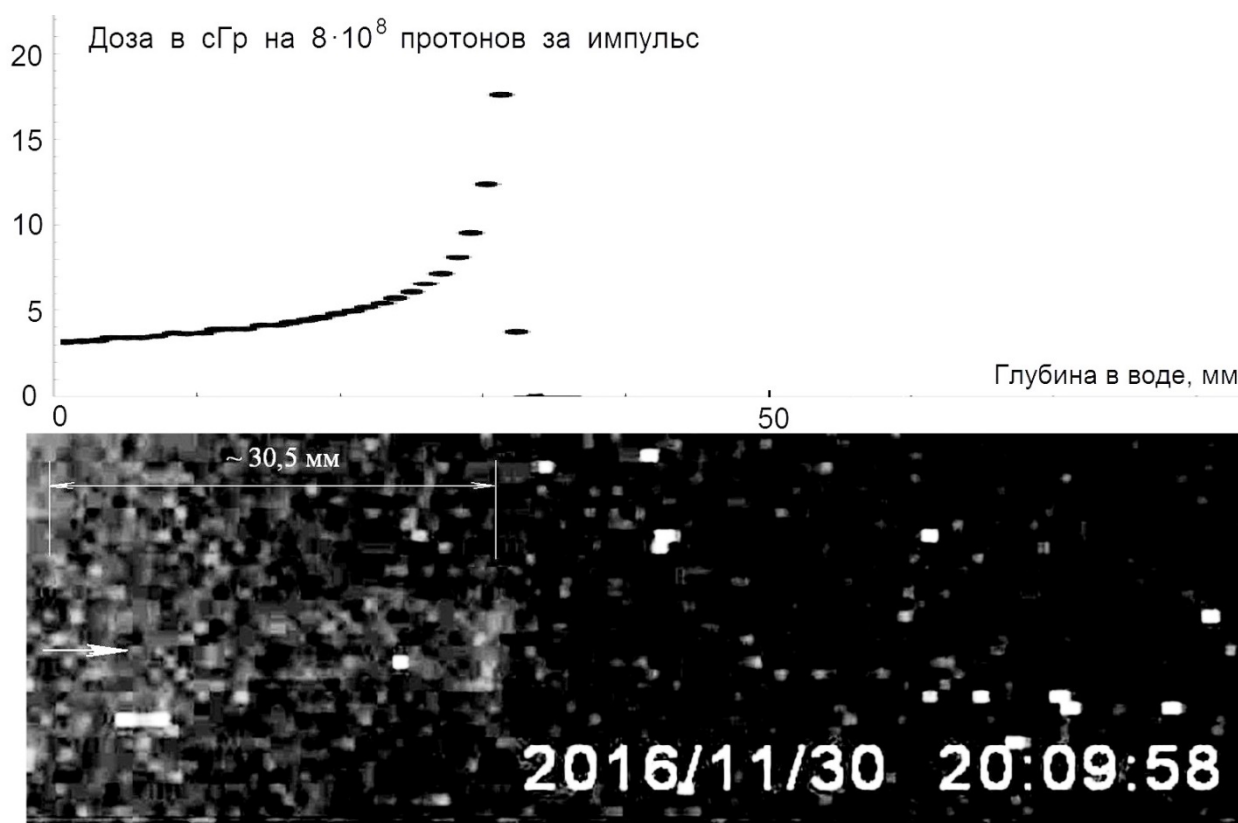


Рис. 4. “Область свечения” для энергии 60 МэВ. Кювета 100 мм. $F=25$ мм. 30.11.2016.

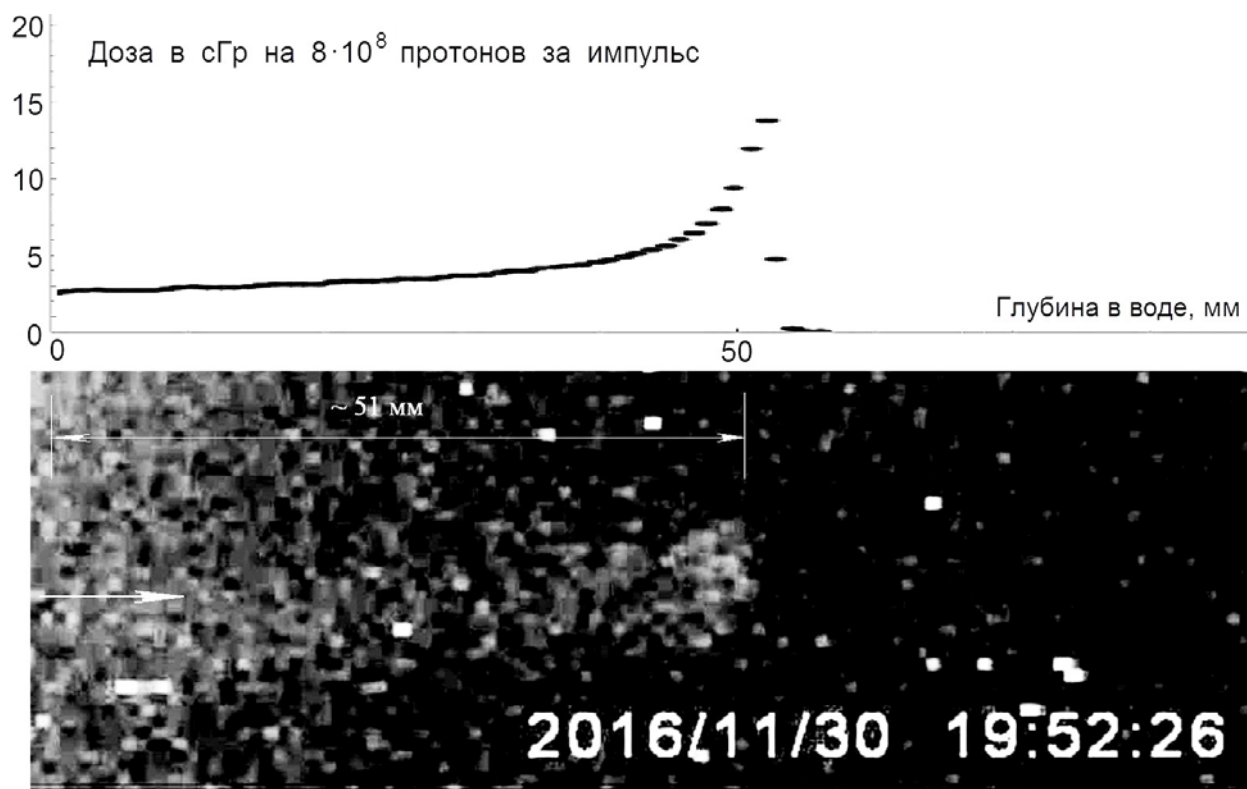


Рис. 5. “Область свечения” для энергии 80 МэВ. Кювета 100 мм. $F=25$ мм. 30.11.2016.

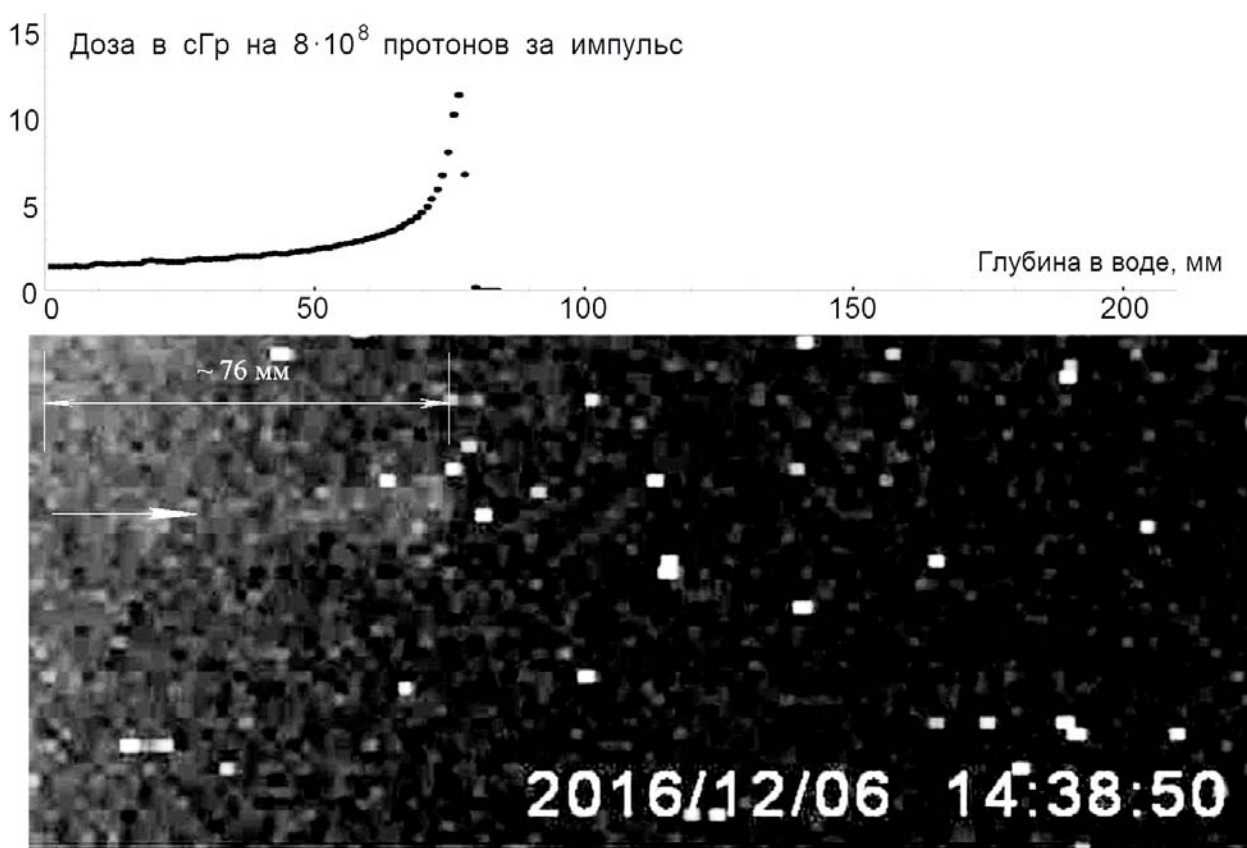


Рис. 6. “Область свечения” для энергии 100 МэВ. Кювета 280 мм. $F=8$ мм. 6.12.2016.

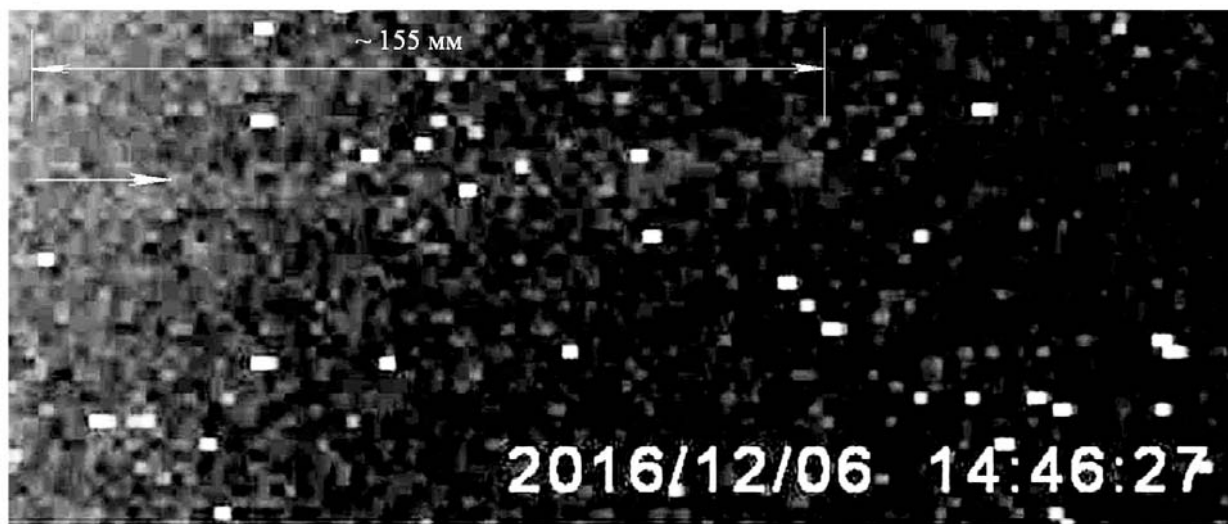
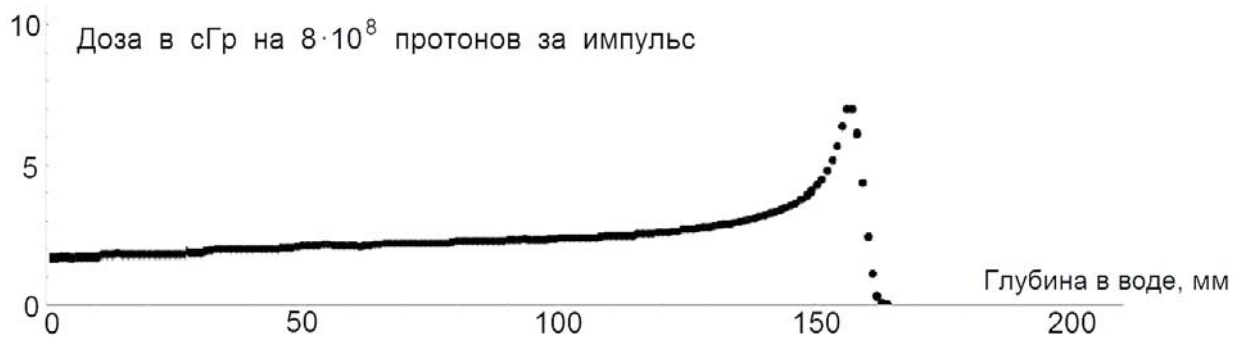


Рис. 7. “Область свечения” для энергии 150 МэВ. Кювета 280 мм. $F=8$ мм. 6.12.2016.

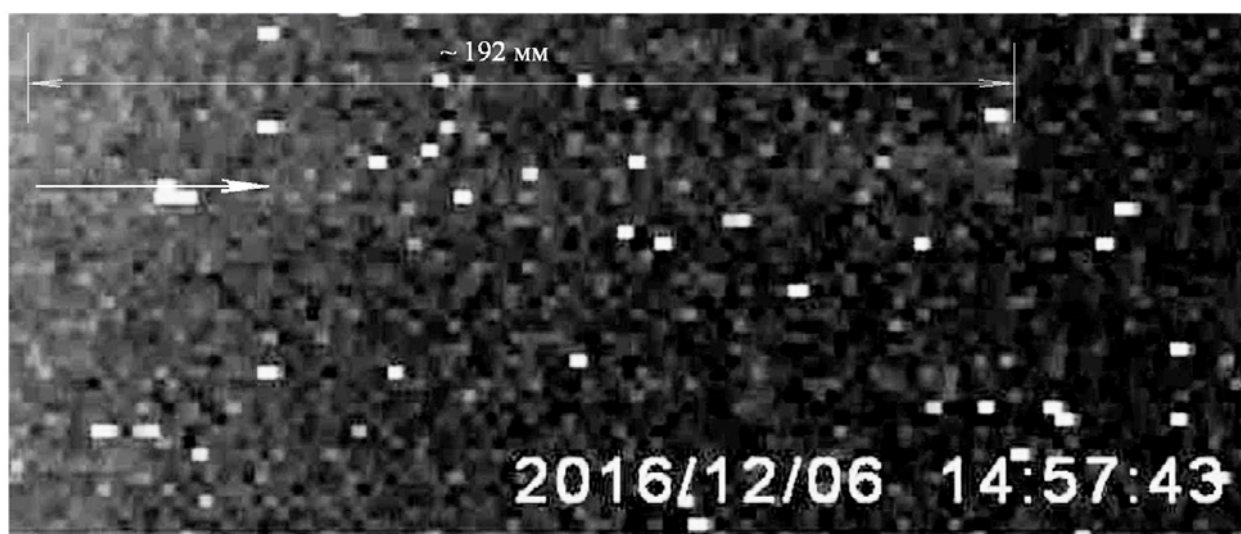
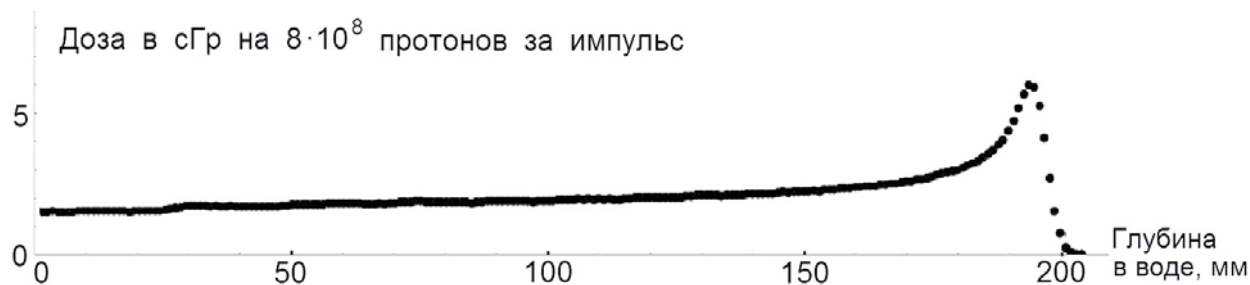


Рис. 8. “Область свечения” для энергии 170 МэВ. Кювета 280 мм. $F=8$ мм. 6.12.2016.

Первый эксперимент проводился 30 ноября 2016 г. со сменной кюветой диаметром 100 мм, с объективом ТВК при $F=25$ мм для энергий 60 и 80 МэВ.

Для более высоких энергий, при которых длина “области свечения” начала превышать размер первой кюветы, был проведен второй эксперимент 6 декабря 2016 г. со сменной кюветой диаметром 280 мм, с объективом ТВК при $F=8$ мм для энергий 100, 150 и 170 МэВ.

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 отдельного кадра проведено контрастирование программными методами.

На кадрах хорошо фиксируется меньшая яркость области свечения во втором эксперименте 6 декабря 2016 г., обусловленная как уменьшением энергии выделения, так и 3-х кратным уменьшения масштаба с более короткофокусным объективом.

5. 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 пик 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 SRIM [5] был произведен расчет определения глубинных дозных распределений протонов в воде для энергий нашего эксперимента и эти кривые приведены сверху на Рис. 4–8.

В литературе [6] были определены соотношения пробег – энергия, которые были использованы для сравнения с полученными экспериментальными значениями пробега L мм на “установке”.

Также было проведено сравнение полученных данных с расчетами, проведенными по моделям [6]. Выявлено совпадение измеренных в водном фантоме на “установке” пробегов с расчетами Монте Карло с точностью $\sim 3\%$.

Для каждой измеренной энергии установка визуализировала кривую Брэгга и было проведено сравнение экспериментальных данных с расчетами по методу Монте Карло по моделям [5] и [6].

В верхней части рисунков 4–8 показаны графики, полученные расчетом численным методом пакетом программ SRIM [5].

Также приведены результаты расчетов (Табл. 1), которые основываются на соотношениях пробег-энергия [6].

Таблица №1 Зависимость пробега протона в воде L от энергии протона E .

$E(\text{МэВ})$	$L(\text{мм})$
60	31
80	52
100	77
150	157
170	196

Проведенные расчеты [6], также совпадают с полученными результатами с точностью до 3 %.

Выявлено, что “установка” определяет совпадение с пиком Брэгга и со значениями, приведенными в Табл. 1 с точностью до 3%.

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Геометрические размеры “области свечения”, зафиксированные на стабильном кадре (Рис. 4–8) и измеренные по известной системе координат, совпадают с областью энергосвечения из кривой Брэгга и Таблицей №1 с точностью до 3%.

2) Положение и форма пика Брэгга, зафиксированные видеорегистрацией и определенные двумя численными методами [5] и [6], согласуются между собой с точностью до 3%.

3) Проведено моделирование переноса пучка в процедурном кресле в водном фантоме методом Монте Карло с помощью программы TRIM, являющейся частью общего пакета SRIM [5].

4) Определена способность “установки” регистрировать световые импульсы короткой длительности и сверх малой интенсивности на уровне 0,00004 – 0,00006 люкса в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

5) Полученные результаты показывают, что предлагаемый новый метод визуализации кривой Брэгга, при подготовке пациентов к сеансам лучевой терапии может использоваться аналогично методу, применяемому на ускорителе в настоящий момент.

Авторы выражают благодарность В. Е. Балакину за возможность тестирования установки визуализации и проведения цикла исследований на терапевтическом ускорителе, а также сотрудникам “Протом”, управлявшим ускорителем 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 поддержку работы.

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

Авторы выражают благодарность сотруднику «Медицинского радиологического научного центра» А. Е. Чернухе г. Обнинск за помощь в написании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Н.В. Марков “Дозиметрия импульсных пучков тяжелых ионов для радиобиологических исследований на ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН”, Диссертация на соискание ученой степени к.ф.м.н. Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт”, Москва, 2014.
2. А.В. Гринкевич, В.В. Сиксин. Установка для визуализации области формирования поглощенных доз в фантоме с водой на пучке электронов для проведения биологических экспериментов, Препринт ФИАН 2016–9.
3. Ф.П. Пресс. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991, 264 с.
4. Л.И. Хромов, Н.В. Лебедев, А.К. Цыцулин, А.Н. Куликов. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. М.: Радио и связь, 1986, 183 с.
5. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler, SRIM: The stopping and Range of Ions in Matter, 2008.
6. Stopping power and range for protons and alpha particles: ICRU Report 49. ICRU, Bethesda, 1993.

Александр Васильевич ГРИНКЕВИЧ
Виктор Валентинович СИКСИН

**УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ
В ФАНТОМЕ С ВОДОЙ НА ПУЧКЕ ПРОТОНОВ
РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ г. ПРОТВИНО**

Формат 60x84/16. П. л. 1,0. Тираж 140 экз. Заказ №51
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН
119991 Москва, Ленинский проспект 53