



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-170

P9-96-170

Ю.Г.Будяшов, В.П.Зорин, Г.В.Мицын, А.Г.Молоканов,
О.В.Савченко

УЗКИЙ ПУЧОК ПРОТОНОВ
С ЭНЕРГИЕЙ 70—100 МэВ
ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ ОПУХОЛЕЙ ГЛАЗА

1996

1. Введение

Одно из наиболее перспективных направлений протонной терапии - лечение злокачественных опухолей глаза. С помощью протонных пучков можно формировать дозные поля с резкими границами, что позволяет подводить высокие дозы к облучаемой мишени при малой нагрузке на окружающие здоровые ткани. Это делает возможным применение крупного фракционирования, когда необходимые для лечения опухоли дозы 50 - 70 Грей могут быть подведены за 4 - 5 фракций и продолжительность курса лечения будет составлять от нескольких дней до нескольких недель [1].

Лечение меланомы глаза протонными пучками может считаться одним из наиболее успешных методов лечения рака, и его рекомендуют проводить как самостоятельное лечение в 80 % случаев (для США это 1500 больных в год) [2]. Поэтому в большинстве центров протонной терапии лечению опухолей глаза уделяется большое внимание.

Продолжительность облучения глаза не должна превышать нескольких минут, так как анатомическое строение глаза не позволяет жестко закрепить его на время облучения и можно только зафиксировать направление взгляда на некоторую светящуюся метку.

В 1987 году в процедурной кабине No.1 клиничко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ был сформирован протонный пучок со средней энергией 100 МэВ с модифицированной формой кривой Брэгга [3]. Однако при замедлении пучка 660 МэВ до средней энергии 100 МэВ его интенсивность в результате неупругих ядерных взаимодействий с веществом замедлителя существенно снижается, а также увеличивается фазовый объем пучка, что приводит к большим потерям при его транспортировке в процедурную кабину по имеющемуся фокусирующему каналу. Мощность дозы такого пучка на плоской вершине модифицированной кривой Брэгга составляет всего 0,3 Гр/мин/мкА. При этом длительность сеанса лучевого лечения глаза составляет около 30 минут, что является неприемлемым.

Таким образом, из-за недостаточной интенсивности сформированного пучка оказалось невозможным его эффективное использование для лучевой терапии глаза. В новой схеме формирования пучка с целью повышения его интенсивности было уменьшено рас-

стояние, на которое должен транспортироваться пучок, а также использован сильнофокусирующий квадрупольный дублет Д4 типа 15K50 с апертурой 15 см, с помощью которого размер пучка в кроссовере был уменьшен до размеров около 10 мм. Все это позволило увеличить мощность дозы в пучке в несколько десятков раз.

2. Формирование пучка

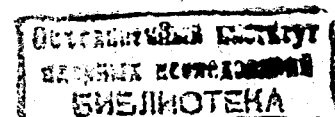
Схема формирования пучка приведена на рис.1. Выведенный из камеры фазотрона протонный пучок с энергией 660 МэВ отклоняется на угол 6° магнитом ОМ-1 и двумя дублетами квадрупольных линз Д1 и Д2 фокусируется на вход углеродного замедлителя. Два магнита - ОМ-1(2) и ВКМ служат для корректировки положения пучка на входе углеродного замедлителя.

Замедленный до необходимой средней энергии протонный пучок отклоняется магнитом СП-37 на угол около 30° и фокусируется квадрупольным дублетом Д4 на расстоянии около 500 мм от края линзы в кабине No.7. В результате замедления пучок имеет широкое энергетическое распределение, и при повороте пучка производится его магнитный анализ. Ширина энергетического распределения пучка после магнитного анализа определяется размерами коллиматоров, устанавливаемых до и после поворотного магнита. В данном случае варьировались размеры только коллиматора, расположенного непосредственно за замедлителем.

В результате измерений был настроен фокусирующий канал и осуществлен первый этап формирования протонных пучков при трех значениях средней энергии протонов - 70, 85 и 100 МэВ.

3. Характеристики пучка

Были исследованы основные параметры пучков при трех значениях средней энергии протонов - 70, 85 и 100 МэВ. Для этих пучков с помощью изодозографа [4] миниатюрным полупроводниковым детектором были измерены изодозные распределения в воздухе и в воде. По изодозным распределениям в воздухе можно определить положение кроссовера пучка. Изодозное распределение для пучка с энергией 70 МэВ в горизонтальной плоскости в воде приведено на рис. 2. На этом же рисунке приведено горизонтальное



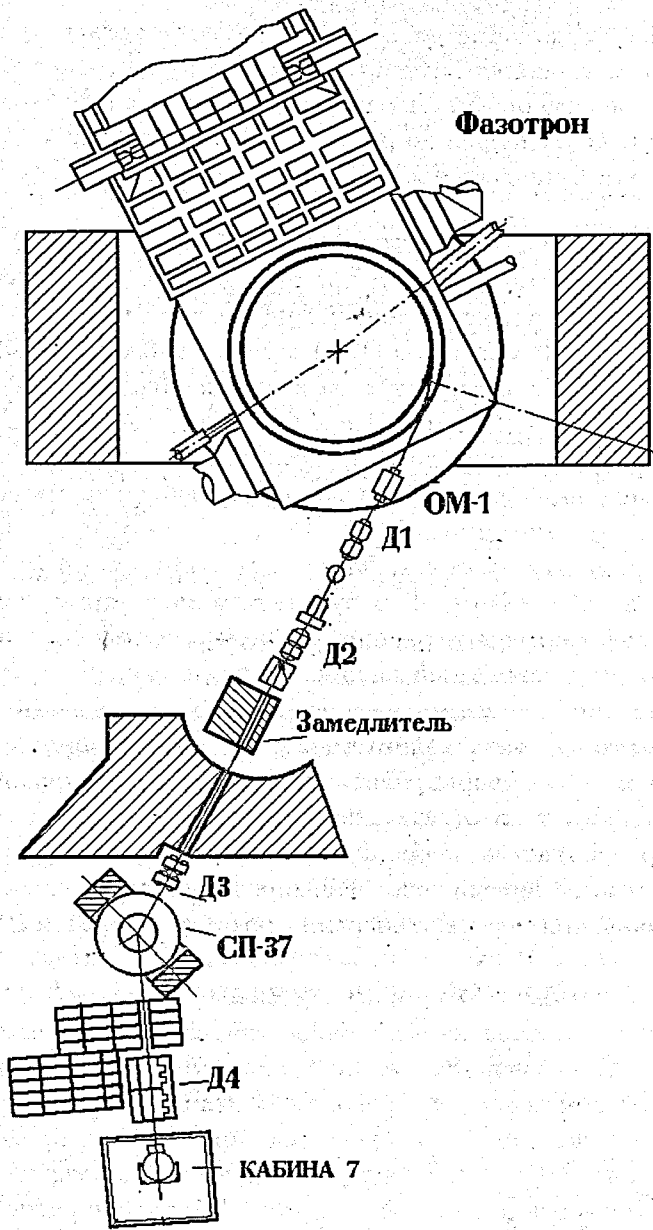


Рис.1. Схема формирования протонного пучка

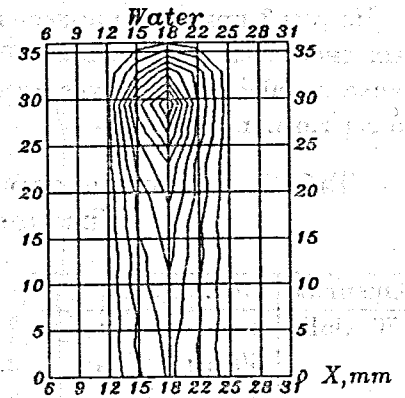
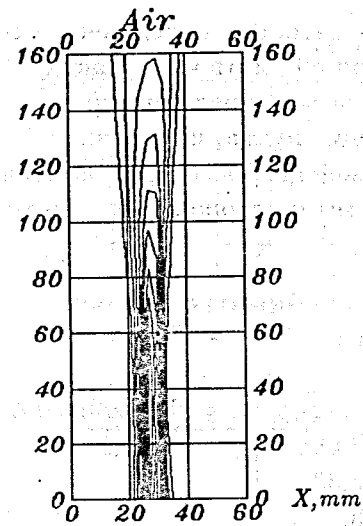


Рис.2. Изодозные распределения протонного пучка с энергией 70 МэВ в воздухе и в воде

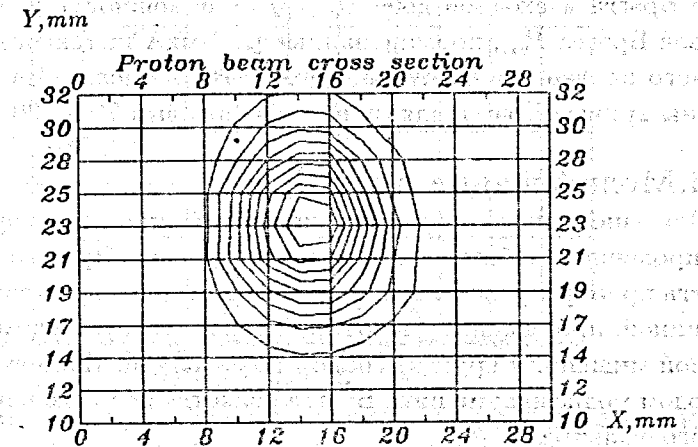


Рис.3. Поперечное сечение протонного пучка

изодозное распределение в воздухе, из которого определено, что пучок образует кроссовер на расстоянии 50 см от края линзы Д4, в вертикальной плоскости пучок практически параллельный.

На рис.3 приведено поперечное сечение пучка, измеренное без выходного коллиматора в месте расположения кроссовера, размеры пучка по 50% изоуровню составляют 6 мм по горизонтали и 9 мм по вертикали.

Табл.1. Основные параметры глубинных дозных распределений

Энергия	Коллиматор	σ_R , мм	$D_{max}/D_{вх.}$	$P_{вх.}$, Гр/мин/мкА
70 МэВ	диаметр 8 см	3,3	3,05	10,2
	30 мм * 60 мм	2,3	3,33	6,2
	20 мм * 60 мм	2,0	3,38	4,0
85 МэВ	диаметр 8 см	4,5	3,0	14,7
	30 мм * 60 мм	-	-	8,5
	20 мм * 60 мм	-	-	6,2
100 МэВ	диаметр 8 см	6,0	3,0	17,0

Кривые Брэгга и изодозные распределения измерялись в водяном фантоме, при таком его положении, при котором пик Брэгга совмещался с кроссовером пучка. Основные параметры глубинных дозных распределений – дисперсия пробега σ_R , отношение дозы в пике Брэгга к входной дозе $D_{max}/D_{вх.}$ и мощность дозы на входе кривой Брэгга $P_{вх.}$, нормированные на 1 мкА интенсивности выведенного из фазотрона пучка, приводятся в табл.1. На рис. 4 приведены кривые Брэгга для пучков с энергиями 70 и 100 МэВ.

4. Модификация пика Брэгга

Для однородного облучения мишени обычно используется модифицированное глубинное дозное распределение. При этом узкий пик Брэгга преобразуется в однородное дозное распределение с плоской вершиной, протяженность которой соответствует размерам облучаемой мишени, и крутым спадом дозы за ней. Наиболее простым методом модификации пика Брэгга является использование гребчатого фильтра.

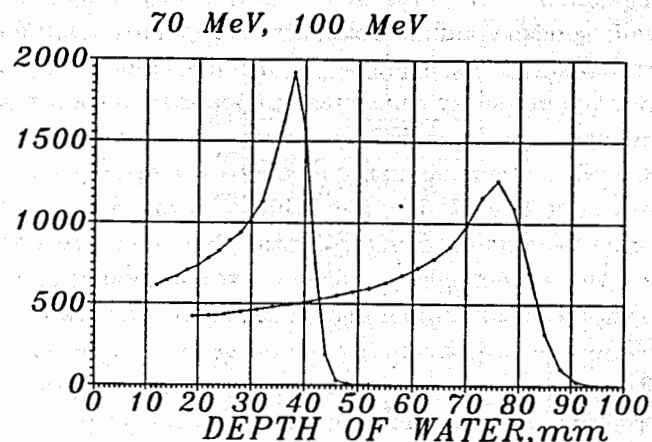


Рис.4. Глубинные дозные распределения протонных пучков с энергией 70 и 100 МэВ в воде

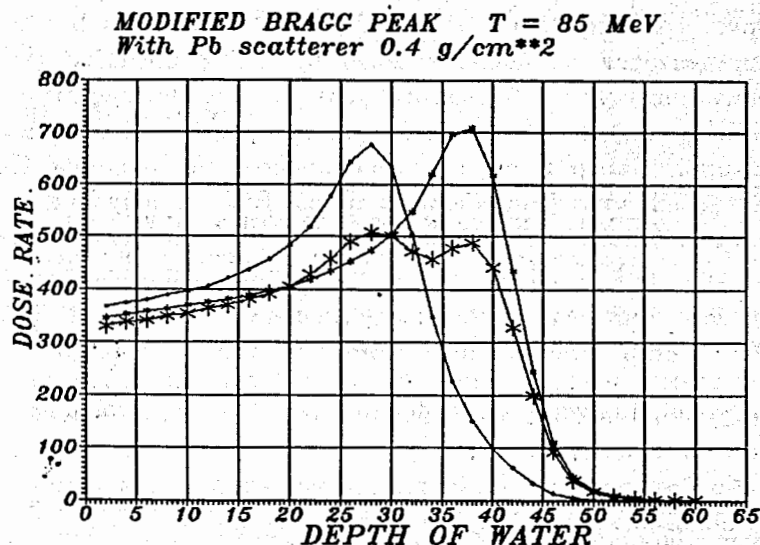


Рис.5. Модифицированное глубинное дозное распределение протонного пучка 85 МэВ

Гребенчатый фильтр – это устанавливаемый на пути пучка замедлитель сложной конфигурации, толщина которого различна в различных участках апертуры канала. Части протонного пучка, прошедшие различную толщину вещества гребенчатого фильтра и оставившие в нем различную часть начальной энергии, образуют набор кривых Брэгга с уменьшенным остаточным пробегом. Результирующий пик есть сумма этих смещенных пиков Брэгга с незамедленной частью исходного пучка. Форма гребенчатого фильтра должна быть выбрана исходя из условия, чтобы прошедшие через него протоны при смешивании в результате многократного кулоновского рассеяния образовывали бы заданное глубинное дозное распределение. Для перемешивания пучка, прошедшего через гребенчатый фильтр, обычно применяется дополнительный рассеиватель.

Наиболее простым и удобным как для расчетов, так и для изготовления и формирования дозного распределения является ступенчатый гребенчатый фильтр. В таком гребенчатом фильтре преобразование глубинного дозного распределения происходит в результате суммирования имеющейся исходной кривой Брэгга с рядом таких же кривых Брэгга, смещенных относительно исходной на некоторую толщину t_i и с относительной интенсивностью ρ_i , которая определяется парциальной долей пучка, прошедшего данную толщину вещества гребенчатого фильтра. Количество ступенек i определяется формой исходной кривой Брэгга, необходимой глубиной дозного распределения и степенью его однородности. На рис.5 представлена модифицированная кривая Брэгга, полученная с использованием только одной ступеньки гребенчатого фильтра для пучка с энергией 85 МэВ. На этом же рисунке приведены исходная и смещенная на толщину $0,9 \text{ г/см}^2$ кривые Брэгга, в результате суммирования которых с относительными весами ρ_i получено модифицированное дозное распределение. На рис.6 приводится горизонтальное изодозное распределение для этого же пучка, измеренное без выходного коллиматора.

Таким образом, используя простейший гребенчатый фильтр всего с одной ступенькой, можно получить глубинное дозное распределение с плоской вершиной около 15 мм и неоднородностью дозы на

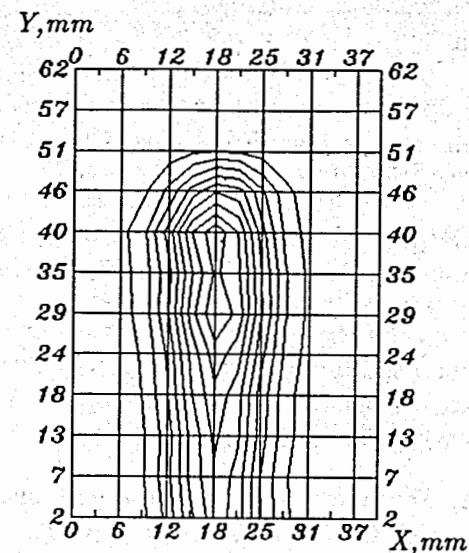


Рис.6. Изодозное распределение модифицированного протонного пучка

ней $\pm 5\%$, протяженность которой достаточна для облучения внутриглазных мишеней.

5. Выводы

- Разработан и реализован первый этап формирования протонного пучка высокой интенсивности с энергией 70 – 100 МэВ, предназначенного для лечения опухолей глаза;
- Измерены основные параметры пучков при трех значениях средней энергии протонов – 70, 85 и 100 МэВ;
- С помощью гребенчатого фильтра получена модифицированная кривая Брэгга с плоской вершиной;
- Мощность дозы в сформированном пучке в несколько десятков раз превосходит мощность дозы в аналогичном пучке, полученном в кабине No.1, что позволяет сократить длительность одного сеанса облучения глаза до 1 мин.

Литература

1. Касперек А. Ophthalmological proton facilities. In Book: Ion Beams in Tumour Therapy. Ed.U.Linz, Chapman & Hall, London, 1995, p.361.
2. Gragoudas E.S. et al. Proton irradiation of small choroidal malignant melanomas. Am.J.Ophthalmol. 83, 1977, p.665.
3. Абазов В.М. и др. Получение и исследование физико-дозиметрических характеристик медицинского протонного пучка со средней энергией 100 МэВ с модифицированной формой кривой Брэгга. ОИЯИ,9-87-281, Дубна, 1987.
4. Кутузов С.А. Устройство для автоматизированного измерения дозных полей. ОИЯИ,Р10-89-194, Дубна, 1989.