

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



6/II-78

P16 - 11080

3-862

692/2-78

В.П.Зорин, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко

МЕТОД МОДИФИКАЦИИ ПИКА БРЭГГА  
ДЛЯ НЕМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОННЫХ  
ПУЧКОВ

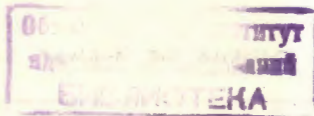
**1977**

P16 - 11080

В.П.Зорин, А.Г.Молоканов, О.В.Савченко

**МЕТОД МОДИФИКАЦИИ ПИКА БРЭГГА  
ДЛЯ НЕМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОННЫХ  
ПУЧКОВ**

*Направлено на I Международный семинар  
по использованию протонных пучков в лучевой  
терапии /Москва, 1977/*



Зорин В.П., Молоканов А.Г., Савченко О.В.

P16 - 11080

Метод модификации пика Брэгга для немоноэнергетических протонных пучков

Представлено описание метода модификации пика Брэгга для немоноэнергетических протонных пучков, который основан на формировании энергетического спектра протонов, необходимого для получения протонного пучка с кривой Брэгга заданной формы.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Zorin V.P., Molokanov A.G., Savchenko O.V.

P16 - 11080

A Method of the Bragg Peak Modification for Nonmonoenergetic Proton Beams

A method of the Bragg peak modification for nonmonoenergetic proton beams is described. It is based on the formation of the proton energetic spectrum necessary for the proton beam production with a defined shape of the Bragg curve.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Форма дозного распределения пучка тяжелых заряженных частиц зависит от энергетического распределения частиц в пучке. На *рис. 1* сплошными линиями изображены дозные распределения протонных пучков, имеющих различные энергетические распределения. Пунктирными линиями показаны распределения пробегов протонов, характеризующие их спектр. Дозное распределение, изображенное на *рис. 1а*, получается при замедлении протонов с энергией 660 МэВ до энергии 150 МэВ. Если выделить из имеющегося спектра узкий интервал энергии, получится дозное распределение, приведенное на *рис. 1б*. Если же сформировать спектр, изображенный на *рис. 1в*, можно получить дозное распределение, удовлетворяющее требованиям лучевой терапии: приблизительно однородное распределение дозы в максимуме и крутой спад дозы за максимумом /так называемая модифицированная кривая Брэгга/.

В случае моноэнергетических пучков тяжелых заряженных частиц разработан ряд методов получения модифицированной кривой Брэгга. Уже сравнительно давно для получения однородного дозного распределения пучка тяжелых заряженных частиц в веществе применяется гребенчатый фильтр<sup>1,2/</sup>. При этом моноэнергетический пучок тяжелых заряженных частиц проходит через фильтр с различной толщиной в разных точках, теряя при этом различную величину энергии, и далее, смешиваясь за счет многократного кулоновского рассеяния, образует широкий энергетический спектр, позволяющий получить необходимое дозное распределение.

В другом методе<sup>13/</sup> используется вращающийся замедлитель переменной толщины, позволяющий производить сканирование моноэнергетическим пучком на разной глубине.

Если же имеется не монохроматический пучок заряженных частиц, а спектр с широким распределением,

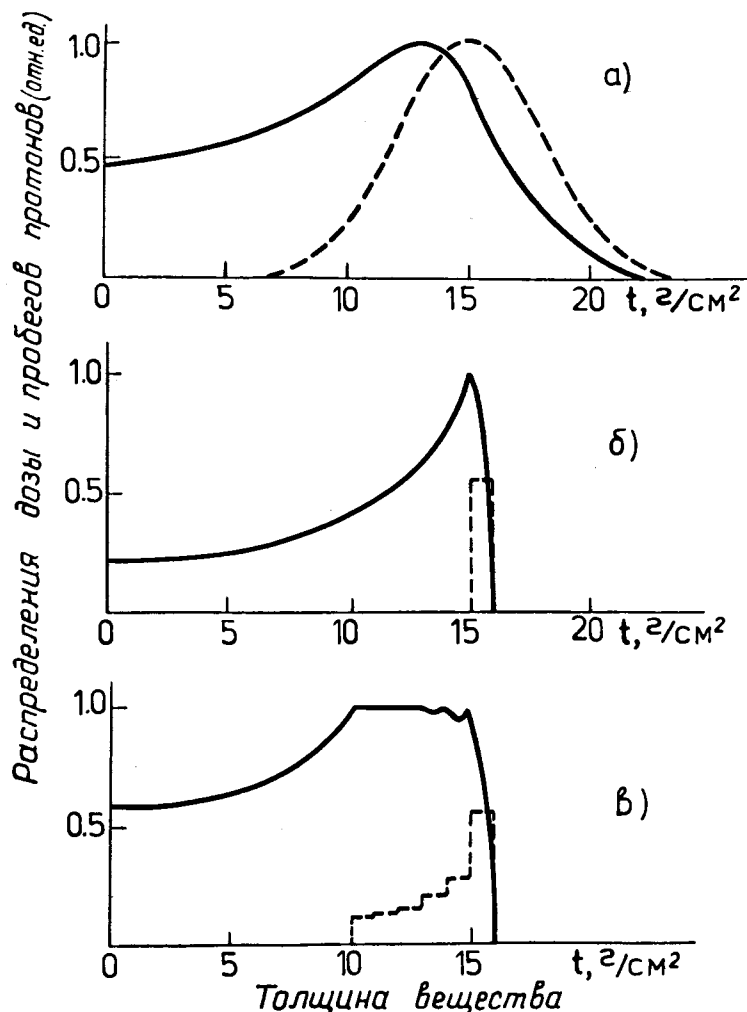


Рис. 1. Распределения пробегов протонов /пунктирные кривые/ и соответствующие им дозные распределения /сплошные кривые/.

то возникает необходимость предварительно выделить из этого спектра частицы, лежащие в узком интервале энергии, а затем пропустить их через гребенчатый фильтр. При этом используется малая часть интенсивности первичного пучка, значительно снижается мощность дозы и увеличивается рассеяние и загрязнение пучка протонов.

Целью настоящей работы явилась разработка метода получения модифицированной кривой Брэгга, свободного от указанных недостатков и пригодного при использовании немонаэнергетических пучков тяжелых заряженных частиц.

## 2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Метод основан на формировании энергетического спектра протонов с помощью ахроматической магнитной системы и расположенного в области максимальной дисперсии коллиматора, настроенного на пропускание частиц требуемого спектра.

Устройство для формирования дозного распределения тяжелых заряженных частиц в веществе, основанное на этом методе и схематически изображенное на рис. 2а, можно условно разделить на три части.

1. Магнит или система магнитов, анализирующие частицы пучка по импульсу.

2. Система элементов магнитной оптики /поворотные магниты и квадрупольные линзы/, компенсирующая дисперсию.

3. Коллиматор, формирующий спектр.

Действие устройства можно представить себе следующим образом. Если в устройство вдоль оси Z входит узкий /по оси X / пучок частиц, имеющий широкое энергетическое распределение, то после прохождения системы I он приобретает дисперсионные свойства, т.е.

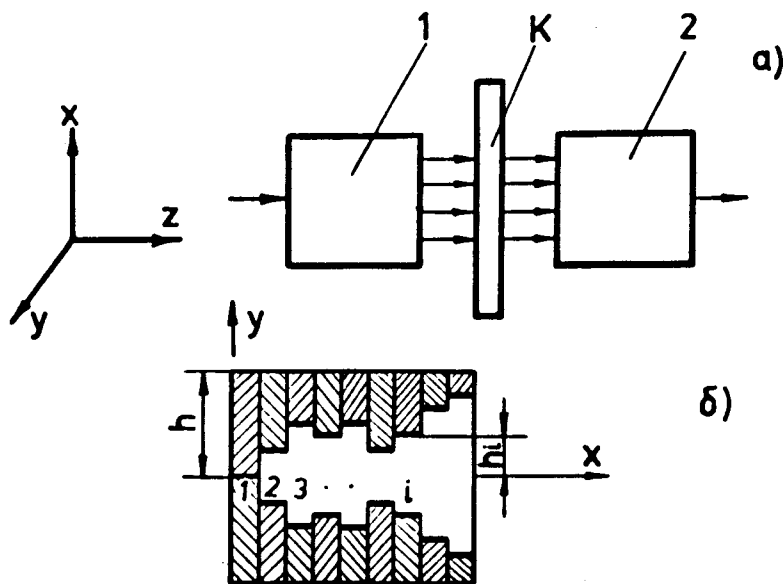


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для формирования дозного распределения /а/ и конструкция формирующего коллиматора /б/.

траектории частиц, обладающих различными импульсами, пространственно разделяются и координата  $X$  частицы в плоскости, где расположен коллиматор  $K$ , однозначно зависит от ее импульса  $P$ . Далее коллиматор  $K$  изменяет интенсивность отдельных импульсных гармоник пучка тяжелых заряженных частиц, затем с помощью системы 2 происходит компенсация дисперсии и в результате смешивания возникает пучок с новым спектральным составом и соответственно дозным распределением.

Коллиматор, формирующий спектр, представляет собой наборную систему подвижных пластин, внутренние стенки которых образуют регулируемый ступенчатый профиль, перекрывающий частично или полностью апертуру отдельных участков импульсного распределения частиц. Количество и ширина пластин выбираются исходя из требований, предъявляемых к форме дозного распределения, и параметров анализирующей магнитной системы.

Принцип работы коллиматора иллюстрирует рис. 2б. Изменяя апертуру каждой  $i$ -й пластины  $h_i$ , можно регулировать количество частиц в интервале импульсов

$$\Delta P_i = \frac{P \Delta x}{D} / P - \text{средний импульс частиц, } D - \text{линейная}$$

дисперсия и  $\Delta x$  - ширина пластины коллиматора/, пропускаемых коллиматором. Подбирая профиль коллиматора, можно выделить из имеющегося широкого энергетического распределения пучка частиц участок спектра, необходимый для формирования заданного дозного распределения.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент проводился на выведенном протонном пучке синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Схема формирования пучка представлена на рис. 3.

Выведенный из камеры синхроциклотрона пучок протонов с энергией 640 МэВ отклоняется с помощью магнитных насадок и поворотного магнита ОМ-1 и фокусируется с помощью дублета квадрупольных линз МЛ-3 на алюминиевый тормозитель, замедляющий протоны до средней энергии 180-200 МэВ. Заторможенные протоны имеют широкое энергетическое распределение с  $\sigma_E \approx 20$  МэВ. За тормозителем располагается щелевой коллиматор  $K$  шириной 1 см. Объективом служит дублет квадрупольных линз МЛМ-1, создающий в горизонтальной плоскости изображение щели в месте расположения коллиматора, формирующего спектр протонов ФК.

Поворотный магнит СП-37 отклоняет пучок на угол  $30^\circ$ . Формирующий коллиматор, состоящий из двенадцати пар пластин шириной 9 мм, располагается на расстоянии 2 м от центра магнита, при этом расстояние между траекториями протонов, отличающихся по импульсу на  $\Delta p/p = 1\%$ , в плоскости коллиматора равно  $\sim 1$  см.

Квадрупольный дублет МЛМ-2 служит для компенсации дисперсии в области расположения фантома и аппаратуры для измерения дозных характеристик.

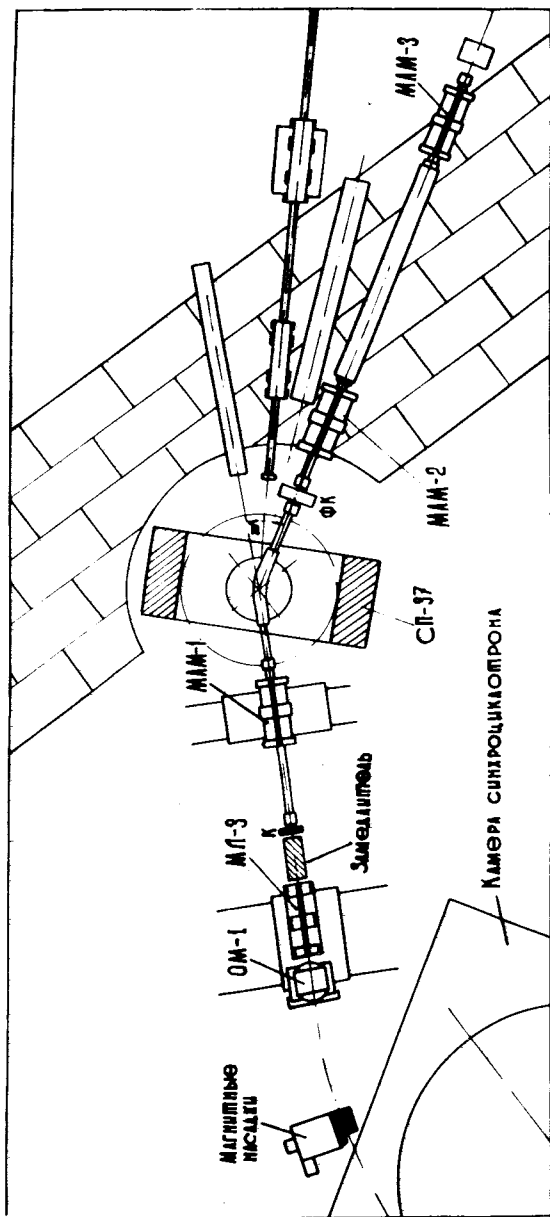


Рис. 3. Схема формирования пучка протонов с кривой Брэгга модифицированной формы в здании синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. ОМ-1, СП-37 - отклоняющие магниты; МЛ-3, МЛ-2, МЛМ-1, МЛМ-2, МЛМ-3 - дублеты квадрупольных линз; К - щелевой коллиматор; ФК - коллиматор, формирующий спектр протонов.

Протяженность плоской части дозного максимума зависит от ширины интервала импульсов частиц, используемых для формирования дозного распределения. Так, для получения кривой Брэгга с плоской вершиной протяженностью  $5 \text{ г/см}^2$  необходим интервал импульсов  $\Delta p/p = 7\%$ .

Крутой спад дозы за плоской вершиной определяется интервалом импульсов протонов, проходящих через отдельные открытые пары пластин. Для получения крутого спада за плоской вершиной  $t_{30\%} - t_{80\%} = 0,5 \text{ г/см}^2$  необходимо получить разрешение при одной паре открытых пластин формирующего коллиматора  $\Delta p/p = 1\%$ .

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 приведена кривая Брэгга, измеренная при одной открытой паре пластин. Отношение дозы в пике к входной дозе равно 2,6, энергия протонов составляет

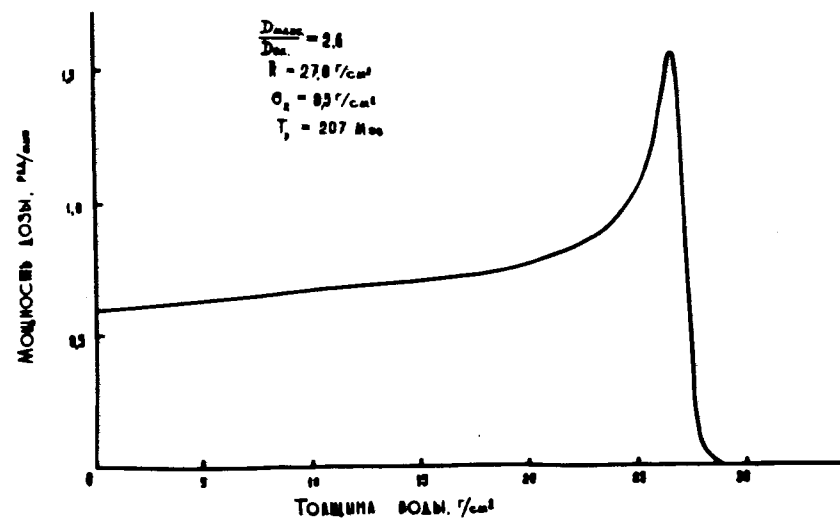


Рис. 4. Кривая Брэгга, измеренная при одной открытой паре пластин формирующего коллиматора.

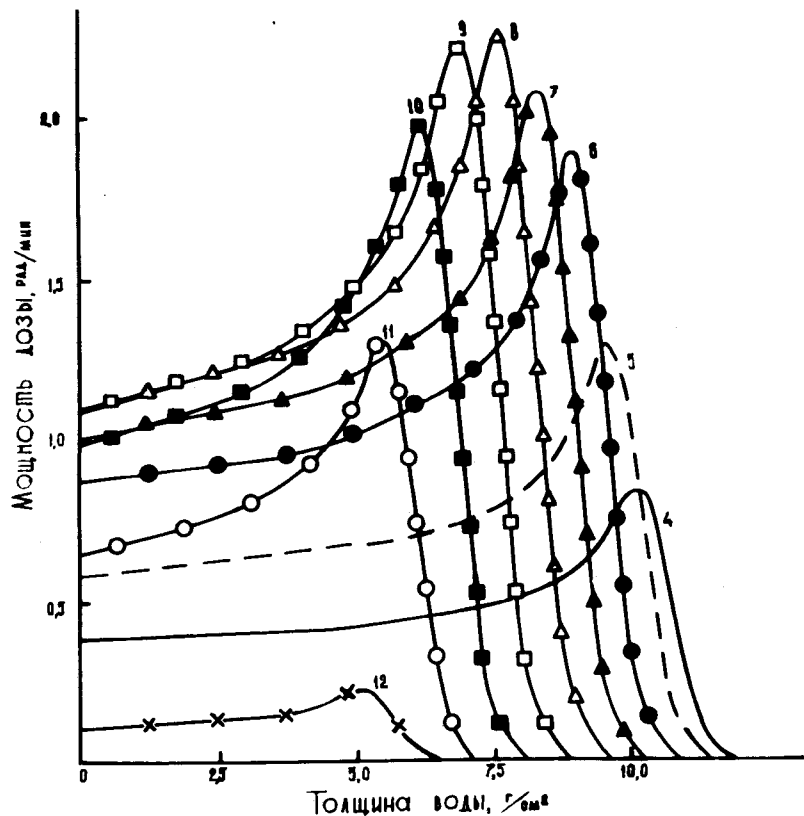


Рис. 5. Семейство окончных участков кривых Брэгга для пучков протонов, пропускаемых отдельными парами пластин формирующего коллиматора. Цифрами на рисунке указаны номера открытых пар пластин.

207 МэВ. По спаду кривой Брэгга можно определить импульсное разрешение протонного пучка. Оно оказывается равным  $\Delta p/p = 1,2\%$ .

Семейство окончных участков кривых Брэгга для пучков протонов, пропускаемых отдельными парами пластин, приведено в таблице и на рис. 5. Начальные участки всех брэгговских кривых на длине  $16,5 \text{ г/см}^2$  плексигласа имеют одинаковый характер. Средние импульсы пучков протонов, пропускаемых соседними щелями, отличаются на  $0,85\%$ . Полный интервал импульсов протонов,

пропускаемых коллиматором, составляет  $7,7\%$ , и пробеги протонов от крайних щелей отличаются на  $5 \text{ г/см}^2$ , что позволяет сформировать кривую Брэгга с плоской вершиной протяженностью до  $5 \text{ г/см}^2$ .

Из полученного семейства кривых Брэгга путем изменения и подбора апертур отдельных щелевых коллиматоров была сформирована модифицированная кривая Брэгга с плоской вершиной протяженностью  $5 \text{ г/см}^2$  и крутым спадом за плоской вершиной /рис. 6/. Спад дозы от  $90\%$  до  $10\%$  происходит на толщине  $1,0 \text{ г/см}^2$ . Отношение дозы на плоской части к входной дозе составляет  $1,45$ . Неоднородность дозы на плоской части модифицированной кривой Брэгга не превышает  $\pm 2,5\%$ .

## 5. ВЫВОДЫ

Разработан метод получения модифицированной кривой Брэгга в условиях немоноэнергетичных протонных пучков. Проведена экспериментальная проверка нового

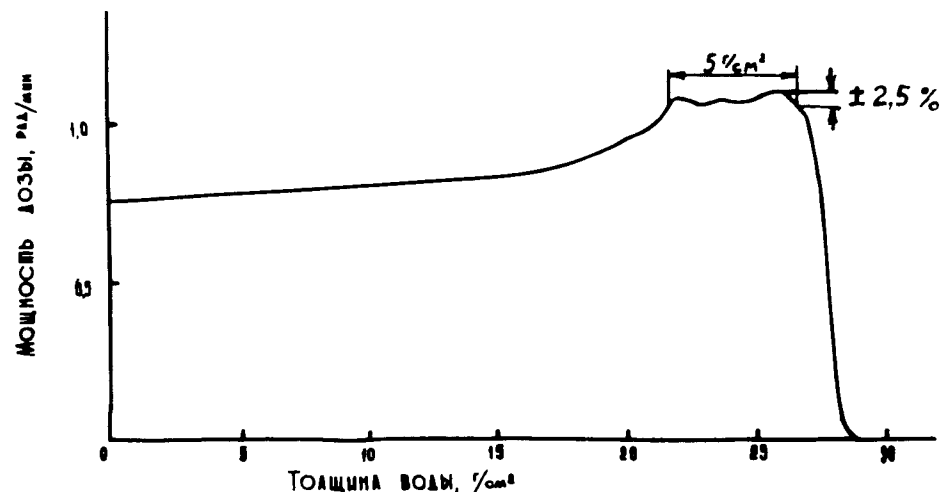


Рис. 6. Модифицированная кривая Брэгга с плоской вершиной.

Таблица

Номер от- крытой пары пластин фор- мирующего коллиматора	Доза в пике, D макс., Доза на входе, D макс./мин D <sub>вх.</sub> , рад/мин		D макс. D <sub>вх.</sub>	Средний пробег протонов, R̄, г/см <sup>2</sup>	Дисперсия пробега σ <sub>R</sub> , г/см <sup>2</sup>	Энергия протонов, T <sub>p</sub> , МэВ	Импульс протонов, P <sub>p</sub> , МэВ/с
	D макс./мин рад/мин	D <sub>вх.</sub> , рад/мин					
4	0,83	0,39	2,12	27,5	0,45	209	660,2
5	1,3	0,576	2,25	26,95	0,50	206,6	656,1
6	1,87	0,85	2,2	26,25	0,50	203,5	650,6
7	2,08	1,0	2,07	25,65	0,50	200,9	646,0
8	2,27	1,095	2,07	24,95	0,50	197,5	640,0
9	2,21	1,17	2,04	24,25	0,45	194,3	634,4
10	1,98	0,98	2,0	23,5	0,45	190,8	628,0
11	1,3	0,655	1,98	22,75	0,50	187,4	621,9
12	0,22	0,108	2,04	22,3	0,50	185,2	617,9

метода на заторможенном до энергии 200 МэВ пучке протонов синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Получена модифицированная кривая Брэгга с плоской вершиной протяженностью до 5 г/см<sup>2</sup> и крутым спадом /около 1 г/см<sup>2</sup>/ за плоской вершиной.

Разработанный метод будет использоваться при формировании на реконструированном ускорителе Лаборатории ядерных проблем /установка "Ф"/ медицинского протонного пучка, предназначенного для сканирующего ротационного облучения глубоко расположенных опухолей<sup>14/</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Larsson B. *Brit.J.Radiol.*, 1961, 34, p.143.
2. Блохин С.И. и др. *Мед. радиология*, 1970, 15/5/, с.64.
3. Robertson J.B. e.a. *Cancer*, 1975, 35, No. 6, p.1664.
4. Абазов В.М. и др. *ОИЯИ, Д-8883, Дубна*, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 ноября 1977 года.