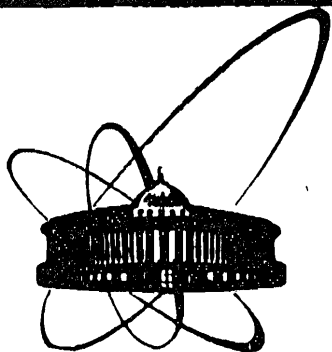


86-648



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P9-86-648

В.М.Абазов, С.А.Густов, В.П.Зорин, С.А.Кутузов,  
И.В.Мирохин, Г.В.Мицын, А.Г.Молоканов,  
О.В.Савченко, А.В.Филимонов

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ  
НА РЕКОНСТРУИРОВАННОМ ФАЗОТРОНЕ  
ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОИЯИ**

Направлено в Оргкомитет Рабочего  
совещания по вопросам протонной  
терапии (Ленинград, 14-18 октября  
1986 года)

**1986**

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ завершены работы по созданию на фазотроне многокабинного клиничко-физического комплекса, включающего в себя три кабины для протонной терапии, кабины для терапии  $\Pi^-$ -мезонами и нейтронами, и ведется трассировка пучков в эти кабины. В данной работе приводятся первые результаты по формированию широких терапевтических протонных пучков в кабинах № 1 и № 2 и измерению их физико-дозиметрических характеристик.

В процедурной кабине № 1 (рис.1), предназначенной для сканирующего ротационного облучения глубоко расположенных опухолей, формируется пучок протонов со средней энергией около 200 МэВ диаметром поля облучения до 6 см и модифицированной формой кривой Брэгга. В этой же кабине предполагается использовать протонные пучки со средней энергией около 100 МэВ и диаметром поля облучения 1-2 см. В процедурной кабине № 2 формируется протонный пучок со средней энергией ~130 МэВ диаметром поля облучения до 5 см и протяженностью плоской части максимума дозы до  $8 \text{ г/см}^2$  в мягкой ткани.

Для получения терапевтических протонных пучков в процедурных кабинах № 1 и № 2 применяется метод модификации пика Брэгга для мезонноэнергетических протонных пучков, получавшихся в результате торможения в замедлителе выведенного из ускорителя пучка протонов с энергией около 660 МэВ <sup>/1/</sup>.

Этот метод основан на преобразовании широкого энергетического распределения замедленных протонов в такое распределение, которое обеспечивает формирование пучка, распределение дозы по глубине вещества в котором наиболее полно удовлетворяет требованиям лучевой терапии - достаточно однородное распределение в широком максимуме и крутой спад за плоской вершиной распределения дозы (так называемая модифицированная кривая Брэгга).

Преобразование спектра осуществляется с использованием магнитного анализа и ступенчатого коллиматора, настроенного на пропускание требуемого спектра. Этот метод был опробован экспериментально еще до остановки фазотрона ДЯП ОИЯИ на реконструкцию, при этом была показана практическая возможность формирования модифицированной кривой Брэгга с плоской вершиной протяженностью до  $5 \text{ г/см}^2$  в воде и крутым спадом за ней около  $1 \text{ г/см}^2$  <sup>2/2/</sup>.

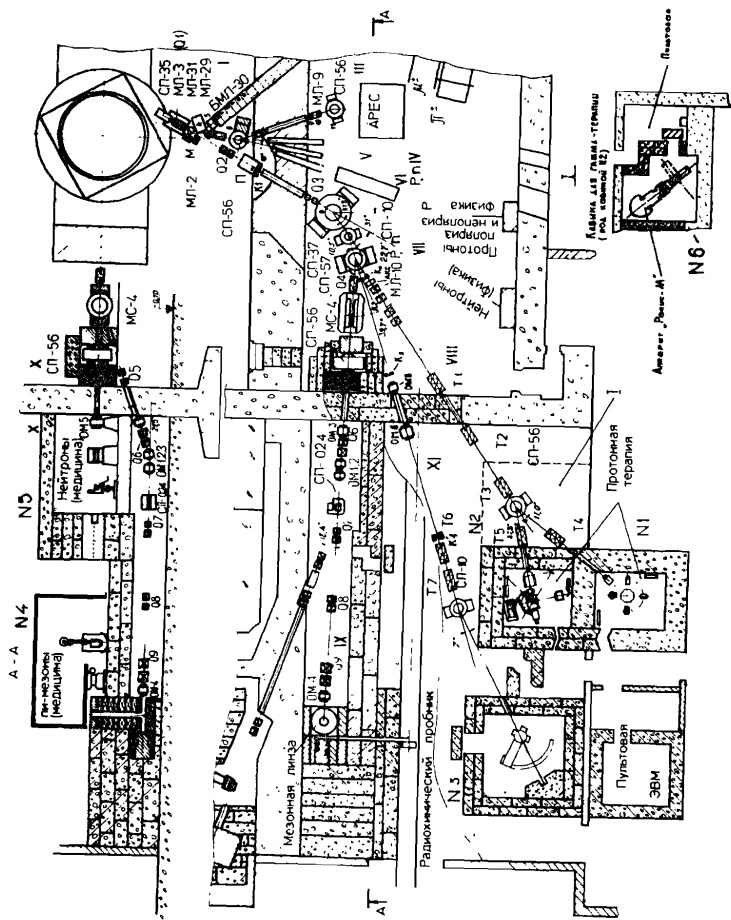


Рис. 1. План разводки пучков фазотрона в процедурные помещения клиничко-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ.

Канал для формирования протонного пучка с модифицированной формой кривой Брэгга должен обеспечить:

- а) магнитный анализ и получение необходимой линейной дисперсии заторможенного протонного пучка в месте расположения коллиматорной системы;
- б) компенсацию линейной дисперсии и получение оптимальных размеров пучка в процедурных кабинетах в месте расположения облучаемых объектов;
- в) транспортировку в процедурные помещения протонных пучков с достаточно широким импульсным распределением ( $\Delta p/p = 6-7\%$ );
- г) минимальные потери пучка при транспортировке.

На основе этих требований была разработана схема канала для транспортировки и формирования таких пучков на фазотроне ЛЯП ОИЯИ, были выполнены расчеты режимов канала, при которых обеспечиваются оптимальные условия формирования и транспортировки протонных пучков в процедурные помещения № 1 и № 2 <sup>7/3/</sup>.

Схема канала для формирования и транспортировки протонных пучков представлена на рис. 1. Выведенный из камеры фазотрона протонный пучок с помощью магнита СП-35 и двух дублетов квадрупольных линз фокусируется на вход углеродного замедлителя, в котором энергия пучка уменьшается до необходимой средней энергии. Управляемый из пульта помещения углеродный замедлитель II выполнен в виде трех независимо вращающихся барабанов, размещенных внутри защиты из тяжелого бетона. Два первых барабана имеют отверстия для установки на пути пучка блоков из углерода различной толщины, позволяющих выбирать суммарную толщину замедлителя в диапазоне от 0 до 130 см с шагом 1,2 см. Третий вращающийся стальной барабан толщиной 40 см позволяет устанавливать коллиматоры различных размеров.

Три магнита - СП-37, СП-10 и СП-57 отклоняют пучок на углы  $32^\circ$ ,  $9,5^\circ$  и  $14,5^\circ$  соответственно. При этом осуществляется магнитный анализ пучка.

Для преобразования энергетического спектра заторможенных протонов в такой, который обеспечивает получение в процедурных кабинетах дозного распределения с заданной модифицированной формой кривой Брэгга, служит дистанционно управляемая автоматическая коллиматорная система (АКС). АКС представляет собой набор из 12 пар подвижных пластин шириной по 1,5 см. Перемещением этих пластин в вертикальном направлении симметрично относительно медианной плоскости пучка можно перекрывать частично или полностью апертуры отдельных частей поперечного сечения канала, пропускающего протоны определенной энергии. Регулирование апертур позволяет трансформировать энергетическое распределение протонов в такое, которое позволяет получить в процедурных кабинетах распределение доз с заданной формой модифицированной кривой Брэгга.

Дублет квадрупольных линз  $Q_3$ , расположенный на выходе коллиматора из защитной стены, фокусирует протонный пучок на АКС для получения крутого спада дозы за плоской вершиной модифицированной кривой Брэгга.

При подвижных способах облучения, например ротационном, когда толщина подлежащей облучению мишени с различных направлений неодинакова, возникает необходимость регулировать протяженность плоской вершины дозного распределения непосредственно в процессе облучения. Для этого в АКС предусмотрена пластина, расположенная перед ступенчатым коллиматором, которая по сигналам от ЭВМ может перемещаться в горизонтальном направлении, перекрывая низкоэнергетическую часть спектра пучка и никак не влияя на высокоэнергетическую часть спектра, при этом уменьшается протяженность плоской вершины глубинного дозного распределения.

Два дублета квадрупольных линз МЛ-10 и пять триплетов ( $T_1-T_5$ ) служат для транспортировки пучка в процедурные помещения и компенсации линейной дисперсии в месте расположения облучаемого объекта. Магнит СП-56 используется для разводки пучков в кабины № 1 и № 2. Поперечное сечение протонных пучков в каждой из процедурных кабин формируется с использованием набора основных и чистовых коллиматоров, устанавливаемых непосредственно перед облучаемым объектом.

Формирование пучка осуществляется в вакууме, так как увеличение поперечных размеров пучка за счет многократного кулоновского рассеяния протонов в воздухе приводит как к уменьшению интенсивности пучка в кабинах, так и к ухудшению энергетического разрешения анализирующей магнитной системы.

При получении и исследовании протонных пучков использовался широкий набор детекторов. Абсолютная интенсивность выведенного пучка протонов измерялась калориметром <sup>14</sup>. Измерения потока протонов через поперечное сечение канала проводились плоскопараллельными воздушными ионизационными камерами. Профили пучка измерялись многопроволочными ионизационными камерами и линейкой полупроводниковых детекторов. Информация с проволочек камеры и полупроводниковых диодов преобразовывалась в цифровую и передавалась для последующей обработки в ЭВМ. Для измерения дозных распределений пучков в процедурных помещениях использовались полупроводниковые детекторы и дозиметры VA-J-18 и КД-27012.

Измерение кривых Брэгга проводилось полупроводниковым детектором и замедлителем, толщина которого изменялась по командам от ЭВМ. Информация с детектора также передавалась и обрабатывалась в ЭВМ.

Измерения пространственных дозных распределений проводились изодозографом, представляющим собой водяной фантом, внутри которого по командам от ЭВМ по трем взаимно перпендикулярным направлениям пере-

мещался полупроводниковый детектор. Информация о положении детектора и величине сигнала с него также передавалась и обрабатывалась в ЭВМ.

Настройка канала проводилась при пониженной интенсивности выведенного из фазотрона пучка протонов - 0,5 мкА.

Пучок со средней энергией около 200 МэВ и модифицированной формой кривой Брэгга был сформирован в кабине № 1. Был измерен набор кривых Брэгга для отдельных составляющих пучка протонов, пропускаемых через апертуру, образованную каждой парой пластин АКС. Результаты измерений приведены на рис. 2. Цифрами на рисунке указаны номера

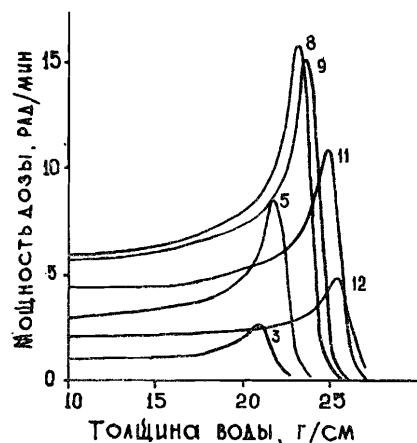


Рис. 2. Семейство кривых Брэгга пучков, пропускаемых между отдельными парами пластин коллиматорной системы. Цифрами на рисунке указаны номера открытых пар пластин.

плоской вершины уменьшена путем обрезания низкоэнергетической части спектра горизонтально перемещающейся пластиной в АКС.

Такое дозное распределение было получено при следующей конфигурации пластин АКС. Определяющая спад за плоской вершиной и мощность дозы на ней пара пластин № II открыта полностью (вертикальная апертура - 100 мм). Для получения плоской вершины открыты: пластина № 9 - 12 мм, пластина № 7 - 8 мм, пластина № 5 - 8 мм, № 3 - 20 мм, пластина № I - 100 мм. Размер щелевого коллиматора  $K_1$  при этом был равен 10x60 мм.

открытых пар пластин. Средние величины пробегов протонов, пропускаемых соседними парами пластин АКС, различаются на 0,5 г/см<sup>2</sup>, импульсы - на 0,7%. Полный интервал импульсов протонов в кабине составляет 7%.

Из полученного набора кривых Брэгга путем подбора апертур каждого из щелевых коллиматоров АКС было сформировано дозное распределение с модифицированной формой кривой Брэгга - с плоской вершиной протяженностью 4,7 г/см<sup>2</sup> и крутым спадом дозы за плоской вершиной (рис. 3). Спад дозы от 90% до 10% происходит на толщине 1,1 г/см<sup>2</sup>. Пунктиром на этом же рисунке изображена кривая Брэгга, протяженность

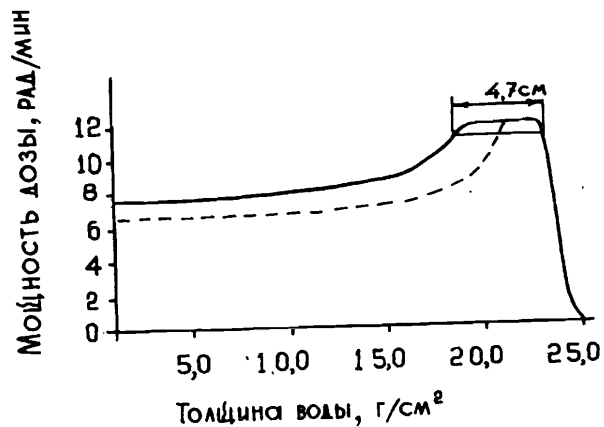


Рис.3. Модифицированная кривая Брэгга с плоской вершиной.

Если задать менее жесткие требования к спаду дозы за плоской вершиной, то можно полностью открыть вместо одной пластины две и увеличить размеры щелевого коллиматора  $K_1$ . При таких условиях была получена модифицированная кривая Брэгга, спад дозы за плоской вершиной в которой увеличен до  $1,8 \text{ г/см}^2$ , но мощность дозы на плоской части кривой Брэгга при этом составила  $45 \text{ рад/мин}$ .

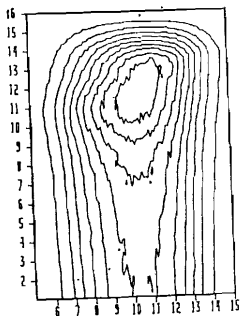


Рис.4. Изодозное распределение в горизонтальной плоскости для пучка протонов с модифицированной формой кривой Брэгга со средней энергией 200 МэВ.

На рис.4 приводится изодозное распределение в горизонтальной плоскости для пучка с модифицированной формой кривой Брэгга в водяном фантоме, измеренное изодозографом.

В этой же кабине был получен протонный пучок со средней энергией около 100 МэВ. Кривая Брэгга, измеренная для этого пучка при полностью открытых пластинах АКС, приво-

дится на рис.5а. Отношение дозы в пике Брэгга к входной дозе  $D_{\text{макс.}}/D_{\text{вх.}} = 2,1$ , мощность дозы в максимуме -  $27 \text{ рад/мин}$ .

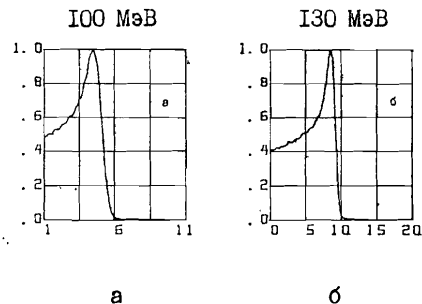


Рис.5. Кривые Брэгга терапевтических протонных пучков:  
а) энергия 100 МэВ, кабина № 1;  
б) энергия 130 МэВ, кабина № 2.

Таким образом, в результате проведенных работ осуществлена транспортировка замедленных протонных пучков в кабины № 1 и № 2 клинично-физического комплекса ЛЯП ОИЯИ. Показано, что разработанный канал обеспечивает получение необходимой линейной дисперсии заторможенного пучка протонов в месте расположения ступенчатого коллиматора, транспортировку в кабины № 1 и № 2 протонных пучков с импульсным распределением  $\Delta p/p = 6-7\%$  и почти полную компенсацию линейной дисперсии в месте расположения объектов облучения.

В кабине № 1 получен пучок протонов со средней энергией 200 МэВ и с модифицированной формой кривой Брэгга - плоской вершиной протяженностью  $4,7 \text{ г/см}^2$  и крутым спадом дозы за ней.

Измеренные мощности дозы позволяют начать проведение медико-биологических исследований на сформированных протонных пучках уже при интенсивности выведенного из реконструированного ускорителя протонного пучка с током, равным или большим, чем 1 мкА.

В кабине № 2 был получен протонный пучок со средней энергией около 130 МэВ. Кривая Брэгга для этого пучка при полностью открытых пластинах АКС приводится на рис.5б. Отношение дозы в максимуме к входной дозе  $D_{\text{макс.}}/D_{\text{вх.}} = 2,5$ , мощность дозы в максимуме около  $75 \text{ рад/мин}$ . На рис.6 приводится изодозное распределение для этого пучка в горизонтальной плоскости.

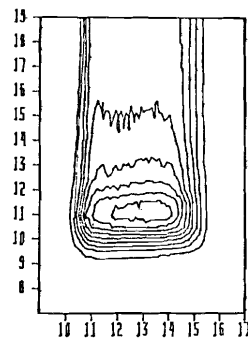


Рис.6. Изодозное распределение в горизонтальной плоскости для пучка протонов со средней энергией 130 МэВ.

Литература

1. Молоканов А.Г., Савченко О.В. Авт.свид. СССР, № 658517 от 11.05.77 г. Бюл. ОИПОТЗ, 1979, № 15, с.174.
2. Зорин В.П., Молоканов А.Г., Савченко О.В. ОИЯИ, Р16-11080, Дубна, 1977.
3. Кузьмин Е.С. и др. ОИЯИ, Р9-84-445, Дубна, 1984.
4. Железов В.П. и др. ОИЯИ, 16-3491, Дубна, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 сентября 1986 года.

Абазов В.М. и др.

P9-86-648

Получение и исследование терапевтических протонных пучков на реконструированном фазотроне  
Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ

Представлены первые результаты формирования и транспортировки терапевтических протонных пучков на реконструированном фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Для получения глубинного дозного распределения с плоской вершиной и крутым спадом применяется метод формирования пучка с необходимым энергетическим спектром из немоноэнергетического пучка. Для пучка со средней энергией 200 МэВ получено глубинное дозное распределение с протяженностью плоской вершины  $4,7 \text{ г/см}^2$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Abazov V.M. et al.

P9-86-648

Forming and Study of Therapeutic Proton Beams  
on Designed Phasotron at the Laboratory  
of Nuclear Problems, JINR

The first results on forming and transporting process of therapeutic proton at the JINR phasotron are presented. To provide the flat-topped depth-dose distributions with steep back slope, the method of extracting the beam with a necessary energy spectrum from a non-monoenergetic beam is used. Extension of the flat-top of the depth-dose distribution is  $4.7 \text{ g/cm}^2$  for the 200 MeV beam mean energy.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986