

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1508/83

21/3-83

16-82-876

Д.Л.Карлин,¹ Б.А.Коннов,¹ В.И.Костюченко,²
М.Ф.Ломанов,² А.Г.Молоканов, В.Б.Низковолос,¹
О.В.Савченко, В.С.Хорошков²

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДОЗИМЕТРИЯ
МЕДИЦИНСКИХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ
ЛЯП ОИЯИ, ИТЭФ ГКАЭ И ЛИЯФ АН СССР

¹ Центральный научно-исследовательский рентгено-
радиологический институт Минздрава СССР, Ленинград

² Институт теоретической и экспериментальной
физики, Москва

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование протонных пучков в лучевой терапии на синхротроне 680 МэВ в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ /Дубна/ началось в 1967 году ^{/1/}, на протонном синхротроне 10 ГэВ Института теоретической и экспериментальной физики /Москва/ в 1968 году ^{/2/} и на синхроциклотроне 1 ГэВ Ленинградского института ядерной физики АН СССР в 1975 году ^{/3/}. К настоящему времени уже накоплен большой опыт по клиническому применению этих пучков в лучевой терапии онкологических больных и в радионейрохирургии.

Вопрос о проведении сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков возник на Первом международном семинаре по использованию протонных пучков в лучевой терапии /Москва, 1977 год/ ^{/4/}. Все медицинские протонные пучки, функционирующие в настоящее время, отличаются друг от друга энергией, пространственными и временными характеристиками и, соответственно, методами дозиметрии. Различия в используемых режимах облучения и размерах дозных полей затрудняют сопоставление клинических результатов. Участники семинара констатировали, что в первую очередь необходимо убедиться в совпадении абсолютных калибровок дозы на различных пучках, так как даже небольшие расхождения в дозе могут исказить анализ результатов лечения. Было признано целесообразным проводить регулярно сравнительную дозиметрию медицинских протонных пучков. По инициативе ЛЯП ОИЯИ проведены циклы сравнительных дозиметрических измерений между тремя медицинскими протонными пучками, результаты которых и изложены в настоящей работе.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕДИЦИНСКИХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ

Пучки протонов, используемые для лучевой терапии, существенно различаются между собой энергетическими, пространственными и временными характеристиками.

Во время проведения сравнительной дозиметрии медицинский протонный пучок, существовавший в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ до реконструкции ускорителя, формировался путем торможения выведенного протонного пучка до средней энергии протонов ~ 200 МэВ ^{/1/}. Временная структура пучка характеризовалась наличием импульсов частиц длительностью 160 мкс, следующих друг за другом через каждые 6 мс. Лучевая терапия проводилась широким пучком /диаметром 5-10 см/, средняя мощность дозы в пучке $2 \cdot 10^{-2}$ Гр/с.

На синхротроне ИТЭФ для лучевой терапии используется пучок протонов, энергия которого может быть выбрана от 70 до 200 МэВ. Временная структура пучка представляет собой импульсы длительностью около 140 нс, интервал между ними - 2,5 с. Пучок имеет поперечные размеры от 5 до 90 мм. Доза в импульсе может быть выбрана в пределах от сотых долей Гр до нескольких десятков Гр.

На синхроциклотроне ЛИЯФ отделением протонной терапии ЦНИРРИ для лучевой терапии используется первичный пучок протонов с энергией 1 ГэВ. Терапия проводится узким пучком протонов шириной 7 мм, мощность дозы может плавно регулироваться в широких пределах^{/3/}. Временная структура пучка характеризуется частотой макроимпульсов 40 Гц, длительность импульсов - 300 мкс.

3. МЕТОД СРАВНИТЕЛЬНОЙ ДОЗИМЕТРИИ

Наиболее удобными для проведения сравнительной дозиметрии являются термолюминесцентные дозиметры /ТЛД/. Показания таких дозиметров не зависят от мощности дозы вплоть до 10^9 Гр/с для области доз до 10^3 Гр^{5/}. Это свойство термолюминесцентных дозиметров позволяет проводить измерения на пучках с существенно различной временной структурой. Кроме того, малые размеры и длительное сохранение дозиметрической информации позволяют транспортировать такие дозиметры на большие расстояния, что делает их особенно удобными для сравнительной калибровки медицинских протонных пучков. Для проведения сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков использовались серийно выпускаемые ТЛД двух типов - LiF и CaF₂.

Термолюминесцентные дозиметры LiF представляют собой заполняемые порошком полиэтиленовые капсулы, используемые в комплекте с серийным измерительным прибором VA-M-30 /ГДР/. Относительная средняя квадратичная погрешность при измерении одним термолюминесцентным дозиметром LiF составляет $\sigma \approx 5\%$. VA-M-30 - прибор для относительных измерений доз. Для проведения абсолютных измерений он нуждается в калибровке. Было проведено пять сеансов калибровки ТЛД на пучке протонов с энергией $T_p=200$ МэВ на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с использованием эталонной ионизационной камеры дозиметра VA-J-18 /ГДР/. В этом приборе в качестве детекторов излучения применяются воздушные ионизационные камеры. Дозиметр предназначен для измерений в полях рентгеновского и гамма-излучений. Полученный в этих измерениях калибровочный коэффициент использовался в дальнейшем при проведении сравнительной дозиметрии на медицинском протонном пучке ИТЭФ.

Этот же калибровочный коэффициент может быть использован и для дозиметрии протонов с энергией 1 ГэВ. Независимость чувствительности термолюминесцентных дозиметров от энергии протонов в этой области энергий показана в целом ряде работ^{/5-10/}. Так, например, в работе^{/5/} показано, что в диапазоне доз до области

сверхлинейности чувствительность термолюминесцентных дозиметров LiF одинакова для протонов и гамма-излучения. В работе^{/6/} показано, что чувствительность ТЛД одинакова для гамма-излучения и для протонов с энергией выше 20 МэВ. В работах^{/7,8/} приводятся зависимости чувствительности ТЛД от dE/dx , из которых также следует, что чувствительность ТЛД к протонам с энергиями 200 и 1000 МэВ одинакова. На синхроциклотроне в Дубне на пучке протонов с энергией 600 МэВ измерялась чувствительность различных типов ТЛД^{9/} и было показано, что чувствительность всех исследованных детекторов к протонам практически равна чувствительности к гамма-излучению^{10/} ⁸⁰Со. Такой же результат для протонов с энергией 798 МэВ приводится в работе^{/10/}.

Термолюминесцентные дозиметры CaF₂ использовались в сочетании с серийным измерительным прибором VAM-164 /ГДР/. ТЛД CaF₂ представляет собой стеклянную капсулу диаметром около 10 мм, внутри которой на проводнике напрессован люминофор CaF₂. Относительная средняя квадратичная погрешность при измерении одним дозиметром составляла $\sigma \approx 8-10\%$. Обработка ТЛД-дозиметров проводилась независимо на двух различных приборах VAM-164. Калибровка этих приборов по дозиметру VA-J-18 проводилась на протонном пучке с энергией 200 МэВ во время четырех сеансов работы на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ. Полученные в этих измерениях калибровочные коэффициенты использовались в дальнейшем при сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков ИТЭФ и ЛИЯФ АН СССР.

4. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешности измерений определялись в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 8.207-76^{/11/} для прямых измерений с многократными наблюдениями. Вводились следующие погрешности измерений:

а/ разброс показаний дозиметров вокруг средних значений при обсчете группы дозиметров. В каждом сеансе измерения проводились группами дозиметров от 9 до 30 штук. Предполагалось, что разброс показаний детекторов описывается нормальным распределением, относительное среднее квадратичное отклонение для каждой серии измерений вычислялось по формуле:

$$\sigma(\bar{A}) = \frac{1}{\bar{A}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{A})^2}{n(n-1)}},$$

где \bar{A} - среднее значение дозы в данной серии измерений, X_i - значение дозы в i -м измерении, n - количество дозиметров в группе.

Значения $\sigma(\bar{A})$ для различных серий измерений находились в пределах: 1,0 - 3,5% для LiF и 2,5 - 5,0% для CaF₂;

б/ погрешность относительной калибровки ТЛД по дозиметру VA-J-18 составляла $\sigma_1 = 1,5\%$ для LiF и $\sigma_1 = 3\%$ для CaF₂;

в/ погрешность измерения абсолютного значения дозы протонов дозиметром VA-J-18 составляла $\sigma_2 = 6\%$;

г/ погрешность абсолютного измерения дозы на медицинском пучке ИТЭФ составляла $\sigma_3 = 8\%$, на медицинском пучке ЛЯФ АН СССР - $\sigma_3 = 6\%$.

Суммарная погрешность вычислялась по методике, рекомендуемой в ГОСТ 8.207-76 - по формуле:

$$\Delta = K \sqrt{\sum_{i=1}^3 \frac{\theta_i^2}{3} + \sigma^2(A)},$$

где Δ - граница погрешности результата измерения при заданной доверительной вероятности; K - коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей; θ_i - граница i -й неисключенной систематической погрешности.

В расчетах принималось $\theta_i = 2\sigma_i$.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ДОЗИМЕТРИИ ПУЧКОВ ЛЯП ОИЯИ И ИТЭФ

Сравнительная дозиметрия пучка ИТЭФ проводилась двумя различными типами термолюминесцентных дозиметров LiF и CaF_2 в различных геометрических условиях при начальной энергии протонов, выводимых из кольца синхротрона $T_p = 200$ МэВ. Схема проведения облучения в "узком" пучке показана на рис.1а. ТЛД облучались внутри узкого коллиматора диаметром 15 мм. Геометрия облучения в "широком" пучке показана на рис.1б. Пучок расширялся за счет многократного кулоновского рассеяния в свинцовом рассеивателе толщиной 3 мм. Облучение ТЛД проводилось на расстоянии 4 м от рассеивателя, где неоднородность дозы в области расположения дозиметров не превышала 5%. Дозиметры облучались дозами ~3 Гр.

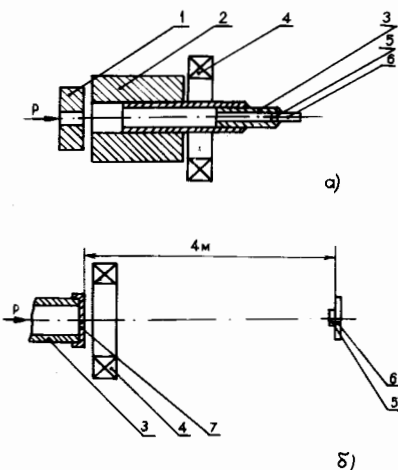


Рис.1. Схема проведения дозиметрических измерений на медицинском протонном пучке ИТЭФ. а/ геометрия "узкого" пучка; б/ геометрия "широкого" пучка. 1-3 - коллиматоры; 4 - индукционный датчик; 5 - таблетка полистирола для калибровки по наведенной активности ^{11}C ; 6 - кассеты с ТЛД; 7 - рассеиватель /свинец толщиной 3 мм/.

Мониторинг пучка производился индукционным датчиком. Для абсолютной калибровки дозы применялся активационный метод по реакции $^{12}\text{C}(p, pn) ^{11}\text{C}$. Погрешность измерения поглощенной дозы таким способом составляла $8\%^{12/}$.

Было проведено три сеанса облучения ТЛД на медицинском протонном пучке ИТЭФ. Результаты измерений, приведенные в табл.1, показывают, что во всех трех сеансах облучения дозиметров в ИТЭФ в пределах погрешностей измерений получено совпадение абсолютных дозиметрических калибровок медицинских протонных пучков Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и ИТЭФ.

Таблица 1

Результаты сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков ИТЭФ и ЛЯП ОИЯИ

Номер сеанса	тип ТЛД	геометрия пучка	количество детекторов	доза ОИЯИ / доза ИТЭФ	σ , отн. средне-квадрат. отклонение
1	LiF	узк.	15	0,99	0,11
		шир.	9	1,10	0,11
	CaF ₂	узк.	10	0,85	0,13
		шир.	15	1,08	0,12
2	LiF	узк.	9	1,04	0,11
		шир.	9	1,13	0,11
	CaF ₂	узк.	10	0,99	0,12
		шир.	30	1,05	0,12
3	LiF	узк.	18	0,96	0,11
		шир.	18	0,99	0,11
	CaF ₂	узк.	30	1,11	0,12
		шир.	30	1,11	0,12

6. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ДОЗИМЕТРИИ МЕДИЦИНСКИХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ ЛЯФ АН СССР И ЛЯП ОИЯИ

На медицинском протонном пучке ЛЯФ было проведено два сеанса измерений поглощенной дозы на пучке протонов с энергией 1000 МэВ. Измерения проводились в условиях, максимально приближенных к условиям протонной терапии. Ионизационная камера и термолюминесцентные дозиметры облучались внутри фантома из оргстекла диаметром 20 см и толщиной около 20 см. Для измерений поглощенной дозы использовались ТЛД LiF и CaF_2 от ОИЯИ и ТЛД LiF от ЦНИРРИ^{13/}. Контроль отпускаемой дозы проводился по ионизационной камере дозиметра типа KD-27012 /ГДР/.

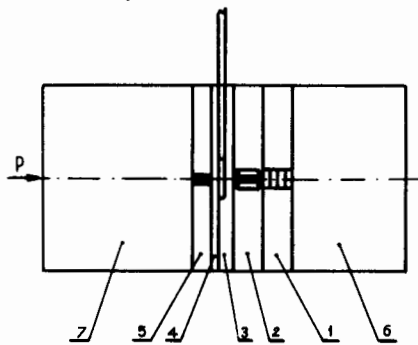


Рис.2. Схема проведения дозиметрических измерений на медицинском протонном пучке ЛЯФ АН СССР. 1,2 - кассеты с ТЛД LiF; 3 - кассета с ионизационной камерой VA-K-252; 4 - кассета с ТЛД для измерения радиальных дозных распределений; 5 - кассета с ТЛД LiF ЦНИРРИ; 6,7 - блоки из оргстекла.

Схема облучения приведена на рис.2 В кассете 1 вдоль оси пучка располагались 4 полиэтиленовые капсулы с ТЛД LiF диаметром 10 мм. В кассете 2 располагалось 5 капсул с порошком LiF диаметром 7 мм. В кассете 3 помещалась воздушная ионизационная камера VA-K-252 - для контроля облучения. В кассете 4 радиально располагались 33 детектора ТЛД ЦНИРРИ, предназначенные для измерения радиальных дозных распределений. В кассете 5 вдоль оси пучка для измерения поглощенной дозы помещалось 10 термолуминесцентных детекторов ЦНИРРИ диаметром по 3,5 мм. Перед детекторами устанавливался поглотитель толщиной 8 см для того, чтобы детекторы находились в области насыщения вторичными компонентами облучения.

Для проведения облучений ТЛД пучок специально расширялся. В первом сеансе фантом облучался пучком с полушириной 3,2 см, во втором - 10 см. Оба раза фантом устанавливался на оси пучка с точностью 1 мм. Проведенные измерения показали, что равномерность дозного поля в зоне расположения детекторов была не хуже 5%. Дозиметры облучались дозами от 2 до 6 Гр. Доза отпускалась с погрешностью 6%. Эта погрешность складывалась из погрешности поверки дозиметра KD-27012 /5%/, по которому калибровались ТЛД ЦНИРРИ и погрешности серии измерений. Результаты измерений, приведенные в табл.2, показывают совпадение в пределах погрешностей измерений абсолютных дозиметрических калибровок медицинских протонных пучков ЛЯП ОИЯИ и ЛЯФ АН СССР.

7. ВЫВОДЫ

1. Отработана методика проведения сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков с помощью ТЛД LiF и CaF₂. Точность сравнительной дозиметрии в каждом сеансе измерений составляла 10-12% /среднеквадратичное отклонение/.

Таблица 2

Результаты сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков ЛЯФ АН СССР и ЛЯП ОИЯИ

Номер сеанса	ширина пучка	Тип ТЛД	количество ТЛД	доза ОИЯИ доза ЛЯФ	σ , относительное среднеквадр. отклонение
1	3,2 см	LiF	26	0,98	0,10
2	10 см	LiF	26	0,98	0,10
		CaF ₂	9	1,01	0,11

2. Проведение сравнительной дозиметрии медицинских протонных пучков ЛЯП ОИЯИ, ИТЭФ и ЛЯФ АН СССР показало совпадение в пределах погрешностей измерений результатов абсолютных измерений поглощенной дозы, несмотря на существенные различия энергетических и временных характеристик этих пучков.

3. Большую точность в определении абсолютных значений поглощенной дозы на каждом пучке можно будет получить, если проводить сравнение с эталонным источником излучения.

4. Дальнейшее повышение уровня точности сравнительной дозиметрии связано с дальнейшим тщательным изучением вклада вторичных частиц, образующихся в результате ядерных взаимодействий, а также условий равновесия вторичных электронов в детекторах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Желепов В.П., Комаров В.И., Савченко О.В. ОИЯИ, 16-3491, Дубна, 1967; Мед.радиология, 1969, №7, с. 54.
2. Хорошков В.С. и др. Препринт ИТЭФ №519, М., 1967; Мед.радиология, 1969, №4, с. 58.
3. Низковолос В.Б. и др. Мед.радиология, 1975, №7, с. 19.
4. Использование протонных пучков в лучевой терапии. Труды Первого международного семинара /Москва, 1977/, Атомиздат, М., 1979.
5. Tochilin E., Goldstein N. Health Physics, 1966, 12, p.1705.
6. Hardy K.A. et al. Radiation Research, 1969, №37, p.272.
7. Patrick I.W. et al. Health Physics, 1976, No.30, p. 295.
8. Hübner K. et al. Nucl.Instr, and Meth., 1980, 175, p. 34.
9. Pernička F., Spurny F. Nucl.Instr, and Meth., 1980, 172, p. 435.
10. Henson A.M., Thomas R.H. Health Physics, 1978, v, 34, No. 4, p. 389.

11. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. ГОСТ 8.207-76, Издат.стандартов, М., 1976.
12. Ломанов М.Ф. и др. Мед.радиология, 1974, №7, с. 59.

Карлин Д.Л. и др.

16-82-876

Сравнительная дозиметрия медицинских протонных пучков ЛЯП ОИЯИ, ИТЭФ ГКАЗ и ЛИЯФ АН СССР

Проведено сравнение абсолютных калибровок дозы на трех медицинских протонных пучках - Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ /Дубна/, Института теоретической и экспериментальной физики /Москва/ и Ленинградского института ядерной физики. Измерения поглощенной дозы на медицинских протонных пучках ИТЭФ и ЛИЯФ проводились с помощью термолуминесцентных дозиметров LiF и CaF₂, предварительно откалиброванных на медицинском протонном пучке ЛЯП ОИЯИ. Точность сравнительной дозиметрии в каждом сеансе измерений составляла 10-12% /среднеквадратичное отклонение/. Было получено совпадение в пределах погрешностей измерений абсолютных значений доз на всех трех пучках, несмотря на различия энергетических и временных характеристик этих пучков.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Karlin D.L. et al.

16-82-876

Comparative Dosimetry of Medical Proton Beams of the LNP JINR, ITEP and LNPI

Absolute dose calibration of three medical proton beams (the Laboratory of Nuclear Problems (JINR, Dubna), the Institute of Theoretical and Experimental Physics (Moscow) and the Leningrad Nuclear Physics Institute) are compared. Measurements of absorbed dose values of ITEP and LNPI beams were performed by means of LiF and CaF₂ thermoluminescent dosimeters, that had been preliminary calibrated at the LNP JINR medical proton beam. The accuracy of comparative dosimetry in each series of measurements were 10-12% (standard deviation). Absolute dose values of every beam are in agreement within the measurement accuracy in spite of the differences of energetic and time beam parameters.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 декабря 1982 года.