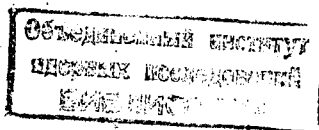


16 - 4507

7931/1 нр.
Б.В.Астрахан, В.Ф.Борейко, Б.Б.Бугарчев,
М.Ш.Вайнберг, Ю.М.Валуев, А.И.Калинин,
Б.С.Краснобородов, О.В.Савченко,
В.П.Стекольников, Б.Н.Шарапов

СОЗДАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ЛАБОРАТОРИИ
ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОИЯИ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ И ДРУГИМ
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИМ ПРОБЛЕМАМ.
ДОЗИМЕТРИЯ ПРОТОННОГО ПУЧКА

Направлено в журнал "Медицинская радиология"



В 1967 г. в Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) ОИЯИ был сформирован и выведен в изолированное, специально оборудованное помещение интенсивный протонный пучок с варьируемой энергией от 90 до 185 Мэв^{/1/}. Параметры этого пучка обеспечили необходимые условия для проведения медико-биологических экспериментов по изучению возможности применения протонов в корпускулярной терапии онкологических больных.

В настоящей работе описано дозиметрическое, юстировочное и вспомогательное оборудование, предназначенное для контроля за ходом облучения онкологических больных и биологических объектов на медицинском протонном пучке ЛЯП ОИЯИ. Общий план размещения этого оборудования показан на рис. 1 и 2.

Оборудование состоит из следующих основных элементов: коллиматорной системы, позволяющей получать заданный профиль протонного пучка соответственно форме облучаемого объекта; цилиндра Фарадея для точного измерения абсолютного значения интенсивности заторможенного протонного пучка; набора из нескольких плоскопараллельных ионизационных камер, устанавливаемых последовательно по направлению протонного пучка для контроля интенсивности протонных пучков и отпуска заданной величины дозы; полупроводниковых кремниевых детек-

торов цилиндрической формы с диаметром 3 мм и толщиной чувствительного слоя 1 мм с дистанционным перемещением в двух взаимно-перпендикулярных направлениях для снятия распределения поглощенной дозы в фантоме; подвижного фантома из плексигласа с плавно регулируемой толщиной для снятия кривых Брэгга и измерения поглощенной дозы на различной толщине тканезквивалентной среды; ротационного кресла; рентгеновского и оптического центраторов для юстировки и фиксации облучаемых объектов на оси протонного пучка; комплекса электро-механического вспомогательного оборудования, блоков питания и электронных схем для дистанционного управления дозиметрической и юстировочной аппаратурой и непрерывной записи величины поглощенной дозы графически на бумажной ленте или в виде числового кода.

Коллиматорная система. Для придания протонному пучку заданного профиля поперечного сечения использовалась массивная стальная коллиматорная система, схематически показанная на рис. 3.

Центральная часть коллиматорной системы набиралась из труб круглого сечения (рис. 3а), позволяющих получать пучки протонов диаметром от 10 до 80 мм через интервалы в 10 мм. Если возникала необходимость получить прямоугольную или более сложную форму поперечного сечения протонного пучка, то центральная часть с набором круглых коллиматоров вынималась, и боковые горизонтальные стальные пластины толщиной 10 мм. каждая выдвигались так, чтобы ломаная линия их внутренней границы наилучшим образом совпала с заданным контуром, соответствующим форме поперечного сечения облучаемого биологического объекта (рис. 3б).

Цилиндр Фарадея. Для абсолютного измерения величины потока протонного пучка использовался цилиндр Фарадея, рассчитанный на энергию протонов до 250 Мэв. Протоны пучка проникают в вакуумную камеру через фольгу из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, проходят

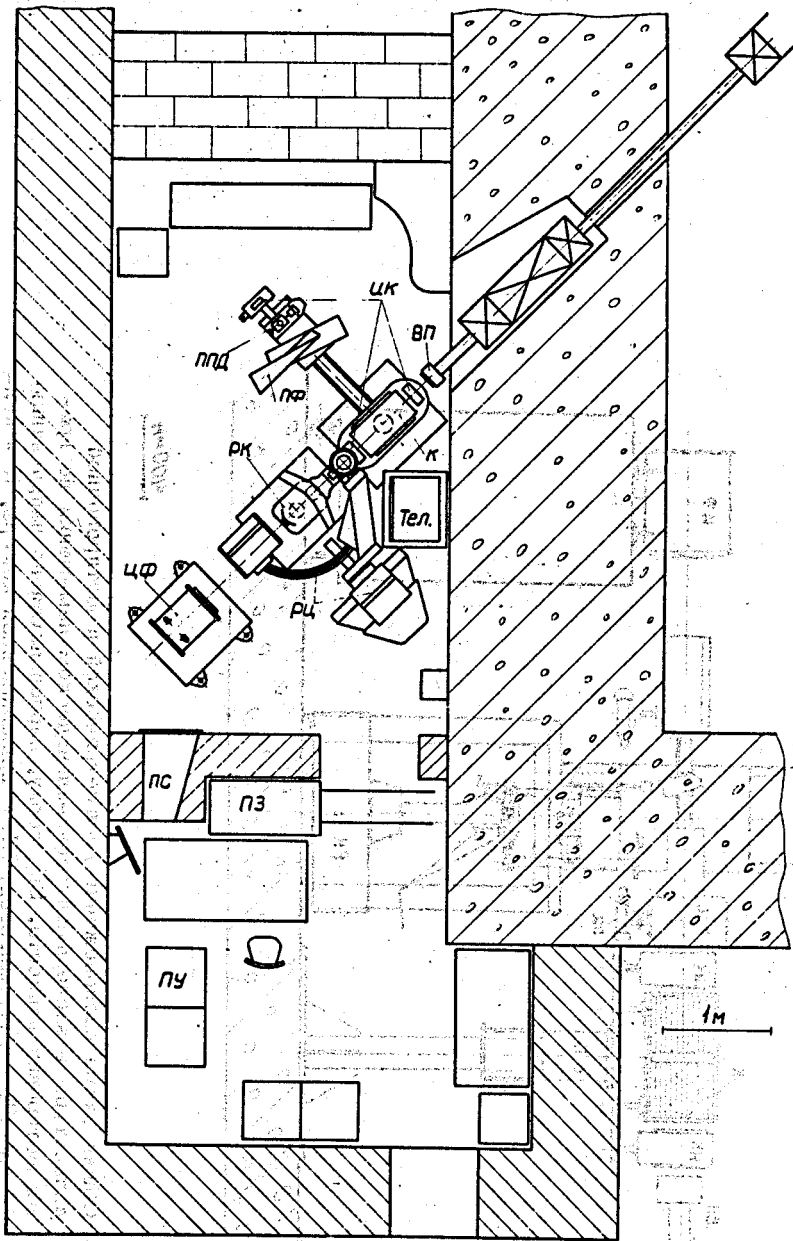


Рис. 1. Общая схема расположения дозиметрической, юстировочной и вспомогательной аппаратуры в экспериментальном клиническом помещении корпуса синхротрона ЛЯП ОИЯИ. ВП - вакуумпровод, К - коллиматор, ИК - ионизационная камера, ПФ - подвижный фантом из плексигласа, ППД - профилирующие полупроводниковые детекторы излучения, РК - ротационное кресло; ЦФ - цилиндр Фарадея, ПС - перископическая система наблюдения за облучаемым объектом, ПЗ - подвижная бетонная защита; РЦ - рентгеновский центратор; ПУ - пульт управления и блоки питания.

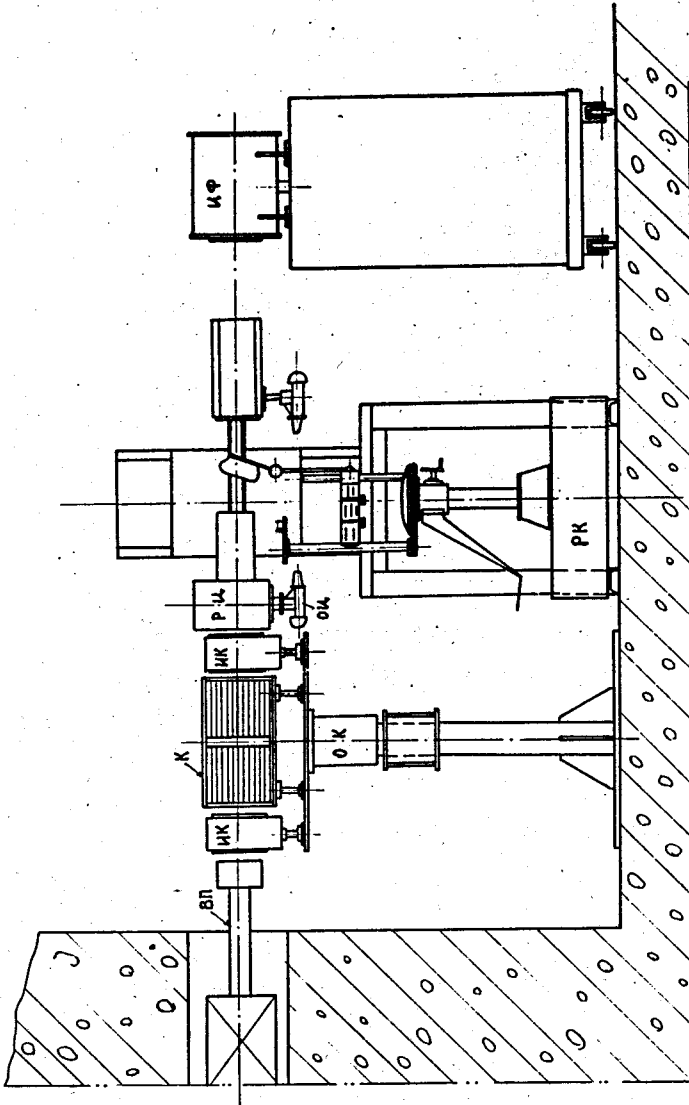
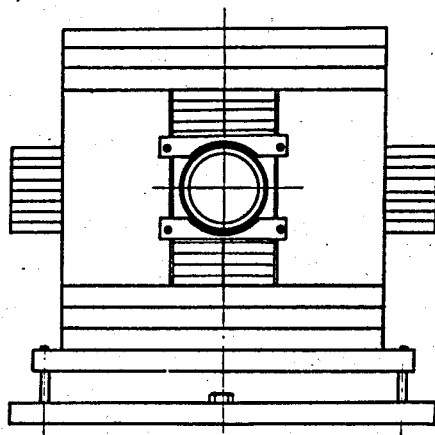


Рис. 2. Общая схема расположения дозиметрической и юстировочной аппаратуры в экспериментально-клиническом помещении во время юстировки пациента. Вид сбоку, перпендикулярно направлению луча. ВП - вакуумпровод, ИК - ионизационная камера, К - коллиматор, РЦ - рентгеновский центратор, ОЦ - оптический центратор, РК - ротационное кресло, ЦФ - цилиндр Фарадея, ОК - опорная колонка.

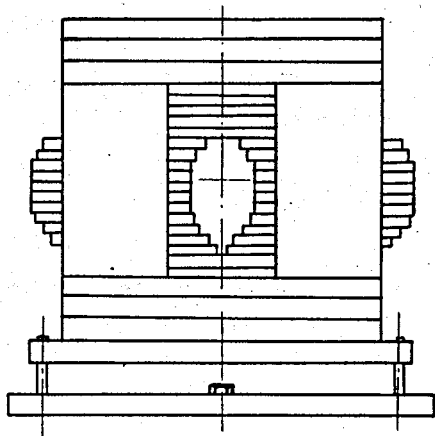
внутри охранного кольцевого электрода и останавливаются в толстом латунном стакане, укрепленном на плексигласовом изоляторе. Собранный цилиндром Фарадея положительный заряд измерялся усилителем тока чувствительностью до 10^{-13} а. Наружный корпус цилиндра Фарадея был изготовлен из стали и вместе с полюсными наконечниками образовывал ярмо электромагнита, возбуждаемого током 2а для создания внутри цилиндра постоянного магнитного поля напряженностью ≈ 100 эрстед, способного заворачивать обратно выбиваемые δ -электроны. Возможные источники ошибок при измерении потока частиц цилиндром Фарадея обсуждались в ряде работ ^{/2,3/} и наиболее существенные из них, согласно проведенным контрольным измерениям, не превосходят 3%.

Ионизационные камеры. Для мониторинга и дозиметрии протонных пучков использовались камеры с тонкими металлическими электродами, расположенными перпендикулярно к оси пучка. В первом типе ионизационных камер, имевших диаметр рабочего объема 120 мм и расстояние между электродами 50 мм, толщина входных фольг и внутренних электродов составляла соответственно $0,11 \text{ г/см}^2 \text{ Fe}$ и $0,073 \text{ г/см}^2 \text{ Cu}$. Эти камеры устанавливались до и после коллиматорной системы и применялись для мониторинга заторможенного протонного пучка и отпуска заданной дозы. В ионизационной камере второго типа диаметр равнялся 200 мм, а расстояние между электродами оставалось 50 мм. Толщина входных фольг и внутренних электродов для придания камере большей прочности была увеличена соответственно до $0,24 \text{ г/см}^2 \text{ Fe}$ и $0,17 \text{ г/см}^2 \text{ Cu}$. Камера устанавливалась после плексигласового фантома и использовалась при измерениях кривой Брэгга и калибровке полупроводниковых детекторов.

Ионизационные камеры обоих типов наполнялись чистым аргоном до давления $\approx 1,1$ ат. Выбор аргона в качестве наполняющего газа обусловлен малым влиянием примесей на изменение величины энергии, за-



а



б

40мм

Рис. 3. Схематический чертеж коллиматорной системы (вид спереди);
 а) для облучения объектов круглого сечения;
 б) для облучения объектов сложного профиля поперечного сечения.

трачиваемой приходящей частицей на образование одной пары ионов^{/4/}, что обеспечивало длительное постоянство характеристик камеры. Для измерения величины поглощенной дозы или потока частиц, проходящих через камеру в заданный интервал времени, к собирающему электроду каждой камеры подсоединялся интегратор тока, выдававший информацию в виде последовательного числа импульсов, пропорционального суммарному числу пар ионов, образованных в рабочем объеме камеры. Интегратор тока почти целиком собран на полупроводниковых элементах, за исключением электрометрической лампы в выносном блоке, присоединявшемся вплотную к собирающему электроду камеры. Схема интегратора тока была испытана для значений входного тока от 10^{-9} до 10^{-6} а и его характеристика найдена линейной с точностью $\approx 1\%$ в диапазоне $0,1 + 100$ герц.

§4. Полупроводниковые кремниевые дозиметры

В настоящее время кремниевые и германиевые диоды широко используются как детекторы одиночных заряженных частиц^{/5/}. В режиме работы "солнечного элемента" кремниевые детекторы в последнее время находят применение и как дозиметры различных видов излучения. Для дозиметрии протонного пучка нами использовались кремниевые детекторы типа Si(Li) в виде цилиндров толщиной 3 мм и диаметром 3 мм, закрепленных в стандартных радиочастотных разъемах. Толщина чувствительного слоя составляла в использованных детекторах ≈ 1 мм.

При внесении в поле излучения кремниевый диод работает как генератор тока с КПД в несколько процентов, имеющий внутреннее сопротивление, равное его прямому сопротивлению при напряжении в несколько милливольт. Если кремниевый детектор работает в режиме короткого замыкания, т.е. входное сопротивление электрометра, измеряющего ток,

много меньше прямого сопротивления используемого диода при напряжении в несколько милливольт, то, как это неоднократно проверялось нами экспериментально, обеспечивается линейность между поглощенной дозой и измеряемым током в широком диапазоне интенсивности излучения.

Следует, однако, отметить, что вследствие радиационных повреждений кристаллического кремния при облучении в протонном пучке чувствительность кремниевых дозиметров заметно уменьшается после суммарной поглощенной дозы в несколько десятков крэд. Поэтому кремниевые дозиметры, используемые в абсолютных измерениях, должны регулярно калиброваться по другим приборам.

Малые размеры кремниевых дозиметров позволили использовать их для снятия характеристик распределения поглощенной дозы на разных глубинах тканезквивалентного фантома. Электромеханическое устройство, управляемое дистанционно, обеспечивало плавное перемещение полупроводниковых дозиметров в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Релейная система управления движением детекторов вынесена в пультовую и исключает одновременное движение обоих детекторов. Для записи величины поглощенной дозы использовались электронные самопишущие приборы ЭППВ или ЭПП, регистрирующие на ленте сигнал с полупроводниковых детекторов.

Фантом. Снятие кривых Брэгга и получение изодозных карт в тканезквивалентных средах с помощью ионизационных камер и полупроводниковых дозиметров производилось на фантоме из плексигласа, массовая тормозная способность которого для высокоэнергетичных протонов всего на 3%^{1/6} отличается от таковой для мягкой ткани. Фантом выполнен в виде двух клиньев: подвижного большого и неподвижного малого клина, установленных так, чтобы толщина плоскопараллельного слоя вещества на пути протонного пучка плавно изменялась при движении большого клина. Равномерное передвижение большого клина и возможность фикси-

рования его в любом положении позволяет плавно или ступенчато увеличивать или уменьшать суммарную толщину вещества на пути пучка в пределах от 7,6 до 24,3 г/см² и обеспечивает запись на движущейся ленте самопишущих приборов как кривых Брэгга, так и распределения дозы в поперечном сечении протонного пучка.

Определение энергии протонного пучка. Во время дозиметрических измерений две малые ионизационные камеры устанавливались на оси протонного пучка до и после коллиматорной системы на общей плите опорной колонны. Основная часть дозиметрической аппаратуры — подвижный фантом из плексигласа, полупроводниковые дозиметры и третья ионизационная камера большого диаметра — устанавливалась на длинной консоли с вертикальной осью вращения, проходящей через центр опорной колонны (рис. 1,2). Перед сеансом облучения консоль поворачивалась таким образом, чтобы дозиметрическая аппаратура устанавливалась на оси протонного пучка, причем неподвижная задняя поверхность фантома проходила через ось вращения кресла и предполагаемое расположение облучаемого объекта. После дозиметрических измерений консоль отодвигалась, освобождая место для установки верхней части ротационного кресла.

Для определения энергии протонного пучка, выведенного в процедурное помещение, с помощью ионизационных камер или полупроводникового дозиметра, зафиксированного на оси пучка путем равномерного изменения толщины фантома, снимались кривые Брэгга, представляющие собой в первом приближении изменение потерь энергии протонов в аргоне или кремнии в зависимости от толщины замедлителя. Значение среднего пробега, α , следовательно, и средней энергии протонного пучка можно вычислить из экспериментальной кривой Брэгга (см. ^{17/}) и используя последние данные об ионизационных потерях и пробегах протонов в различных веществах ^{16/}.

В полученное значение среднего пробега протонов R_0 в общем случае надо внести поправку на эффекты многократного кулоновского рассеяния и ядерного взаимодействия протонов в процессе торможения. Относительное укорачивание пробега определяется в первом приближении формулой^{17/} $\Delta R / R = Z / 6400$, где Z - средний атомный номер вещества замедлителя. В случае тканеэквивалентного фантома ($Z \approx 6$)

$\frac{\Delta R}{R} = 10^{-3}$. Поправка на ядерное взаимодействие оценивалась в работах^{18,9/} и составляет для меди $\Delta R / R = 0,07\%$. Обе эти поправки малы и их можно не учитывать в дозиметрических измерениях, где точность определения дозы не превосходит 1%.

Отношение ординат расчётных кривых Брэгга позволяет вычислить поправку на нетканеэквивалентность реальных детекторов в зависимости от толщины замедлителя из мягкой ткани. В максимуме кривой Брэгга эти поправки достигают 5% и должны учитываться при измерениях скорости накопления дозы в различных участках брэгговской кривой и построении изодозных карт.

Калибровка ионизационных камер. Во время проведения калибровочных измерений с ионизационными камерами плексигласовый фантом убирался из пучка и все три ионизационные камеры устанавливались так, чтобы протонный пучок проходил последовательно через все ионизационные камеры и поглощался в цилиндре Фарадея. За определенный интервал времени измерялся средний ток цилиндра Фарадея и число отсчётов каждой камеры.

Калибровочный коэффициент каждой ионизационной камеры определялся по формуле

$$K_I = 10^{11} \frac{i}{n_I} \left(\frac{dE}{dx} \right)_T (1 + \kappa) \frac{\text{рад. см}^2}{1 \text{ отсчёт камеры}}, \quad (1)$$

где: 10^{11} - переводной множитель; i - ток цилиндра Фарадея в амперах; n_1 - число отсчетов ионизационной камеры в 1 сек; $(dE/dx)_T$ - ионизационные потери протонов в Мэв/г/см² в мягкой ткани при энергии протонов T ; κ - поправочный коэффициент, в общем случае представляющий собой сумму поправок $\kappa = \sum_1 \kappa_1$; κ_1 - поправка на ядерное поглощение и многократное кулоновское рассеяние протонного пучка во входных фольгах и внутренних электродах ионизационных камер; κ_2 - поправка на рассеяние и торможение протонов в стенках ограничивающего коллиматора; κ_3 - поправка на вклад в поглощенную дозу вторичных частиц, возникающих при ядерных взаимодействиях протонов пучка в тормозной среде /10/.

На основании проведенных экспериментальных измерений и теоретических оценок /10/ получено

$\kappa = \sum_1 \kappa_1 = (10 \pm 3)\% + (0 \pm 2)\% + (10 \pm 5)\% = (20 \pm 6)\%$ для случая, когда в пучке стоят все три ионизационные камеры, и

$\kappa = \sum \kappa_1 = (7 \pm 3)\% + (0 \pm 2)\% + (10 \pm 5)\% = (17 \pm 6)\%$ для случая, когда в пучке стоят камеры 1 и 3.

В обоих случаях ошибка суммарной поправки определялась как корень квадратный из суммы квадратов ошибок отдельных слагаемых. При определении полной погрешности величины K_1 необходимо также учитывать ошибку в измерениях величины тока цилиндра Фарадея и случайный разброс отдельных измерений, обусловленный нестабильностью параметров всей регистрирующей аппаратуры. Этот разброс, усредненный по двадцати двум сериям отдельных измерений, составляет $\pm 5\%$. Результирующая ошибка калибровочного коэффициента ионизационной камеры составляет при таком способе измерений, примерно, 10%.

Менее точно калибровочный коэффициент камеры можно определить и другим методом - путем абсолютных измерений ионизационного тока самой камеры. В этом случае

$$K_I = 10^5 \frac{i_k}{n_I} \frac{\omega}{q(dE/dx)_{Ar}} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{Тк} \frac{\text{рад, см}^2}{1 \text{ отсчёт камеры}}, \quad (2)$$

где:

10^5 - переводной множитель,

i_k - ток ионизационной камеры в амперах,

n_I - число отсчётов камеры в 1 сек,

ω - энергия, затрачиваемая на образование одной пары ионов в аргоне в к ,

q - толщина чувствительного слоя газа в камере в г/см².

Для используемых камер $q = 1,8 \cdot 10^{-2}$ г/см² $(dE/dx)_{Тк}$ и

$(dE/dx)_{Ar}$ - ионизационные потери протонов в мягкой ткани и аргоне, соответственно.

Значения K_I , полученные по формуле (2) в том же самом сеансе облучения, когда определялись значения K_I по формуле (1), хорошо согласуются между собой, однако второй метод представляется менее точным из-за случайных загрязнений газа, влияющих на значение величины ω в формуле (2), которое нельзя учесть.

Калибровка полупроводниковых детекторов. Калибровка кремниевых полупроводниковых детекторов производилась следующим образом. Линза №7 фокусирующего канала отключалась. В результате дефокусировки протонный пучок в месте расположения ограничивающего коллиматора расширялся по диаметру примерно в два раза так, что в пределах радиуса 2,5 см неоднородность пучка не превышала 5%. Далее плексиглазовый фантом и вторая ионизационная камера убирались с протонного пучка, а ограничивающая секция круглого коллиматора выдвигалась вплотную к плоскости перемещения полупроводниковых детекторов.

В этом случае поперечное распределение дозы, измеренное полупроводниковым детектором, имело на ленте самописца почти прямоугольный вид. При этих измерениях также фиксировались показания ионизационных камер.

В этих условиях средняя доза, поглощенная в течение определенного промежутка времени вблизи выходного отверстия ограничивающего коллиматора, определялась с помощью следующей формулы $D = K_{I_3} \frac{N_3}{S}$ рад, где K_{I_3} — калибровочная постоянная третьей ионизационной камеры, N_3 — число отсчетов третьей камеры за определенный промежуток времени, S — площадь поперечного сечения коллиматора в см². Значение D сопоставлялось далее с распределением дозы, измеренным полупроводниковым дозиметром, и находился калибровочный коэффициент K_D .

За время одного сеанса облучения чувствительность полупроводниковых детекторов вследствие радиационных повреждений изменялась всего на 2-3%, поэтому калибровочный коэффициент полупроводникового дозиметра можно было считать постоянным в течение одного сеанса и использовать этот дозиметр для определения абсолютной величины поглощенной дозы при разных условиях облучения.

Точность калибровочного коэффициента полупроводникового детектора K_D несколько ухудшается по сравнению с точностью коэффициента K_I вследствие некоторой неравномерности ($\approx 5\%$) распределения поглощенной дозы в разных участках сечения протонного пучка и составляет в разовых измерениях: $\Delta K_D = \pm 1\%$.

Построение изодозных карт. Благодаря малым размерам полупроводниковые дозиметры широко применялись нами в дозиметрических измерениях по изучению распределения поглощенной дозы в различных условиях облучения, необходимых для построения изодозных карт. Если полупроводниковый детектор установлен на оси пучка, то плавно изменяя

толщину клина, можно получить на ленте самописца кривую Брэгга и по ней определить среднюю энергию протонного пучка и его разброс.

Остановив клин в ряде последовательных положений и перемещая полупроводниковые детекторы в плоскости, перпендикулярной оси протонного пучка, можно получить распределение поглощенной дозы на различных глубинах плексигласового фантома. Вид некоторых типичных кривых распределения поглощенной дозы вдоль оси протонного пучка и в нескольких поперечных сечениях фантома изображен на рис. 4.

В полученные результаты, согласно расчётам, вносилась небольшая поправка на нетканеэквивалентность кремния, а также учитывалось различие удельного веса и массовой тормозной способности мягкой ткани и плексигласа. По этим данным для различных условий облучения строились изодозные карты, одна из которых показана на рис. 5.

Вследствие временных флюктуаций интенсивности протонного пучка (обычно в пределах 5-10%), дрейфа нуля усилителя тока и нестабильности тока отклоняющего магнита результаты воспроизводились с точностью 10-15%. Это и определяет относительную точность построенных изодозных кривых.

Подготовка к облучению и отпуск заданной дозы. В случае облучения больных с различными злокачественными новообразованиями заранее по результатам рентгенологических обследований определялись форма и глубина очага поражения, и по этим данным задавались условия облучения. Подбирался оптимальный профиль сечения ограничивающего коллиматора, проводились необходимые дозиметрические измерения и строилась изодозная карта. Перед сеансом облучения производилась абсолютная калибровка дозиметрической аппаратуры, определялась скорость накопления дозы в том месте фантома, которое соответствует расположению очага поражения, и показания полупроводниковых дозиметров связывались со скоростью счёта первых двух ионизационных камер. За-

С 3495 + С 349а

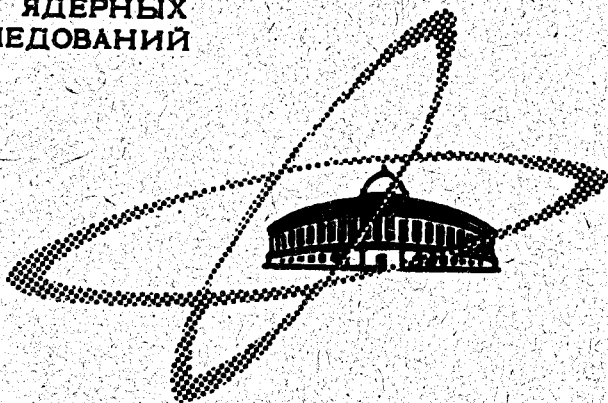
11/1X-6

A-912

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

16 - 4507



Б.В.Астрахан, В.Ф.Борейко, Б.Б.Бугарчев,
М.Ш.Вайнберг, Ю.М.Валуев, А.И.Калинин,
Б.С.Краснобородов, О.В.Савченко,
В.П.Стекольников, Б.Н.Шарапов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

СОЗДАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ЛАБОРАТОРИИ
ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОИЯИ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ И ДРУГИМ
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИМ ПРОБЛЕМАМ.
ДОЗИМЕТРИЯ ПРОТОННОГО ПУЧКА

1969

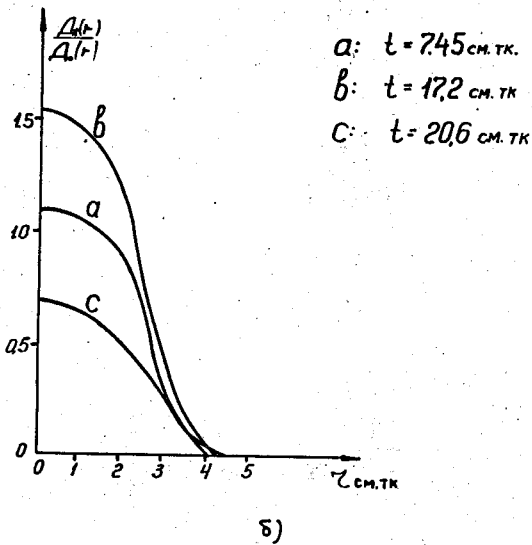
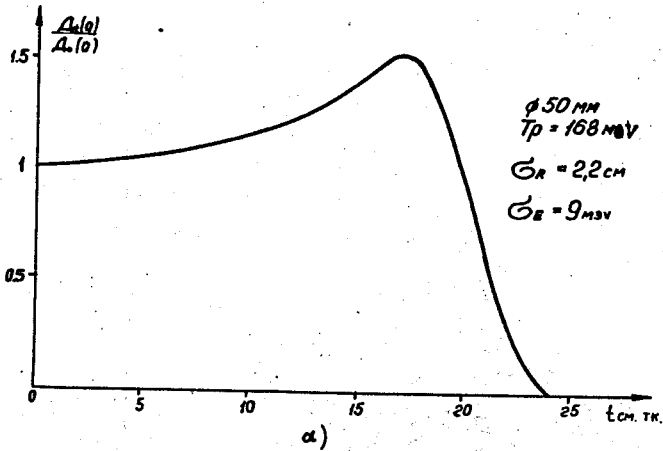


Рис. 4. Типичные отношения распределения поглощенной дозы в тканеэквивалентном фантоме, полученные с помощью полупроводниковых дозиметров.
 а) распределение поглощенной дозы вдоль оси протонного пучка (кривая Брэгга);
 б) распределение поглощенной дозы в нескольких поперечных сечениях пучка на различных глубинах тканеэквивалентного фантома.

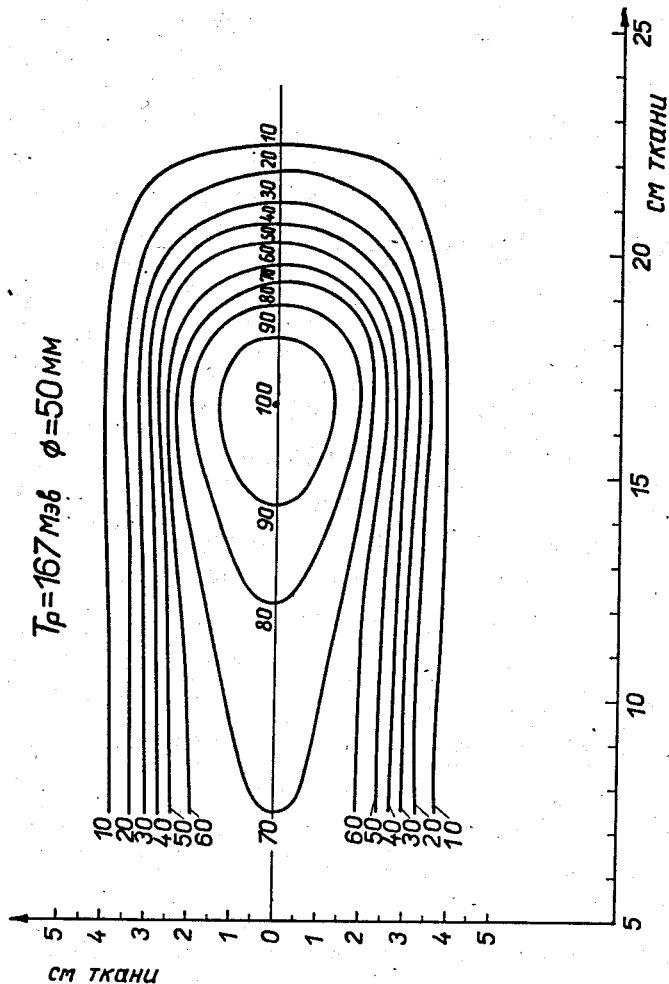


Рис. 5. Изодозная карта для протонов с энергией 167 Мэв и круглого коллиматора диаметром 50 мм, полученная с помощью полупроводниковых дозиметров в плекситгласовом фантоме и преобразованная к мягкой ткани с удельным весом 1 г/см³.

тем вся дозиметрическая аппаратура, установленная на подвижной консоли, убиралась из пучка, на ротационное кресло помещался пациент, и с помощью рентгеновского и оптических центраторов производилась юстировка очага поражения на пересечении оси протонного пучка и ротационного кресла.

Для наведения заданного участка брэгговской кривой на очаг поражения на пути протонного пучка вплотную к поверхности тела пациента устанавливался дополнительный поглотитель из плексигласа, толщина которого определялась из дозиметрических измерений и корректировалась в каждом сеансе облучения с учётом изменения энергии протонного пучка.

Далее пациент жестко фиксировался в кресле, процедурное помещение закрывалось защитной бетонной дверью, и в дальнейшем врач наблюдал на пациентом через перископическую систему зеркал из пульт-овой комнаты. Доза облучения очага поражения задается врачом дежурному оператору — дозиметристу, который пересчитывает ее в показание первых двух ионизационных камер и включает ускоритель. При существующих скоростях накопления дозы (порядка сотни рад в минуту) сеанс облучения длится обычно несколько минут и оператор производит от-пуск заданной дозы с относительной точностью не хуже 1-2%.

Параметры протонного пучка и установленная дозиметрическая аппаратура позволили в конце 1967 г. приступить к проведению регулярных медико-биологических экспериментов по облучению онкологических больных и биологических объектов с целью изучения возможности применения протонов высоких энергий в медицине.

К началу мая 1969 г. на медицинском пучке Лаборатории ядерных проблем было проведено в общей сложности свыше 70 сеансов облучения. За это время полный курс корпускулярной терапии прошли 19 онкологических больных с различными типами злокачественных новообразований.

В заключение авторы выражают благодарность В.П.Джелелову, за помощь Л.И.Лapidусу, А.И.Рудерману за активную постоянную помощь в работе, за коллективам сотрудников ЛЯП и ЦЭМ ОИЯИ, возглавляемых К.А.Бай-муром, А.И.Смирновым, Н.Т.Греховым и М.А.Либерманом, конструкторам КБ ЛЯП И.Х.Ноздрину и В.И.Сидоровой на проектирование, изготовление и монтаж в сжатые сроки всего комплекса дозиметрического оборудования, необходимого для использования протонов высоких энергий в медицине. Прочли мы труды авторов, посвященные разработке методов измерения дозы ионизирующей радиации в различных средах, а также методов измерения дозы ионизирующей радиации в различных средах.

1. В.П.Джелелов, В.И.Комаров, О.В.Савченко. Препринт ОИЯИ 16-3491, Дубна 1967. Мед. радиология, 1969, №4.
2. Радиационная дозиметрия. Под редак. Дж.Хайна и Г.Браунелла, стр. 538, 1958 г. Изд-во И.Л., Москва 1958 г.
3. Измерение характеристик ядерных реакций и пучков частиц. Под редак. Арцимовича Л.А., стр. 166, 1965 г. Изд-во, Мир, Москва, 1965 г.
4. Принципы и методы регистрации элементарных частиц. Перевод с английского. Под редак. Арцимовича Л.А., стр. 128, 1963, Изд-во И.Л., Москва, 1963 г.
5. Ю.К.Акимов, А.И.Калинин, В.Ф.Кушнирук, Х.Юнгклауссен. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. Атомиздат, 1967 г.
6. Studies in Penetration of Charged Particles in Matter. Nucl. Sci. Ser. report. No.39, p.148,171. National academy of Sci. Washington. D.C. 1964.
7. R.Mather and E.Segre. Phys. Rev., 84, 191 (1964).
8. И.М.Василевский, И.И.Карлов, Ю.Д.Прокошкин, Препринт ОИЯИ, P1-4000, Дубна 1968 г.

9. И.М.Василевский, И.И.Карпов, В.И.Петрухин, Ю.Д.Прокошкин. Препринт ОИЯИ Р1-4081, Дубна 1968 г.

10. C.D.Zerby and W.E.Kinney. Nucl. Instr. and Meth., 36, 125(1965)

Рукопись поступила в издательский отдел

3 июля 1969 года.