

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

16-84-258

ПОРТМАН

Анатолий Иосифович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗОВЫХ
И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЙ
РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ПУЧКАХ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ**

01.04.01 - экспериментальная физика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в Институте медико-биологических проблем МЗ СССР.

Научный руководитель
кандидат технических наук
старший научный сотрудник

Владимир Иванович
Испов

Официальные оппоненты:
доктор технических наук
профессор

Леб Николаевич
Зайцев

кандидат технических наук
старший научный сотрудник

Игорь Васильевич
Филюшкин

ведущее предприятие:

Институт ядерных исследований АН УССР г.Киев.

Защита диссертации состоится "14" 03 1984г.

в _____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, г.Дубна, Московской обл., ЛВЗ ОИЯИ, конференцзал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЗ ОИЯИ.

Автореферат разослан "12" 02 1984г.

Ученый секретарь
Специализированного совета

М.Ф.Лихачев

Общая характеристика работы

В настоящее время широким фронтом ведутся различные прикладные исследования на пучках ускоренных заряженных частиц. Это медико-биологические исследования, работы по физике защиты и радиационной стойкости материалов, конструкций и аппаратуры. Для проведения таких исследований на ускорителях необходимо сформировать поля облучения требуемых размеров и равномерности, обеспечить дозиметрическое сопровождение, контроль чистоты пучка и мониторингирование процесса облучения. Кроме того, при постановке этих экспериментов нужно исследовать формирование поглощенных доз в облучаемых объектах, а также спектральные характеристики полей радиационного воздействия.

Целью настоящей работы явилось создание условий радиационного воздействия для проведения радиобиологических экспериментов на пучках синхрофазотрона ОИЯИ.

Актуальность задач, решаемых в диссертации, вытекает из проблемы обеспечения радиационной безопасности и определяется необходимостью проведения экспериментальных исследований с целью изучения биологического действия высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней разработан ряд методов спектрометрии и устройства на основе этих методов, которые, не обладая высоким разрешением, позволили провести необходимые экспериментальные исследования при минимальной затрате ускорительного времени; предложена простая методика и создана программа расчета глубинных дозовых распределений в тонких слоях ткани; впервые на синхрофазотроне ОИЯИ сформированы поля облучения для проведения радиобиологических экспериментов и исследованы характеристики этих полей; налажено физико-техническое обеспечение радиобиологических экспериментов на пучках синхрофазотрона.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы позволили провести серию радиобиологических экспериментов по плановой тематике Института медико-биологических проблем, по тематике смежных организаций, а также по международной программе "Интеркосмос".

Результаты методических разработок могут быть использованы при постановке радиобиологических экспериментов на других ускорителях тяжелых заряженных частиц, а также при проведении других прикладных исследований.

Некоторые элементы комплекса аппаратуры и устройств, а также экспериментальные результаты, полученные в работе, внедрены в практику работы других организаций.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Автор защищает:

1. Методики спектрометрии для исследования полей радиационного воздействия на пучках синхротрона и разработанные спектрометры.
2. Результаты спектрометрических исследований на пучках ионов синхротрона ОИЯИ.
3. Методику расчета и формирования дозы высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц в тонких слоях ткани.
4. Результаты исследований дозовых характеристик полей облучения и дозовые распределения в фантомах облучаемых биообъектов.
5. Комплекс устройств и аппаратуры для физико-технического обеспечения радиобиологических экспериментов на канале пучков ионов синхротрона ОИЯИ.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на совещаниях и симпозиумах по космической биологии и медицине по программе "Интеркосмос" (г. Варна, 1975 г.; г. Будапешт, 1976 г.; г. Сухуми, 1977 г.; г. Варшава, 1979 г.), совещании по радиационной защите (г. Новосибирск, 1976 г.), Всесоюзном семинаре по биологическому действию ускоренных многозарядных ионов и протонов (г. Пущино, 1979 г.), совещании по перспективам использования базовых установок ОИЯИ для биологических исследований (г. Дубна, 1981), Всесоюзном рабочем совещании по закономерностям биологического действия и дозиметрии тяжелых ядерных частиц (г. Пущино, 1982 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура диссертации. Диссертация содержит 70 страниц основного текста, 40 рисунков, 5 таблиц; состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы включает 112 наименований.

Краткое содержание диссертации

Работа открывается введением, в котором отмечается актуальность проблемы, сформулированы цель диссертации и положения, защищаемые автором.

Первая глава посвящена анализу методов исследования характеристик полей радиационного воздействия на ускорителях тяжелых заряженных частиц. Начинается глава с краткой характеристики источников ускоренных заряженных частиц, используемых в радиобиологических экспериментах, а затем дается обзор применяемых методов исследования формирования поглощенной дозы и спектральных характеристик полей облучения. Особое внимание уделено состоянию проблемы восстановления истинных энергетических распределений по измеренным аппаратурным спектрам.

Заключает главу обоснование задачи исследования, сделанное на основании обрисованного в этой главе современного состояния проблемы.

Во второй главе описаны разработанные методы спектрометрии для исследования характеристик полей радиационного воздействия.

Глава начинается с метода, в котором используются изотропные детекторы, один из которых имеет полностью чувствительный шаровой объем, а другой – сферический чувствительный слой. Оба детектора выполнены из пластического сцинтиллятора. Для аппаратурных спектров $f_1(x)$ и $f_2(x)$, соответственно, (X – энергвыделение в детекторе от частицы с энергией Z , проходящей на расстоянии q от его центра) составляются уравнения Фредгольма I рода:

$$f_1(x) = P_{11}(x)n(x) + \int_{A_1(x)}^{A_2(x)} P_1(x,z)n(z)dz, \quad A_1(x)$$
$$f_2(x) = P_{22}(x)n(x) + \int_{A_1(x)}^{A_2(x)} P_2(x,z)n(z)dz, \quad A_2(x)$$

где $P_{11}(x)$ и $P_{22}(x)$ – вероятности полного поглощения частицы с энергией X в детекторах; $P_1(x,z)$, $P_2(x,z)$ – вероятность выделения частицей с энергией Z энергии X в задаваемом предельми интегрирования энергетическом диапазоне; $n(z)$ – искомый энергетический спектр попадающих в детектор заряженных частиц. Решение $n(z)$ отыскивается минимизацией сглаживающего функционала в представлении искомого спектра в виде непрерывной суперпозиции положительных отрезков с неизвестными угловыми коэффициентами.

Блок детекторов спектрометра для измерения энергетических спектров вторичных протонов состоит из цилиндрического сцинтилляционного детектора, в который вложен шаровой сцинтилляционный детектор. Первичные частицы здесь дискриминируются по сумме энергвыделений в шаровом и цилиндрическом детекторах, что дает возможность проводить спектрометрию низкоэнергетичных вторичных протонов восстановлением их энергетических распределений из аппаратурных спектров в шаровом детекторе на фоне больших плотностей потока первичных частиц.

Погрешность восстановленных энергетических распределений из аппаратурных спектров, полученных с использованием изотропных детекторов, определяется погрешностью, с которой получены эти аппаратурные спектры, закладываемой в программу восстановления истинных энергетических распределений. Погрешность восстановленных спектров может быть как меньше, так и больше погрешности эксперимента, поскольку, с одной стороны, при обработке используется дополнительная информация о гладкости искомого спектра, а, с другой, на погрешность влияет форма линии, существенно отличающаяся от δ -функции.

Принцип работы спектрометра линейной передачи энергии заключается в измерении спектров по энерговыделениям в проходном детекторе телескопа из двух полупроводниковых детекторов при различных расстояниях между детекторами. В соответствии с расстоянием между детекторами изменяется диапазон углов, под которыми регистрируются частицы. Из измеренных аппаратурных спектров составлялись разности спектров по энерговыделениям в проходном детекторе для двух соседних положений перемещающегося детектора. Этот спектр составляет левую часть интегрального уравнения.

$$\frac{dN_i}{dE} - \frac{dN_{i+1}}{dE} = \iint_{S, \Delta\Omega_i} \frac{dn_i}{d\Omega_i dL ds_{\perp}} \cdot \frac{\cos^2 \theta}{d_1} d\Omega ds_{\perp},$$

где $\Delta\Omega_i$ - телесный угол между направлениями θ_i и θ_{i+1} (максимальные углы регистрации для положений второго детектора i и $i+1$) при φ (угол в плоскости детектора), изменяющемся от 0 до 2π ; S - площадь первого (проходного) детектора; L - линейная передача энергии; ds_{\perp} - элемент площади первого детектора, нормальный к направлению падающей частицы.

Составляющие $dn_i/d\Omega_i dL ds_{\perp}$ искомого спектра отыскиваются минимизацией суммы квадратов разностей левой и правой частей интегрального уравнения по параметрам принятого для искомого спектра представления в виде положительной кусочно-постоянной функции. Истинный спектр получаем, суммируя эти составляющие с весами, равными телесным углам $\Delta\Omega_i$, по которым они усреднялись. Относительная погрешность полученных этим методом спектров линейной передачи энергии при выборе четырех точек по расстояниям между детекторами, обеспечивающих $\theta_i = 80^\circ, 60^\circ, 40^\circ, 20^\circ$, не превышает 20% для спадающих спектров линейной передачи энергии вторичного излучения.

В последнем разделе этой главы описан метод спектрометрии и идентификации вторичных заряженных частиц в энергетическом диапазоне до 100 МэВ/нуклон с помощью телескопа из двух полупроводниковых детекторов, между которыми располагается поглотитель переменной толщины, определяющей энергетические диапазоны регистрируемых частиц. Первый детектор - проходной. Введение соответствующих уровней дискриминации в первом $\mathcal{E}_{1,t,z}$ и во втором $\mathcal{E}_{2,t,z}$ каналах спектрометра при данной толщине поглотителя между детекторами t позволяет идентифицировать частицы, регистрируемые обоими детекторами, по заряду Z в энергетических диапазонах $\Delta E_{t,z}$. Таким образом, задание уровней дискриминации по энерговыделениям в детекторах спектрометра сводит ядро уравнения Фредгольма, описывающее аппаратурные спектры, к функции

$$\sigma(E) = \begin{cases} 1, & \text{если } E_{\min t,z} \leq E \leq E_{\max t,z} \\ 0, & \text{если } E < E_{\min t,z} \text{ или } E > E_{\max t,z} \end{cases}$$

где $E_{\min t,z}$ и $E_{\max t,z}$ - минимальная и максимальная энергии регистрируемых частиц с зарядом Z при толщине поглотителя между детекторами t .

Параметры идентификации спектрометра $\mathcal{E}_{1,t,z}$ и $\mathcal{E}_{2,t,z}$ имеют зависимость от заряда $Z^{3/2}$. Разрешение спектрометра в энергетическом диапазоне до 100 МэВ/нуклон находится в пределах 0,17±0,11.

Третья глава диссертации посвящена вопросам разработки спектрометров на основе методов, изложенных в предыдущей главе.

Материалы, касающиеся экспериментальных исследований спектральных характеристик и формирования поглощенной в фантомах мелких лабораторных животных дозы на пучках синхрофазотрона ОИЯИ представлены в четвертой главе. Основные результаты этих исследований отражены в выводах настоящего автореферата.

В этой же главе автор касается вопроса формирования дозы в тонких слоях ткани, когда главным процессом является несоблюдение дельта-электронного равновесия. В диссертации разработан простой расчетный метод определения дозы за тонкими слоями ткани. С использованием глобальных распределений поглощенной энергии электронов \dot{I} , известных дифференциального распределения дельта-электронов по энергиям $dN/d\omega$, а также зависимости их энергии от угла вылета $\omega(\theta)$ записывается разность энергии $U(t_j)$, уносимой дельта-электронами из слоя, находящегося на глубине t_j и энергии $P(t_j)$, поглощаемой на глубине t_j от дельта-электронов, образовавшихся в предыдущих слоях:

$$U(t_j) - P(t_j) = \int_{t_j}^{\infty} \int_0^{\pi/2} \frac{dN}{d\omega} \frac{d\omega}{d\theta} \cdot i(t-t_j, \omega) d\theta dt - \int_0^{t_j} \int_0^{\pi/2} \frac{dN}{d\omega} \frac{d\omega}{d\theta} \cdot i(t_j-t, \omega) d\theta dt.$$

По этому алгоритму составлена программа, содержащая в качестве параметров заряд частицы, ее энергию, средний атомный номер и толщину среды. Приведены результаты расчета коэффициента относительного уменьшения поглощенной дозы от глубины ткани для протонов с энергиями от 0,05 до 10 ГэВ/нукл, а также экспериментальной проверки разработанного метода на пучке дейтонов, ускоренных до энергии 4 ГэВ/нукл.

Последняя глава посвящена описанию оборудования канала пучков ускоренных заряженных частиц для физико-технического обеспечения радиобиологических экспериментов на синхрофазотроне. Для определения равномерности дозного поля используется сконструированное для этой цели дистанционное устройство диагностики профиля пучка, в котором детекторами служат цилиндрические ионизационные камеры диаметром 20 мм,

расположенные по радиусу, вращающемуся около оси, располагающейся параллельно оси пучка. Для контроля "чистоты" пучка использовался спектрометр с плоским полупроводниковым детектором с толщиной чувствительного слоя порядка 500 мкм. Монитором при проведении радиобиологических экспериментов служит ионизационная плоскопараллельная двухсекционная камера с толщиной по пучку порядка $0,3 \text{ г/см}^2$. Токи с этой камеры регистрируются интеграторами тока с чувствительностями $3 \cdot 10^9 \text{ гц А}^{-1}$ и $4 \cdot 10^{11} \text{ гц А}^{-1}$. В каждом эксперименте мониторинг камер калибруется по конденсаторным тканезэквивалентным камерам со сферическим чувствительным объемом ($0,1 \text{ см}^3$), которые, в свою очередь, 1 раз в год калибруются на градуировочном стенде. Для прерывания облучения по набору необходимой дозы служит дешифратор. Завершается пятая глава обзором некоторых перспектив развития канала пучков синхротрона для проведения радиобиологических экспериментов.

Завершается диссертация выводами, в которых сформулированы основные результаты.

1. Разработанный метод расчета дозы в тонких слоях ткани от тяжелых заряженных частиц в энергетическом диапазоне $0,05-10 \text{ ГэВ/нуклон}$ позволяет оценить отличие реально поглощенной в тонких слоях ткани дозы от значения поглощенной дозы, рассчитанной по ионизационным потерям. В частности, при облучении монослоя клеток со средним диаметром 20 мкм протонами с энергией 9,2 ГэВ средняя поглощенная доза оказывается на 20% ниже расчетной величины.

2. Разработанные спектрометрические методы и созданные спектрометры позволяют исследовать энергетические спектры вторичных заряженных частиц в энергетическом диапазоне до 100 МэВ/нуклон с погрешностью $\pm 20\%$ в разумные отрезки ускорительного времени, а также идентифицировать эти частицы по заряду в диапазоне от 1 до 6.

3. С помощью разработанных спектрометров проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик полей радиационного воздействия на пучках синхротрона ОИЯИ. Измерения спектров заряженных частиц с идентификацией их по заряду показали, что вклад вторичного излучения убывает с увеличением заряда вторичных заряженных частиц и возрастает с толщиной фантома, изменяясь от 6% до 13% при изменении толщины фантома кролика вдоль оси фантома на пучке альфа-частиц с энергией 4 ГэВ/нуклон от 0 до 18 г/см^2 . Эти дозовые вклады создавались флюенсом вторичных заряженных частиц, составляющим от 0,4 до 1% от флюенса первичных. Измеренная компонента вторичных заряженных частиц существенна в плане интерпретации результатов радиобиологических экспериментов. Так, среднее значение коэффициента качества для измеренной компоненты вторичного излучения составляет

здесь 6,3, что приводит к возрастанию коэффициента качества излучения в фантоме до 1,7.

Измерение спектрометром линейной передачи энергии распределения по ЛПЭ в диапазоне $15-150 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \text{см}^2$ в фантоме кролика на пучках протонов и дейтонов синхротрона ОИЯИ не меняли своего характера на различных глубинах фантома и спадали с увеличением ЛПЭ по квадратичной гиперболе. Вычисленные по этим распределениям зависимости дозы от ЛПЭ имели максимум в районе $30 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \text{см}^2$. Дозы от вторичных заряженных частиц в этом диапазоне ЛПЭ увеличивались приблизительно на 40% при изменении толщины фантома до $10 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ и затем спадали на 10% к заднему торцу фантома ($18 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$).

Измерения, проведенные с помощью спектрометра-телескопа с шаровым детектором показали качественное соответствие энергетических распределений вторичных протонов на пучках дейтонов в фантоме кролика с описанными выше ЛПЭ-распределениями, что указывает на то, что основной компонентой вторичного излучения являются вторичные протоны.

4. В соответствии с результатами исследований дозовых распределений в фантомах биообъектов рост дозы с глубиной замедляется по мере увеличения заряда падающих частиц, а глубинная дозовая кривая для ядер углерода с энергией 4 ГэВ/нуклон уже строго убывающая.

Пространственные дозовые распределения выявили спад дозы к краю фантомов, причем этот спад тем резче, чем больше глубина. Так для дейтонов синхротрона на заднем торце фантома кролика доза спадает на 20%, а фантома крысы - на 15% к боковой поверхности.

5. Созданная дозиметрическая и контролирующая аппаратура позволяет определять поглощенную дозу и контролировать процесс облучения с точностью не хуже 10%.

6. Созданный канал пучков, оборудованный комплексом устройств и аппаратуры, дает возможность оперативно создавать воспроизводимые поля облучения с размерами $5,5 \cdot 5,5 \text{ см}^2$ с неравномерностью $\pm 10\%$ и вкладом сопутствующего излучения по интегральному флюенсу меньше 0,5%, а по дозе меньше 5%.

Публикации по материалам диссертации:

1. В.И. Попов, А.И. Портман, М.А. Сычков, А.Б. Колодин, И. Никл. Разработка и создание условий облучения биообъектов протонами высоких энергий. В кн. Функция организма и факторы космического полета, "Медицина", М., 1974, с. 148.
2. А.И. Портман, Б.А. Красевин, Е.И. Кудряшов, Н.И. Рыжов. Математическое описание радиационного поражения в нервных центрах головного мозга человека при воздействии тяжелых ядер ГКИ, Тезисы докл. УШ Симпозиум по космической биологии и медицине, Варна, 1975, с. 85.
3. Е.И. Кудряшов, С.А. Новиков, А.И. Портман, В.Г. Семенов, М.А. Сычков, О.И. Цисляк. Исследование дозовых характеристик пучков частиц, сформированных на синхротроне ОИЯИ для радиобиологических исследований. Препринт ОИЯИ, 16-10261, Дубна, 1976, 12 с.
4. Е.И. Кудряшов, А.И. Портман, М.А. Сычков, В.Г. Семенов. Роль высокоэнергетических δ^- -электронов в формировании тканевой дозы тяжелых заряженных частиц. Тезисы IX Симпозиума по космической биологии и медицине, Будапешт, 1976, с. 68.
5. А.И. Портман. Метод фантомной спектрометрии с применением изотропных тканезквивалентных детекторов, Тезисы X Симпозиума по космической биологии и медицине, Сухуми, 1977, с. 116.
6. Н.И. Рыжов, В.И. Попов, А.И. Портман, Б.С. Федоренко, Р.Д. Говорун, А. Бадракова, И. Талаш. Итоги радиационно-физических и радиобиологических исследований с высокоэнергетическими тяжелыми заряженными частицами, материалы XII Симпозиума по космической биологии и медицине, Варшава, 1979, с. 82.
7. Л.П. Зиновьев, И.Б. Исинский, А.Д. Кириллов, С.А. Новиков, В.И. Попов, А.И. Портман, И.Н. Семеновский, Е.Д. Шафранов. Возможности использования синхротрона ЛЭЗ ОИЯИ для медико-биологических целей. - Препринт ОИЯИ, 18-82-65, Дубна, 1982, 14 с.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1984 года.