

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

6205/2-80

22/12-80

P16-80-601

В.Е.Алейников, В.А.Архипов, М.М.Комочков,
М.И.Салацкая, А.П.Череватенко

ДОЗИМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ
И ФИЗИКА ЗАЩИТЫ В ОИЯИ

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1979 году исполнилось пятнадцать лет работы Отдела радиационной безопасности и радиационных исследований * /ОРБиРИ/ ОИЯИ. За этот срок сотрудники отдела наряду с регулярным контролем за уровнями ионизирующих излучений, соблюдением правил и норм радиационной безопасности решали научно-методические вопросы по следующим основным направлениям:

- дозиметрия излучений от источников,
- наведенная радиоактивность,
- радиационная защита,
- компонентный и энергетический составы излучений, определяющих радиационную обстановку за защитой,
- адекватность показаний детекторов излучений дозе и спектру частиц,
- радиационная обстановка в окружающей среде.

В направлении дозиметрии излучений источников исследованы энергетические распределения нейтронов в зале синхроциклотрона, вблизи синхрофазотрона, циклотронов многозарядных ионов и импульсных быстрых реакторов /ИБР-30 и ИБР-2/. Глубинные распределения доз в тканезквивалентных фантомах были измерены на пучках синхроциклотрона и ИБР-30, а также в поле рассеянного излучения в зале синхроциклотрона.

Наведенная радиоактивность изучалась на одном из основных источников этого фактора радиационной вредности - синхроциклотроне. В порядке возрастания степени радиационной опасности наведенная радиоактивность имеет место в воздушной среде, воде, охлаждающей узлы синхроциклотрона, защите и деталях ускорителя. В конструкционных металлах, защитных материалах и воде установлены основные радиоактивные изотопы и их активности.

Исследования по радиационной защите включали измерения параметров функции ослабления флюенса нуклонов различных энергетических групп и доз излучения, разработку феноменологических и аналитических методов расчета прохождения излучений через защиту. Метод случайных испытаний внедрен в практику расчета спектрально-угловых распределений флюенса нуклонов от мишеней и за защитой как наиболее достоверный. Различные

* До 1977 г. - Отдел радиационной безопасности.

методы расчета дозиметрических параметров поля излучения проверялись в полномасштабном эксперименте на синхроциклотроне.

Изучение компонентного и энергетического составов излучений за защитой синхрофазотрона, синхроциклотрона, циклотронов и ИБР показало, что типичным излучением, определяющим радиационную обстановку, являются быстрые нейтроны. Однако в отдельных случаях на этих установках дозу излучений определяют нейтроны высоких энергий /синхроциклотрон, синхрофазотрон/ или гамма-излучение /ИБР/. Нельзя не учитывать протонный компонент за защитой синхроциклотрона и синхрофазотрона при интерпретации показаний дозиметров нейтронов.

Адекватность показаний детекторов излучений дозе и спектру нейтронов устанавливалась путем сличения результатов измерения этих величин проверяемыми средствами с наиболее достоверными данными. Эксперименты, выполненные в полях излучений основных ядерно-физических установок ОИЯИ, показали, что в типичных полях излучений достоверность определения дозы излучений не соответствует рекомендации МКРЕ-30%^{1/6/} для доз излучений, сопоставимых с предельно допустимыми.

Результаты изучения радиационной обстановки в окружающей среде свидетельствуют об отсутствии влияния работы ядерно-физических установок ОИЯИ на загрязненность среды.

В следующих разделах представлена более обстоятельная информация о состоянии работ и достигнутом ими уровне в области дозиметрии и физики защиты в ОИЯИ.

2. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЙ

В ОИЯИ представлен широкий спектр источников ионизирующих излучений: импульсные ядерные реакторы на быстрых нейтронах, ускорители заряженных частиц на высокие энергии, ускорители тяжелых ионов, ускорители электронов, а также радиоактивные вещества, с которыми проводят исследования в радиохимических лабораториях.

Характеристики ядерно-физических установок ОИЯИ как источников излучений приведены в табл. 1.

В научно-экспериментальном отделе ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем производится химическое разделение и исследование изотопов элементов, получаемых в результате ядерных реакций после облучения мишеней на пучках синхроциклотрона. Работы проводятся в основном с элементами редкоземельной группы. По степени радиотоксичности изучаемые изотопы относятся к группам "Д", "Г" и "В"^{1/24/} радиоактивных веществ в открытом виде, а по их количеству /активности/ работа с ними относится к III и II классам радиохимических ра-

Таблица 1

Характеристика ядерно-физических установок ОИЯИ как источников излучений

№: Установка	Сорт час-: тип, полу-: чаемых : на уста- : новке	Максималь-: ная энер-: гия или : импульс : частиц	Средний : ток (мощ-: ность) : или число : частиц в : импульсе	Средний : повторе-: ность им-: пульсов : ния	Частота: Длитель-: ность им-: пульса : излуче-: ния	Скваж-: ность из-: лучения	Эффек-: тивность : вывода : из ус-: корите-: ля, %	Компонент: излуче-: ния, оп-: ределяю-: щий дозу : за защи-: той	Средний : интеграль-: ный поток : нейтронов : от уста- : новки	Измерение : дозы и : коэффици-: ента : качества : (КК) в : пучке : нейтр/с	
I:	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II	12
<u>Лаборатория высоких энергий (ЛВЭ)</u>											
I. Синхрофазот- рон /I-5/	протоны	10 ГэВ	$3 \cdot 10^{11}$	0,1	0,5+600мс	$2 \cdot 10^4 + 20$	90	нейтроны	$3 \cdot 10^{10}$ на 10^{11} прот. ж) вмпл. ($E_H > 1,5$ МэВ)/6/		
	дейтроны	4,7 ГэВ пука	$1,1 \cdot 10^{11}$	"	"	"	"	"	"		
	альфа-част.	"	$1,6 \cdot 10^9$	"	"	"	"	"	"		
	ядра угле- рода	"	$5 \cdot 10^5$	"	"	"	"	"	"		
	ядра кмс- лорда	"	$1 \cdot 10^5$	"	"	"	"	"	"		
	π^- -К-мезо- ны	$1,7 \frac{\text{ГэВ}}{с}$	$10^4 + 10^6$	"	0,1+3 мс	$10^5 + 3 \cdot 10^3$	-	"	"		
<u>Лаборатория ядерных проблем (ЛЯП)</u>											
2. Синхро- циклотрон	протоны	680 МэВ	≈ 3 мкА	167	0,16 мс и 2,5 мс	37 и 2,5	$10+20$	нейтроны	$2,5 \cdot 10^{9/9/}$ ж) ($E_H > 20$ МэВ)	800 рад/с КК=1,8/10/	

Таблица 1 /продолжение/

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		вторичные пучки: μ -мезоны, нейтроны π -мезоны		$5 \cdot 10^5 c^{-1}$ $\sim 2 \cdot 10^8 c^{-1}$ $\sim 10^7 c^{-1}$	167	0,16 и 2,5 мс	37и2,5	-	нейтроны	$6 \cdot 10^{13}$	$60 \text{ рад/час} / I_2^7$ ($E_n < 20 \text{ МэВ}$) КК-3,5/II/ (для нейтронного пучка)
<u>Лаборатория ядерных реакций (ЛЯР)</u>											
3. Циклотрон У-300/13/	многозарядные ионы с $A/Z = 5+7$	$5 \cdot 10^6 \text{ МэВ}$	до $5 \cdot 10^{13} c^{-1}$	50+150	0,5+5 мс	4+5	30	нейтроны	10^{10}	/I4/	
4. Циклотрон У-200/13/	многозарядные ионы с $A/Z = 2+4,5$	$5 \cdot 10^6 \text{ МэВ}$	$10^{14} + 10^{15} c^{-1}$	"	"	"	30	"	10^{11}	/I4/ (режим ускорения дейтерия, гелия)	
5. Микротрон МТ-17/15/	электроны	16 МэВ	25 мкА	400 и 50	2,5 мкс	$10^3 + 8 \cdot 10^3$	95	гамма-излучение	$3 \cdot 10^{11}$		
<u>Отдел новых методов ускорения (ОНМУ)</u>											
6. СИЛУНД КУТИ /16,17/	электроны	1,5 МэВ	200+300 А/имп	0,5	20 нс	10^8	-	гамма-излучение			450 рад/ч вблизи ускорительной трубки /18/
7. ЛМУ-3000/16/	электроны	"	250А/имп	I	200нс	$5 \cdot 10^6$	-	"			

Таблица 1 /продолжение/

I:	2	:	3	:	4	:	5	:	6	:	7	:	8	:	9	:	10	:	II	:	12
<u>Лаборатория нейтронной физики (ЛНФ)</u>																					
8.	Реактор ИБР-30/19/	нейтроны	спектр деления	25 кВ (реакторный режим)	4	70мкс	$3,6 \cdot 10^3$	нейтроны	$8,10^{12}$ н/см ² с на поверхности активной зоны (E _n > 0,5 МэВ)	670 рад/час (база 8,5м)	6 рад/час (база 68м/20/ КК=7,9/21/										
				8 кВт (бустерный режим)	100	3 мкс	$3,3 \cdot 10^3$	-													
9.	Реактор ИБР-2/22/	нейтроны	спектр деления	4 МВт	5	90мкс	$2,2 \cdot 10^3$	-	$1,75 \cdot 10^{17}$ (E _n > 0,5 МэВ)	1,8 рад/час (база 8 м)	xxx)/23/										

x) Выход за защиту ускорителя.

xx) С июля 1979 г. реконструируется.

xxx) Физический пуск на мощность 300 Вт.

бот^{/24/}. Сразу после облучения на синхротронном циклотроне активность радиохимической мишени обычно составляет около 1,5 грамм-эквивалента радия, но в отдельных экспериментах может достигать 10 г-экв. радия. Большинство исследуемых элементов имеют периоды полураспада от нескольких часов до 30 дней. Суммарное содержание радиоактивных изотопов с периодом полураспада более 30 дней в таких мишенях не превышает 50 мКи. В течение года в этом отделе проводится до 150 опытов по облучению и разделению радиоактивных изотопов.

В научно-экспериментальном химическом отделе Лаборатории ядерных реакций кроме химической обработки и исследования облученных на циклотронах У-300 и У-200 веществ, ведется также изготовление мишеней и препаратов из трансураниевых и транс-плутониевых элементов. Более половины применяемых изотопов относятся к группе "А" по степени радиотоксичности /особо высокая радиотоксичность/^{/24/}. В год в этом отделе перерабатывается до 150 мишеней, из них 50 /со средним весом 4-5 мг/ из трансураниевых элементов, причем каждая из этих последних в течение года около трех раз регенерируется. По количеству радиоактивных веществ на рабочем месте такие работы относятся к III и II классам работ.

3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Методы и средства измерений, которыми располагает отдел, позволяют осуществлять контроль уровней практически всех видов ионизирующего излучения, определяющих радиационную обстановку в ОИЯИ. При проведении измерений уровней рентгеновского, α , β , и γ -излучений для целей систематического радиационного контроля в основном используются промышленные приборы^{/25/}. Характеристики большинства приборов, используемых для дозиметрии нейтронов, приведены в работе^{/26/}. С целью изучения радиационной обстановки в полях смешанного излучения применяется также дозиметр, детектором которого является рекомбинационная камера REM-2^{/27,28/}. С помощью этого прибора измеряются поглощенная и эквивалентная дозы, а также коэффициент качества ионизирующего излучения без ограничения по составу и энергии излучения для глубины ткани около 2 г/см². Пределы измерения эквивалентной дозы - 1 мБэр/ч \div 30 Бэр/ч в поле статистически равномерно распределенного излучения. Для измерения эквивалентной дозы нейтронов из промышленных приборов используется только ДН-А-1^{/29/}.

Широкий диапазон энергий нуклонов в полях излучения за защитой ускорителей и импульсного быстрого реактора, импульсный характер излучений большинства базовых ядерно-физических установок ОИЯИ потребовали дальнейшего развития методов измерения

доз и энергетических спектров нуклонов. Основные методы измерения уровней нейтронного поля основаны на регистрации медленных и тепловых нейтронов сцинтилляционным, ионизационным или активационным детекторами в замедлителях разных размеров и конфигурации.

Для контроля радиационной обстановки в ОИЯИ эффективно используются так называемые интеграторы мощности дозы излучения. Они представляют собой устройства с активными детекторами /газоразрядными, сцинтилляционными/, позволяющие в любой момент времени получать информацию о накопленной поглощенной или эквивалентной дозе в определенном месте. Интеграторы мощности дозы излучения используются, в частности, для группового контроля облучения персонала, не охваченного индивидуальным дозиметрическим контролем, и отдельных лиц из населения.

Для более точного измерения эквивалентной дозы нейтронов применяется многошаровая методика ^{30/} с использованием в качестве детектора медленных и тепловых нейтронов сцинтилляционных детекторов ⁶LiJ(Eu) или ZnS(B), а также индиевого активационного детектора. Методы измерения спектров нуклонов широкого диапазона энергий были развиты в связи с исследованием энергетических спектров нуклонов в полях излучения базовых ядерно-физических установок ОИЯИ с целью установления закономерностей в формировании поля нейтронов, определения адекватности показаний дозиметров эквивалентной дозе в таких полях, а также экспериментальной проверки способов расчета защиты от излучений ускорителей протонов.

В полях излучения за защитой ускорителей протонов для спектрометрии нейтронов используется сцинтилляционный детектор медленных и тепловых нейтронов ⁶LiJ(Eu) с набором шаровых полиэтиленовых замедлителей ^{31/} и углеродсодержащий активационный детектор ^{32/}. Энергетические спектры нейтронов восстанавливались методом "жесткой" априорной информации о величинах потоков нейтронов разных энергетических групп ^{33/} и методом статистической регуляризации ^{34,35/}. Последний используется также при восстановлении спектров нейтронов по наведенной радиоактивности детекторов из индия в шаровых полиэтиленовых замедлителях ^{36/}, по показаниям пороговых активационных детекторов ^{37/}, а также по показаниям системы активационных детекторов ^{38/} /тепловых, резонансных, пороговых и индиевых детекторов в замедлителях/. Упомянутые выше методы позволяют определять энергетические спектры нейтронов в диапазоне энергий от 10^{-8} эВ до 1 ГэВ. С целью уточнения функций чувствительности детектора медленных нейтронов в шаровых замедлителях была измерена ^{39/} зависимость от энергии нейтронов чувствительности детектора ⁶LiJ(Eu) в шаровых полиэтиленовых замедлителях с диаметрами 5,08 см /2 дюйма/, 7,62 см /3 дюйма/, 12,7 см /5 дюймов/

и 25,4 см /10 дюймов/ в интервале энергий от 0,01 эВ до 10^8 эВ методом спектрометрирования энергии нейтронов от импульсного быстрого реактора по времени пролета. Значение чувствительности сцинтилляционного детектора ${}^6\text{LiJ}(\text{Eu})$ в шаровых замедлителях и дозиметра ДН-А-1 $^{29}/\text{к}$ нейтронам с энергией около 30 кэВ было измерено $^{40}/$ также с использованием нейтронов, образованных в реакциях ${}^6\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, при превышении энергии протонов над порогом реакции на 10 кэВ.

Для измерений энергетических спектров и спектрально-угловых распределений протонов высокой энергии за защитой ускорителей используется сцинтилляционный спектрометр $^{41,42}/$. Идентификация протонов по энергии осуществляется путем измерения потерь энергии частицы в тонком сцинтилляторе. Протоны, идущие в заданном направлении, выделяются телескопом сцинтилляционных счетчиков. В диапазоне энергий протонов от 55 до 500 МэВ амплитудное разрешение составляет соответственно 11% и 27%. Для восстановления энергетических спектров протонов по амплитудным распределениям используется метод статистической регуляризации.

Спектрометрия γ -излучения при измерении радиоактивности активационных детекторов и образцов внешней среды выполняется с помощью сцинтилляционных спектрометров с кристаллами $\text{NaJ}(\text{Tl})$ и полупроводникового $\text{Ge}(\text{Li})$ -спектрометра.

Для определения индивидуальных доз, получаемых сотрудниками ОИАИ при работе вблизи ядерно-физических установок, используются стандартные кассеты ИФК-2,3 $^{43}/$ с рентгеновской пленкой типа ORWO RD3-4, позволяющие измерять дозу жесткого и мягкого гамма-излучения, а также дозу бета-излучения; доза нейтронов определяется по числу треков и звезд в ядерной эмульсии типа К толщиной 20 мкм, помещенной вместе с корректирующим пакетиком в свободную полость кассеты ИФК-2,3 /ИФК_н $^{44-46}/$. При проведении ремонтных работ в зонах специального допуска сотрудники дополнительно получают индивидуальные дозиметры КИД-2 и ДК-02. Для контроля дозы при аварийных или случайных облучениях сотрудников, работающих в зонах, периодически становящихся зонами запрета, в кассеты вставляются вкладыши с термoluminesцентными детекторами на основе порошка $\text{LiF}^{47}/$. Персонал, непосредственно занятый на проведении аварийно-опасных работ на реакторах, обеспечивается индивидуальными дозиметрами типа ИКС-А, "Гнейс" $^{48}/$.

Единство средств измерения обеспечивается поверкой и градуировкой дозиметров и радиометров. Поверка и градуировка производятся в специальном помещении $5,17 \times 10,76 \times 4,5 \text{ м}^3$ на поверочных дозиметрических установках, аттестованных по второму разряду и оснащенных образцовыми источниками гамма-излучения

(^{60}Co , ^{137}Cs) первого и второго разрядов и образцовыми источниками нейтронов ($\text{Pu} + \text{Be}$), ^{252}Cf второго разряда. Для градуировки радиометров по тепловым нейтронам используется $\text{Pu} + \text{Be}$ источник нейтронов в стандартной парафиновой сфере диаметром 15 см. Градуировка альфа- и бета-радиометров производится, соответственно, с помощью образцовых, 2-3 разряда, источников ^{239}Pu и $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$.

4. РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА

При работе ускорителей и реактора радиационная обстановка на рабочих местах за защитой определяется, как уже отмечалось выше, в основном, нейтронным компонентом поля излучения. Типичные распределения эквивалентной дозы по энергетическим группам для двух крайних случаев в отношении спектров нейтронов - "жесткого" и "мягкого" - представлены в табл.2. Энергетические группы выбраны в соответствии с характерными границами функций чувствительности средств дозиметрического контроля. В первом случае вклад в эквивалентную дозу верхнего энергетического интервала нейтронов является решающим. Относительный вклад нейтронов с энергией, большей заданной, в эквивалентную дозу в местах пребывания персонала на ядерно-физических установках ОИЯИ, приведен на рис.1. Более подробную информацию об энергетических распределениях можно найти в работах /9,49,50,58/.

В типичных полях излучений за защитой действующих ускорителей вклад в эквивалентную дозу других видов излучений, в частности, гамма-квантов, не превышает нескольких процентов от дозы нейтронов. За защитой реактора ИБР-30 доза гамма-излучения составляет в среднем около 60% от дозы нейтронов /минимум - 20%, максимум - 150%/. Уровни излучений на рабочих местах персонала изменяются от долей мбэр/ч до десятков мбэр/ч. Глубинные распределения доз в тканезквивалентных фантомах были измерены в пучках реактора ИБР-30 и синхроциклотрона, а также в поле рассеянного излучения в зале синхроциклотрона /10,11,99-102/.

Характер распределения дозы H с расстоянием R от ускорителей протонов изучался в работах /9,51,52/ и приведен на рис.2. Абсолютные значения HR^2 на рисунке относятся к параметрам ускорителей, приведенным в табл.1, причем синхрофазотрон в режиме, дающем приведенное распределение, работает приблизительно половину года.

При остановленных ядерно-физических установках радиационную обстановку определяет гамма-излучение от наведенной радиоактивности оборудования. Уровни гамма-излучения в местах, где персонал выполняет профилактические и ремонтные работы, приведены

Таблица 2

Распределение эквивалентной дозы нейтронов по энергетическим группам, %

Установки	Характер спектра нейтронов	Энергетические группы нейтронов				
		$E < 0,4 \text{ эВ}$	$0,4 \text{ кэВ} < E < 10 \text{ кэВ}$	$10 \text{ кэВ} < E < 0,4 \text{ МэВ}$	$0,4 \text{ МэВ} < E < 20 \text{ МэВ}$	$E > 20 \text{ МэВ}$
Ускорители /49/	"жесткий"	0,2	0,4	1,0	20,4	78
	"мягкий"	7	18	6	67	2
Реактор ИБР-30 /50/	"жесткий"	3	4	7	86	-
	"мягкий"	13	24	13	50	-

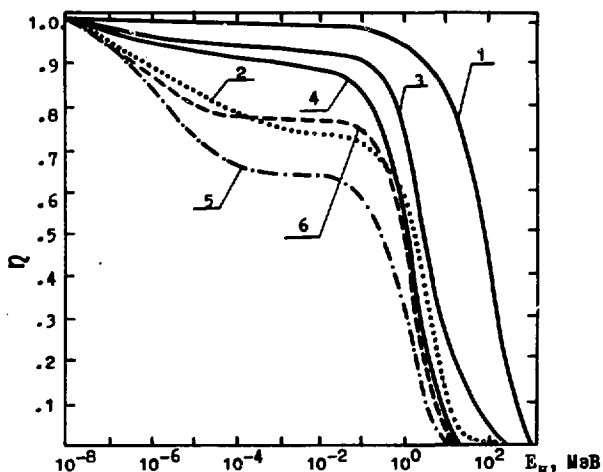


Рис.1. Относительный вклад нейтронов с энергией больше заданной в суммарную эквивалентную дозу η ; 1/ за сплошной защитой синхроциклотрона; 2/ за защитой с проемами синхроциклотрона; 3/ район линейного промежутка синхрофазотрона; 4/ в зале и физкабинетах циклотрона У-300 /режим выведенного пучка ионов/; 5/ за защитой циклотрона У-200 /лабиринт/; 6/ в поле рассеянного излучения на реакторе ИБР-30.

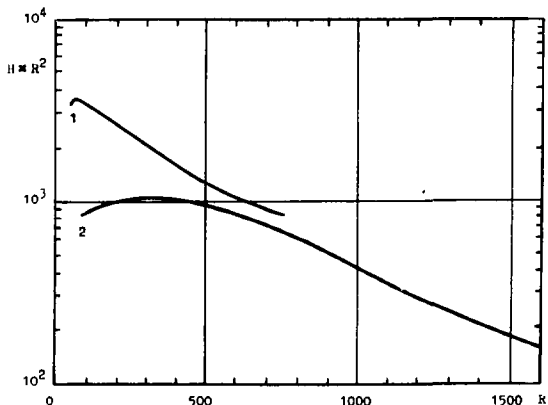


Рис.2. Эквивалентная доза нейтронов $H \cdot R^2 / \text{мкбэр} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ / на различных расстояниях $R / \text{м} /$ от геометрического центра ускорителей. 1 - синхрофазотрон /51/, кривая приведена с использованием уточненных коэффициентов перехода от флюенса нейтронов к эквивалентной дозе /54/, 2 - синхроциклотрон /8/.

Таблица 3

Уровни гамма-излучения от наведенной радиоактивности ускорителей и реактора

Место измерения, установка	мР/ч	Время после выключения установки, ч
<u>Зал реактора ИБР-30</u>		
Вход в зал	72	72
Шибер канала №1	200	72
Шибер канала №6	250	72
Коробка передач ОПЗ	540	72
Защитный экран зоны	3600	72
<u>Зал синхроциклотрона</u>		
Внутри камеры ускорителя	50000	2
Выводное окно пучков частиц	6000	2
Вариатор частоты	300	2
За ярмом магнита	5	2
<u>Зал экспериментальной аппаратуры /лаб. №4/</u>		
У коллиматоров пучка протонов	20	5
Средний фон по залу	1	0,01
<u>Зал синхрофазотрона</u>		
Внутри вакуумной камеры, район расположения мишеней и систем вывода пучков	400	72
Район инъекции пучка в синхрофазотрон /цилиндры Фарадея, поворотный магнит ПМ-2/	100	72
<u>Залы циклотронов У-200, У-300</u>		
Дуанты	600	5
Мишень после облучения	5000	0,2
<u>Зал микротрона МТ-17</u>		
Резонатор	250	5
Урановый конвертор	400	0,2
Графитовый куб	12	5

в табл.3. Наведенная гамма-радиоактивность обусловлена в основном долгоживущими изотопами ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{60}Co , $^{64}\text{Cu}^{58}$, входящими в состав стали и меди, из которых изготовлены узлы ускорителей и реактора. В зале реактора

ИБР-30, кроме перечисленных факторов, значительные уровни создает гамма-излучение продуктов деления.

Радиохимические работы по разделению и исследованию изотопов, обработка и регенерация мишеней после облучения проводятся в защитных боксах под вытяжкой с помощью специальной вентиляции. Радиационная обстановка при выполнении этих работ определяется высокой гамма-радиоактивностью мишеней /до 10 г экв. Ra / в первые часы после облучения за счет короткоживущих изотопов. На рабочих местах во время опытов мощности доз гамма-излучения достигают $10 \div 15$ мР/ч. Вклад в эквивалентную дозу альфа- и бета-излучений за счет загрязнения рабочих поверхностей и воздуха не является сколько-нибудь существенным.

Основными источниками загрязнения рабочих поверхностей и оборудования радиоактивными веществами являются открытые источники и активация пыли, масел и других материалов в главных залах ядерно-физических установок.

В табл.4 приведены типичные уровни загрязнения радиоактивными веществами рабочих поверхностей на установках, где имеет место загрязнение. Из этой таблицы видно, что уровни загрязнения радиоактивными веществами рабочих поверхностей не превышают допустимых.

Уровни излучений в местах пребывания персонала на ускорителях, реакторах и при проведении работ с открытыми и закрытыми источниками изменяются от долей мбэр/ч до нескольких бэр/ч, а в выведенных пучках или главных залах мощность эквивалентной дозы достигает миллионов бэр/ч, поэтому требуется различный подход к организации и мероприятиям по обеспечению безопасных условий труда. В ОИЯИ с 1969 года вокруг любого источника ионизирующих излучений в зависимости от степени существующей или возможной опасности установлены зоны радиационного воздействия. В санитарно-защитной зоне⁵⁴ выделяются:

- зона запрета - $H^* > 10$ бэр при однократном облучении;
- зона специального допуска - $H > 5$ бэр за год;
- контролируемая зона $H \geq 0,23$ мбэр/ч.

Для каждой радиационной зоны определены границы, организация работ, средства индивидуальной защиты и индивидуальный дозиметрический контроль. Радиационный контроль с применением зонального деления территории вокруг источников излучений позволяет применять единообразные и конкретные требования при организации безопасных условий труда на различных ядерно-физических установках /ускорители, реакторы, радиохимические лаборатории и др./, повышает самоконтроль персонала.

* H - эквивалентная доза.

Таблица 4

Снимаемое загрязнение радиоактивными веществами
рабочих поверхностей /до дезактивации/, част./см²·мин

Место измерения, установка	Бета-активные нуклиды	Альфа-активные нуклиды
1. Зал реактора ИБР-30		
Пол у входа	50	1
Пол над зоной	450	1
Платформа замедлителя	1000	1
2. Зал синхроциклотрона, район мишени	2000	1
3. Радиохимические помещения II класса ЛЯП	200	1
4. Радиохимические помещения III класса ЛЯП	20	1
5. Зал и экспериментальные павильоны синхрофазотрона	10	1
6. Зал циклотрона У-300, зал циклотрона У-200, внутри камеры циклотрона на дуантах	1000	1
7. Столы переборки ионных источников и деталей ускорителя ЛЯР	100	1
8. Комната переборки ионных источников циклотронов ЛЯР	100	1
9. Зал микротрона ЛЯР	10	1
10. Радиохимические помещения II класса ЛЯР	40	1
11. Радиохимические помещения III класса ЛЯР	20	1

С 1971 года в ОИЯИ проводится регулярный контроль радиоактивности в окружающей среде. Контроль включает в себя измерения уровней гамма-излучения и заряженных частиц, бета- и гамма-радиоактивности воды, почвы и растительности. Результаты контроля уровней гамма-излучения и заряженных частиц ⁵⁵/, усредненные по всем контрольным точкам, приведены в табл.5, из которой следует, что фон гамма-излучения и заряженных частиц в окружающей ОИЯИ среде ниже среднего фона на земном шаре, равного ~10 мкР/ч ⁵⁷/, а вклад в радиоактивность окружающей среды от работы ядерно-физических установок ОИЯИ не наблюдается.

Таблица 5

Результаты контроля уровней гамма-излучения
и заряженных частиц в окружающей среде, мкР/ч

Годы	мкР/ч вокруг ОИЯИ	мкР/ч, данные ^{158/}
1971	4,1+0,4	4,5
1972	4,0+0,4	6,0
1973	5,6+0,6	6,0
1974	5,0+0,5	5,4
1975	4,2+0,4	4,8
1976	4,1+0,2	5,6
1977	4,8+0,4	7,6
1978	4,2+0,5	4,2

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ОБЛУЧЕНИЯ СОТРУДНИКОВ

К началу 1979 года на индивидуальном дозиметрическом контроле находилось 2100 сотрудников ОИЯИ. Анализ условий работы вблизи ядерно-физических установок ОИЯИ и многолетний опыт дозиметрического контроля свидетельствуют о том, что уровень облучения персонала в среднем остается небольшим. Так, за последнее десятилетие ~90% сотрудников, работающих в условиях, связанных с облучением, получали за год дозы менее 1,5 бэр. На рис. 3 представлены значения средних годовых доз облучения персонала лабораторий и общепитовских отделов ОИЯИ в течение 1965-78 гг. Из рисунка видно, что наибольшему облучению подвергаются сотрудники отдела эксплуатации синхроциклотрона ЛЯП и сотрудники, участвующие в ремонте узлов этого ускорителя /кривая 2-1/. Получаемая ими доза примерно на 97%, как следует из данных табл. 6, обусловлена гамма-излучением наведенной радиоактивности камеры и отдельных узлов ускорителя. Из этой таблицы также видно, что при работе персонала в смешанных полях гамма-излучения и нейтронов индивидуальная доза, обусловленная нейтронами, составляет от 2,5% (для групп ремонта и эксплуатации синхроциклотрона ЛЯП) до 38% (для сотрудников ЛВЗ) от полной эквивалентной дозы.

Многолетний контроль за облучением сотрудников ОИЯИ показал, что доза облучения персонала, обусловленная бета-излучением и мягким гамма-излучением, ничтожно мала для персонала всех лабораторий, кроме Лаборатории ядерных реакций, где небольшое число сотрудников /в среднем около 1%/ при работе

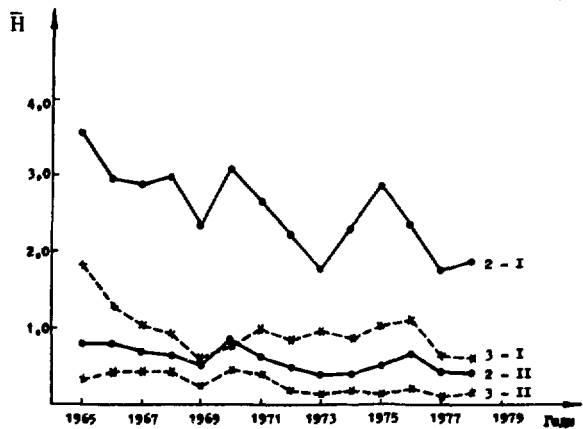
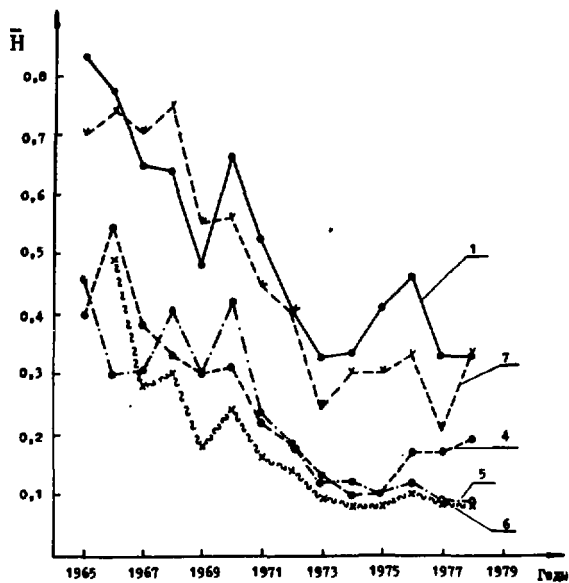


Рис. 3. Среднегодовые дозы облучения персонала \bar{H} , бэр. 1 - ОИЯИ; 2 - I - ремонтная группа и группы эксплуатации синхротриклотрона ЛЯП; 2 - II - научные отделы и вспомогательные группы ЛЯП; 3 - I - ремонтная группа и группы эксплуатации ИБР-30 ЛНФ; 3 - II - научные отделы и вспомогательные группы ЛНФ; 4 - ЛВЭ; 5 - ЛЯР; 6 - ОНМУ; 7 - ОРБИРИ.

Таблица 6

Вклад нейтронов в коллективные дозы, получаемые персоналом лабораторий ОИЯИ /средние за период 1965-1978 гг, %/

Персонал	ЛЯП	ЛВЗ*	ЛНФ	ЛЯР*
Группы ремонта, эксплуатации	2,5		8,5	
Научные отделы и вспомогательные группы	19		23,5	
Весь персонал лаборатории, работающий в радиационно-вредных условиях	11,5	38	11,5	20

* Контролировался весь персонал лабораторий без разделения его на группы.

с активированными деталями и узлами конструкций камеры ускорителя и мишеней подвергается облучению бета-частицами и гамма-излучением широкого спектра энергий. При этом в среднем значении дозы, получаемой кожным покровом от бета-излучения, примерно в 10 раз более дозы от гамма-излучения; для хрусталика глаза это отношение составляет 5:1. Следует иметь в виду, однако, что уровень получаемых при этом доз был всегда ниже предельно допустимых.

Данные, приведенные на рис.3, свидетельствуют об общей тенденции уменьшения среднегодовых доз, получаемых персоналом ОИЯИ за период 1965-1978 гг. Среднегодовая доза для персонала ОИЯИ в 1978 году составила 0,33 бэр.

На рис.4 приведены значения ежегодных коллективных доз облучения персонала Института и отдельных его лабораторий за период 1965-1978 гг. Во всех подразделениях наблюдается тенденция к уменьшению этих доз.

Приведенные в этой главе результаты индивидуального дозиметрического контроля подтверждают действенность мер, принимаемых для уменьшения степени облучения сотрудников ОИЯИ.

6. АДЕКВАТНОСТЬ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Большое внимание в работе отдела было уделено проверке адекватности показаний используемых в ОИЯИ методов и средств

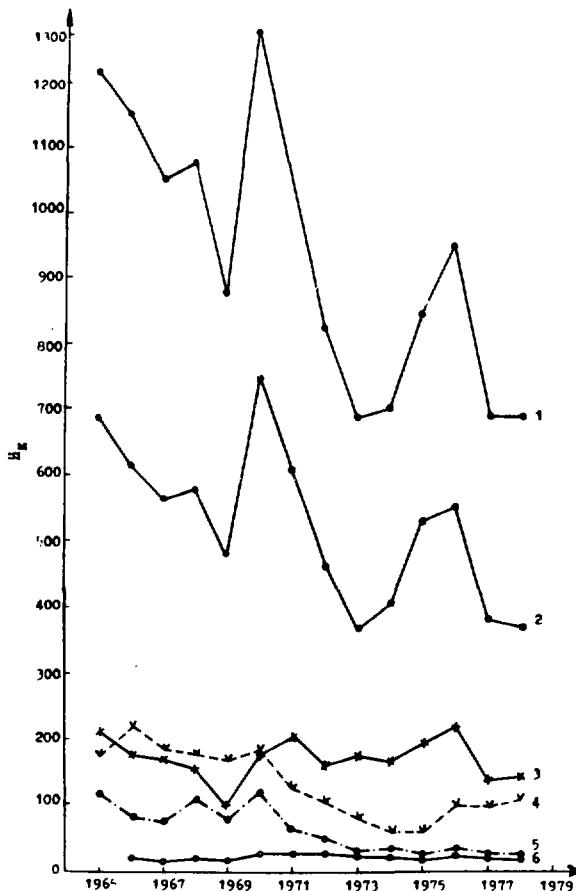


Рис. 4. Коллективные дозы H_k , бэр. человек, получаемые ежегодно персоналом ОИЯИ в целом и персоналом каждой лаборатории в отдельности. 1 - ОИЯИ, 2 - ЛЯП, 3 - ЛНФ, 4 - ЛВЗ, 5 - ЛЯР, 6 - ОНМУ.

измерения эквивалентной дозе в полях излучения сложного компонентного состава.

Одним из способов проверки адекватности показаний дозиметров эквивалентной дозе является сравнение показаний дозиметров в типичных полях излучения с эквивалентной дозой, измерен-

ной методом, принятым за наиболее достоверный. Сравнительные измерения доз излучения были выполнены в полях за защитой ускорителей протонов ОИЯИ на высокие энергии ^{28/} и ИБР-30 ^{60/}, а также в пучке ИБР-30 ^{21/}.

В полях излучения, типичных для условий работы персонала на ускорителях, в сравнительных измерениях применялись широко используемые для дозиметрии излучений ускорителей средства: сцинтилляционные, активационные и ионизационные детекторы медленных нейтронов с замедлителями ^{80,59,60/}, сцинтилляционный дозиметр ДН-А-1 ^{20/}, активационный углеродсодержащий детектор ^{32/}, рекомбинационный дозиметр ^{27,28/}, индивидуальные фотодозиметры ^{44,45,46/}. Измерения выполнялись в условиях максимально "жесткого", "мягкого" и промежуточного спектров нейтронов. За наиболее вероятную эквивалентную дозу нейтронов с энергией менее 20 МэВ принималась доза, полученная с помощью соотношения

$$H = \int_{0,01 \text{ эВ}}^{20 \text{ МэВ}} \eta(E) \phi(E) dE, \quad /6.1/$$

где $\eta(E)$ - коэффициент перехода от плотности потока моноэнергетических нейтронов, падающих на тканезквивалентный фантом, к эквивалентной дозе в максимуме глубинного распределения эквивалентной дозы для спектра нейтронов $\phi(E)$, измеренного в месте сравнения показаний приборов. Измерения спектра нейтронов $\phi(E)$ выполнялись спектрометром Боннера ^{81/}. За наиболее вероятную полную эквивалентную дозу излучения принималась средняя величина эквивалентной дозы, измеренной рекомбинационным дозиметром и компонентным методом ^{28/}. Сравнение результатов измерений эквивалентной дозы с помощью приборов, широко используемых для оперативного контроля радиационной обстановки за защитой ускорителей и, в частности, за защитой ускорителей протонов ОИЯИ с наиболее вероятной величиной эквивалентной дозы, показало, что эти приборы воспроизводят эквивалентную дозу нейтронов и полную эквивалентную дозу излучения с точностью коэффициента 2. Как правило, это приводит к переоценке наиболее вероятной величины. Эквивалентная доза, определенная по показаниям дозиметров с детекторами, регистрирующими нейтроны по протонам отдачи, может значительно превышать наиболее вероятную дозу. Завышение обусловлено большим вкладом в показания дозиметров протонов, выходящих из защиты ускорителя и с высокой эффективностью регистрируемых детектором. Это, в частности, относится к индивидуальному дозиметру нейтронов /ИФК_н/, если его показания не корректируются ^{28/}.

В полях рассеянного излучения ИБР-30 выполнялись исследования^{/50/} адекватности показаний фотоэмульсионных и сцинтилляционных детекторов эквивалентной дозе нейтронов. За наиболее вероятную эквивалентную дозу нейтронов в полях рассеянного излучения ИБР-30 принималась величина, установленная на основе спектра нейтронов. Переход от плотности потока к мощности эквивалентной дозы выполнялся на основании рекомендаций МКРЕ^{/61/}, аппроксимированных в работе^{/82/}. Восстановление спектров нейтронов выполнялось по программе, использующей метод статистической регуляризации^{/34/}. В программе расчета спектра использовались показания спектрометра Боннера, счетчика СММ-11 и априорная информация о максимальной энергии нейтронов.

С целью установления степени адекватности показаний различных детекторов, используемых для дозиметрического контроля, эквивалентной и поглощенной дозам, были выполнены сравнительные измерения^{/21/} в пучке ИБР-30, спектр нейтронов в котором близок к типичному спектру реактора и известен в широком диапазоне энергий^{/63/}. Измерения были выполнены с помощью трековых, термолуминесцентных, активационных, ионизационных, сцинтилляционных и фотодетекторов, используемых и разрабатываемых в ОИЯИ и странах-участницах /ГДР, ПНР, СССР, СРР, ЧССР/ для дозиметрии нейтронов и гамма-излучения. Из рассмотрения данных, полученных в работе^{/21/}, следует, что разброс измеренных значений доз нейтронов и гамма-излучения превышает 30% - величину, которую МКРЕ рекомендует^{/61/} для оценок достаточной точности при измерениях доз, сопоставимых с предельно-допустимыми величинами.

Анализ полученных в работах^{/50,21/} данных позволил сделать вывод о том, что отличие функции чувствительности детектора ИФК_н от идеальной, использование Pu-Be источника для градуировки этого детектора и потери информации при просмотре эмульсии на микроскопе приводят к занижению, в среднем в 1,7 раза, индивидуальных доз облучения персонала, работающего в полях нейтронов ИБР-30. Для устранения этого занижения с 1978 года при определении индивидуальных доз вводится поправочный коэффициент, а с 1979 года для градуировки ИФК_н используется источник²⁵²Cf, спектр нейтронов которого близок к спектру деления. Завышение показаний сцинтилляционного бэрметра (ZnS(B) в шаровом полиэтиленовом замедлителе диаметром 25,4 см) в 1,6 раза в этих же полях обусловлено относительно высокой дозой чувствительностью этого дозиметра к промежуточным / E < 0,1 МэВ/ нейтронам.

7. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЙ И РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ

Отсутствие достаточной информации для решения практических задач радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц определило основное направление работ в области защиты от излучений. Приоритет был отдан исследованиям в области физики защиты ускорителей высоких энергий, которые велись по четырем направлениям:

- получение эмпирических констант для расчетов защиты;
- разработка и совершенствование методов расчета защиты;
- экспериментальная проверка методов расчета;
- выявление закономерностей в формировании энергетических распределений нуклонов за защитой ускорителей протонов.

В серии экспериментов /1964-1968 гг./ изучалось ослабление широкого пучка нейтронов в защитах из железа, бетона и в железо-водной слоистой защите^{/64-69/}. Источником нейтронов явились мишени из Ве и Си, которые бомбардировались протонами с энергией 170; 250; 350; 480; 660 МэВ и 10 ГэВ. Исследовались также формирование и ослабление в защите излучения, рассеянного в зале синхроциклотрона на энергию 680 МэВ^{/70-74/}. Для регистрации излучений в защите использовались активационные детекторы из углерода, фосфора и индия, а также ядерные эмульсии и рентгеновские пленки. Исследовалось ослабление в защите потоков нейтронов высокой энергии, быстрых и резонансных и дозы гамма-излучения. Измеренные в этих экспериментах параметры ослабления потоков нейтронов в совокупности с данными других ядерных центров использовались в дальнейшем при расчетах защиты ускорителей полуэмпирическими методами.

В развитии методов расчета прохождения излучения через защиту можно условно выделить два этапа: первый /1963-1968 гг./ - попытку получить относительно простые формулы для оценки защиты ускорителей без использования ЭВМ, и второй этап - развитие методов расчета защиты с использованием ЭВМ. На первом этапе решалось уравнение переноса нейтронов^{/75-79/} с использованием относительно грубых допущений /приближений прямо-вперед и квазиупругого рассеяния/. Расчеты, выполненные такими способами, позволяли рассчитывать ослабление потока нейтронов и оценивать энергетические спектры нуклонов в защите для плоского мононаправленного источника нейтронов высокой энергии на границе полубесконечной защиты. Применение ЭВМ позволило существенно сократить количество упрощающих допущений, принимаемых в расчетах. Среди используемых в ОИЯИ программ для расчета полей излучения за защитой ускорителей прежде всего следует отметить программу расчета нуклон-мезонного каскада в веществе методом Монте-Карло^{/80/}. Эта программа позволяет модели-

ровать взаимодействие нуклонов и π -мезонов с блоками однокомпонентного вещества следующих конфигураций: цилиндр, слой, бесконечное полупространство. Программа вычисляет следующие характеристики для каждой прослеживаемой частицы: координаты ее местонахождения, направление движения, кинетическую энергию. К недостаткам метода следует отнести экспоненциальный рост времени, необходимого для расчета поля излучения с увеличением толщины защиты.

Для решения задач радиационной защиты ускорителей, которые можно свести к определению функции спектрально-углового распределения плотности потока нейтронов в полубесконечной однородной защите с плоским мононаправленным источником релятивистских нейтронов на ее границе, разработан метод^{/81/} и составлена программа для ЭВМ. Метод основан на решении уравнения переноса нейтронов, полученного при следующих допущениях: а/ вкладом, который вносят заряженные частицы в развитие межъядерного каскада в веществе, можно пренебречь; б/ вероятность образования нейтрона под углом, большим 90° в лабораторной системе, много меньше вероятности вылета нейтрона под малыми углами. Принятые допущения ограничивают интервал энергий нейтронов $/20 \text{ МэВ} < E < 1 \text{ ГэВ}/$, для которых возможно использование этого метода расчета, однако для толщин вещества в несколько сотен $\text{г}/\text{см}^2$ время расчета функции спектрально-углового распределения потоков нейтронов в защите сокращается в десятки раз по сравнению с временем, необходимым для расчета тех же величин методом Монте-Карло. Для экспрессного расчета защиты ускорителей на основе полумпирического метода^{/82/} составлены номограммы для расчета защиты в типичной геометрии источник-защита, а именно для случая, когда на защиту падает излучение, генерируемое в мишенях протонами с энергией 25-400 МэВ.

В исследованиях по физике защиты электронных ускорителей были систематизированы имеющиеся^{/85/} и получены новые^{/86/} расчетные данные о дифференциальных и дозовых характеристиках тормозного излучения с энергией до 100 МэВ. Рассчитаны также параметры ослабления тормозного излучения в бетоне^{/87/}, выполнены оценки полей излучения на местности вблизи электронных ускорителей^{/88,89/}.

С целью проверки применимости разных методов расчета поля нейтронов за защитой ускорителей протонов на энергии менее 1 ГэВ несколькими методами^{/80-84/} были рассчитаны характеристики поля нейтронов в типичной для ускорителей геометрии "источник-защита". А именно - для случая, когда на бетонную защиту падает излучение, образованное в "толстой" медной мишени протонами с энергией 660 МэВ. В этой же геометрии были измерены^{/90/} интегральные характеристики /эквивалентная доза и плотность потока нейтронов/ и энергетические спектры нейт-

ронов. Измерения выполнены вблизи внешней поверхности двухметровой защиты из обычного бетона в четырех местах, расположенных так, что угол между импульсом протонов пучка и вектором, направленным из центра мишени в точку установки детектора, составлял $0^\circ; 30^\circ; 39^\circ$ и 65° . Сравнение измеренных и рассчитанных величин позволило оценить точность некоторых методов расчета защиты ускорителей. В рассмотренном диапазоне углов и толщин защиты эквивалентные дозы, рассчитанные полуэмпирическими методами, как правило, отличаются от измеренных величин не более, чем в 3 раза; методы решения кинетического уравнения в плоской геометрии с такой же точностью позволяют рассчитывать потоки высокоэнергетических нейтронов; метод Монте-Карло дает возможность вычислять потоки нейтронов высокой энергии с точностью не хуже $\pm 50\%$. Спектр нейтронов, рассчитанный методом Монте-Карло, правильно описывает форму энергетического распределения нейтронов. Значения потоков разных энергетических групп, рассчитанных этим методом, не отличаются от измеренных более, чем в 2 раза.

С 1969 года в ОИЯИ проводятся исследования энергетических и угловых распределений потоков нуклонов за защитой протонных ускорителей ОИЯИ /91-95,96,98,97,41,98/. Эти работы выполняются с целью установления закономерностей формирования полей нуклонов за защитой ускорителей и получения экспериментальных данных о дифференциальных характеристиках полей излучения. Установлено, что форма энергетических спектров нейтронов $\phi(E)$ за защитой протонных ускорителей в основном зависит от композиции защиты и геометрии "источник-защита". Функция $E \cdot \phi(E)$ за сплошной защитой имеет максимум в области нейтронов высокой энергии. У наиболее "жестких" спектров максимум расположен вблизи 100 МэВ. Проемы в защите приводят к значительному увеличению в спектре нейтронов низких энергий за счет рассеянного излучения, выходящего через эти проемы.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты научно-методических работ и опыт работы по контролю за радиационной обстановкой, выполнением правил и норм показывают, что только их разумное сочетание дает правильную оценку радиационного риска при работе на уникальных ядерно-физических установках и позволяет делать обоснованные рекомендации о целесообразных мерах защиты от ионизирующего излучения.

Развитие методов расчета переноса излучения в веществе позволило оперативно определять размеры защитных экранов, оценивать компонентный состав излучений и их пространственно-энергетическое распределение. Разработка и совершенствование

методов и средств дозиметрии и спектрометрии излучений обеспечили повышение достоверности измерения уровней и доз излучения в несколько раз.

Изучение радиационной обстановки показало, что основным источником облучения персонала, непосредственно выполняющего работы на ядерно-физических установках, являются детали установок с наведенной радиоактивностью. Для персонала, работающего за защитой ускорителей и ИБР-30, определяющим компонентом излучения являются нейтроны. Средние дозы облучения персонала и населения более чем на порядок ниже предельных величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер В.И. и др. АЭ, 1956, 4, с.22.
2. Отчет о деятельности Объединенного института ядерных исследований за 1978 г. Ежегодное издание. ОИЯИ, Р-12406, Дубна, 1979.
3. Булдаковский В.Н. и др. ОИЯИ, 9-12198, Дубна, 1979.
4. Кириллов А.Д. и др. ОИЯИ, 9-9309, Дубна, 1975.
5. Гаспарян А.П. и др. ОИЯИ, 1-9111, Дубна, 1975.
6. Комочков М.М., Лебедев В.Н. ОИЯИ, Р-2231, Дубна, 1965.
7. Желепов В.П. и др. АЭ, 1956, т.4, с.13.
8. Данилов В.И., Розанов Е.И., Смирнов В.И. ОИЯИ, Р9-10080, Дубна, 1976.
9. Комочков М.М. и др. ОИЯИ, Р16-12078, Дубна, 1979.
10. Зельчинский М. и др. ОИЯИ, Р9-3369, Дубна, 1967.
11. Зельчинский М. и др. ОИЯИ, Р16-3587, Дубна, 1967.
12. Желепов В.П. и др. В кн.: Труды III совещания по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. ОИЯИ, Р18-12147, Дубна, 1979, с.271.
13. Оганесян Ю.Ц., Фикс М.М. ОИЯИ, 9-4165, Дубна, 1969.
14. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Б1-2759, Дубна, 1966.
15. Капица С.П., Милехин В.Н. Микротрон. "Наука", М., 1969.
16. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
17. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-12414, Дубна, 1979.
18. Долбилов Г.В., Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-11934, Дубна, 1978.
19. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат, М., 1976.
20. Бамблевский В.П., Гречко В.В. ОИЯИ, Б16-12123, Дубна, 1979.
21. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-12122, Дубна, 1979.
22. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, Р3-10888, Дубна, 1977.
23. Архипов В.А. и др. ОИЯИ, Р13-12466, Дубна, 1979.
24. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений /ОСП-72/. Атомиздат, М., 1973.

25. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. Атомиздат, М., 1977.
26. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-6790, Дубна, 1972.
27. Зельчинский М., Жарновецкий К. Neutron Monitoring. IAEA, Vienna, 1967, p.125.
28. Catalogue 75-76. Nuclear Equipment Establishments "POLON", Warszawa, 1975.
29. Голованов Н.А. и др. Труды СНИИП. Атомиздат, 1964, вып.1, с.36.
30. Алейников В.Е., Архипов В.А., Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-4480, Дубна, 1969.
31. Bramblett R.L. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1960, 9, p.1.
32. Лебедев В.Н., Салацкая М.И. В кн.: Дозиметрические и радиометрические методики. Атомиздат, М., 1966, с.282-291.
33. Алейников В.Е., Гердт В.П., Комочков М.М. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. IAEA, Vienna, 1973, vol.2, p.31.
34. Туровцева Л.С. Решение обратных некорректно поставленных задач методом статистической регуляризации. /Программа ОБР-23/, Препринт ИМП АН СССР, 1975.
35. Алейников В.Е., Гердт В.П., Комочков М.М. В трудах IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, том 2, с.240; ОИЯИ, Р16-8176, Дубна, 1974.
36. Алейников В.Е., Бамблевский В.П., Череватенко Е.П. ОИЯИ, Р16-9123, Дубна, 1975.
37. Алейников В.Е., Бамблевский В.П., Комочков М.М. АЭ, 1977, т.42, вып.2, с.129.
38. Бамблевский В.П., Гречко В.В. ОИЯИ, Р16-12069, Дубна, 1978.
39. Ветцель Л. и др. В кн.: Дозиметрия излучений и физика защиты ускорителей заряженных частиц. Сборник докладов совещания по дозиметрии и физике защиты на ускорителях. ОИЯИ, 16-4888, Дубна, 1970, с.201.
40. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-12819, Дубна, 1979.
41. Алейников В.Е., Гердт В.П., Тимошенко Г.Н. АЭ, 1976, т.41, вып.5, с.332; ОИЯИ, Р16-9400, Дубна, 1975.
42. Тимошенко Г.Н., Алейников В.Е., Хан Г. Kernenergie, 1978, 21, 6, p.181.
43. Козлов В.Ф. Фотографическая дозиметрия ионизирующих излучений. Атомиздат, М., 1964.
44. Золин Л.С., Лебедев В.Н., Салацкая М.И. АЭ, 1962, т.13, с.467.
45. Комочков М.М., Салацкая М.И. ОИЯИ, Р16-8175, Дубна, 1974.
46. Комочков М.М., Салацкая М.И. ОИЯИ, Р16-9780, Дубна, 1976.
47. Becker K. Solid State Dosimetry. CRC Press, Cleveland, Ohio, USA, 1973.

48. Бочвар И.А. и др. Метод дозиметрии ИКС. Атомиздат, М., 1977.
49. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-9870, Дубна, 1976.
50. Архипов В.А. и др. ОИЯИ, 16-11817, Дубна, 1978.
51. Лебедев В.Н. ОИЯИ, Р-2446, Дубна, 1965.
52. Алейников В.Е., Лебедев В.Н. ОИЯИ, Р9-3393, Дубна, 1967.
53. Зайцев Л.Н. и др. Основные защиты ускорителей. Атомиздат, М., 1971.
54. Нормы радиационной безопасности /НРБ-76/. Атомиздат, М., 1978.
55. Аленицкая С.И. и др. ОИЯИ, 16-10539, Дубна, 1977.
56. Harkrog A., Lippert I. Report 265, Riso, 1972; Report 305, Riso, 1974; Report 3230 Riso, 1975.
57. Эйзенбад М. Радиоактивность внешней среды. Атомиздат, М., 1967.
58. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-6791, Дубна, 1972.
59. Золин Л.С. ОИЯИ, 2252, Дубна, 1965.
60. UCRU Report 20, 1971.
61. Радиационная безопасность. Величины, единицы, методы и приборы. Пер. с англ. под ред. И.Б.Кеирим-Маркуса. Атомиздат, М., 1974.
62. Rindi A. Health Phys., 1974, 27, p.322.
63. Голиков В.В. и др. ОИЯИ, 3-5736, Дубна, 1971.
64. Зайцев Л.Н. и др. ОИЯИ, Р-2479, Дубна, 1965; АЭ, 1966, т.20, вып.4, с.355.
65. Сычев Б.С. и др. ОИЯИ, Р-2359, Дубна, 1965; АЭ, 1966, т.20, вып.4, с.233.
66. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р9-2933, Дубна, 1966.
67. Зайцев Л.Н. и др. АЭ, 1966, т.21, №1, с.5С.
68. Алейников В.Е. и др. АЭ, 1969, т.26, вып.6, с.541.
69. Зайцев Л.Н. и др. АЭ, 1968, т.24, вып.3, с.284.
70. Зайцев Л.Н. и др. ОИЯИ, Р9-3435, Дубна, 1967; АЭ, 1968, т.24, вып.2, с.194.
71. Кимель Л.Р. и др. ОИЯИ, Р16-3514, Дубна, 1967. АЭ, 1968, т.24, вып.4, с.395.
72. Кимель Л.Р. и др. ОИЯИ, Р9-3403, Дубна, 1967.
73. Кимель Л.Р. и др. ОИЯИ, Р9-3402, Дубна, 1967.
74. Зайцев Л.Н. и др. ОИЯИ, Р16-3591, Дубна, 1967.
75. Комочков М.М., Сычев Б.С. АЭ, 1963, т.12, с.325; ОИЯИ, 1167, Дубна, 1963.
76. Комочков М.М., Сычев Б.С. ОИЯИ, Р2-3315, Дубна, 1967.
77. Сычев Б.С. ОИЯИ, Р16-3593, Дубна, 1967.
78. Сычев Б.С. ОИЯИ, Р16-4304, Дубна, 1969.
79. Сычев Б.С. ОИЯИ, Р9-3269, Дубна, 1967.
80. Соболевский Н.М. ОИЯИ, Б1-2-5458, Дубна, 1970.

81. Алейников В.Е., Крючков В.П. ОИЯИ, Р-16-8177, Дубна, 1974.
82. Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-7335, Дубна, 1973.
83. Alsmiller R.G., Jr. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1969, 74, p.213.
84. Серов А.Я., Сычев Б.С. Труды Радиотехнического института АН СССР, №9, 127, 1971.
85. Цовбун В.И. ОИЯИ, 16-7104, Дубна, 1973.
86. Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-11132, Дубна, 1977.
87. Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-7834, Дубна, 1974.
88. Цалпе Д., Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-9481, Дубна, 1976.
89. Цовбун В.И. ОИЯИ, Р16-10390, Дубна, 1977.
90. Алейников В.Е. и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", 1975, т.2, с.226. ОИЯИ, Р16-8179, Дубна, 1974.
91. Алейников В.Е. и др. АЭ, 1970, т.28, вып.5, с.438; ОИЯИ, Р16-4727, Дубна, 1969.
92. Alejnikov V.E., Komochkov M.M., Tsovboon V.I. Internat. Congress on Protection Against Accelerator and Space Radiation. IAEA, Vienna, 1973, vol.1, p.31.
93. Алейников В.Е. и др. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. IAEA, Vienna, 1973, vol.1, p.31.
94. Алейников В.Е., Гердт В.П., Комочков М.М. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.2, с.240; ОИЯИ, Р16-8176, Дубна, 1974.
95. Алейников В.Е., Гердт В.П., Комочков М.М. АЭ, 1977, т.42, вып.4, с.305; ОИЯИ, Р16-9870, Дубна, 1976.
96. Alejnikov V.E., Gerdt V.P., Komochkov M.M. In: Proc. of IVth Int. Congress IRPA, Paris, 24-30 April, 1977, p.823.
97. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-11891, Дубна, 1978.
98. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, 16-8583, Дубна, 1975.
99. Measurement and Calculation of Neutron Spectra for Irradiation of a Phantom. Technische Universitat Dresden, 05-4-77.
100. Pszona S. Experimental Determination of Dose-Equivalent and Quality Factor in a Cylindrical Phantom Irradiated with Reactor Neutrons. IAEA, Vienna, 1973.
101. Зельчинский М. и др. ОИЯИ, Р16-5383, Дубна, 1970.
102. Головачик В.Г. и др. В сб.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Атомиздат, М., 1969, вып.9, с.116.