



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

2006–21  
На правах рукописи

**Санников Александр Венедиктович**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ СПЕКТРОМЕТРИИ  
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА БОЛЬШИХ ПРОТОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ**

**01.04.23 – физика высоких энергий**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 2006

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор В.Н. Лебедев (ИФВЭ, г. Протвино).

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук, профессор Л.А.Трыков (ФЭИ, г. Обнинск), доктор физико-математических наук Г.Н.Тимошенко (ОИЯИ, г. Дубна).

Ведущая организация – Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (г. Москва).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

## Общая характеристика работы

### Актуальность проблемы

Различные методы спектрометрии нейтронного излучения широко используются на ядерно-физических установках для целей дозиметрии и защиты персонала. Необходимость их применения обусловлена широким диапазоном энергий нейтронов за биологическими защитами – от  $10^{-8}$  до 10 МэВ на реакторах и до сотен МэВ на ускорителях – и невозможностью измерения доз нейтронов с требуемой точностью во всем этом диапазоне с помощью простых дозиметрических систем.

Наиболее сложной проблемой является индивидуальная дозиметрия нейтронов, особенно после введения эффективной дозы в качестве нормируемой величины и новых операционных величин для ее оценки – амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$  для оперативного контроля и индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  для индивидуального контроля. В отличие от ранее измерявшейся максимальной эквивалентной дозы, последняя величина зависит не только от энергетического, но и от углового распределения внешнего излучения.

Задачи контроля характеристик индивидуального дозиметра нейтронов ИФВЭ на основе ядерной фотозмульсии МК-20, а также исследования чувствительности перспективных индивидуальных дозиметров за защитой протонного синхротрона ИФВЭ стимулировали разработку пассивного дозиметра-спектрометра нейтронов (ПДСН) и основанной на его использовании методики калибровки индивидуальных дозиметров нейтронов в полях рассеянного излучения в терминах  $H_p(10)$ .

Другой областью исследований, результаты которых приведены в диссертации, является применение спектрометров Боннера для измерения высокоэнергетических нейтронных спектров в опорных полях ЦЕРН и на вершине горы Цугшпитце (~3000 м). Эти работы выполнены автором во время зарубежных командировок в ЦЕРН (Женева) в 1993-94 гг. и GSF (Мюнхен) в 1995-96 гг. в рамках научной программы «Радиационная безопасность воздушных полетов», финансируемой Европейским союзом. Актуальность этой проблемы также была обусловлена концептуальными изменениями в системе дозиметрических величин и дозовых пределов, в результате которых экипажи высотных лайнеров и часто летающие пассажиры попали в категорию профессионально облучаемого персонала.

**Цель диссертационной работы** – разработка средств измерения спектральных и дозовых характеристик нейтронов в высокоэнергетических полях излучения, установление энергетических зависимостей чувствительности используемых детекторов, разработка современных программ восстановления нейтронных спектров по показаниям различных спектрометров, а также применение разработанных средств и методов для исследования характеристик полей нейтронов на больших протонных ускорителях и для калибровки в этих полях индивидуальных дозиметров нейтронов.

**Автор защищает:**

- Разработку пассивного дозиметра-спектрометра нейтронов для высокоэнергетических ускорителей и основанной на его применении методики калибровки индивидуальных дозиметров нейтронов в полях рассеянного излучения с произвольным угловым распределением.
- Результаты исследований чувствительности индивидуальных дозиметров нейтронов за защитой протонного синхротрона ИФВЭ на 70 ГэВ, явившиеся основой физического обоснования ряда новых перспективных индивидуальных дозиметров нейтронов.
- Результаты расчетов энергетических зависимостей чувствительности спектрометров Боннера на основе индиевого активационного детектора, LiI и <sup>3</sup>He-счетчиков, в том числе в области высоких энергий нейтронов до 1,5 ГэВ.
- Разработку новых программ восстановления спектров нейтронов по показаниям различных спектрометров, основанных на перспективном методе параметризации.
- Результаты измерений нейтронных спектров и дозиметрических характеристик полей излучения за защитами ускорителей ИФВЭ и ЦЕРН, а также на вершине горы Цугшпитце (ФРГ), с помощью ПДСН и спектрометров Боннера.

**Научная новизна и практическая ценность.** Разработан и внедрен в практику дозиметрических измерений на протонном синхротроне ИФВЭ пассивный дозиметр-спектрометр нейтронов. Исследованы спектры нейтронного излучения и закономерности формирования дозы нейтронов в экспериментальном зале ускорителя.

Разработанная на основе применения ПДСН методика калибровки индивидуальных дозиметров нейтронов на фантомах в полях излучения с произвольным угловым распределением позволила впервые получить большое количество экспериментальных данных по чувствительности различных типов альбедных,

трековых и комбинированных дозиметров в реальных условиях облучения персонала за защитой ускорителя.

Впервые рассчитаны энергетические зависимости чувствительности спектрометра Боннера с индиевым активационным детектором, который используется в ЦЕРН, ИФВЭ и других центрах. Полученные результаты показали, что функции чувствительности данного спектрометра сильно отличаются от рассчитанных ранее для других типов детекторов, что не позволяет использовать литературные матрицы чувствительности для этого спектрометра.

Рассчитаны функции чувствительности спектрометров Боннера с детекторами тепловых нейтронов трех типов (индиевый активационный детектор, LiI и  $^3\text{He}$ -счетчики) к нейтронам с энергиями от 20 МэВ до 1,5 ГэВ, дающие возможность расширить область применения этих спектрометров на высокоэнергетические спектры за защитой ускорителей и в атмосфере. Выполнен анализ дополнительных механизмов регистрации высокоэнергетических нейтронов при использовании детекторов активного типа и оценен их вклад в чувствительность.

Разработаны программы восстановления нейтронных спектров по показаниям различных спектрометров, в том числе универсальная программа BON95, превосходящая по основным характеристикам имеющиеся аналоги. Их отличительными особенностями являются оптимальный способ учета закономерностей формирования нейтронных спектров, объективность получаемого решения (независимость от пользователя) и корректный анализ неопределенностей.

С помощью различных методик установлены спектральные и дозиметрические характеристики нейтронного излучения в высокоэнергетических опорных полях ЦЕРН, предназначенных для калибровки перспективных для применения на борту авиалайнеров дозиметров.

Измерен спектр нейтронного излучения на вершине горы Цугшпитце (~3000 м) с помощью высокочувствительного спектрометра Боннера GSF. Полученные данные могут рассматриваться в качестве результатов базового эксперимента и уже использовались для тестирования моделей расчета формирования нейтронных спектров в атмосфере под действием космических излучений.

#### **Апробация работы и публикации**

Диссертация основана на результатах исследований, выполненных автором в период 1987-1997 гг. в Отделе радиационных исследований ИФВЭ, ЦЕРН и GSF.

Основные результаты исследований, вошедших в диссертацию, опубликованы в препринтах ИФВЭ, ОИЯИ и ЦЕРН, журналах “Атомная энергия”, “Kernenergie”, “Radiat. Prot. Dosim.” и “Nucl. Instrum. Methods”. Они также докладывались на Международных симпозиумах по физике радиационной защиты в 1987 г. (Вайнбёла, ГДР) и 1992 г. (Гауссиг, ФРГ); на Международных симпозиумах по нейтронной дозиметрии в 1992 г. (Берлин, ФРГ) и 1995 г. (Париж,

Франция); на 3-м Совещании специалистов по проблемам защиты ускорителей, мишеней и облучательных установок в 1997 г. (Сендаи, Япония).

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации – 75 страниц текста, в том числе 45 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 81 наименования.

## **Содержание работы**

**В первой главе** диссертации описан пассивный дозиметр-спектрометр нейтронов, методика восстановления нейтронных спектров и методика калибровки с помощью ПДСН индивидуальных дозиметров нейтронов на фантомах за защитой ускорителя в полях рассеянного излучения с произвольным угловым распределением. Приведены результаты измерений нейтронных спектров и чувствительности различных индивидуальных дозиметров нейтронов за защитой протонного синхротрона ИФВЭ.

Индивидуальные дозиметры нейтронов, используемые в настоящее время, имеют, как правило, значительную энергетическую зависимость чувствительности, что вносит большую неопределенность в результаты индивидуального контроля доз нейтронов. Для снижения этой погрешности используется калибровка индивидуальных дозиметров нейтронов непосредственно в местах работы персонала. Другой подход основан на применении комбинированных дозиметров, включающих два или более детектора нейтронов с различными функциями чувствительности, что позволяет оценивать жесткость спектра нейтронов и вносить поправку в показания детекторов. Этот метод более перспективен для высокоэнергетических ускорителей, где поля излучения могут быстро меняться во времени и в пространстве.

Исследования чувствительности комбинированных дозиметров за защитой протонного синхротрона ИФВЭ [3-6] показали, что основной проблемой при проведении экспериментальных исследований такого рода является мониторинг индивидуального эквивалента дозы нейтронов  $H_p(10)$ , который должен измеряться индивидуальным дозиметром. Широко используемые для этих целей дозиметры с изотропной чувствительностью не позволяют однозначно интерпретировать показания индивидуальных дозиметров, облучаемых на фантоме в полях рассеянного излучения с произвольным угловым распределением.

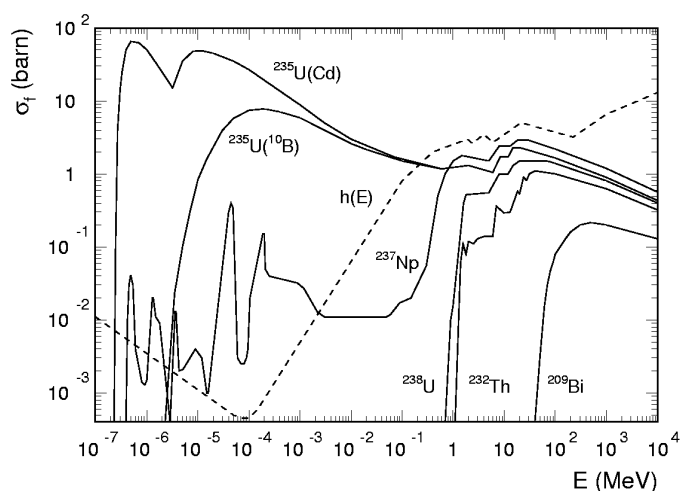
Анализ методов калибровки индивидуальных дозиметров нейтронов в полях рассеянного излучения и опыт нашей работы позволили сформулировать основ-

ные требования к средству измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронов  $H_p(10)$ , который должен:

- размещаться на фантоме вблизи индивидуальных дозиметров, иметь небольшие размеры и слабо возмущать поле излучения;
- быть пассивным для возможности проведения облучений в ряде точек за длительные промежутки времени;
- иметь достаточно высокую чувствительность и небольшую погрешность измерения дозы в нейтронных спектрах различной жесткости;
- иметь низкую чувствительность к фотонам и заряженным частицам.

Практически единственным методом, удовлетворяющим всем перечисленным требованиям, является метод, основанный на применении делящихся изотопов. Достаточно большие сечения деления тяжелых ядер, широкий диапазон энергий регистрируемых нейтронов (от тепловой до десятков ГэВ), высокая избирательность по отношению к фотонам и заряженным частицам и небольшие размеры делают его перспективным для использования не только на реакторах, но и на ускорителях.

В состав ПДСН [7] входят мишени из  $^{235}\text{U}$  в кадмиевом и борном (толщиной  $0,36 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2} \text{ }^{10}\text{B}$ ) фильтрах,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{209}\text{Bi}$ . Энергетические зависимости сечений деления используемых нуклидов приведены на рис. 1. Борные фильтры



**Рис. 1.** Энергетические зависимости сечений деления нуклидов, используемых в ПДСН, и удельного эквивалента кермы нейтронов  $h(E)$ .

изготавливались путем полимеризации эпоксидной смолы в смеси с порошком аморфного бора, обогащенного выше 90% изотопом  $^{10}\text{B}$ , в тефлоновых формах. Размеры кадмиевых и борных фильтров составляют  $\text{Ø}22 \times 5$  мм и  $\text{Ø}30 \times 15$  мм,

соответственно. Делящиеся мишени массой 1-2 мг и площадью 1 см<sup>2</sup>, нанесенные на алюминиевые подложки диаметром 19 мм, размещались в кадмиевых и борных фильтрах в контакте с лавсановыми трековыми детекторами толщиной 6 мкм.

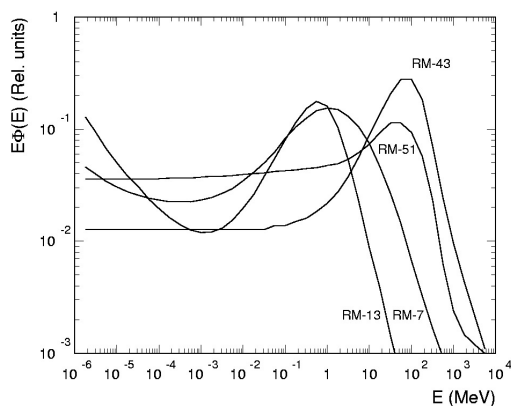
При проведении калибровки индивидуальных дозиметров в качестве фантомов использовались сферические полиэтиленовые замедлители радиационных мониторов (РМ) диаметром 25,4 см, входящих в состав автоматизированной системы радиационного контроля ИФВЭ. Индивидуальные дозиметры и ПДСН размещались на фантомах со стороны предполагаемого максимума интенсивности излучения. Показания ПДСН интерпретировались в терминах эквивалента кермы нейтронов (рис. 1) для исключения двойного учета вклада ( $n, \gamma$ )-реакций в фантоме, измеряемого индивидуальным дозиметром фотонов [8]. Для восстановления нейтронных спектров разработана программа UNFOLD, в которой синтезированы метод параметризации, используемый при поиске начального решения, и метод итераций. Неопределенности полученного спектра и интегральных величин оцениваются методом вариации экспериментальных данных.

Измерения проводились за верхней и боковой защитами экспериментального зала протонного синхротрона ИФВЭ на 70 ГэВ. Результаты измерений [7] показали, что наиболее интенсивным источником нейтронного излучения в экспериментальном зале является участок верхней защиты вблизи РМ-43 (восточная часть зала), что связано с близким расположением основных внутренних мишеней в кольцевом зале ускорителя. С удалением от точки РМ-43 к РМ-51 (вблизи перехода через защиту) мощность дозы нейтронов за верхней защитой снижается более чем в 100 раз.

За боковой защитой также наблюдается небольшое, но систематическое уменьшение мощности дозы нейтронов с удалением от РМ-43. Это говорит о том, что основным компонентом нейтронного излучения в большинстве точек экспериментального зала являются рассеянные нейтроны, приходящие с небольшого участка верхней защиты. В зонах каналов вывода вторичных частиц ситуация, как правило, более сложная и зависит от режима работы каналов.

Характерные спектры нейтронов, измеренные ПДСН за верхней и боковой защитой ускорителя, представлены на рис. 2. Наиболее жесткий спектр с максимумом при энергии около 80 МэВ и относительно малым вкладом промежуточных нейтронов наблюдается в точке РМ-43. Спектр в точке РМ-51 иллюстрирует характер изменения нейтронных спектров за верхней защитой при уменьшении флюенса нерассеянных нейтронов, выходящих из защиты вблизи точки измерения, и увеличении вклада рассеянного излучения. В качестве характерного спектра нейтронов за боковой защитой представлен спектр, измеренный на РМ-7. Наиболее мягкий спектр нейтронов обнаружен в точке РМ-13, вблизи транспортного лабиринта в кольцевой зал ускорителя, где преобладают многократно рассеянные нейтроны.





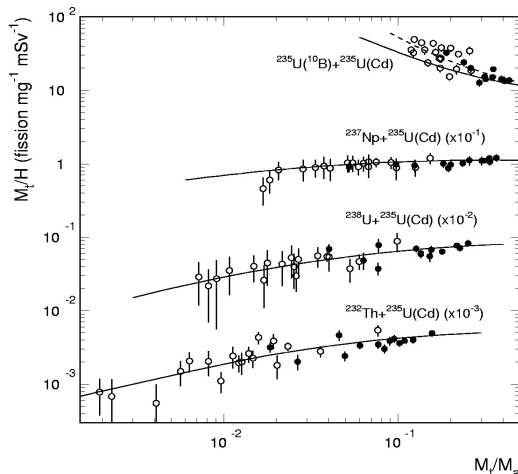
**Рис. 2.** Спектры нейтронов, измеренные ПДСН за защитой протонного синхротрона ИФВЭ.

ПДСН использовался для калибровки и исследования чувствительности индивидуальных дозиметров нейтронов и перспективных детекторов за защитой протонного синхротрона ИФВЭ в 1988-1993 гг. В каждом сеансе индивидуальные дозиметры и ПДСН облучались в десяти точках экспериментального зала с достаточно большой мощностью дозы нейтронов. За время измерений было получено большое количество экспериментальных данных по чувствительности различных детекторов нейтронов в полях излучения ускорителя и

выполнено экспериментальное обоснование ряда новых индивидуальных дозиметров, в том числе наиболее перспективных – комбинированных альбедо-трековых дозиметров.

На рис. 3 показаны экспериментальные данные [3-6] за защитой ускорителя для четырех типов комбинированных дозиметров на основе делящихся мишеней в сравнении с расчетными зависимостями [1-2]. Детектор  $^{235}\text{U}(\text{Cd})$  выполняет здесь роль альбедного детектора, регистрирующего низкоэнергетическую часть спектра нейтронов, остальные детекторы – роль трекового (порогового) детектора. Значения чувствительности представлены в зависимости от отношения показаний трекового и альбедного детекторов  $M_t / M_a$ , которое является параметром жесткости спектра, определяющим величину поправочного коэффициента для одного из детекторов комбинированного дозиметра. В целом расчетные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными, за исключением дозиметра  $^{235}\text{U}(^{10}\text{B}) + ^{235}\text{U}(\text{Cd})$ . Причиной расхождений в этом случае являются отличия использованных нами литературных спектров нейтронов от реальных спектров в области промежуточных энергий, поэтому в дальнейшем мы использовали экспериментальную зависимость для данного комбинированного дозиметра (штриховая кривая).

Недостатками дозиметров на основе  $^{238}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$  является фон спонтанного деления. Применимость последнего в индивидуальном контроле ограничена также из-за  $\gamma$ -радиоактивности этого нуклида.



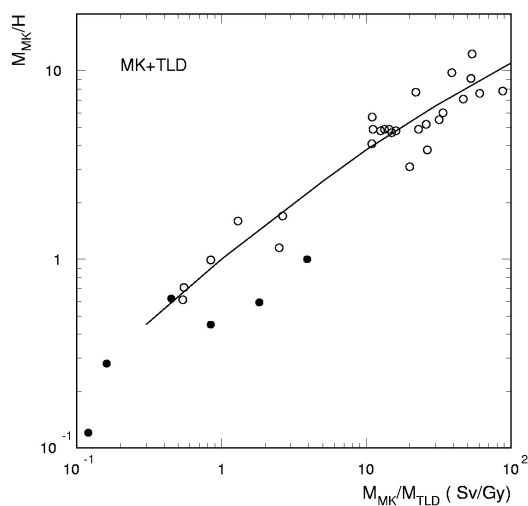
**Рис. 3.** Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей чувствительности комбинированных дозиметров нейтронов на основе делящихся мишеней. Кривые – расчет; черные кружки – верхняя защита; светлые – боковая.

применение ограничено из-за наличия в дозиметрах радиоактивных и высокотоксичных веществ.

На рис. 4 приведены экспериментальные значения дозовой чувствительности комбинированного дозиметра на основе ядерной фотоэмульсии МК-20 и альбедного дозиметра за защитой ускорителя и в опорных полях нейтронов ИФВЭ. Пленка МК-20 до настоящего времени применяется в индивидуальном дозиметрическом контроле в ИФВЭ. Альбедный дозиметр, для которого приводятся экспериментальные данные, является одним из исследованных нами вариантов и представляет собой две пары ТЛД  ${}^6\text{LiF}$  и  ${}^7\text{LiF}$  ДТГ-4 под полиэтиленовым замедлителем толщиной 10 мм, покрытым сверху кадмием. Несмотря на то, что диапазон дозовой чувствительности МК-20 за защитой ускорителя составляет более порядка, при использовании ее в составе комбинированного дозиметра отклонение экспериментальных данных от градуировочной зависимости для ускорительных спектров составляет не более 30%.

Описанный выше альбедный дозиметр нейтронов является прототипом разработанного позднее автором индивидуального дозиметра смешанного излучения ДВГН-01. Применение полиэтиленового замедлителя оказалось оптимальным способом повышения чувствительности дозиметра к быстрым нейтронам и понижения чувствительности к тепловым и промежуточным нейтронам. Конструкция была оптимизирована для возможности одновременного измерения с высокой точностью доз фотонов и заряженных частиц. С этой целью вместо кад-

Наиболее перспективным является впервые предложенный автором вариант комбинированного дозиметра  ${}^{235}\text{U}({}^{10}\text{B}) + {}^{235}\text{U}(\text{Cd})$ . Он имеет наименьшую погрешность измерения доз менее 4 мЗв среди рассмотренных дозиметров. Его преимущества еще более возрастают при измерении доз нейтронов с мягкими спектрами, характерными для условий работы персонала. Комбинированные дозиметры  ${}^{235}\text{U}({}^{10}\text{B}) + {}^{235}\text{U}(\text{Cd})$  и  ${}^{232}\text{Th} + {}^{235}\text{U}(\text{Cd})$  используются в настоящее время в ограниченном объеме на атомных ледоколах, атомных подводных лодках и предприятиях ядерного топливного цикла. Их более широкое при-



**Рис. 4.** Дозовая чувствительность пленки МК-20 в зависимости от отношения показаний МК-20 и альбедного дозиметра. Черные кружки – опорные поля; светлые кружки – ускорительные поля; кривая – градуировочная зависимость для ускорительных спектров.

мия используется тонкий борный фильтр для поглощения внешних тепловых нейтронов, для выравнивания энергетической зависимости чувствительности к фотонам применен тонкий медный фильтр, а суммарная толщина тканеэквивалентного вещества над детекторами строго соответствует регламентированному значению  $1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ .

Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01 в составе автоматизированного комплекса индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-301, в разработке которого также принимал участие автор, в течение нескольких лет успешно эксплуатируется на ряде предприятий Росатома и уже является наиболее массовым в РФ индивидуальным дозиметром нейтронов. В 2004 г. ДВГН-

01 был введен в эксплуатацию в ИФВЭ, где дозы нейтронов определяются по методике комбинированного дозиметра МК-20+ДВГН, при обосновании которой широко использовались результаты измерений с помощью ПДСН. Разработка ДВГН-01 в составе комплекса работ «Разработка научных и практических основ создания и организация серийного производства комплекса средств термoluminesцентной индивидуальной дозиметрии внешнего облучения персонала и населения» удостоена премии правительства РФ за 2005 г.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы применения индиевого спектрометра Боннера (ИСБ) для исследования спектральных и дозовых характеристик высокоэнергетических опорных полей ЦЕРН. Выполнены расчеты функций чувствительности спектрометра в диапазоне энергий нейтронов от  $10^{-8}$  до 20 МэВ и оценены на основе литературных данных в области высоких энергий до 1 ГэВ. Разработана программа восстановления нейтронных спектров по показаниям спектрометра Боннера BON94. Представлены результаты измерений спектров опорных полей, а также флюенса и амбиентного эквивалента дозы нейтронов в сравнении с расчетными данными и экспериментальными данными, полученными

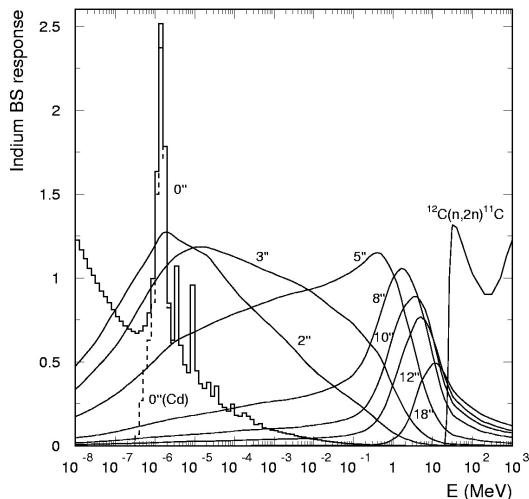
ми с помощью тканеэквивалентных пропорциональных счетчиков HANDI и REM-500.

Высокоэнергетические опорные поля CERN [10] были введены в действие в 1993 г. и продолжают использоваться до настоящего времени при финансовой поддержке Европейского союза в рамках научной программы “Радиационная безопасность воздушных полетов”. Данная программа была принята после выхода в свет Публикации МКРЗ № 60, в которой были значительно снижены пределы доз для населения. В результате этих изменений экипажи высотных лайнеров оказались в категории профессионально облучаемого персонала, для которого необходимо проводить оперативный и индивидуальный контроль доз облучения.

Опорные поля созданы на базе канала Н6 протонного синхротрона SPS. Пучок вторичных заряженных частиц (протоны и пионы) с импульсом 205 ГэВ/с направлялся магнитной оптикой канала на медную мишень размерами  $\varnothing 7 \times 50$  см. Точки измерения находились под углами около  $90^\circ$  к мишени за верхней и боковой бетонными защитами толщиной 80 см и за верхней стальной защитой толщиной 40 см. В качестве монитора использовалась прецизионная ионизационная камера (PIC), размещенная в пучке на удалении от мишени. Мощность дозы в точках измерения могла меняться от нескольких мкЗв/час до нескольких мЗв/час с помощью системы коллиматоров канала Н6. Все характеристики режимов работы канала и показания монитора записывались в режиме on-line на диск компьютера.

В экспериментах в опорных полях CERN в 1993-94 гг. принимали участие более 20 Европейских лабораторий с различными дозиметрами и спектрометрами активного и пассивного типа. Целью измерений была калибровка дозиметров в полях излучения, характерных для высотных полетов (~10 км), и выбор перспективных дозиметров для использования на борту авиалайнеров. В круг задач автора входила характеристика опорных полей с помощью двух различных методов: исследование спектральных (в терминах линейной энергии) и дозовых характеристик смешанного излучения тканеэквивалентными пропорциональными счетчиками HANDI и REM-500, а также измерение нейтронных спектров спектрометром Боннера (СБ).

Индиевый спектрометр Боннера ЦЕРН [11,12,14] состоит из индиевых активационных детекторов, размещаемых внутри сферических полиэтиленовых замедлителей диаметрами 2", 3", 5", 8", 10", 12" и 18". Для измерения флюенса тепловых нейтронов используется также голая индиевая фольга и фольга, покрытая кадмием 1 мм толщиной. Индиевые детекторы имеют форму сферических оболочек с внешним диаметром 20 мм и весом 2 г, окружающих полиэтиленовые сферы диаметром 19,5 мм. Детекторы помещаются в сферы Боннера таким образом, что в конструкции отсутствуют воздушные зазоры и она является сферически симметричной.



**Рис. 5.** Матрица чувствительности индиевого спектрометра Боннера ЦЕРН.

использовалась оценка литературных данных [14]. Чувствительность и разрешение СБ при этих энергиях малы, поэтому в ИСБ используется также активационный детектор высокоэнергетических нейтронов на основе пластикового сцинтиллятора, регистрирующий нейтроны по реакции  $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ . Матрица чувствительности детекторов ИСБ показана на рис. 5. Результаты показывают, что функции чувствительности «голой» индиевой фольги и малых сфер сильно отличаются от соответствующих зависимостей для обычно используемых детекторов тепловых нейтронов из-за наличия мощного резонанса в сечении реакции  $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ .

При разработке программы восстановления нейтронных спектров по показаниям спектрометров Боннера был выполнен критический анализ существующих методов и сформулированы основные требования к подобным программам:

- точность восстановления спектров;
- гладкость получаемого решения;
- максимально возможное и оптимальное использование априорной информации о форме нейтронного спектра;
- независимость программы восстановления от пользователя и воспроизводимость результатов;
- корректная оценка неопределенностей.

Программа BON94 [13] создана с учетом этих требований на основе методов параметризации и итераций. При оценке неопределенностей используется метод

Нейтроны регистрируются по реакции  $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ , где  $^{116\text{m}}\text{In}$  имеет период полураспада 54,1 мин. Фотоны с энергиями 1,09 и 1,29 МэВ избирательно регистрируются сцинтилляционным спектрометром NaI типа «колодец». Результатами измерений являются скорости счета в насыщении, которые определяются с учетом времени облучения, времени распада до начала обсчета и времени обсчета.

Функции чувствительности ИСБ рассчитывались по разработанной автором программе FANEUT в диапазоне энергий от тепловой до 20 МэВ [12].

В области высоких энергий ис-

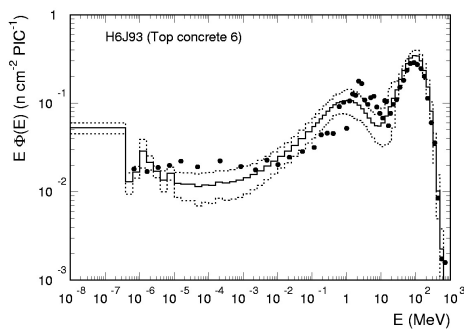
вариации экспериментальных данных в пределах погрешностей измерений и погрешностей функций чувствительности.

Результаты измерений [14] в трех точках опорных полей ЦЕРН приведены в табл. 1. Экспериментальные погрешности в большинстве случаев малы. Определяющую роль в неопределенностях восстановленных спектров играют погрешности функций чувствительности ИСБ (5% при энергиях ниже 20 МэВ и 15% при высоких энергиях) и сечений активации углерода (15%).

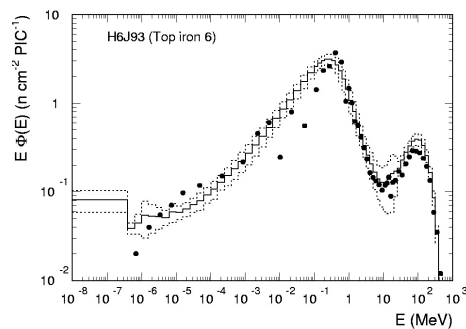
**Таблица 1.** Результаты измерений в опорных полях ЦЕРН индиевым СБ (скорость счета в насыщении) и углеродным детектором (активность в насыщении), нормированные на показания монитора (PIC).

Детектор	Верхняя бетонная защита	Верхняя стальная защита	Боковая бетонная защита
0"(Cd)	0,019±9,6%	0,100±2,9%	0,029±5,5%
0"	0,066±3,0%	0,169±2,1%	0,137±1,9%
2"	0,071±2,7%	0,755±0,8%	0,137±1,7%
3"	0,108±3,2%	1,838±0,5%	0,188±1,4%
5"	0,147±2,0%	2,850±0,4%	0,222±1,4%
8"	0,117±2,1%	1,923±0,5%	0,180±1,6%
10"	0,098±2,2%	0,884±0,8%	0,148±2,8%
12"	0,078±2,7%	0,517±1,0%	0,128±1,9%
18"	0,055±2,7%	0,116±2,3%	0,073±3,0%
<sup>11</sup> C	0,75±2,0%	0,86±2,0%	0,84±1,5%

Измеренные спектры нейтронов за верхними бетонной и стальной защитами показаны на рис. 6-7 в сравнении с результатами расчетов по программе FLUKA92. В целом наблюдается неплохое согласие в обоих случаях. Различие между измеренным и расчетным спектрами не выходит, как правило, за пределы двух среднеквадратичных отклонений восстановленного спектра, за исключением резких пиков и провалов в расчетных спектрах. Программа BON94 дает гладкие решения в широком диапазоне энергий, за исключением области 1-10 эВ, где проявляются нерегулярности в функциях чувствительности голого и кадмированного индиевого детектора.



**Рис. 6.** Спектр нейтронов в опорном поле ЦЕРН за верхней бетонной защитой, измеренный ИСБ, в сравнении с расчетным.



**Рис. 7.** Спектр нейтронов в опорном поле ЦЕРН за верхней стальной защитой, измеренный ИСБ, в сравнении с расчетным.

Результаты измерений интегральных дозиметрических величин представлены в табл. 2. Можно видеть, что программа BON94 дает реалистическую оценку неопределенностей, которые варьируются от 5-6% для флюенса нейтронов до 7-8% для амбиентного эквивалента дозы. В табл. 3 приведено сравнение с результатами измерений амбиентного эквивалента дозы нейтронов с помощью тканеэквивалентных пропорциональных счетчиков HANDI и REM-500, выполненных автором в июльском 1993 г. и майском 1994 г. сеансах. Принимая во внимание экспериментальные ошибки как в измерениях с пропорциональными счетчиками, которые достигают 10%, так и в измерениях с ИСБ, согласие следует признать хорошим, несмотря на применение принципиально различных методов. Эквиваленты доз нейтронов, рассчитанные методом Монте Карло по программе FLUKA92, также близки к экспериментальным данным.

**Таблица 2.** Интегральные дозиметрические величины опорных полей ЦЕРН, измеренные индиевым СБ и углеродным детектором.

Величина	Верхняя бетонная защита	Верхняя стальная защита	Боковая бетонная защита
$\bar{E}$ (>0,4 эВ) (МэВ)	$52,1 \pm 7,0$	$6,27 \pm 0,83$	$42,3 \pm 5,5$
$\Phi$ (n/cm <sup>2</sup> /PIC)	$1,50 \pm 0,09$	$13,2 \pm 0,7$	$2,24 \pm 0,12$
$H^*(10)$ (10 <sup>-10</sup> Зв/PIC)	$3,63 \pm 0,28$	$18,6 \pm 1,5$	$4,93 \pm 0,35$
$h^*(10)$ (10 <sup>-10</sup> Зв см <sup>2</sup> )	$2,42 \pm 0,13$	$1,41 \pm 0,13$	$2,20 \pm 0,12$

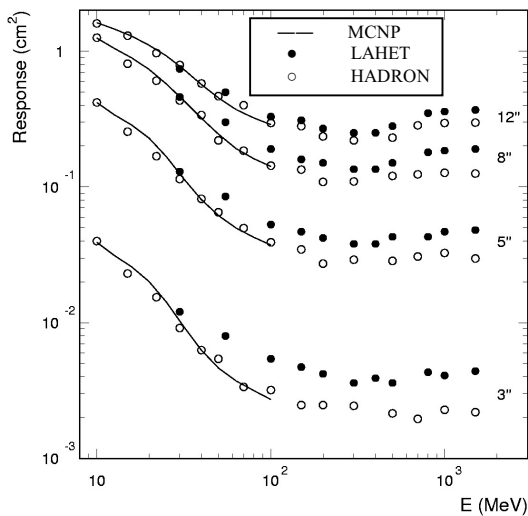
**Таблица 3.** Сравнение расчетных (FLUKA92) и измеренных различными методами значений амбиентного эквивалента дозы нейтронов  $H^*(10)$  ( $10^{-10}$  Зв/ПЧ).

Метод	Верхняя бетонная защита	Верхняя стальная защита	Боковая бетонная защита
ИСБ	$3,63 \pm 0,28$	$18,6 \pm 1,5$	$4,93 \pm 0,35$
FLUKA92	3,48	17,5	4,98
HANDI (J93)	3,94	16,0	5,33
HANDI (M94)	4,13	16,2	
REM-500 (M94)	3,88	18,5	

Полученные с помощью ИСБ и тканезквивалентных пропорциональных счетчиков результаты в рамках программы характеристики опорных полей ЦЕРН явились основой для интерпретации показаний различных дозиметров активного и пассивного типа, исследовавшихся в этих полях.

**В третьей главе** представлены результаты расчетных исследований энергетических зависимостей чувствительности спектрометров Боннера к высокоэнергетическим нейтронам. Исследовались СБ с детекторами тепловых нейтронов трех типов (индиевый активационный детектор,  $^3\text{He}$  и  $\text{LiI}$  счетчики).

В расчетах [15] использовались три современные программы, реализующие метод Монте Карло: MCNP4A, LANET и HADRON. Последняя программа разработана автором совместно с Е.Н. Савицкой. Результаты сравнения функций чувствительности четырех сфер  $^3\text{He}$  СБ, рассчитанных по этим программам, показаны на рис.8. Функции чувствительности, рассчитанные по программам MCNP и HADRON, согласуются друг с другом в пределах 15% в диапазоне энергий 10-100 МэВ. Результаты расчетов по программе LANET лежат значительно выше, как правило. С учетом этих результатов дальнейшие расчеты проводились по программе HADRON.



**Рис. 8.** Сравнение функций чувствительности  $^3\text{He}$  СБ, рассчитанных по программам MCNP, LANET и HADRON.



Высокочувствительный спектрометр Боннера GSF основан на сферическом пропорциональном  $^3\text{He}$ -счетчике SP90 производства Centronic Ltd. (Великобритания). Счетчик диаметром 32 мм наполнен газом  $^3\text{He}$  до давления 172 кПа и криптоном до 100 кПа. Стенка счетчика изготовлена из нержавеющей стали толщиной 0,51 мм. Нейтроны регистрируются по реакции  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  с  $Q = 0,765$  МэВ. Для измерений в высокоэнергетических полях излучения СБ GSF был дополнен 9" сферой со свинцовой прослойкой между диаметрами 3" и 4". Полная матрица чувствительности спектрометра, рассчитанная по программам MCNP (ниже 10 МэВ) и HADRON, показана на рис. 9.

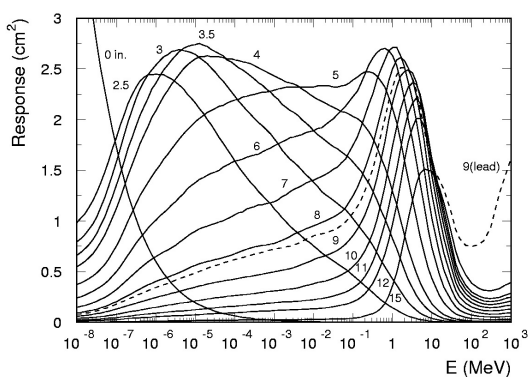


Рис. 9. Матрица чувствительности  $^3\text{He}$  спектрометра Боннера GSF.

Сравнение этих данных с функциями чувствительности СБ на основе широко используемого детектора LiI (4x4 мм) показало, что чувствительность  $^3\text{He}$  СБ примерно на порядок выше. Рассчитанные спектры событий от высокоэнергетических нейтронов в этих счетчиках указывают также на проблемы при интерпретации аппаратного спектра детектора LiI и вычитании фона, несущественные для  $^3\text{He}$ -счетчика.

Программа восстановления нейтронных спектров по показаниям СБ BON95 является модифицированной версией программы BON94, основанной на методе параметризации. При разработке программы была поставлена задача сделать ее универсальной, исключив выделение отдельных детекторов из общей схемы решения обратной задачи. Кроме того, в низкоэнергетической области добавлен компонент эпитепловых нейтронов для лучшего описания мягких спектров многократно рассеянных нейтронов и внесен ряд других изменений. Программа реализует решение системы уравнений

$$M_i = \sum_{j=1}^n A_i(E_j)\Phi(E_j) + \Delta M_i, \quad i=1, \dots, m,$$

где  $M_i$  – показания сфер Боннера;  $\Delta M_i$  – неопределенности, включающие погрешности результатов измерений и функций чувствительности  $A_i(E_j)$ ;  $\Phi(E_j)$  – искомый спектр нейтронов.

Нейтронные спектры параметризуются линейной суперпозицией максвелловского пика тепловых нейтронов,  $E^{-b}$  – хвоста эпитепловых нейтронов,

$1/E$  – хвоста промежуточных нейтронов, пика быстрых нейтронов и пика каскадных нейтронов (для высокоэнергетических спектров):

$$E\Phi_p(E) = a_1 F_{th}(E) + a_2 F_{epi}(E) + a_3 F_{int}(E) + a_4 F_f(E) + a_5 F_h(E), \text{ где}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{th} = X_{th}^{3/2} e^{-X_{th}}, \quad X_{th} = E / T_{th} \\ F_{epi} = E^{-b} (1 - e^{-X_{th}}) e^{-X_f} \\ F_{int} = (1 - e^{-X_{th}}) e^{-X_f} \\ F_f = \begin{cases} X_f^{3/2} e^{-X_f}, & X_f = (E / T_f)^c \\ X_f^c / (1 + X_f^{c+1,3}), & X_f = E / T_f \end{cases} \\ F_h = X_h^{1,7} e^{-X_h}, \quad X_h = E / T_h \end{array} \right.$$

Пик быстрых нейтронов  $F_f$  описывается квазимаксвелловским распределением в случае низкоэнергетических спектров. Для высокоэнергетических спектров используется нижнее выражение, лучше описывающее ускорительные спектры нейтронов. Экспоненциальные факторы в выражениях для  $F_{epi}$  и  $F_{int}$  включены для подавления этих компонентов в областях тепловых и быстрых нейтронов. Температуры теплового и каскадного пиков выбраны равными 0,035 эВ и 55 МэВ, соответственно.

Свободные параметры  $b$ ,  $c$  и  $T_f$ , описывающие наклон эпитеплового хвоста, ширину и температуру пика быстрых нейтронов, меняются на заданной сетке шаг за шагом для поиска оптимального решения, удовлетворяющего условию:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{M_i - M_i^P}{\Delta M_i^{\text{exp}}} \right)^2 = \min, \text{ где}$$

$$M_i^P = \sum_{j=1}^n A_j(E_j) \Phi_p(E_j).$$

Значения коэффициентов  $a_k$  для каждой комбинации свободных параметров также находятся методом наименьших квадратов. Уравнение для  $\chi^2$  благодаря линеаризации спектров преобразуется в систему линейных уравнений относительно неизвестных  $a_k$ :

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^m (B_{ik} - C_{ik} a_k) = 0,$$

которая имеет единственное решение, так как компоненты параметризованного спектра линейно независимы.

Оптимальный спектр  $\Phi_p(E_j)$ , соответствующий абсолютному минимуму  $\chi^2$ , используется далее в качестве начального спектра в итерационной процедуре с критерием окончания  $\chi^2 < 1$ . Было найдено, что алгоритм параметризации обеспечивает хорошее решение в большинстве случаев (обычно  $\chi^2 \ll 1$ , если экспериментальные ошибки не слишком малы) и итерационная процедура дает видимое улучшение лишь в некоторых случаях сложных спектров. Полученный спектр  $\Phi_0(E_j)$  используется для расчета полных неопределенностей  $\Delta M_i$ :

$$\Delta M_i = \sqrt{(\Delta M_i^{\text{exp}})^2 + \left(\sum_{j=1}^n \Delta A_i(E_j) \Phi_0(E_j)\right)^2}.$$

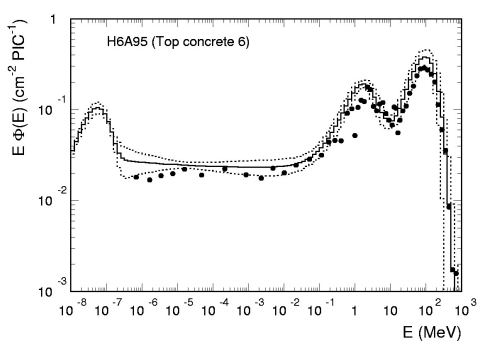
Описанная процедура поиска спектра  $\Phi_p(E_j)$  выполняется для  $N$  различных комбинаций показаний спектрометра:  $M_i' = M_i + \xi \cdot \Delta M_i$ , где  $\xi$  – случайное число с нормальным распределением. В результате мы получаем  $N$  различных нейтронных спектров (стандартное значение  $N=25$ ), по которым определяются средние значения и неопределенности спектра и различных функционалов.

Спектрометр Боннера GSF использовался в измерениях спектров нейтронов опорных полей ЦЕРН в августовском сеансе 1995 г., а также спектра космических нейтронов на вершине горы Цугшпитце (~3000 м). Все измерения проводились в режиме записи амплитудных спектров для контроля и вычитания в необходимых случаях фона. При измерениях на горе Цугшпитце сферы Боннера размещались в алюминиевом контейнере, в котором поддерживалась постоянная температура  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ . В качестве монитора использовалась 5" сфера. Время измерения каждой сферой выбиралось таким, чтобы статистическая ошибка была менее 2,5%. В результате полное время измерений составило 144 часа.

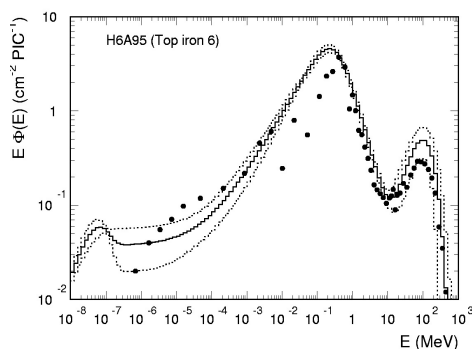
Амплитудные спектры  $^3\text{He}$ -счетчика в измерениях в ЦЕРН не содержат фона в каналах выше 60-го (начало плато) и измерены с большой статистикой (статистические ошибки во всех случаях менее 1%). В случае измерений космического спектра статистика была значительно хуже и в нескольких измерениях обнаружен большой фон в первых 200 каналах. Полное число  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  реакций было найдено для этих спектров по числу импульсов в каналах выше 250-го (под пиком), умноженному на среднее отношение этого интеграла к полному числу импульсов, рассчитанное по спектрам без фона. Возможной причиной больших фонов является излучение мощной радиостанции, находящейся на горе Цугшпитце. Другой проблемой являлись заметные изменения давления воздуха во время измерений. Поправочный коэффициент  $k_p$  на изменение давления

рассчитывался по результатам измерений давления в национальной метеорологической лаборатории в Киле, которые хорошо коррелировали с показаниями монитора (сфера 5").

Измеренные нейтронные спектры [17] за верхними бетонной и стальной защитами опорных полей ЦЕРН показаны на рис. 10 и 11. В целом спектры согласуются по форме с результатами расчетов и предыдущих измерений с помощью индиевого СБ, однако наблюдаются небольшие систематические различия. В табл. 4 измеренные дозиметрические величины сравниваются с результатами расчета и других измерений, выполненных  $^3\text{He}$  СБ (РТВ, Брауншвейг), индиевым СБ, тканеэквивалентными пропорциональными счетчиками HANDI и REM-500. Хорошее согласие расчетных и измеренных разными методами эквивалентов дозы нейтронов, полученное ранее для методик ЦЕРН, не подтверждается результатами измерений с помощью СБ РТВ и GSF, которые согласуются друг с другом в среднем в пределах 7%.



**Рис. 10.** Спектр нейтронов в опорном поле ЦЕРН за верхней бетонной защитой, измеренный СБ GSF, в сравнении с расчетным.



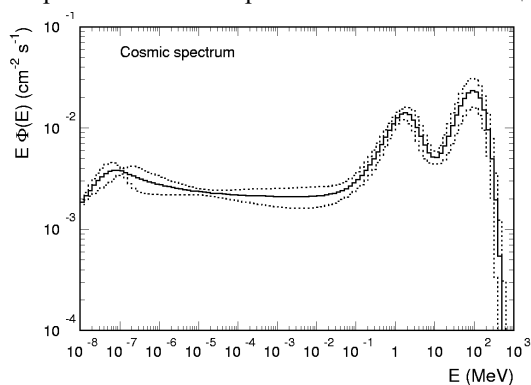
**Рис. 11.** Спектр нейтронов в опорном поле ЦЕРН за верхней стальной защитой, измеренный СБ GSF, в сравнении с расчетным.

Расхождения результатов измерений GSF и ЦЕРН имеют систематический характер и составляют более 20% по флюенсу и AMBIENTному эквиваленту дозы нейтронов. Причиной этих различий, как было выяснено позднее, является неучтенный вклад рассеянного излучения в градуировочном поле ЦЕРН на основе радионуклидного источника  $^{238}\text{Pu-Be}$ . Все экспериментальные методики ЦЕРН градуировались в этом поле, поэтому согласие между ними не удивительно. После введения поправки эти данные были также приведены к согласованию с результатами РТВ и GSF (после завершения автором работы в GSF).

**Таблица 4.** Сравнение измеренных и расчетных интегральных дозиметрических величин в опорных полях ЦЕРН

Верхняя бетонная защита	${}^3\text{He}$ СБ(GSF)	${}^3\text{He}$ СБ(РТВ)	In СБ(ЦЕРН)	FLUKA	HANDI	REM
$\bar{E}$ (МэВ)	46,5 ± 12,6		52,1			
$\Phi$ (см <sup>-2</sup> РИС <sup>-1</sup> )	1,85 ± 0,12	1,67	1,50			
$H^*(10)$ (10 <sup>-10</sup> Зв РИС <sup>-1</sup> )	4,80 ± 0,43	4,48	3,63	3,48	4,03	3,88
Верхняя стальная защита						
$\bar{E}$ (МэВ)	5,89 ± 2,78		6,27			
$\Phi$ (см <sup>-2</sup> РИС <sup>-1</sup> )	17,5 ± 0,4	16,7	13,2			
$H^*(10)$ (10 <sup>-10</sup> Зв РИС <sup>-1</sup> )	25,4 ± 1,0	22,5	18,6	17,5	16,1	18,5
Боковая бетонная защита						
$\bar{E}$ (МэВ)	41,3 ± 11,6		42,3			
$\Phi$ (см <sup>-2</sup> РИС <sup>-1</sup> )	2,73 ± 0,10	2,62	2,24			
$H^*(10)$ (10 <sup>-10</sup> Зв РИС <sup>-1</sup> )	6,25 ± 0,58	6,11	4,93	4,98	5,33	

Результаты восстановления спектра нейтронов на вершине горы Цугшпитце [16] показаны на рис. 12 и в табл. 5. Расчеты проводились с двумя наборами экспериментальных данных: без поправки и с поправкой на изменение давления воздуха во время измерений. Различия между двумя спектрами и интегральными величинами заметны, но они находятся в пределах неопределенностей. Как и ожидалось, спектр космических нейтронов подобен высокоэнергетическим ускорительным спектрам за бетонными защитами (рис. 10), за исключением



**Рис. 12.** Космический спектр нейтронов на вершине горы Цугшпитце, измеренный СБ GSF.

области тепловых нейтронов. Он также качественно согласуется с результатом расчета, выполненного для условий эксперимента по программе FLUKA.

**Таблица 5.** Интегральные дозиметрические величины космического спектра нейтронов, измеренного на вершине горы Цугшпитце.

	$\bar{E}$ (МэВ)	$\Phi$ (см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	$H^*(10)$ (10 <sup>-11</sup> Зв с <sup>-1</sup> )
Без поправки на давление	39,7 ± 8,4	0,128 ± 0,012	3,18 ± 0,45
С поправкой	37,8 ± 13,8	0,126 ± 0,013	2,99 ± 0,43

**В заключении** сформулированы следующие выводы:

- Пассивный дозиметр-спектрометр нейтронов является надежным и удобным средством измерения спектральных и дозовых характеристик полей нейтронного излучения за защитами ускорителей. Его особенности дают возможность измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронов непосредственно на фантоме, вблизи индивидуальных дозиметров, то есть корректно учитывать как экранирующие свойства фантома, так и вклад рассеянного излучения от фантома, независимо от углового распределения внешнего излучения.
- Программы переноса низкоэнергетических нейтронов FANEUT и высокоэнергетических адронов HADRON, успешно применявшиеся ранее в расчетах функций чувствительности различных детекторов, дозовых характеристик адронов и т.д., показали высокую достоверность результатов и в задачах установления энергетических зависимостей чувствительности спектрометров Боннера в широком диапазоне энергий нейтронов.
- Разработанные программы восстановления нейтронных спектров по показаниям различных спектрометров превосходят существующие аналоги по основным характеристикам. Наиболее важным их преимуществом является использование физически обоснованной информации о характерных особенностях нейтронных спектров и введение ее в алгоритм решения оптимальным путем. Отметим также объективность результатов, их воспроизводимость и корректный анализ неопределенностей.
- Результаты измерений с помощью различных методик позволили установить спектральные и дозовые характеристики нейтронного излучения в высокоэнергетических опорных полях ЦЕРН, необходимые для решения задач радиационной безопасности воздушных полетов. В рамках данной проблемы выполнены также измерения космического спектра нейтронов, результаты которых подтверждают вывод о подобии нейтронных спектров в атмосфере и за бетонными защитами опорных полей ЦЕРН. Они важны также для тестирования моделей расчета транспорта высокоэнергетических адронов в атмосфере.

## Список литературы

1. V.E.Borodin, V.T.Golovachik, E.P.Korshunova, V.N.Lebedev, **A.V.Sannikov** and E.G.Spirov. Response of albedo and fission track detectors to neutrons in the energy range from thermal to 20 MeV. *Kernenergie* **31**, 267 (1988).
2. A.M.Biskupchuk, V.E.Borodin, V.T.Golovachik, E.P.Korshunova, V.N.Lebedev and **A.V.Sannikov**. Interpretation of the readings of combined albedo-track personnel neutron dosimeters in the terms of dose equivalent. *Kernenergie* **30**, 419 (1987).
3. В.Е.Бородин, И.Б.Воробьев, Е.П.Коршунова, А.С.Кривохатский, В.Н.Лебедев, В.А.Николаев, Т.С.Потапова, **А.В.Санников**. Исследование чувствительности комбинированных альbedo-трековых индивидуальных дозиметров нейтронов за защитой протонного синхротрона ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 89-60, Серпухов, 1989.
4. **A.V.Sannikov**, I.B.Vorob'ev, E.P.Korshunova, V.A.Nikolaev. Response of combined albedo-track neutron personnel dosimeters behind IHEP proton synchrotron shielding. IHEP Preprint 89-211, Serpukhov, 1989.
5. В.Е.Бородин, И.Б.Воробьев, Е.П.Коршунова, А.С.Кривохатский, В.Н.Лебедев, В.А.Николаев, Т.С.Потапова, **А.В.Санников**. Дозиметрические характеристики нейтронных трековых детекторов применительно к высокоэнергетическим ускорителям. *АЭ* **69**, 167 (1990).
6. В.Е.Бородин, И.Б.Воробьев, Е.П.Коршунова, В.Н.Лебедев, В.А.Николаев, **А.В.Санников**. Чувствительность комбинированных альbedo-трековых индивидуальных дозиметров нейтронов за защитой протонного синхротрона ИФВЭ. *АЭ* **69**, 171 (1990).
7. **А.В.Санников**. Пассивный дозиметр-спектрометр нейтронов для высокоэнергетических ускорителей. Препринт ИФВЭ 90-133, Протвино, 1990.
8. **A.V.Sannikov**. Calibration method for personnel neutron dosimeters in stray radiation fields. *Radiat. Prot. Dosim.* **44**, 277 (1992).
9. А.И.Абросимов, В.Е.Алейников, А.Г.Алексеев, А.В.Антипов, В.П.Бамблевский, В.А.Белогорлов, Г.И.Бритвич, М.Зельчинский, А.Г.Крылов, С.И.Купцов, В.Д.Майоров, Ю.В.Мокров, **А.В.Санников**, Б.Снопек, Г.Н.Тимошенко, С.А.Харлампиев, А.А.Чумаков. Измерение характеристик опорных полей нейтронов ОИЯИ. Препринт ОИЯИ Р16-93-37. Дубна, 1993.
10. A.Aroua, M.Höfert, **A.V.Sannikov** and G.R.Stevenson. Reference fields for in-flight dosimetry. CERN/TIS-RP/TM/93-46. Geneva, 1993.

11. J.Liu and **A.V.Sannikov**. Calibration of the indium and LiI multisphere spectrometers and the Rem counters in the new RP calibration facility. CERN/TIS-RP/TM/93-50. Geneva, 1993.
12. **A.V.Sannikov**. Calculated response functions of indium loaded Bonner spectrometer. CERN/TIS-RP/IR/94-05. Geneva, 1994.
13. **A.V.Sannikov**. BON94 code for neutron spectra unfolding from Bonner spectrometer data. CERN/TIS-RP/IR/94-16. Geneva, 1994.
14. J.Liu, **A.V.Sannikov** and G.R.Stevenson. Neutron energy spectra of the CERN-CEC reference field facility measured by the indium Bonner spectrometer and carbon activation detector. CERN/TIS-RP/IR/94-17. Geneva, 1994.
15. **A.V.Sannikov**, V.Mares and H.Schraube. High energy response functions of Bonner spectrometers. Radiat. Prot. Dosim. **70**, 291 (1997).
16. H.Schraube, J.Jakes, **A.V.Sannikov**, E.Weitzenegger, S.Roesler and W.Heinrich. The cosmic ray induced neutron spectrum at the summit of the Zugspitze (2963 m). Radiat. Prot. Dosim. **70**, 405 (1997).
17. V.Mares, **A.V.Sannikov** and H.Schraube. The response functions of a He-3 Bonner spectrometer and their experimental verification in high energy neutron fields. Proc. Third specialist meeting on shielding aspects of accelerators, targets and irradiation facilities. Sendai, Japan, OECD Nuclear Energy Agency, 1997.
18. I.L.Azhgirey, I.A.Kurochkin, **A.V.Sannikov**, E.N.Savitskaya. Calculation of high-energy hadron spectra at the CERN-CEC reference field facility by the MARS'95 and HADRON codes. Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. **A408**, 535 (1998).

*Рукопись поступила 17 октября 2006 г.*



А.В. Санников

Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 18.10.2006. Формат 60x84/16. Офсетная печать.  
Печ. л. 1.48. Уч.-изд.л. 1.68. Тираж 100. Заказ 95. Индекс 3649.  
ЛР №020498 06.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

АВТОРЕФЕРАТ 2006 – 21, ИФВЭ, 2006

---