

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

РЯБЕВА Елена Васильевна

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ СИСТЕМ ДЕТЕКТОРОВ,
УСТАНОВЛЕННЫХ НА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ.

01.04.01. — техника физического эксперимента,
физика приборов, автоматизация
физических исследований

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Автор:

Рябев _____

Москва, 1992

Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного
Знамени инженерно-физическом институте.

Научный руководитель: кандидат технических
наук, доцент, В.Т. Самосадный

Официальные оппоненты: доктор физико-математических
наук, Е.А. Крамер-Агеев
кандидат физико-математических
наук, В.М. Петров

Ведущая организация: НПО "Энергия"

Защита состоится "19" октября 1992 г. в 16 час.
00 мин. на заседании специализированного совета К053.03.05 в
Московском инженерно-физическом институте по адресу:
115409, Каширское шоссе, д.31, тел. 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан "19" сентября 1992г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в
одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
специализированного совета *А.Н. Гудков*

А.Н. Гудков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется тем, что бурное развитие ядерной энергетики, широкое применение ядерно-физических установок и источников ионизирующих излучений потребовали создания новых и совершенствования имеющихся методов регистрации нейтронного излучения.

Необходимо создание высокочувствительных детекторов, работающих в режиме реального времени. Возможным вариантом решения этой задачи является создание многослойного детектора на основе гелиевых счетчиков, обладающего высокой чувствительностью к нейтронам различных энергетических групп, вследствие наличия замедлителя — полиэтилена. Изменяя толщину полиэтилена, возможно делать детектор наиболее чувствительным к характерным спектрам, например, спектру деления и т.д.

Измерения плотности потоков нейтронов в космосе проводились на аэростатах, искусственных спутниках Земли и орбитальных станциях. В настоящее время, в связи с перспективами создания энергетической базы на околоземной орбите, важны измерения плотности потоков нейтронов на борту орбитальной станции (ОС). Так как, это важно не только для защиты экипажа, но и для правильной оценки воздействия излучений на бортовую аппаратуру, более верной интерпретации экспериментов на борту ОС. Отличительной чертой эксперимента по измерению плотности потоков нейтронов на борту ОС, по сравнению с другими экспериментами в околоземном пространстве, является наличие локальных нейтронов, индуцированных протонами в конструкционных материалах станции. Это вторичное излучение существенно, вследствие большой массы ОС. Следовательно, для моделирования работы детекторов на борту ОС, необходимо рассчитать плотность потока локальных нейтронов, индуцированных протонами различных источников в материалах станции.

При разработке детекторных систем, позволяющих находить энергетическое распределение потоков нейтронов, сложным вопросом является восстановление информации по показаниям детекторных систем. В настоящее время разработано множество методов решения обратных задач физики. Однако, для каждого конкретного

эксперимента практически всегда приходится учитывать априорную информацию. В случае присутствия значительных погрешностей в экспериментальных данных, лучше всего использовать метод регуляризации. Важным вопросом метода регуляризации является метод выбора параметра регуляризации.

Критерием работоспособности программы является возможность с хорошей точностью восстанавливать энергетические спектры по показаниям различных детекторных систем.

Цель работы состояла в определении потоков нейтронов на борту ОС, а также в разработке методики нахождения решения задачи восстановления энергетического распределения потока нейтронов по показаниям двух различных систем детекторов.

Научная новизна и практическая значимость работы заключается в следующем:

— проведены расчеты и получены значения плотности потока вторичных нейтронов, индуцированных протонами различных источников на борту ОС;

— впервые разработан и реализован метод восстановления исходных спектральных характеристик потоков нейтронов по показаниям систем детекторов, который включает в себя:

а) программу FIELD, реализующую метод регуляризации с учетом статистической природы ошибок;

б) выбор параметра регуляризации по перегибу функции обобщенной невязки.

Автор выносит на защиту:

1. Результаты расчетов плотности потоков вторичных нейтронов, индуцированных протонами в материалах орбитальной станции, в зависимости от месторасположения точки измерения.
2. Результаты моделирования процесса взаимодействия потоков нейтронов и протонов с набором детекторов "Спектр-Н" на борту ОС.
3. Методику восстановления энергетического распределения потоков нейтронов по показаниям различных систем детекторов в присутствии значительной погрешности

экспериментальных данных. Методика включает в себя:

- программу FIELD, реализующую метод регуляризации с учетом статистической природы ошибок;
- выбор параметра регуляризации по перегибу функции обобщенной невязки.

Апробация работ. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в отчетах МИФИ, а также были доложены на выездной сессии "Ядерная физика" АН СССР в 1990г., на I Всесоюзной научно-технической конференции "Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов" (Томск, 1991г.), на Международном совещании по твердотельным детекторам и их применению (Одесса, 1991г.), Международной конференции студентов и молодых ученых "Современная физика и экология" (Москва, 1992г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 75 наименований, содержит 108 страниц, в том числе 32 рисунка и пять таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В настоящей диссертации дан анализ возможных источников нейтронов на околоземных орбитах. Нейтроны, не являясь составляющей первичных космических лучей, все-таки присутствуют в околоземном пространстве. В основном это нейтроны альbedo Земли, которые являются продуктом взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атомов атмосферы Земли. Спектр нейтронов альbedo рассчитан и измерен в экспериментах. Значение плотности потока таких нейтронов зависит от многих параметров: географической долготы и широты, высоты, периода солнечной активности. Кроме того, околоземного пространства могут достигать нейтроны высоких энергий, образуемые на Солнце во время солнечных вспышек.

При экспериментальных исследованиях потоков нейтронов на искусственных спутниках Земли всегда наблюдается значительный фон, вносимый так называемыми "локальными" нейтронами. Эти нейтроны образуются в материале спутника или станции, в самом детекторе под

воздействием высокоэнергетичных протонов. При проведении экспериментов на борту станции важной задачей является расчет характеристик локальных нейтронов.

Расчет проводился в предположении, что материал конструкции модуля, по атомному номеру близок к алюминию и, что отсутствуют большие массы веществ, взаимодействующих с нейтронами.

Сначала проводился расчет значения объемной мощности вторичных источников, потом по его значению вычислялся поток вторичных нейтронов в любой части модуля.

Значение объемной мощности вторичных источников рассчитывался по комплексу программ "HAMLET", который моделирует процесс взаимодействия адронов с веществом методом Монте-Карло. Адрон-ядерное взаимодействие рассчитывалось в рамках модели внутриядерного каскада, включающего испарительную стадию. Таким образом, были рассчитаны спектры вторичных нейтронов, индуцированных в конструкции станции и в детекторе, применяемом для регистрации нейтронов, а также зависимости плотности потока нейтронов от расстояния от стенки модуля в осевом и радиальном направлении внутри и вне модуля станции.

Разработка методики восстановления истинных спектральных характеристик по показаниям систем детекторов

В работе подробно рассматривается задача восстановления спектральных характеристик по показаниям двух систем детекторов: набора композиционных делящихся детекторов "Спектр-Н" и многослойного детектора на основе гелиевых счетчиков.

Для восстановления спектра нейтронов по показаниям набора "Спектр-Н" необходимо решить уравнение Фредгольма 1-го рода:

$$u_1 = \int_0^{\infty} a_1(E) \varphi(E) dE, \quad (1)$$

где u_1 — число делений в 1-ом детекторе на 1 ядро детектора-мишени за 1 секунду, $\sigma_1(E)$ — энергетическая зависимость сечения 1-го детектора, $\varphi(E)$ — искомый спектр. Если разложить спектр нейтронов по ступенчатым или ортогональным многочленам, возможно свести решение уравнений Фредгольма к системе линейных уравнений вида:

$$U = AZ$$

где a_{1j} — средняя чувствительность 1-го детектора к нейтронам в j-ой энергетической группе, Z_j — плотность потока нейтронов, принадлежащих группе j.

Практически приходится решать систему

$$U_0 = A_h Z,$$

где $U_0 = U + \delta$, $A_h = A + h$, δ и h — погрешности экспериментальных данных. Погрешности неизбежны, вследствие статистической природы флуктуации потоков нейтронов. Погрешности в операторе A усугубляются вследствие усреднения по энергетическому интервалу.

Задачу восстановления энергетического спектра по показаниям многослойного детектора тоже можно свести к решению системы линейных уравнений со статистической ошибкой в элементах матрицы и элементах правой части.

Для решения полученной системы уравнений разработана программа **RIKID**.

Программа основывается на методе регуляризации Тихонова, где для решения системы ищется минимум сглаживающего функционала

$$M^{\alpha}(Z) = |A_h Z - U_0|^2 + \alpha |Z|^2,$$

где α — параметр регуляризации.

Для отыскания минимума функционала разработана модификация широко известного алгоритма **FUMILI**, реализующего метод наименьших квадратов. В качестве показателей, характеризующих погрешность

решения использованы следующие величины:

— след матрицы остаточной аппаратной функции $\text{Sp}A_R$, где

$$A_R = (A^T W A + \alpha I)^{-1} A^T W A,$$

$W_{nm} = W_n \delta_{nm}$; $\sigma_n^2 = \frac{1}{W_n}$ — дисперсия элемента правой части системы (1).

— функция обобщенной невязки

$$\rho(\alpha) = \|AZ - u\|^2 - (\delta + h\|Z\|)^2$$

Решение некорректно поставленной задачи, выполненное с помощью метода регуляризации, зависит не только от входных данных, но и от параметра регуляризации. Поэтому для всех расчетных экспериментов было найдено решение при различных значениях параметра α . Построены графики зависимости показателей решения от α для тестовых расчетов.

Выбор параметра регуляризации является важной составной частью решения задачи восстановления.

В программе FIELD реализованы три метода выбора параметра регуляризации. В первом значение выбирается из условия равенства нулю функции обобщенной невязки. Второй метод предполагает выбор такого значения параметра регуляризации, при котором след матрицы остаточной аппаратной функции с ростом α начинает значительно убывать. Наиболее хорошие результаты дает предложенный автором метод выбора параметра α в точке перегиба функции обобщенной невязки. В работе для каждого восстанавливаемого спектра приводятся графики зависимости $\rho(\alpha)$ и $\text{Sp}A_R$ от α . Параметр α выбирается по характерному изменению функции обобщенной невязки. Такой метод логичен, что можно подтвердить следующими соображениями. Зависимость функции обобщенной невязки от параметра α для всех решений имеет характерный излом. Такое поведение функции объясняется тем, что при небольших значениях параметра регуляризации на решение оказывает влияние в основном статистический член сглаживающего функционала. С увеличением параметра постепенно возрастает влияние стабилизатора. Вследствии

этого, решение становится все более и более смещенным, функция обобщенной невязки начинает сильно возрастать. Именно в области перегиба функции обобщенной невязки влияние на решение обоих членов сглаживающего функционала взаимно уравновешено.

Для подтверждения работоспособности программы FIELD были проведены следующие модельные расчеты. Набор композиционных делющихся детекторов предназначен для регистрации нейтронов на борту ОС, поэтому по его показаниям производилось восстановление спектров локальных нейтронов и нейтронов альbedo Земли. Моделирование взаимодействия нейтронов с набором детекторов производилось по программе "HAMLET". Восстановление спектральных характеристик по программе FIELD, показало, что спектры восстанавливаются хорошо. Истинное значение спектра попадает в область погрешности решения. По показаниям многослойного детектора на основе гелиевых счетчиков произведено восстановление спектра локальных нейтронов. Расчеты взаимодействия нейтронного излучения с детектором проведены с помощью программы, реализующей метод Монте-Карло. Представлены результаты расчетов, из которых видно, что восстановленный спектр хорошо согласуется с литературными данными. Поэтому можно сделать заключение, что программа FIELD позволяет находить устойчивые решения.

Моделирование исследования плотности потока нейтронов на борту ОС "Мир"

В настоящее время на борт станции "Мир" в жилой отсек помещены наборы "Спектр-Н". Целью эксперимента является определение флюенсов и спектральных характеристик нейтронов на ОС. С целью обработки результатов эксперимента проведено математическое моделирование эксперимента. Рассмотрены возможные источники нейтронов на борту ОС и проведен расчет взаимодействия потоков нейтронов с набором детекторов. Рассмотрены возможные источники протонов на борту ОС. Учтены:

- протоны галактических космических лучей;
- протоны естественных радиационных поясов Земли;
- протоны солнечных вспышек.

Рассчитаны значения скорости реакций, т.е. число реакций на одно

ядро мишени в секунду. Полученные в результате математического моделирования значения скорости реакций, вызванных протонами и нейтронами, приведены отдельно. По показаниям набора "Спектр-Н" произведено восстановление модельного спектра нейтронов на борту ОС. Показано, что набор "Спектр-Н" может регистрировать нейтроны на борту ОС и по его показаниям возможно восстановление энергетических спектров нейтронов.

Эксперименты по определению энергетического распределения

Для проверки работ систем детекторов в реальных условиях проводились эксперименты по определению энергетического распределения плотности потока нейтронов. Восстановление истинных спектральных характеристик производилось с помощью программы FIELD. Набор "Спектр-Н" регистрировал в эксперименте нейтроны, индуцированные протонами с $E_p = 70$ МэВ в толстой алюминиевой мишени. Спектр таких нейтронов близок к спектру локальных нейтронов, поэтому можно считать такой эксперимент близким к реальным условиям. По результатам эксперимента можно сделать вывод о пригодности набора "Спектр-Н" для регистрации нейтронов со спектрами, близкими к спектрам локальных нейтронов. С помощью многослойного детектора проводился эксперимент по регистрации нейтронов лабораторного источника ^{252}Cf ; и спектр нейтронов восстанавливался по программе FIELD. Из результатов эксперимента ясно, что детектор нейтронов пригоден для работы в полях нейтронов со спектром деления и программа FIELD хорошо восстанавливает истинное значение спектра.

ВЫВОДЫ

Основной итог диссертационной работы заключается в физическом обосновании методики определения плотности потока и энергетического состава нейтронов на орбите ОС и в наземных условиях. Восстановление энергетического состава нейтронов с помощью разработанной программы FIELD позволяет осуществлять идентификацию источников их излучений в режиме реального времени с

применением многослойных детектирующих систем на основе гелиевых счетчиков.

Этот вывод подтверждается следующими результатами, полученными в работе.

1. Проведено впервые в стране математическое моделирование процессов генерации вторичных нейтронов под воздействием потоков протонов в конструкции ОС и многослойном детекторе. Расчеты значений плотности потоков дают величину 0.92 нейтр/см²с внутри станции на расстоянии более 0.5 м. от стенки станции, и величину 2.70 нейтр/см²с вблизи со стенкой станции для периода максимума ЭА. Эта величина неплохо согласуется с данными, имеющимися в литературе. Спектр вторичных нейтронов, полученный в результате расчетов по данной методике, согласуется со спектром вторичных нейтронов, измеренным на ИСЗ "Космос" и спектром вторичных нейтронов для кораблей "Space Shuttle" и ММС, рассчитанным и приведенным в литературе. Следовательно, методика, предложенная в настоящей работе, может быть использована для расчетов плотности потока вторичных нейтронов, и результаты, приведенные в настоящей работе, можно использовать при интерпретации экспериментов и для расчета работы различной аппаратуры на борту ОС.

2. Проведен анализ метода регуляризации для восстановления исходных характеристик нейтронного излучения по показаниям детектирующих устройств. При наличии статистических погрешностей в результатах измерений и калибровочных характеристиках детекторов, может быть применен метод регуляризации при решении некорректно поставленной задачи.

3. Впервые предложен метод выбора параметра регуляризации по характерному изменению кривой функции обобщенной невязки. С помощью предложенной методики решались задачи восстановления различных спектров по показаниям набора композиционных делящихся детекторов "Спектр-Н" и многослойного детектора на основе гелиевых счетчиков. Из работы ясно, что предложенный метод хорошо восстанавливает исходный спектр, истинное значение попадает в область статистической ошибки решения.

4. В работе сделан анализ результатов экспериментов по определению энергетического распределения плотности потока нейтронов с помощью двух систем детекторов. Результаты обработки их с помощью предложенной методики показали хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными. Подтвердили работоспособность методики и возможность определения исходных характеристик потоков излучений с помощью указанных систем детекторов.

Предложенные методики могут быть положены в основу разработки и создания детектирующих устройств нового типа, предназначенных для решения ряда научных и практических задач в области радиационной физики, физики приборов и радиометрии слабых потоков излучений.

Основные результаты исследований были опубликованы в работах:

1. Рябева Е.В., Чадаев В.А., Самосадный В.Т. Восстановление энергетическо-углового распределения потоков нейтронов. //Препринт 029-91. - М.: МИИМ, 1991.
2. Рябева Е.В., Сибирцев А.А., Лакина И.Ю., Самосадный В.Т. Потоки нейтронов на борту орбитальной станции. //Космические исследования. - 1992. - Т.38, Вып.6.
3. Рябева Е.В., Тарновский Г.Б., Кадилин В.В. Методика восстановления спектра нейтронов на борту орбитальной станции. //Сб.: Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. I Всесоюзная научно-техническая конференция 25-27 июня 1991. Материалы конференции. - Томск, 1991.
4. Рябева Е.В., Лакина И.Ю., Самосадный В.Т. и др. Исследования характеристик вторичного нейтронного излучения, индуцированного протонами ГИЛ в космической станции. //Сб.: Достижения прикладной ядерной физики. - М.: Энергоатомиздат, 1992.
5. Рябева Е. В. Методика восстановления энергетического спектра нейтронов на борту ОС. //Сб.: Современная физика и экология. Международная конференция студентов и молодых ученых. - Москва, 1992. - С. 43.

Б. Рабева Е.В., Чадаев В.А., Самосадный В.Т. Применение метода регуляризации при восстановлении энергетическо-угловой плотности потока нейтронов. // Сб.: Достижения прикладной ядерной физики. - М.: Энергоатомиздат, 1992.

Подписано к печати 25.06.92. Заказ 1200. Тираж 100 экз.

Типография ММФ, Калифорное шоссе, д.31