

---

*На правах рукописи*

**Лишнеvский Андрей Эрикович**

**ВАРИАЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА  
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ НА ФАЗЕ  
СПАДА 23-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

**01.04.08 - Физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

**Москва – 2014**

Работа выполнена в отделе космофизических исследований Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Панасюк Михаил Игоревич

кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Бенгин Виктор Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник федерального  
государственного бюджетного учреждения  
«Институт прикладной геофизики имени  
академика Е.К. Федорова»,  
Нусинов Анатолий Абрамович

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
профессионального образования  
«Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»,  
Михайлов Владимир Владимирович

Ведущая организация:

Институт земного магнетизма, ионосферы и  
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
Российской Академии Наук

Защита состоится « 14 » \_\_\_\_\_ мая 2014 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 (19-й корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова), в аудитории 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ апреля 2014 г.

Учёный секретарь  
диссертационного Совета Д501.001.45  
кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность проблемы**

Ионизирующие излучения космического пространства являются важным фактором, ограничивающим возможности работы космической техники и людей в космическом пространстве. Необходимость совершенствования модельного описания радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве общеизвестна и отражается в предпринимаемых в последнее время усилиях международной коллаборации специалистов по разработке моделей АЕ-9, АР-9. Одна из побудительных причин создания новых моделей - необходимость улучшения точности прогнозирования уровней радиационного воздействия на аппаратуру и людей, находящихся на космических аппаратах.

За время эксплуатации орбитального комплекса «Международная Космическая Станция» (МКС) был накоплен длительный мониторинг ряд данных по радиационной обстановке, покрывающий более половины 23-го солнечного цикла от максимума до минимума. В этот период наблюдались значительные вариации радиационной обстановки на орбитальной станции. Одновременно, на фазу спада 23-го цикла выпал уникально спокойный период солнечной активности. Удачно совпало, что в течение этого времени на МКС функционировала штатная система радиационного контроля (СРК). Четыре дозиметрических блока ДБ-8, входящих в состав СРК, имели различные условия защищенности детекторов элементами конструкции и оборудованием МКС, что позволило оценивать перепад доз в Служебном модуле МКС при различных радиационных условиях. Детекторы ДБ-8 позволили получить длительный однородный ряд дозиметрических данных. Поэтому, в целях дальнейшего совершенствования методов оценки и прогнозирования радиационной обстановки на МКС, представляется целесообразным получить закономерности вариаций дозы на борту МКС в период спокойных гелиогеофизических условий.

### **Цель работы**

В настоящей диссертации в качестве объекта исследования выбрана радиационная обстановка на орбитах пилотируемых орбитальных станций. Предметом исследования являются закономерности влияния вариаций ГКЛ и характеристик орбитального движения МКС на изменения доз ионизирующего излучения на МКС.

Целью диссертационной работы является определение вариаций вклада ГКЛ и протонов внутреннего радиационного пояса Земли (РПЗ) в поглощенную дозу на борту МКС и разработка, на базе полученных эмпирических закономерностей, инженерной методики краткосрочного прогнозирования радиационной обстановки на МКС по данным СРК.

### **Задачи исследования**

Задачами диссертационной работы является:

1. Разработать методику обработки данных дозиметрических блоков ДБ-8 системы радиационного контроля МКС, обеспечивающую оценку вклада в дозу на МКС, обусловленного галактическими космическими лучами (ГКЛ) и внутренним радиационным поясом Земли (РПЗ), а также получить ряды данных о вкладе в суточную поглощенную дозу от ГКЛ и РПЗ для детекторов ДБ-8, имеющих наибольшую и наименьшую защищенность элементами конструкции и оборудованием МКС.

2. Исследовать влияние вариаций потока ГКЛ на среднесуточную мощность дозы на борту МКС и возможное влияние параметров орбиты МКС на вклад РПЗ в среднесуточную мощность дозы на борту МКС

3. Создать и верифицировать по данным СРК (Системы Радиационного Контроля) методику краткосрочного прогнозирования динамики накопления дозы на МКС

### **Научная новизна результатов, полученных в диссертации, состоит:**

1. В охватывающем более половины цикла солнечной активности ряде данных, характеризующих вклад галактических космических лучей (ГКЛ) в среднесуточную дозу на борту МКС.

2. В экспериментальных зависимостях поглощенной дозы, получаемой МКС при прохождении зоны внутреннего радиационного пояса Земли (РПЗ), от параметров траектории станции, характеризующих это прохождение.

### **Получены следующие результаты:**

I. На основе анализа данных СРК за период 2005 – 2009 гг., характеризовавшийся низким уровнем солнечной активности, определен вклад в суточную дозу, вносимый ГКЛ и РПЗ.

II. Установлено, что доза от ГКЛ практически не зависит от условий защищенности детекторов СРК оборудованием МКС.

III. Показано, что изменения дозы от ГКЛ на борту станции хорошо коррелируют с изменениями интенсивности потоков космических лучей, прослеживаемых по данным нейтронных мониторов: коэффициенты корреляции Пирсона [1] между вкладом в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ и скоростью счета нейтронного монитора по данным станции в г. Апатиты составляют, соответственно, 0,91 и 0,92 для наименее защищенного и наиболее защищенного окружающим оборудованием станции детекторных блоков СРК.

IV. Найдено, что доза от РПЗ на МКС существенно зависит от условий защищенности детекторов и высоты орбиты, соответствующие изменения могут превышать 2 раза и более.

V. Получены эмпирические формулы, позволяющие производить оценки дозы, получаемой МКС при прохождении через внутренний радиационный пояс Земли (область Южно – Атлантической Аномалии (ЮАА)).

VI. Разработаны и апробированы методики обработки данных СРК (предварительно дешифрованных специализированными программными комплексами в Центре управления полетами ЦНИИмаш и в Институте медико-биологических проблем РАН), полученных в различных режимах функционирования комплекса СРК на МКС.

VII. На основе данных СРК разработана инженерная методика прогнозирования динамики накопления дозы на МКС. Показано, что при значении доверительной вероятности, равном 96%, погрешность методики не более 25% для наиболее защищенного окружающим оборудованием станции детекторного блока СРК (для наименее защищенного – погрешность не более 32%).

### **Практическая значимость**

Практическая значимость результатов, полученных в диссертации, состоит в разработке инженерной методики расчетной оценки дозы на МКС. Эта методика может быть в дальнейшем использована для анализа дозиметрической информации при оперативном обеспечении радиационной безопасности экипажей МКС.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

I. Проведенный анализ данных СРК за период 2005 – 2009 гг., характеризовавшийся низким уровнем солнечной активности, позволил определить вклад в суточную дозу, вносимый как ГКЛ, так и РПЗ, в условиях спокойной радиационной обстановки. Впервые по результатам дозиметрических измерений за значительный временной период получены оценки вклада в суточную дозу от ГКЛ и от РПЗ. Было установлено, что вклад от ГКЛ в среднесуточную мощность дозы изменялся в период 2005 - 2009 гг. в интервале от  $0,08 \pm 0,01$  до  $0,11 \pm 0,01$  мГр/сут, независимо от места расположения дозиметрического блока (что составляет от 57% до 44% вклада в суточную дозу для наиболее защищенного детектора ДБ-8 №4 и от 35% до 27% вклада в суточную дозу для наименее защищенного детектора ДБ-8 №1).

II. Установлено, что доза от РПЗ на МКС существенно зависит от высоты орбиты станции. Вклад в среднесуточную мощность дозы от РПЗ в период 2005 - 2009 гг. изменялся от 0,06 до 0,14 мГр/сут (от 43% до 56% среднесуточной дозы) для наиболее защищенного детектора ДБ-8 №4 и от 0,15 до 0,30 мГр/сут (от 65% до 73% среднесуточной дозы) для наименее защищенного детектора ДБ-8 №1, при изменении высоты прохождения станцией области ЮАА от 320 до 380 км.

III. Предложенная на основе анализа данных СРК инженерная методика краткосрочного прогнозирования дозы на МКС позволяет, на основе дозиметрических данных СРК и баллистической информации о параметрах орбиты станции, осуществить краткосрочный прогноз (на 1-2 суток) динамики накопления дозы на МКС с погрешностью не более, чем 25% (для ДБ-8 №4) и 32% (для ДБ-8 №1), с доверительной вероятностью, равной 96%.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием в процессе компьютерной обработки информации данных, поставляемых штатной системой дозиметрического контроля МКС, используемой для обеспечения безопасности жизнедеятельности действующих экипажей Международной Космической Станции, совпадением результатов краткосрочного прогнозирования дозы на МКС с эмпирическими данными о радиационной обстановке на станции с приемлемой точностью, а также согласием представленных в диссертационной работе численных оценок вклада в суточную дозу на станции, вносимого ГКЛ и РПЗ, с аналогичными результатами других исследовательских групп [2].

#### **Личный вклад**

Разработка специализированного программного обеспечения и обработка дозиметрических данных системы радиационного контроля МКС были проведены диссертантом самостоятельно. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научными руководителями, а также с другими соавторами публикаций.

#### **Апробация результатов работы**

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих международных конференциях: международная конференция «Влияние космической погоды на человека: в космосе и на Земле» (Москва, 4 – 8 июня 2012 г.), международная конференция «VII международный аэрокосмический конгресс IAC'12» (Москва, 26 – 31 августа 2012 г.), научной конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, 15 – 19 апреля 2013 г.), «XIV конференция по космической биологии и авиакосмической медицине с международным участием, посвященная 50-летию создания ИМБП РАН» (Москва, 28 – 30 октября 2013 г.)

#### **Публикации**

Основное содержание диссертации изложено в 4 печатных работах, приведённых в конце автореферата: 4 в рецензируемых статьях [A1, A2, A3, A4], 4 из которых – в научных журналах из списка ВАК, а также в тезисах и трудах международных конференций [A5, A6, A7].

#### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, выводов и списка цитируемой литературы из 57 наименований. Объём работы составляет 133 страницы текста, включая 75 рисунков и 19 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цель, предмет и объект исследования, поставлены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов диссертационной работы, кратко рассмотрено ее содержание, а также приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлена история экспериментальных исследований, посвященных изучению радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, представлены основные понятия и определения, дано описание основных источников космической радиации на орбитах пилотируемых орбитальных станций и закономерностей, которым подчиняются вариации радиационной обстановки на околоземных орбитах. Кроме этого, в первой главе представлен обзор моделей, описывающих радиационную обстановку в ближнем космосе, дано описание их практического применения для нужд краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования радиационной обстановки, обоснована необходимость в дальнейшем совершенствовании методов оценки и прогнозирования радиационной обстановки на пилотируемых орбитальных комплексах и перспективных пилотируемых космических аппаратах.

**Во второй главе** дается описание системы радиационного контроля (СРК), развернутой в модуле «Звезда» Международной космической станции. Представлены основные задачи СРК, ее структурная схема и связь с другими бортовыми системами Служебного модуля МКС. Дается подробное описание детекторов радиации СРК (представлено описание одного из ключевых элементов системы СРК - дозиметрических блоков ДБ-8, данные которых использовались при выполнении диссертационного исследования). Представлено описание дозиметрической методики, использованной при разработке детекторов ДБ-8, а также (в графическом виде) функции экранированности блоков ДБ-8 (информация представлена согласно данным работ [3,4,5]). Дано описание различных режимов функционирования СРК и структуры передаваемой на Землю с детекторов СРК информации. Представлено подробное описание использовавшихся в диссертационной работе информационных массивов, полученных в результате передачи данных СРК по каналам телеметрии на Землю и их последующей предварительной дешифровки специализированными программными комплексами в Центре управления полетами ЦНИИмаш и в Институте медико-биологических проблем РАН. Для использовавшихся в диссертационной работе данных СРК даны подробные описания методик их обработки, служащие решению задачи разделения вклада в дозу на МКС, обусловленного ГКЛ и РПЗ – одной из задач, поставленных в диссертационном исследовании. В частности, первая методика, используемая для обработки дозиметрических данных с временным разрешением 10 минут, состояла в следующем.

Для определения вклада в среднесуточную мощность дозы от РПЗ, используя баллистическую информацию, определялись все интервалы времени в течение суток, во время которых МКС проходила зону ЮАА, и суммировались приращения поглощенной дозы, накопленные за эти интервалы времени. Соответствующая доза от ГКЛ вычислялась при этом как разность между среднесуточной мощностью дозы и мощностью дозы от РПЗ, накопленной за соответствующие сутки. Расчет же среднесуточной мощностью дозы происходил следующим образом: значение поглощенной дозы, зарегистрированное в 0 часов 00 минут рассматриваемых суток вычиталось из значения поглощенной дозы, зарегистрированного в 0 часов 00 минут следующих суток.

Необходимость во второй методике, использующей дозиметрические данные СРК с временным разрешением 10 секунд, была обусловлена выявленной в процессе программной реализации первой методики значительной ее чувствительностью к полноте и целостности данных, из-за чего удалось получить данные по суточным дозам внутри

ЮАА и вне её границ лишь за период со второй половины 2005 г. до конца 2009 г., в то время как эксплуатация комплекса СРК на Международной Космической Станции началась в августе 2001 года (согласно [6]), и продолжается вплоть до настоящего времени.

Вторая методика, используемая для обработки дозиметрических данных с временным разрешением 10 секунд, состояла в следующем. Функционирование системы радиационного контроля на МКС позволяет автоматически определять начало и окончание зоны повышенной радиации и величину дозы, накопленной за этот промежуток времени. Телеметрические данные, поступающие с СРК, позволяют определить как детальное распределение мощности дозы во время прохождения ЮАА, так и величину дозы, накопленную за одно пересечение зоны повышенной радиации. В качестве параметров, характеризующих траекторию, по которой МКС пересекает зону ЮАА, было решено выбрать точку пересечения широты  $-30^\circ$ , задаваемую значениями долготы и высоты прохождения этой точки, а также направлением движения – с севера на юг или наоборот (участок траектории, характеризующийся движением с юга на север, было решено обозначить как «восходящий», а с севера на юг – как «нисходящий»). Эти участки траектории различаются своими баллистическими параметрами (в частности, высотой), что приводит к несколько различным значениям доз для «восходящих» и «нисходящих» витков.

Обработка телеметрической информации СРК совместно с данными баллистики позволяет поставить в соответствие численному значению поглощенной дозы для каждого из прохождений области ЮАА момент времени и значение географических координат, которые имела МКС при пересечении широты  $-30^\circ$ , которую было решено обозначить термином «референтная широта». Экспериментальная зависимость между мощностью дозы, регистрируемой детекторами ДБ-8, и долготой прохождения МКС области ЮАА при фиксированной широте  $30^\circ$  ю.ш. позволяет получить математическое описание - аппроксимацию такой зависимости, что позволяет, в свою очередь, осуществить разделение вклада в полную суточную мощность дозы от ЮАА и от ГКЛ для всего временного диапазона массива анализируемых данных СРК. При обработке данных по этой методике координатам конкретной точки (высота, долгота при фиксированной широте) ставится в соответствие доза, накопленная за определенный промежуток времени, т.е. эта методика оперирует параметрами, промежуточными между дозой, накопленной за сутки, и мощностью дозы в точке.

**В третьей главе** рассматриваются результаты обработки данных СРК, полученных в двух различных режимах функционирования комплекса СРК на МКС (как уже упоминалось, эти режимы обеспечивают получение дозиметрической информации с временным разрешением 10 минут и 10 секунд соответственно).

В **параграфе 3.1** представлены результаты обработки данных с десятиминутным временным разрешением (первая методика обработки дозиметрических данных). В графическом виде (рис. 1 и рис. 2) представлены получившиеся в результате обработки данных СРК временные зависимости вклада в суточную дозу от РПЗ и от ГКЛ для периода со второй половины 2005 г. до конца 2009 г. (границы временного периода обусловлены степенью полноты имеющихся данных СРК). Данные на графиках представлены для детекторов ДБ-8, имеющих наименьшую и наибольшую степень защищенности окружающим оборудованием станции. Также в **параграфе 3.1** указывается на прослеживаемую с середины 2006 г. до окончания 2009 г. связь вклада в суточную дозу от РПЗ с высотой прохождения орбитальным комплексом МКС области Южно-Атлантической аномалии, а также на отсутствие таковой связи для вклада в суточную дозу от ГКЛ (более подробно этот результат рассматривается в **параграфах 3.2** и **3.3**).

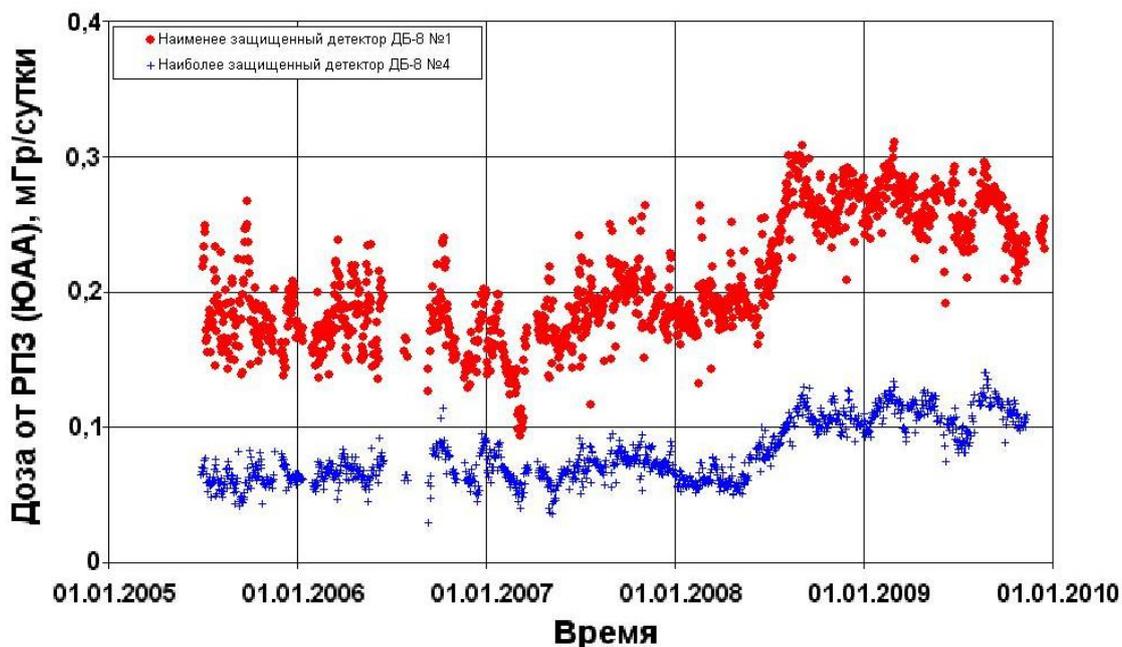


Рис. 1. Вклад в суточную дозу от РПЗ

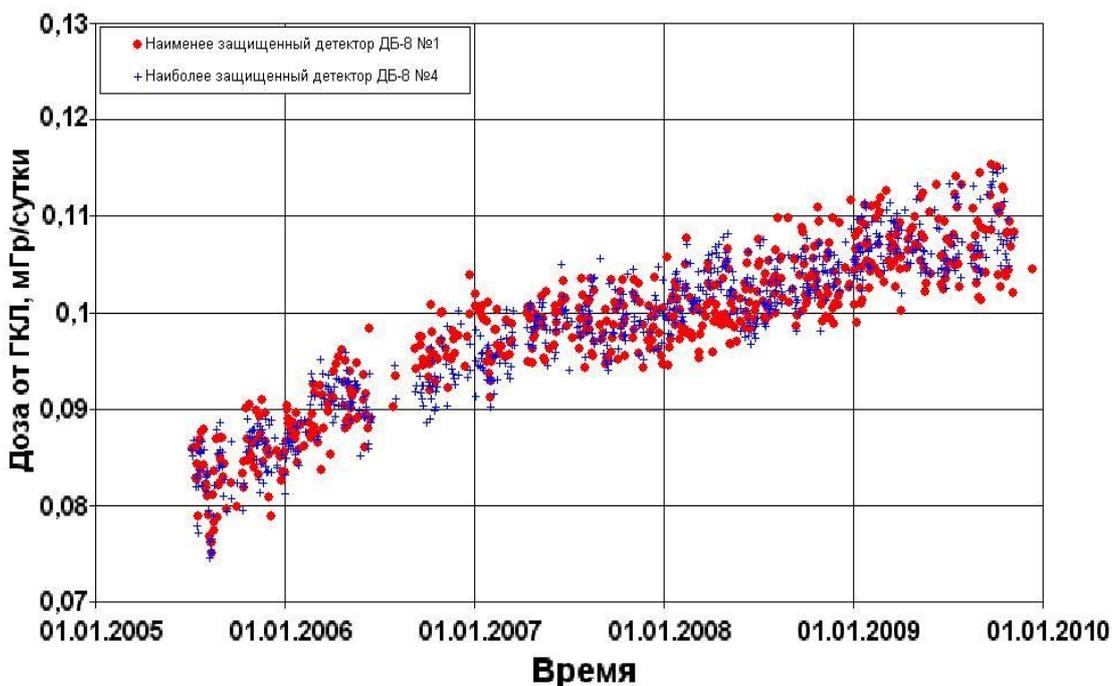


Рис. 2. Вклад в суточную дозу от ГКЛ

В параграфе 3.2 подробно рассматривается полученная в результате анализа данных СРК временная зависимость вклада в суточную дозу от ГКЛ (рис. 2 и рис. 3). Для более удобного графического представления этой зависимости используется сглаживание данных методом скользящего среднего [7].

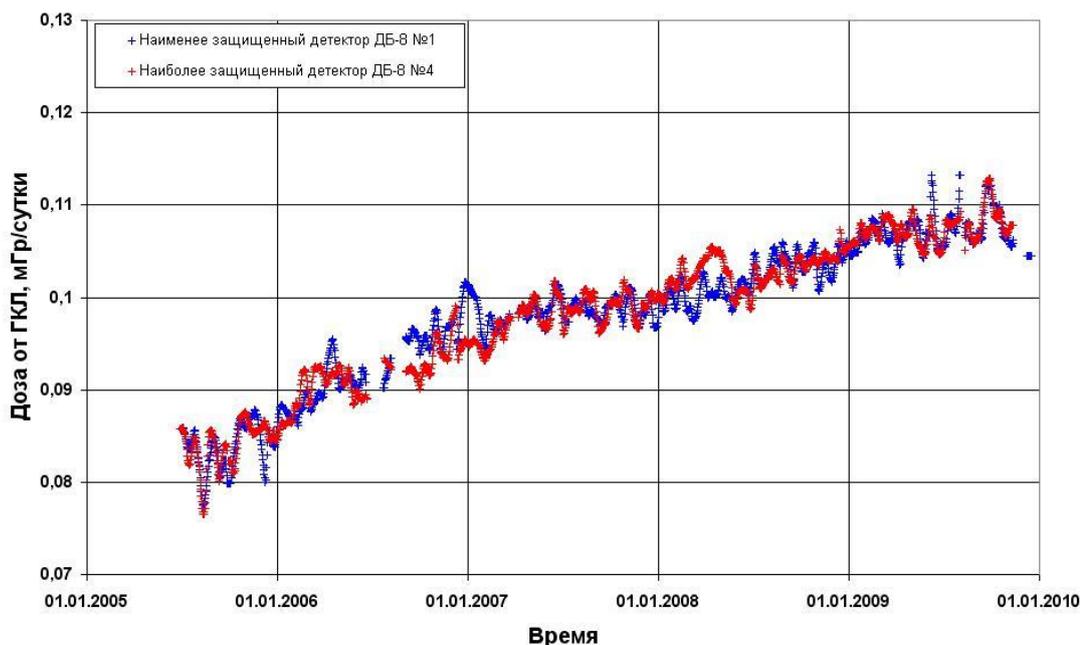


Рис. 3. Вклад в суточную дозу от ГКЛ (сглаженные данные)

Показывается, что вклад от ГКЛ в среднесуточную мощность дозы в период 2005 - 2009 гг. изменялся в интервале от 0,08 до 0,11 мГр/сут независимо от места расположения дозиметрического блока (что составляет от 57% до 44% вклада в среднесуточную мощность дозы для наиболее защищенного детектора ДБ-8 №4, а для наименее защищенного детектора ДБ-8 №1 – от 35% до 27% вклада в среднесуточную мощность дозы), что указывает на то, что условия экранировки детекторов не оказывают существенного влияния на вклад в суточную мощность дозы от ГКЛ.

В параграфе 3.2 также представлено сравнение вклада в суточную дозу от ГКЛ (сглаженные данные) со скоростью счета нейтронного монитора по данным станций в г. Апатиты (Россия) и в г. Киль (Германия) (рис. 4).

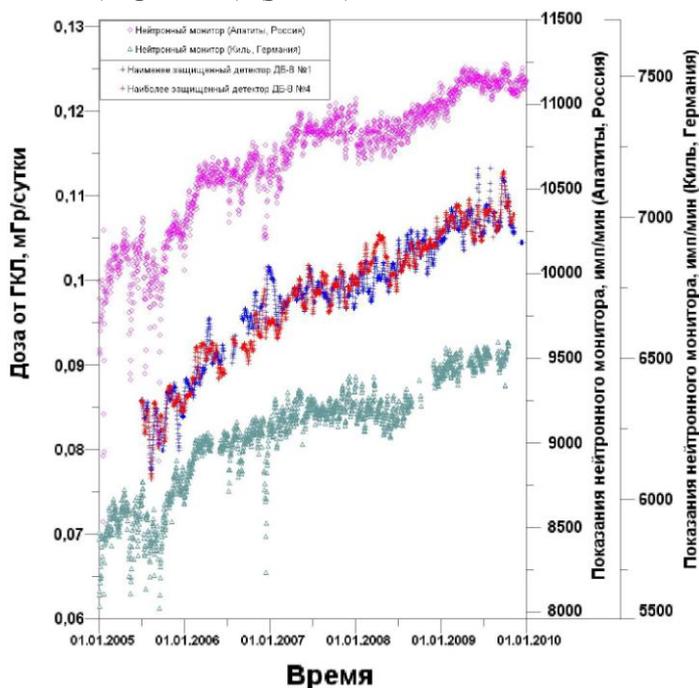


Рис. 4. Сравнение вклада в суточную дозу от ГКЛ (сглаженные данные) со скоростью счета нейтронных мониторов

Показано, что вклад в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ изменяется в соответствии с трендом, прослеживаемым по данным мониторинга потоков ГКЛ за 2005 - 2009 гг. Также в **параграфе 3.2** приводится количественная оценка связи между вкладом в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ и скоростью счета нейтронного монитора по данным станции в г. Апатиты: приводятся рассчитанные за 2005 - 2009 гг. коэффициенты корреляции Пирсона [1], составившие 0,91 и 0,92 для наименее защищенного и наиболее защищенного блоков ДБ-8 соответственно. Этот результат свидетельствует о наличии в 2005 - 2009 гг. тесной связи между вкладом в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ на борту МКС и скоростью счета нейтронных мониторов на наземных станциях.

В **параграфе 3.3** подробно рассматривается полученная в результате анализа данных СРК временная зависимость вклада в суточную дозу от РПЗ (построенная также с использованием сглаженных согласно [7] дозиметрических данных). Производится ее сравнение с графиком временной зависимости высоты прохождения МКС области ЮАА на восходящих и нисходящих витках (рис. 5).

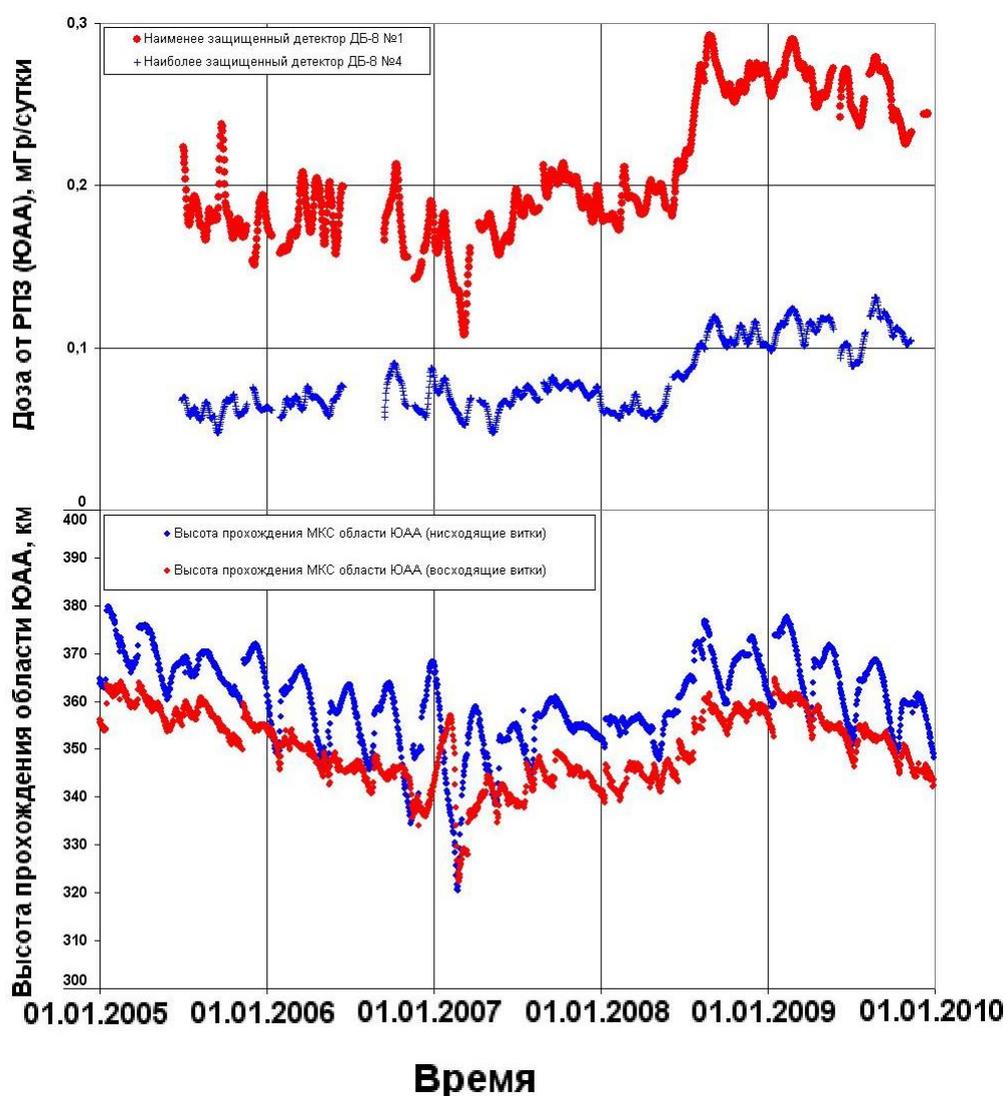


Рис. 5. Сравнение вклада в среднесуточную мощность дозы от РПЗ с зависимостью высоты прохождения МКС области ЮАА от времени

Приводится количественная оценка связи вклада в среднесуточную мощность дозы от РПЗ с высотой прохождения МКС области ЮАА в виде коэффициентов корреляции

Пирсона [1] между вкладом в среднесуточную мощность дозы от РПЗ (для наименее защищенного и наиболее защищенного блоков СРК) и высотой прохождения МКС зоны ЮАА за период с 01.07.2006 по 31.12.2009. Коэффициенты корреляции составили 0,85 и 0,77 для восходящих и нисходящих витков соответственно (наименее защищенный блок СРК); 0,82 и 0,73 - для наиболее защищенного блока СРК, восходящих и нисходящих витков соответственно.

Также в **параграфе 3.3** приводятся численные оценки вклада от РПЗ в среднесуточную мощность дозы за период 2005 - 2009 гг.: от 0,06 до 0,14 мГр/сут (что составляет от 43% до 56% среднесуточной дозы) для наиболее защищенного детектора ДБ-8 №4 и от 0,15 до 0,30 мГр/сут (что составляет от 65% до 73% среднесуточной дозы) для наименее защищенного детектора ДБ-8 №1. Делается вывод о том, что для вклада от РПЗ в среднесуточную мощность дозы экранировка детекторов имеет существенное значение (в отличие от аналогичного вклада в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ).

В конце **параграфа 3.3** делается вывод о том, что методика обработки десятиминутных данных СРК, из-за недостаточной целостности исходных данных и особенностей самой методики, не позволила задействовать весь временной диапазон данных СРК, доступных для анализа. Поэтому, с целью расширения временного диапазона массива анализируемых данных, была разработана методика обработки данных СРК, имеющих временное разрешение десять секунд (вторая методика обработки дозиметрических данных).

Анализу результатов обработки данных с десятисекундным временным разрешением посвящен **параграф 3.4** диссертационной работы. Обработка данных СРК МКС была проведена для временного интервала 01.07.2005 – 30.11.2011, результаты обработки представлены на рис. 6.

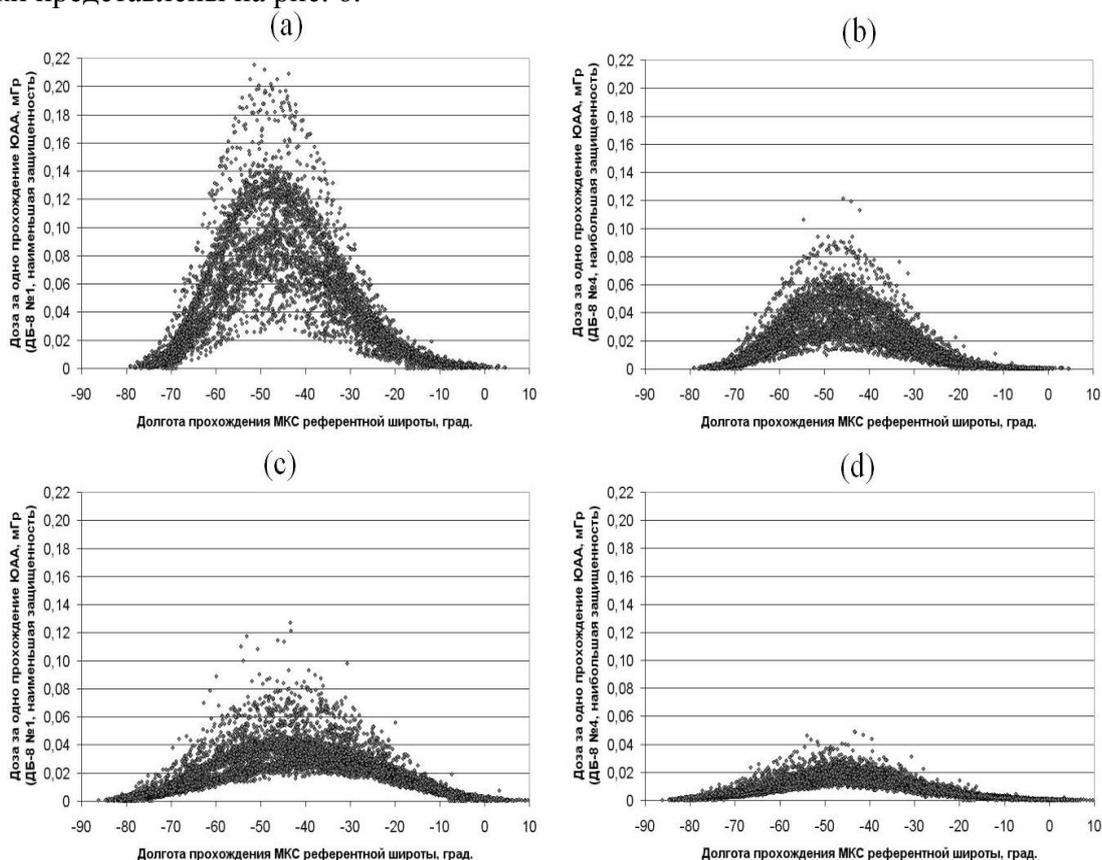


Рис. 6. Зависимость дозы, получаемой МКС в области ЮАА за одно прохождение, от долготы пересечения МКС референтной широты (нисходящие витки, детектор ДБ-8 №1 (наименьшая защищенность) – рис. (а); нисходящие витки, детектор ДБ-8 №4

(наибольшая защищенность) – рис. (b); восходящие витки, детектор ДБ-8 №1 (наименьшая защищенность) – рис. (c); восходящие витки, детектор ДБ-8 №4 (наибольшая защищенность) – рис. (d))

Как видно из рис. 6, зависимости дозы, регистрируемой блоками ДБ-8 за одно прохождение ЮАА, от долготы пересечения станцией референтной широты 30° ю.ш., представляют собой «колоколообразные» распределения показаний детекторов по долготе. Однако, на рис. 6 можно видеть весьма значительный разброс зарегистрированных показаний детекторов. Было предположено, что этот разброс обусловлен значительным диапазоном высот прохождения Международной космической станцией зоны ЮАА (рис. 7).

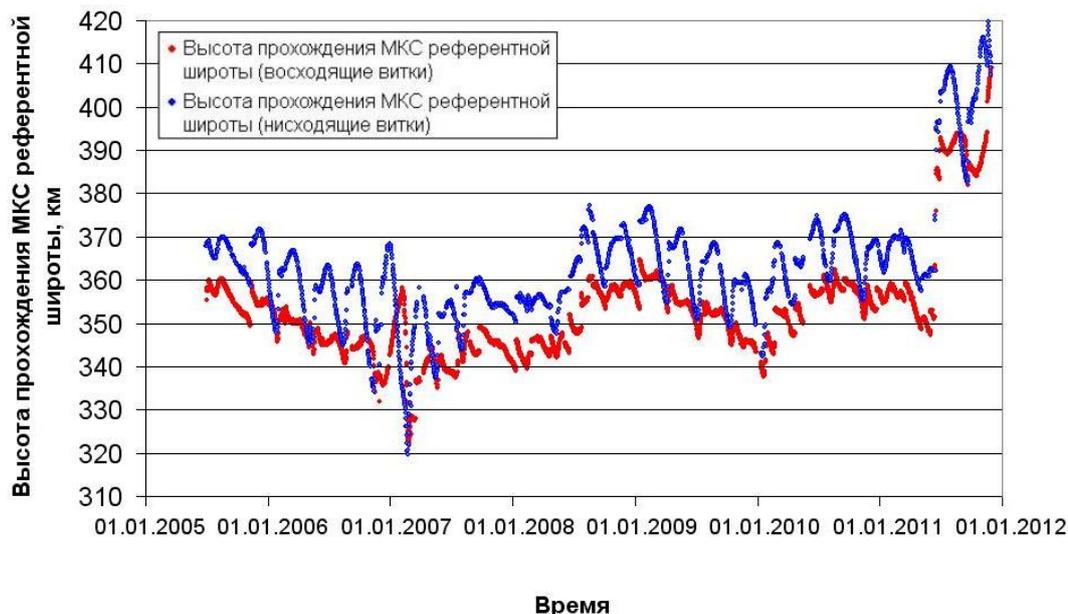


Рис. 7. Зависимость высоты пересечения МКС референтной широты от времени

С целью проверить это предположение и минимизировать влияние этого эффекта, было решено разбить весь диапазон высот, на которых происходило пересечение МКС референтной широты, на отдельные поддиапазоны шириной 10 км. Это позволило получить распределения мощности дозы по долготе с значительно меньшим разбросом зарегистрированных данных, чем на рис. 6. Для этих распределений оказалось возможным ввести математическое описание, аппроксимирующее экспериментальные зависимости, в виде

$$f(\lambda) = A \cdot e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $\sigma$  - численные коэффициенты,  $\lambda$  – долгота,  $\lambda_{\text{ср}}$  – долгота, на которой данная аппроксимационная функция достигает максимального значения, численно равного  $A$  (рис. 8):

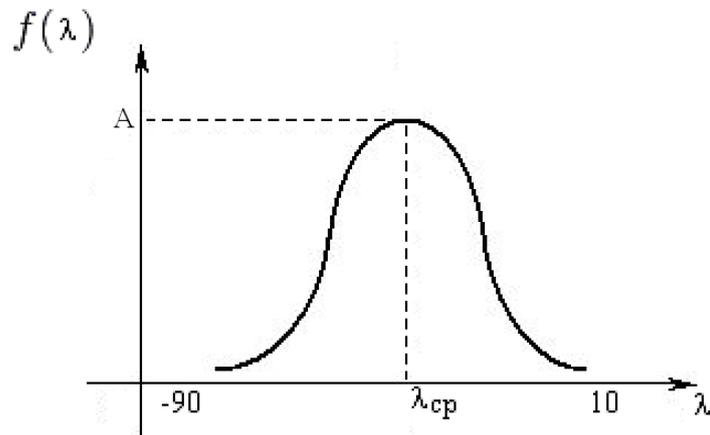


Рис. 8. Графическое представление аппроксимационной функции  $f(\lambda)$

Далее было решено проанализировать, зависит ли численный коэффициент  $A$ , характеризующий максимум аппроксимационной функции  $f(\lambda)$ , от высоты, на которой находилась МКС при пересечении референтной широты  $-30^\circ$  ю.ш. Для этого были построены графики зависимости коэффициента  $A$  от высоты пересечения МКС референтной широты. В результате анализа получившихся графических зависимостей было установлено, что коэффициент  $A$  зависит от высоты пересечения МКС референтной широты, и эта зависимость может быть аппроксимирована функцией вида

$$A(h) = k * (h - h_0) + b \quad (2)$$

где  $k$ ,  $b$  – численные коэффициенты,  $h$  – высота пересечения МКС референтной широты,  $h_0$  – минимальное значение высоты, равное 300 км.

Таким образом, возможность аппроксимации эмпирических зависимостей мощности дозы для каждого из прохождений МКС области ЮАА от долготы прохождения МКС референтной широты функцией вида (1), вместе с высотной зависимостью коэффициента  $A$ , которую также оказалось возможно аппроксимировать (линейной функцией), позволили построить математическое описание для экспериментальных зависимостей мощности дозы за каждое из прохождений МКС области ЮАА от долготы пересечения МКС референтной широты, в виде функции  $D_{\text{расч}} = f(h, \lambda)$  (функции от высоты и долготы пересечения МКС референтной широты  $30^\circ$  ю.ш.)

Было проведено сравнение экспериментальных зависимостей мощности дозы за каждое из прохождений МКС области ЮАА от долготы пересечения МКС референтной широты ( $D_{\text{эсп}}$ ), с соответствующими расчётными значениями функции  $D_{\text{расч}}$  – в виде графического представления временной зависимости отношения  $D_{\text{эсп}} / D_{\text{расч}}$ . При этом было предложено ограничить используемый диапазон долгот  $\lambda$  центральной частью ЮАА, областью от 50 градусов западной долготы до 30 градусов западной долготы ( $-50 < \lambda < -30$ ), поскольку в этой области долгот ЮАА имеет в наименьшей степени подверженные изменениям границы [8]. На рис. 9 приведен пример такого графического представления отношения экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному.

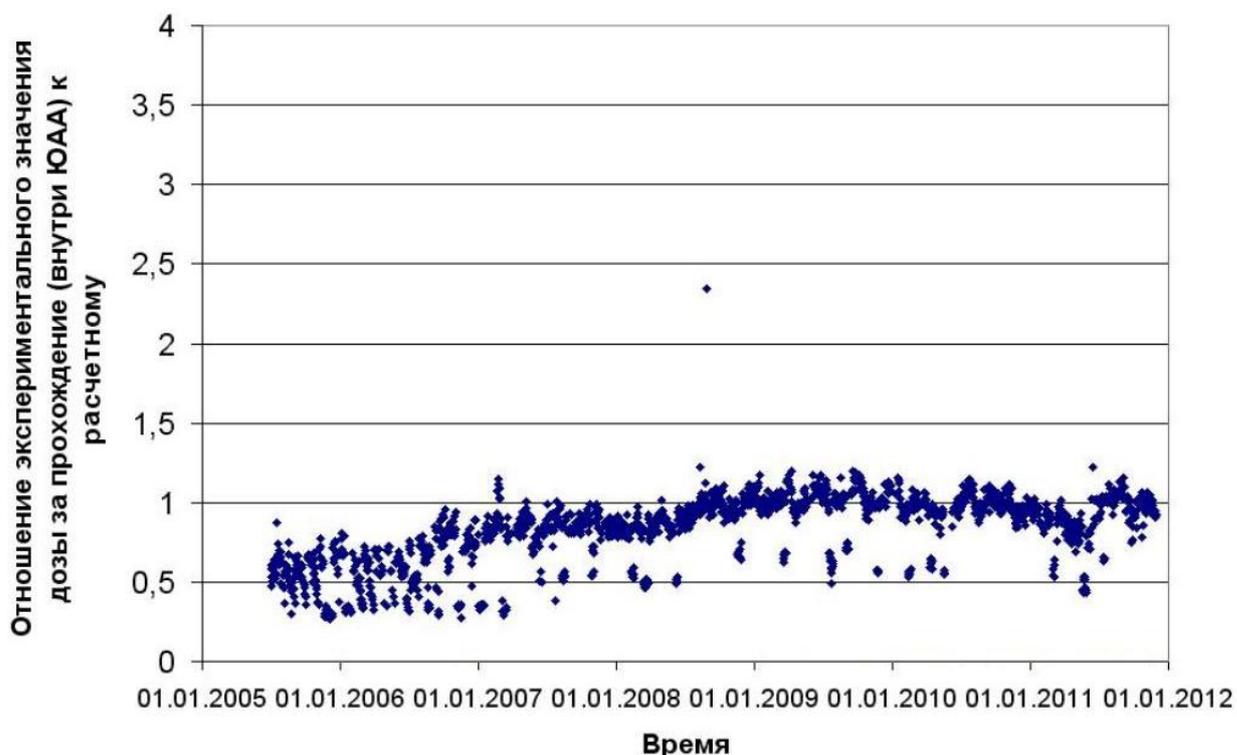


Рис. 9. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №1, наименьшая защищенность, нисходящие витки)

**Четвёртая глава** посвящена описанию методики оценки и краткосрочного прогнозирования радиационной обстановки на МКС на основе экспериментальных дозиметрических данных и обсуждению получаемых с ее помощью результатов.

В **параграфе 4.1** представлено описание методики расчетной оценки радиационной обстановки на МКС. При ее реализации был использован эмпирический алгоритм прогноза, основанный на результатах бортовых дозиметрических измерений, на полученных в диссертационном исследовании и подробно рассмотренных в **параграфе 3.4** математических описаниях для экспериментальных зависимостей мощности дозы за каждое из проходов МКС области ЮАА от долготы пересечения МКС референтной широты, а также на данных баллистики. Прогноз динамики дозы на «последующий» период (1-2 суток) осуществлялся на основе анализа дозиметрических данных «предыдущего» периода (1 день – 2 недели). Прогноз на «последующий» период основывался на определении вклада в дозу от ГКЛ и характеристик доз, получаемых МКС при прохождении ЮАА, по дозиметрическим данным «предыдущего» периода, при этом принималось в качестве допущения, что высота полета МКС в течение «предыдущего» и «последующего» периодов времени изменяется незначительно.

В **параграфе 4.2** представлено описание информационных массивов дозиметрических и баллистических данных, использовавшихся при разработке и тестировании методики расчетной оценки радиационной обстановки на МКС.

В **параграфе 4.3** представлены результаты прогнозирования динамики накопленных доз на МКС, и проведен их подробный анализ. Так, на рис. 10, в качестве иллюстрации работы разработанного алгоритма прогноза радиационной обстановки на МКС, приведена прогнозная оценка динамики накопленных доз (обозначена красным) в сравнении с реальными экспериментальными данными (обозначена черным) для 15.07.2009, дата была выбрана произвольно. На левой панели рисунка представлены данные для наименее защищенного канала детекторов ДБ-8, на правой – для наиболее защищенного.

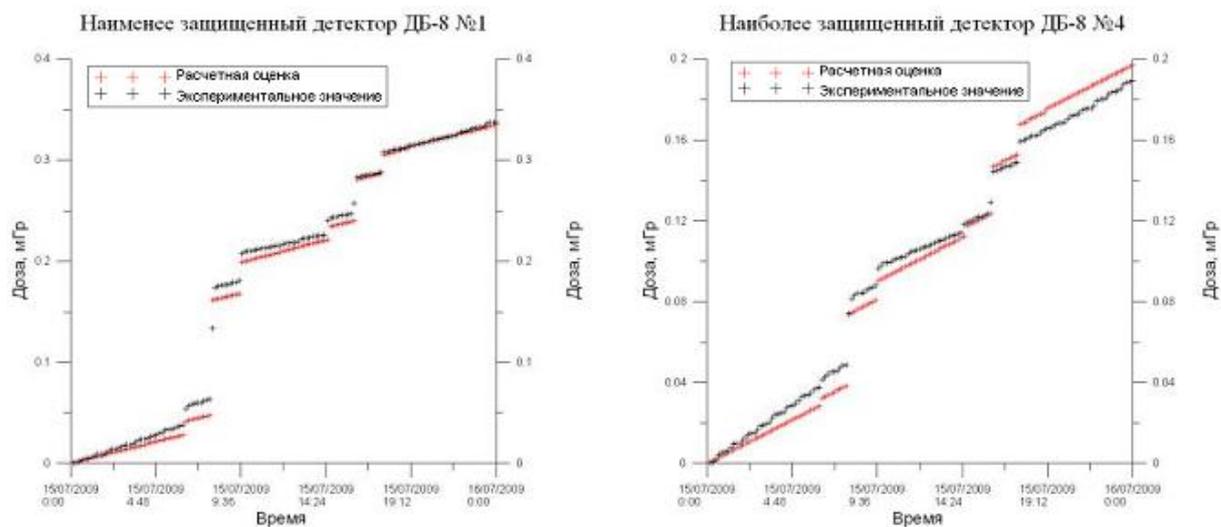


Рис. 10. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2009, длительность «последующего» периода - 1 сутки, длительность «предыдущего» периода - 2 недели (с 01.07.2009 по 14.07.2009)).

Аналогичное приведенному на рис. 10 сравнению прогнозных оценок динамики накопленных доз с экспериментальными данными было проведено для всего временного интервала имеющихся данных (01.07.2005 – 30.11.2011) со скважностью в 14 суток.

Была также проведена количественная оценка точности прогнозирования (при длительности «последующего» периода равной 1 суткам, «предыдущего» периода - 14 дням) согласно формуле

$$M = \frac{|D_{\text{эксп}} - D_{\text{расч}}|_{\text{макс}}}{D_{\text{сут}}} * 100 \% \quad (3), \text{ где:}$$

$M$  – функция расстояния [9] экспериментальных данных и их расчетной оценки,  $D_{\text{эксп}}$  – экспериментальное значение дозы,  $D_{\text{расч}}$  – расчетное значение дозы согласно алгоритму прогноза,  $D_{\text{сут}}$  – доза за «последующий» период времени (в данном случае, за 1 сутки),  $|D_{\text{эксп}} - D_{\text{расч}}|_{\text{макс}}$  – супремум – норма [9], значение модуля разности экспериментального и расчетного значений дозы, максимальное из всех значений, вычисленных для «последующего» периода.

Кроме этого, в **параграфе 4.3** представлено временное распределение функции расстояния экспериментальных и расчетных значений доз (рис. 11), а также (рис. 12) функция распределения супремум – норм экспериментальных данных и их расчетных оценок для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8.

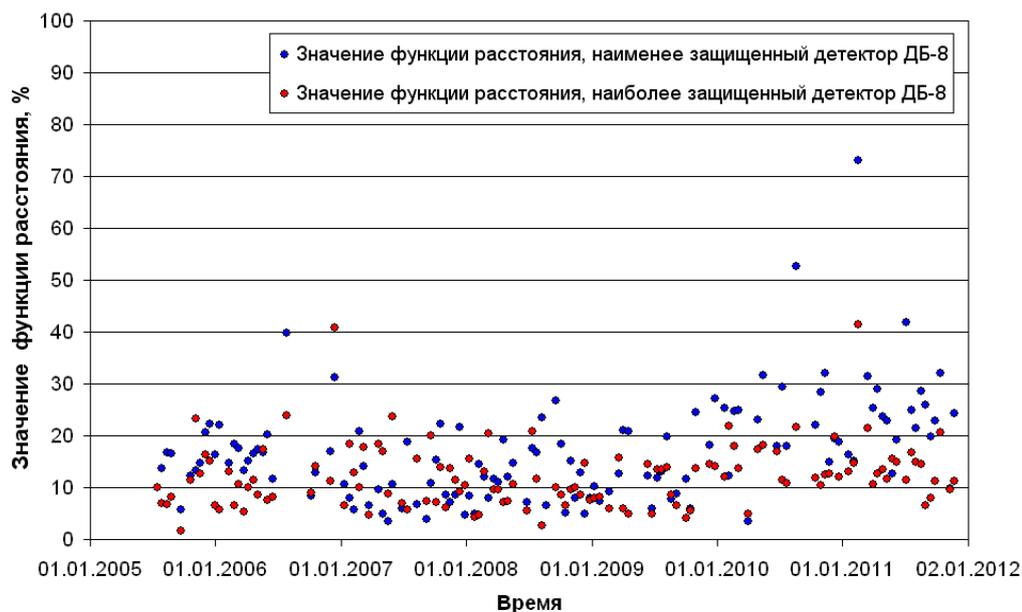


Рис. 11. Временное распределение количественной оценки близости прогнозных оценок динамики накопленных доз к реальным экспериментальным данным для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8.

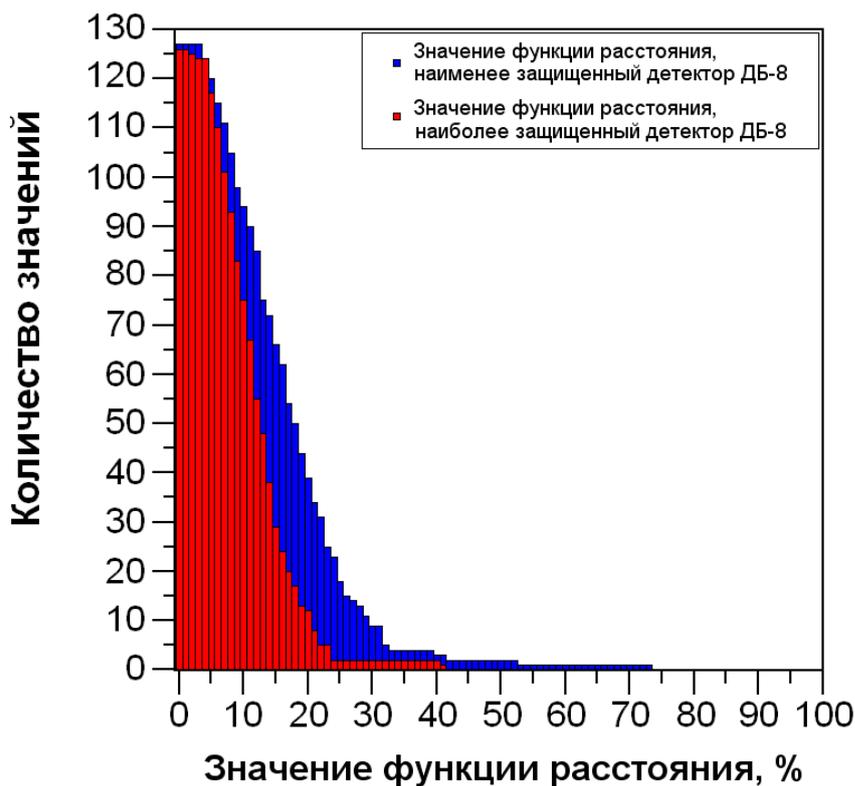


Рис. 12. Функция распределения количественной оценки близости прогнозных оценок динамики накопленных доз к реальным экспериментальным данным для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8.

Как можно видеть из рис. 11 и 12, для наиболее защищенного детектора ДБ-8 удается произвести прогноз динамики накопленных доз с погрешностью не более 25%, для наименее защищенного - с погрешностью не более 32% (при значении доверительной

вероятности, равном 96%). Количество значений, выходящих за обозначенные границы точности прогноза (75% и 68% соответственно), равно пяти, что составляет ~ 4% от общего их количества (общее количество значений равно 127). Это эквивалентно уровню значимости отклонений, равному 0,04.

Подобная погрешность краткосрочного прогноза радиационной обстановки (порядка 30%) для нужд практической космонавтики считается приемлемой.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

По данным СРК МКС исследованы вариации мощности поглощенной дозы на орбитальном комплексе МКС за период 2005 – 2011 гг.

Получены следующие результаты:

I. Разработана методика обработки данных дозиметрических блоков ДБ-8 системы радиационного контроля МКС, обеспечивающая оценку вклада в дозу на МКС, обусловленного галактическими космическими лучами (ГКЛ) и внутренним радиационным поясом Земли (РПЗ).

II. Проведенный анализ данных СРК за период 2005 – 2009 гг., характеризовавшийся низким уровнем солнечной активности, позволил определить вклад в суточную дозу, вносимый ГКЛ и РПЗ.

III. Установлено, что доза от ГКЛ практически не зависит от условий защищенности детекторов СРК оборудованием МКС.

IV. Установлено, что изменения дозы от ГКЛ на борту станции хорошо коррелируют с изменениями интенсивности потоков космических лучей, прослеживаемых по данным нейтронных мониторов: коэффициенты корреляции Пирсона [1] между вкладом в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ и скоростью счета нейтронного монитора по данным станции в г. Апатиты составляют, соответственно, 0,91 и 0,92 для наименее защищенного и наиболее защищенного блоков ДБ-8.

V. Показано, что доза от РПЗ на МКС существенно зависит от условий защищенности детекторов и высоты орбиты, соответствующие изменения могут превышать 2 раза и более.

VI. Получены эмпирические формулы, позволяющие производить оценки дозы, получаемой МКС при прохождении через зону ЮАА.

VII. На основе данных СРК разработана инженерная методика прогнозирования динамики накопления дозы на МКС. Показано, что при значении доверительной вероятности, равном 96%, погрешность методики не более 25% для наиболее защищенного детектора ДБ-8, для наименее защищенного – погрешность не более 32%.

В результате проведенной работы получены оценки вклада в суточную дозу на МКС от ГКЛ и от РПЗ; установлена взаимосвязь дозы от ГКЛ с интенсивностью потоков частиц ГКЛ, а дозы от РПЗ – с высотой орбиты станции.

Информации, содержащейся в данных СРК, достаточно для краткосрочного (на 1 - 2 суток) прогноза динамики накопления дозы на борту станции с приемлемой (порядка 30%) погрешностью.

Разработанная методика прогнозирования радиационной обстановки может быть использована для обработки и анализа текущей информации СРК при оперативном обеспечении радиационной безопасности экипажей МКС.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. *Лишневский А.Э., Панасюк М.И., Бенгин В.В., Петров В.М., Волков А.Н., Нечаев О.Ю.* Вариации радиационной обстановки на МКС в 2008 году. // Космические исследования. М., Наука. 2010. Т. 48. №2. С. 212-217.

A2. *Лишневский А. Э., Панасюк М. И., Бенгин В. В., Петров В. М., Волков А. Н., Нечаев О. Ю.* Вариации радиационной обстановки на Международной Космической Станции в 2005–2009 годах. // Космические исследования. М., Наука. 2012. Т. 50. № 4. С. 341–345.

A3. *Лишневский А. Э., Панасюк М. И., Нечаев О. Ю., Бенгин В. В., Петров В. М., Волков А. Н., Лягушин В. И., Николаев И. В.* Результаты мониторинга вариаций поглощенной дозы на Международной Космической Станции за период 2005–2011 гг. // Космические исследования. М., Наука. 2012. Т. 50. № 5. С. 419–424.

A4. *Лишневский А. Э., Бенгин В. В.* Методика краткосрочного прогноза динамики накопления поглощенной дозы на Международной Космической Станции по данным системы радиационного контроля // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Химки, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2013. № 5. С. 54 – 59

A5. Международная конференция «Влияние космической погоды на человека: в космосе и на Земле» г. Москва, ИКИ РАН, 4 – 8 июня 2012 г., тезисы докладов, С. 166. Постерный доклад SWH P.45 *Лишневский А. Э., Панасюк М. И., Нечаев О. Ю., Бенгин В. В., Петров В. М., Волков А. Н., Лягушин В. И., Николаев И. В.* Вариации радиационной обстановки на Международной Космической Станции за период 2001 – 2011 гг. по данным системы радиационного контроля.

A6. Седьмой Международный Аэрокосмический Конгресс IAC'12 г. Москва, 26-31 августа 2012 г., тезисы докладов, С. 51. Доклад 2.6 *Лишневский А. Э., Панасюк М. И., Нечаев О. Ю., Бенгин В. В., Петров В. М., Волков А. Н., Лягушин В. И., Николаев И. В.* Вариации радиационной обстановки на Международной Космической Станции за период 2001 – 2011 гг. по данным системы радиационного контроля

A7. XIV конференция по космической биологии и авиакосмической медицине с международным участием, посвященная 50-летию создания ИМБП РАН г. Москва, 28-30 октября 2013 г., тезисы докладов, С. 15 *Бенгин В. В., Петров В. М., Панасюк М. И., Нечаев О. Ю., Волков А. Н., Лягушин В. И., Николаев И. В., Александрин А.П., Тельцов М.В., Братолобова – Цулукидзе Л.С., Лишневский А.Э.* Основные результаты, полученные в ходе эксплуатации системы радиационного контроля на Служебном модуле Международной космической станции

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Лялин В.С., Зверева И.Г., Никифорова Н.Г.* Статистика: теория и практика в Excel: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, ИНФРА-М. 2010. С. 243.

2. *Badhwar G. D., Atwell W., Cash B., Petrov V. M., Akatov Yu. A., Tchernykh I. V., Shurshakov V. A. and Arkhangelsky V. A.* Radiation environment on the MIR orbital station during solar minimum // Adv. Space Res. 1998. V. 22. №. 4. PP. 501-510.

3. Техническое описание. Система радиационного контроля (СРК) Em 1.320.017 ТО. НИИЯФ МГУ. 1999.

4. *Петров В.М., Бенгин В.В., Шуришаков В.А., Панасюк М.И., Кутузов Ю.В., Морозов О.В., Мясников А.Г., Тельцов М.В., Марков А.В., Волков А.Н., Лягушин В.И., Николаев И.В., Александрин А.П.* Поглощенные дозы в октябре – ноябре 2003 года на российском сегменте международной космической станции по данным системы радиационного контроля. //Космические исследования. М., Наука. 2006. Т. 44. №2. С. 112-117.

5. *Митрикас В.Г.* Модель защищенности обитаемых отсеков служебного модуля Международной космической станции для оценки радиационной опасности // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2004 Т. 38. № 3. С. 41-47.
6. Научно-технический сборник «Модель космоса». М., 2007. Т. 1. Гл. 3.9, 3.10. С. 627–667.
7. Сато Ю. Без паники! Цифровая обработка сигналов. / Пер. с японского Т.Г.Селиной. М.: Додэка-XXI. 2010. С. 29.
8. *Мирошниченко Л.И., Петров В.М.* Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. *Дюран Б., Оддел П.* Кластерный анализ . М.: Статистика. 1977. С. 17.

Подписано в печать 27.02.2014

Формат А5

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Тираж 100 экз. Заказ № 2521

Отдел полиграфии Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова  
119192 Москва, Ломоносовский проспект, 27