

Московский ордена Ленина, ордена Трудового Красного Знамени
и ордена Октябрьской Революции государственный университет
имени М.В. Ломоносова

НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

ЛИШНЕВСКИЙ АНДРЕЙ ЭРИКОВИЧ

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

Специальность 01.04.08 - физика плазмы

диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:
доктор физ. - мат. наук,
профессор Панасюк М.И.
кандидат физ. - мат. наук,
Бенгин В.В.

Москва, 2014 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКЕ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ (ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ)	9
1.1. История экспериментальных исследований радиационной обстановки в ближнем космосе	9
1.2. Особенности радиационной обстановки на околоземных орбитах в различных фазах цикла солнечной активности. Вариации радиационной обстановки.	35
1.3. Модели радиационной обстановки на околоземных орбитах	37
1.4. Применение моделей радиационной обстановки. Перспективы и задачи дальнейших исследований.....	42
Глава 2. ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ	45
2.1. Описание аппаратуры.....	45
2.2. Описание информационных массивов	55
2.3. Методика обработки дозиметрических данных	59
Глава 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	70
3.1. Результаты обработки данных с десятиминутным временным разрешением (первая методика обработки данных)	70
3.2. Вклад в суточную дозу от ГКЛ	72
3.3. Вклад в суточную дозу от РПЗ.....	75
3.4. Результаты обработки данных с десятисекундным временным разрешением (вторая методика обработки данных)	78
Глава 4. МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ ДОЗЫ НА МКС	103

4.1. Описание методики расчетной оценки радиационной обстановки на МКС.....	103
4.2. Описание информационных массивов	108
4.3. Результаты прогнозирования динамики накопленных доз на МКС .	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
ВЫВОДЫ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127

ВВЕДЕНИЕ

То, что околоземное космическое пространство таит в себе радиационную угрозу, стало известно исследователям с самого начала космической эры. В октябре и ноябре 1957 г. в Советском Союзе на околоземную орбиту были выведены аппараты «Спутник-1» и «Спутник-2». Научная нагрузка для «Спутника-2» была разработана исследовательской группой под руководством С.Н. Вернова в НИИЯФ МГУ. Основную часть научной нагрузки для «Спутника-2» составлял счетчик Гейгера-Мюллера, предназначенный для регистрации потоков заряженных частиц. В январе 1958 г. 4-х ступенчатая ракета «Юпитер-С», разработанная Вернером фон Брауном (США), вывела на околоземную орбиту первый американский искусственный спутник, «Explorer-1». Установленное на «Explorer-1» научное оборудование было практически идентично аппаратуре, установленной на советском «Спутнике-2»; это был счетчик Гейгера – Мюллера, сконструированный под руководством Джеймса Ван Аллена (Айовский Университет).

И советский, и американский аппараты зарегистрировали мощнейшие потоки космической радиации, которые не были предсказаны теоретическими моделями, существовавшими на тот момент (впоследствии зарегистрированные на «Спутнике-2» и «Explorer-1» потоки радиации будут отождествлены с потоками частиц радиационных поясов Земли (РПЗ) [1]). С этого самого момента и до настоящего времени тема космической радиации и радиационной безопасности во время космических полетов находится в зоне интереса различных групп исследователей. 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.

Актуальность темы. 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 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 исследования. Целью диссертационной работы является определение вариаций вклада ГКЛ и протонов 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 являются:

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 методику краткосрочного прогнозирования динамики накопления дозы на МКС

Объектом исследования является 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.

Научная новизна состоит:

1. В охватывающем более половины цикла СА ряде данных, характеризующих вклад ГКЛ в среднесуточную дозу на борту МКС.
2. В экспериментальных зависимостях дозы, получаемой МКС при прохождении зоны РПЗ, от параметров траектории станции, характеризующих это прохождение.

Практическая ценность 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.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, выводов и списка цитируемой литературы.

В литературном обзоре (глава 1) представлена история экспериментальных исследований, посвященных изучению радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, представлены основные понятия и определения, а также представлен обзор моделей, описывающих радиационную угрозу в ближнем космосе.

Вторая глава диссертации посвящена описанию штатной системы радиационного контроля (СРК) Международной Космической Станции. В этой главе представлены описание СРК, структура получаемой с нее телеметрической информации, а также методика обработки данных измерений доз на МКС.

В третьей главе анализируются результаты обработки дозиметрических данных СРК. Подробно рассматриваются вклады от ГКЛ и от РПЗ в суточную дозу, получаемую МКС, связь этих вкладов с потоками частиц в околоземном космическом пространстве, а также с условиями защищенности детекторов и высотой орбиты станции.

В четвёртой главе обсуждается разработанная на основе анализа данных СРК инженерная методика расчетной оценки дозы на МКС, результаты ее апробирования, а также точность прогнозирования при помощи этой методики динамики накопленных доз на МКС.

В заключении подведены основные итоги диссертационной работы. В частности, на защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. 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).

2. 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.
3. 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%.

Результаты диссертации были представлены на 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 IАС'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.) и опубликованы в работах [2], [3], [4], [5].

Автор хотел бы посвятить эту диссертационную работу своему отцу, кандидату геолого – минералогических наук, Лишневному Эрику Николаевичу, к сожалению, не дожившему до даты её защиты.

Глава 1. ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКЕ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ (ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ)

1.1. История экспериментальных исследований радиационной обстановки в ближнем космосе

Как уже упоминалось, первая аппаратура, предназначавшаяся для радиационных измерений в космическом пространстве, была установлена на 2-м советском ИСЗ, запущенном 3 ноября 1957 г. Эти приборы были разработаны и изготовлены в НИИЯФ МГУ под руководством академика С.Н. Вернова. При помощи этого оборудования впервые удалось зарегистрировать заряженные частицы внешнего радиационного пояса Земли. К сожалению, проблемы с получением телеметрической информации с этого ИСЗ не дали возможности изучить радиационные условия на всех участках орбиты спутника, и это значительно осложнило интерпретацию полученных результатов. Тем не менее, это был самый первый опыт экспериментального изучения радиационных условий в околоземном космическом пространстве, и опыт успешный. В дальнейшем для исследования околоземной радиационной обстановки использовались не только ИСЗ, но и пилотируемые космические аппараты.

В Новом Свете исследования радиационной обстановки вблизи Земли при помощи ИСЗ были впервые осуществлены американской исследовательской группой под руководством Дж. Ван Аллена (Айовский Университет). Группе Ван Аллена удалось получить более полную информацию о радиационных условиях в околоземном космическом пространстве. Оборудование этой научной группы было установлено на американских ИСЗ «Эксплорер-1» и «Эксплорер-3», отправившихся в полет в феврале-марте 1958 г. Но орбиты этих ИСЗ проходили только через внутренний радиационный пояс Земли.

Оборудование, установленное на 3-м советском ИСЗ, запущенном 15 мая 1958 г., позволило, благодаря орбитам этих спутников, изучить потоки заряженных частиц как во внутреннем, так и во внешнем РПЗ.

Согласно [6], приборы для изучения космической радиации, установленные на борту 2-го и 3-го ИСЗ, дали уникальную информацию о потоках радиации почти над всей поверхностью Земли. На рис. 1 приведено распределение потоков частиц на высоте 320 км, по данным 2-го ИСЗ (согласно [6]). Из рис. 1 видно, что в Южном полушарии существуют области, где на высоте 320 км зарегистрированы потоки радиации, в 5 раз и более превышающие средние по Земле. До полетов 2-го и 3-го ИСЗ предполагалось, что на этих высотах никакой радиации, кроме космических лучей, не существует, и обнаружение в Южной Атлантике зон повышенных потоков энергичных частиц явилось большой неожиданностью [6]. Оказалось, что это частицы РПЗ, опускающиеся на малые высоты (200-300 км) в районах отрицательных магнитных аномалий - тех областей, где напряженность магнитного поля Земли ниже средней для данной широты [6]. Таких аномалий значительных размеров оказалось две - в Южном полушарии (Бразильская и Южно-Атлантическая) и одна - в Северном (Северо-Атлантическая) [6].

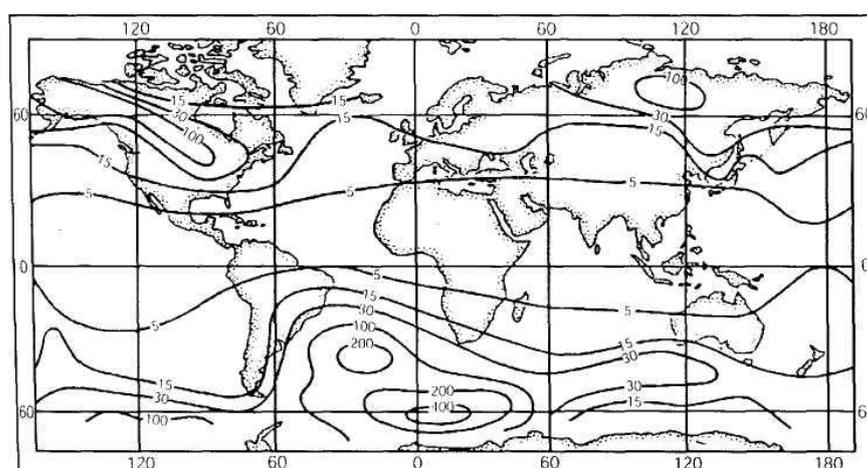


Рис. 1. Распределение потоков частиц по данным 2-го ИСЗ над поверхностью земного шара на высоте 320 км. Цифры у линий - потоки частиц в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (согласно [6]).

В дальнейшем многие и отечественные, и зарубежные искусственные спутники и пилотируемые аппараты имели одной из своих научных задач изучение частиц РПЗ, частиц СКЛ и ГКЛ, а также иных источников радиации, составляющих в комплексе радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве [7].

В таблице 1 приведены сведения о начальных этапах исследования космической радиации на советских КА (согласно [7]).

Таблица 1.

Название ИСЗ	Дата запуска	Высота перигея, км	Высота апогея, км	Наклонение, град	Основные результаты
2 ИСЗ 3 ИСЗ	3.11.1957 15.05.1958	225 225	1670 1880	65 65	Открытие РПЗ
"Космос 4, 7, 9, 15, 17,41"	1962-1964	180-300	370-780	49-65	Изучение РПЗ и КЛ
"Электрон-1" "Электрон-2"	30.01.1964 30.01.1964	406 460	7100 68200	61 61	Радиационное повреждение солнечных батарей
"Электрон-3" "Электрон-4"	11.07.1964 11.07.1964	405 460	7040 66230	61 61	Изучение РПЗ, защита солнечных батарей
Корабли-спутники "Космос", орбитальные станции	с 1960	180-300	250-400	52-65	Дозиметрические измерения

Необходимо отметить исследования на КА серии «Электрон» (1964 г.). Эти космические аппараты, запускавшиеся попарно («Электрон-1, 2», «Электрон-3, 4») с помощью одной ракеты-носителя, имели различные параметры орбит. Это дало возможность детально исследовать всю область РПЗ. Но исследования, проведенные на КА этой серии, дали не только значительную информацию о потоках частиц РПЗ, но показали также и то, что космической радиация имеет поражающее воздействие на бортовые системы КА (в частности, на солнечные батареи). На этих ИСЗ впервые были получены убедительные доказательства такого поражающего воздействия, и на этой же серии космических аппаратов были впервые опробованы

некоторые меры защиты оборудования от воздействия космической радиации. В частности, на ИСЗ «Электрон-3» и «Электрон-4», запущенных через полгода после первой пары ИСЗ этой серии, солнечные батареи были защищены специальными тонкими прозрачными покрытиями. Это позволило значительно ослабить влияние потоков протонов радиационных поясов Земли на солнечные батареи, и в результате ИСЗ «Электрон-3, 4» проработали значительно дольше, по сравнению с первой парой спутников [6].

В дальнейшем, начиная с 1960-х гг. на различных КА (таких, как серия ИСЗ «Молния», «Космос», «Горизонт», «Прогноз») проводились измерения, позволившие получить прямую информацию о радиационных условиях на борту КА, необходимую как для нужд пилотируемой космонавтики, так и для прогнозирования сроков службы различной бортовой аппаратуры [6].

Опыт этих работ показал, что космос - очень динамичная среда, и предсказать точные параметры этой среды довольно сложно. Поэтому, для оценки воздействия частиц РПЗ, ГКЛ, космической плазмы и СКЛ на космические аппараты, необходим постоянный мониторинг непосредственно на борту космических аппаратов. Основными задачами такой службы мониторинга будут: оценка фактического воздействия радиации на космические аппараты; апробация и уточнение существующих и разработка новых динамических моделей радиационных полей; получение экспериментальных данных для исследования магнитосферы Земли [6]. Эта концепция была разработана в 1970-х гг. в НИИЯФ МГУ Э. Н. Сосновцом, и для ее осуществления была разработана и создана унифицированная патрульная аппаратура КДК-М (затем - контрольно – дозиметрический модуль «ДИЭРА») [6]. Внешний вид этого модуля и состав его детекторов приведены на рис. 2 и в таблице 2 соответственно (согласно [6]).

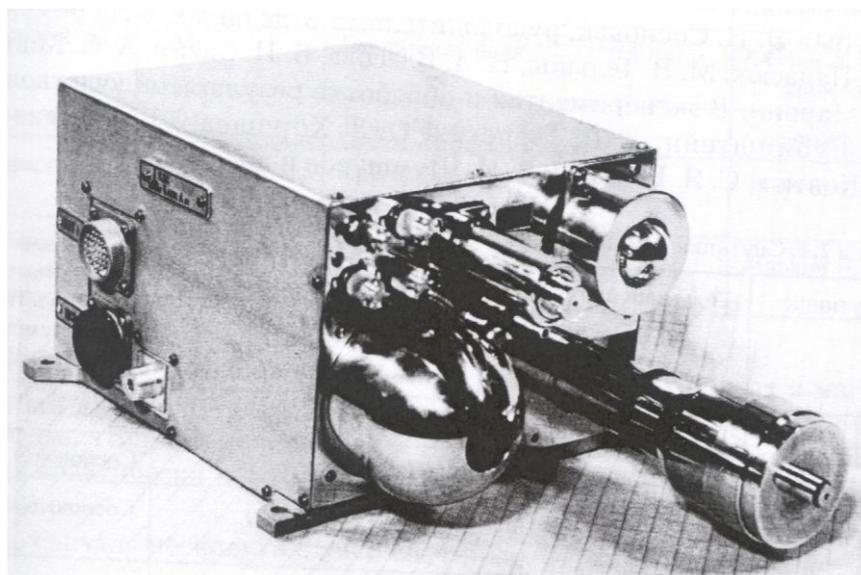


Рис. 2 Внешний вид блока детектирования унифицированного комплекса ДИЭРА (согласно [6])

Таблица 2.

Вид детектора	Диапазон энергий
Электростатический анализатор	$E_{i,e} = 0,1-14$ кэВ
Торцовый газоразрядный счётчик	$E_e = 0,1-1,5$ МэВ, $E_p = 12-50$ МэВ
Телескоп из сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов	$E_e = 2-6$ МэВ, $E_p = 10-300$ МэВ
Черенковский счётчик	$E_e > 2$ МэВ, $E_p > 350$ МэВ
Ионизационная камера (дозиметр)	$E_e > 4$ МэВ, $E_p > 50$ МэВ

Установка этого модуля производилась на различные российские и советские КА связи, навигации и телевидения, как работавшие в прошлом, так и функционирующие сейчас на геостационарных и эллиптических орбитах (серия ИСЗ «Экспресс», уже упоминавшаяся серия ИСЗ «Молния»). В 1992-1997 гг. контрольно-дозиметрические комплексы «ДИЭРА» функционировали на КА «Глонасс-56,60», «Горизонт-41,43», «Экспресс-А1»,

«Галс». Два комплекта «ДИЭРА» также были установлены на спутниках «Экспресс-А2» и «Экспресс-А3», запущенных в 2000 г. [6].

Создание пилотируемых орбитальных комплексов позволило осуществлять исследования радиационной обстановки и на этом классе космических аппаратов. Длительные мониторинговые исследования радиационной обстановки были проведены на таких орбитальных пилотируемых комплексах, как, например, «Салют-6» - «Союз», «МИР», «МКС».

На орбитальном комплексе «Салют-6» - «Союз», выведенном на околоземную орбиту 29 сентября 1977 г. (прекратил свое существование 28 июля 1982 г.), были осуществлены эксперименты «Интеграл», «Пилле» и «ППД-2» [8]. Среди научных целей этих экспериментов было, в том числе, изучение распределения поглощенной дозы космического излучения внутри орбитального комплекса за длительные интервалы времени. Эксперимент «Интеграл» на орбитальном комплексе «Салют-6» - «Союз» проводился в период максимума солнечной активности 21-го цикла, в период 1979—1981 гг., и заключался в экспонировании в разных местах обитаемых отсеков станции наборов детекторов ионизирующего излучения. После определенного времени экспонирования детекторы возвращались на Землю для обработки. В качестве регистраторов излучения использовались автономные твердотельные детекторы: термолюминесцентные кристаллофосфоры и стекла, трековые детекторы из пластика, фотопленки (согласно [8]). Всего на станции было проведено девять этапов эксперимента «Интеграл» с продолжительностью экспонирования детекторов от 31 до 308 суток (результаты представлены в таблице 3), согласно [8].

Таблица 3.

Экспонирование		Номер сборки	Место размещения	Средняя доза, мГр	Средняя мощность дозы, мГр/сут
Период	Продолжительность, сут.				
12.03.1979 - 13.06.1979	93	1	Рабочий отсек панель 101	13,84±0,64	0,149±0,007
		2	Переходный отсек точка № 1	18,04±0,75	0,194±0,008
		3	Рабочий отсек спальное место № 1	16,43±0,83	0,177±0,009
		4	спальное место № 2	14,27±0,61	0,153±0,009
13.05.1979 - 13.06.1979	31	5	Рабочий отсек панель 50	4,65±0,20	0,150±0,006
		6	панель 55	5,81±0,42	0,187±0,013
		7	спальное место № 1	5,78±0,46	0,186±0,015
		8	спальное место № 2	4,67±0,26	0,150±0,008
13.05.1979 - 19.08.1979	96	9	Рабочий отсек панель 101	20,78±1,13	0,212±0,012
		10	пост № 1	20,31±1,54	0,207±0,016
		11	Переходный отсек точка № 1	30,54±1,15	0,312±0,012
		12	точка № 2	30,71±1,66	0,312±0,017
26.05.1979 - 31.07.1980	66	13	Рабочий отсек спальное место № 2	8,42±0,14	0,128±0,002
		14	панель 34	9,80±0,18	0,149±0,003
26.05.1980 - 26.09.1980	123	15	Переходный отсек точка № 1	17,27±0,33	0,140±0,004
		16	точка № 2	17,63±0,44	0,143±0,004
26.05.1980 - 11.10.1980	138	17	Рабочий отсек спальное место № 1	20,36±0,87	0,148±0,006
		18	пост № 1	18,64±0,18	0,135±0,001
26.05.1980 - 30.03.1981	308	19	Переходный отсек точка № 1	34,53±0,28	0,112±0,001
		20	точка № 2	34,50±0,71	0,112±0,002
22.03.1981 - 22.05.1981	61	21	Рабочий отсек спальное место № 1	9,00±0,50	0,148±0,008
		22	спальное место № 2	9,45±0,60	0,155±0,01
22.03.1981 - 26.05.1981	65	23	Переходный отсек точка № 1	10,65±0,65	0,164±0,01
		24	точка № 2	10,95±0,70	0,169±0,01

Еще один эксперимент, проведенный на орбитальном комплексе «Салют-6» - «Союз», эксперимент «Пилле», был, помимо изучения дозовых распределений, посвящен оперативному определению индивидуальных доз за любые промежутки времени непосредственно на борту станции (согласно [8]). В комплект аппаратуры для эксперимента «Пилле» входил малогабаритный бортовой измерительный пульт и набор из 16 автономных термолюминесцентных датчиков. Пульт обеспечивал снятие информации с термолюминесцентных датчиков и индикацию результата на световом табло. Датчик представлял собой автономное устройство с детекторным элементом — кристаллическим $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$, нанесенным монослоем на нагревательный элемент и запаянным в стеклянный баллончик. Аппаратура «Пилле» обеспечивала измерение дозы в диапазоне 10^{-5} - 0,1 Гр с точностью $\pm 5\%$ (согласно [8]). Внешний вид оборудования, использованного для эксперимента «Пилле», а также его результаты представлены на рис. 3 и в таблице 4 соответственно (согласно [8]).



Рис. 3. Бортовой дозиметрический пульт «Пилле» с датчиком

Таблица 4.

Место размещения датчика	Величина дозы, мГр	Средняя мощность дозы за период, мГр/сут
Одежда		
командира основной экспедиции	0,390	0,081
бортинженера основной экспедиции	0,416	0,087
командира экспедиции посещения	0,405	0,084
космонавта - исследователя экспедиции посещения	0,393	0,082
Переходный отсек		
точка № 1	0,524	0,109
точка № 2	0,447	0,093
Рабочий отсек		
панель 34	0,430	0,090
пост № 1	0,320	0,067
спальное место № 1	0,515	0,107
спальное место № 2	0,500	0,104

Также при полете ОК «Салют-6» - «Союз» в пилотируемом режиме для контроля радиационной обстановки в обитаемых отсеках станции использовался автономный прямопоказывающий дозиметр «ППД-2» (согласно [8]). Дозиметр обеспечивал измерение интегральной дозы ионизирующего излучения в диапазоне от 10^{-4} до 1,0 Гр с погрешностью 20%. Считывание информации производилось визуально по стрелочному индикатору. В соответствии с программой радиационных исследований космонавты последовательно помещали дозиметр в фиксированные точки в обитаемых отсеках, где осуществлялось его экспонирование в течение различных интервалов времени. В конце каждого интервала определялась величина поглощенной дозы в месте расположения дозиметра за данное время. Эксперимент проводился на ОК «Салют-6» - «Союз» с декабря 1977 г. по июль 1980 г. в местах преимущественного пребывания экипажей на станции (всего пять точек). Результаты изучения радиационной обстановки на

станции по данным эксперимента «ППД-2» представлены в таблице 5 (согласно [8]).

Таблица 5.

Время измерения	Среднесуточная доза, мГр/сут			Время измерения	Среднесуточная доза, мГр/сут		
	Переходный отсек	Рабочий отсек, спальное место			Переходный отсек	Рабочий отсек, спальное место	
		№ 1	№2			№ 1	№2
25.12.1977 - 30.12.1977	–	0,176	–	23.04.1979 - 03.05.1979	–	0,120	–
04.01.1978 - 11.01.1978	0,324	–	–	03.05.1979 - 13.05.1979	–	–	0,084
30.01.1978 - 02.03.1978	–	–	0,136	13.05.1979 - 02.06.1979	0,146	–	–
24.06.1978 - 10.07.1978	0,246	–	–	15.06.1980 - 25.06.1980	–	0,080	–
18.07.1978 - 21.07.1978	–	0,160	–	25.06.1980 - 05.07.1980	–	–	0,069
21.07.1978 - 30.07.1978	–	–	0,112	05.07.1980 - 15.07.1980	0,114	–	–

Согласно [8], результаты всех трех экспериментов показали хорошее согласие друг с другом.

Базовый блок орбитального комплекса «МИР» был выведен на орбиту 20 февраля 1986 года. Затем в течение 10 лет к нему один за другим были пристыкованы ещё шесть модулей. 23 марта 2001 года ОК «МИР» был затоплен в водах Тихого океана.

За время существования ОК «МИР» было проведено значительное количество экспериментов, посвященных изучению радиационной обстановки на этой станции – например, такие, как «ЛЮЛИН», ДК-1 и С-11 («Канопус»), «Цирцея», «Нозика», «Доза-А1», и др. (согласно [9]).

Эксперимент «Пилле», проводившийся на «Салюте-6», также продолжил свое существование на станции «МИР».

Эксперимент «Канопус», посвященный исследованию радиационных полей в условиях малой экранировки детекторов излучения оборудованием станции, проводился на борту орбитальной станции «МИР» в 1997-1999 гг. Измерения осуществлялись с помощью приборов, размещенных на внешней поверхности модуля «Природа» ОС «МИР» (согласно [9]). Для проведения эксперимента «Канопус» использовались дозиметр «ДК-1» и спектрометр «С-11».

Дозиметр «ДК-1» был предназначен для измерения поглощенной дозы и потока частиц ионизирующего излучения. Прибор состоял из 3 блоков - двух блоков детектирования и одного блока регистрации. Измерительным элементом каждого из блоков детектирования являлись кремниевые полупроводниковые детекторы, чувствительная область которых представляла собой диск площадью 1 см^2 и толщиной 0,5 мм. Конструкция блоков детектирования обеспечивала различную толщину экранировки детекторов веществом. В первом блоке детектор был закрыт фольгой толщиной 0,155 мм ($0,0418 \text{ г/см}^2$). Во втором блоке детектор был размещен внутри алюминиевой сферы диаметром 165 мм с толщиной стенки 4 мм ($1,12 \text{ г/см}^2$) (согласно [9]).

Спектрометр «С-11» состоял из двух блоков: блока детектирования (БД) и блока анализа (БА), соединенных кабелем. БД содержал телескопическую систему, состоящую из трех детекторов: двух тонких полупроводниковых и одного сцинтилляционного. Телескоп детекторов вырезал во внешнем пространстве конус с углом полураствора 25° . Заряженная частица, попадая в телескопическую систему анализатора «С-11», оставляла в детекторах часть своей энергии. Энерговыделения в детекторах преобразовывались в электрические импульсы, которые затем поступали в блок анализа. Проведение этого эксперимента позволило получить массив

данных по потокам протонов и по мощности дозы в зоне Южно-Атлантической аномалии на внешней поверхности станции «МИР» за период ~ 2,5 года (согласно [9]).

Эксперимент «Цирцея» и его более упрощенная версия - прибор «Нозика» - были ориентированы на измерение поглощенной и эквивалентной доз и определение коэффициента качества излучения внутри станции. Прибор «Цирцея» представлял из себя тканеэквивалентный дозиметр, основной направленностью работы которого было определение параметров, в наибольшей степени характеризующих радиобиологические эффекты (согласно [9]). Эксперимент «Цирцея» проводился на ОК «МИР» в период 1988-1990 гг.

Прибор «Нозика» являлся модификацией прибора «Цирцея». Он обеспечивал получение более подробной информации о характеристиках поля излучения, о спектрах ЛПЭ с различной детальностью усреднения вдоль траектории. Так же, как и прибор «Цирцея», он был предназначен для измерения дозиметрических параметров космического ионизирующего излучения на станции «МИР» с последующей передачей результатов измерений на Землю по системе телеметрии (согласно [9]). Детектирующим элементом в этом приборе служил тканеэквивалентный пропорциональный счетчик, аналогичный датчику прибора «Цирцея». «Нозика» был доставлен на борт станции «МИР» российско-французским экипажем на корабле «Союз» и включен в 18 час. 19 мин. 21 сек. 30 июля 1992 года по времени ЦУП (согласно [9]). За время его работы были получены данные по временным распределениям потока заряженных частиц ионизирующего космического излучения, по мощности поглощенной дозы, мощности эквивалентной дозы, а также по спектрам ЛПЭ [9].

Совместный советско-болгарский проект, система дозиметрической радиометрии «ЛЮЛИН», выполненный в конце 1980-х годов, был посвящен определению параметров радиационного поля в различных отсеках станции

«МИР». Это исследование выявило наиболее защищенные и наименее защищенные отсеки станции с точки зрения радиационной защиты экипажа [10]. Результаты этих исследований значительно повлияли на рекомендации Российской Службы Радиационной безопасности [11], данные космонавтам в течение наиболее опасных периодов 22 солнечного цикла. Так, благодаря этим инструкциям, радиационное облучение космонавтов во время солнечной вспышки 20 октября 1989 было в три раза меньше, чем могло бы ожидаться в отсутствие этих рекомендаций [10].

Еще один эксперимент, «Доза-А1», был направлен на изучение закономерностей динамики распределения доз в отсеках станции «Мир» при полете в условиях нормальной радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве [9]. Первый комплект аппаратуры «Доза-А1» был доставлен на борт станции «МИР» в сентябре 1995 года; с 1 декабря 1998 года начались систематические измерения. Многоканальный дозиметр «Доза-А1» состоял из 7 автономных дозиметров и интерфейсного блока для передачи информации на Землю и подзарядки аккумуляторных батарей автономных дозиметров. Аппаратура «Доза-А1» позволяла регистрировать мощность поглощенной дозы и плотность потока заряженных частиц в диапазонах от $2 \cdot 10^{-3}$ до 60 мкГр/с и от 1 до 10^5 см⁻²·с⁻¹ соответственно [9]. Чувствительными элементами дозиметров являлись кремниевые полупроводниковые детекторы. Дозиметры имели дозовую чувствительность $2,4 \cdot 10^{-4}$ мкГр/имп и обеспечивали временное разрешение 15 секунд.

Методика эксперимента заключалась в проведении длительных мониторинговых измерений мощности поглощенной дозы и плотности потока излучения в заданных зонах базового блока станции «МИР». Периодически (1 раз в 5-7 суток) проводился сброс данных по телеметрическому каналу на Землю, осуществлялась подзарядка источников питания АД, в процессе которой не прекращался набор данных о мощности поглощенной дозы каждым детекторным блоком. После подзарядки каждый блок возвращали на

место постоянного расположения для продолжения измерений в точке его установки [9].

Еще один прибор, Р-16, служил на орбитальной станции «Мир» основным патрульным дозиметром [12]. В состав Р-16 входили две ионизационные камеры со стенкой из пластика толщиной $0,5 \text{ г*см}^{-2}$; одна из ионизационных камер имела также дополнительный экран толщиной $3,0 \text{ г*см}^{-2}$. Сама ионизационная камера представляла собой цилиндр диаметром 60 мм, шаровидный со стороны рабочего объема, наполненный чистым аргоном до давления 4,5 атм. Точность измерения поглощенной дозы этим прибором в диапазоне мощностей доз от 4 до 1000 мкГр*ч^{-1} была не хуже 5% для всех видов проникающих излучений. Регулярный прием телеметрической информации с дозиметра Р-16 осуществлялся с марта 1986 г. по январь 2001 г. [12]. Фотография прибора Р-16 представлена на рис. 4 (согласно [12]).

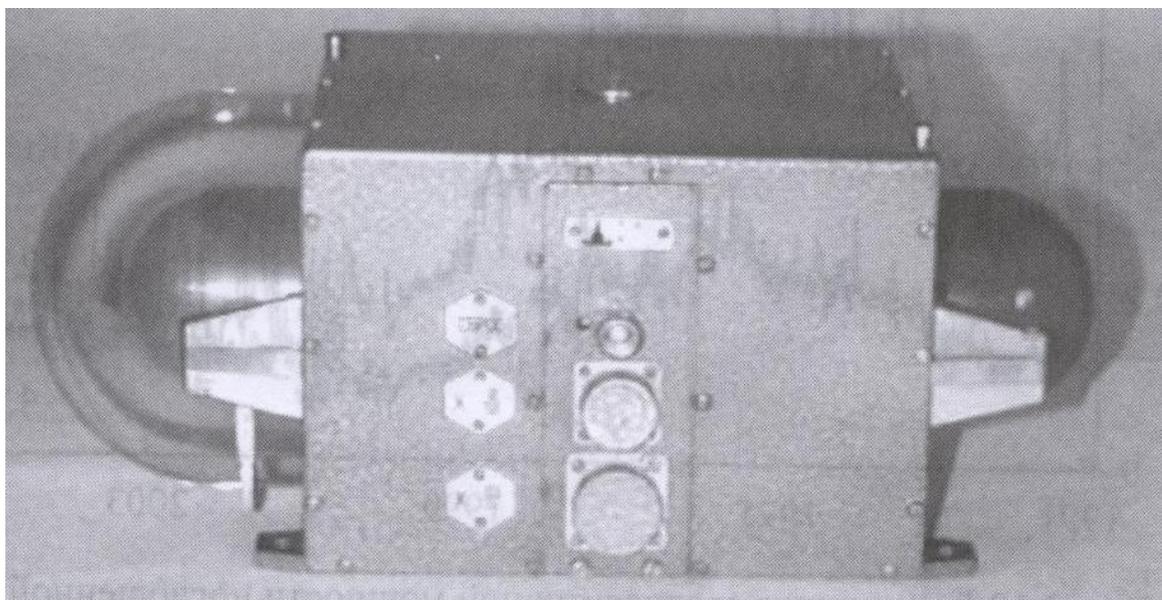


Рис. 4. Фотография дозиметра Р-16 (согласно [12])

На рис. 5 приведен пример результатов измерений мощности поглощенной дозы на станции «Мир» одним из каналов дозиметра Р-16 за период полета станции с 1987 г. по 2001 г. (согласно [12]).

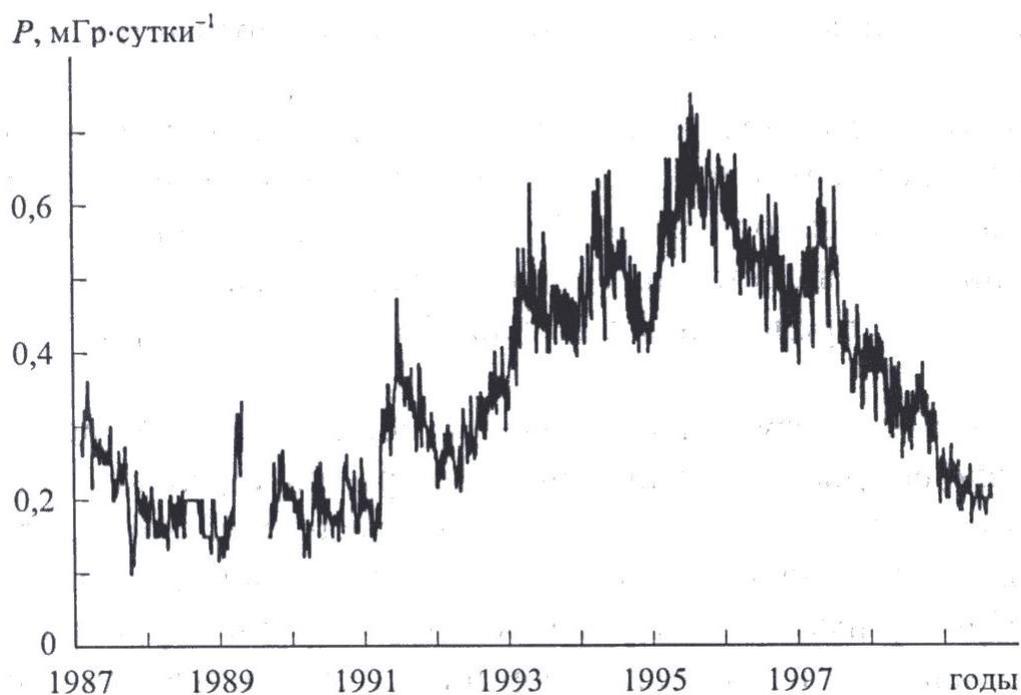


Рис. 5. Динамика среднесуточной мощности поглощенной дозы по данным прибора Р-16. Из показа на графике исключены дозы, обусловленные СПС (согласно [12]).

В 1995 г. на борту станции «МИР» были проведены эксперименты SilEye-1 и SilEye-2 [13, 14, 15, 16]. На рис. 6 показана схема телескопа кремниевых детекторов для эксперимента SilEye-2 на борту станции «МИР» (согласно [15]).

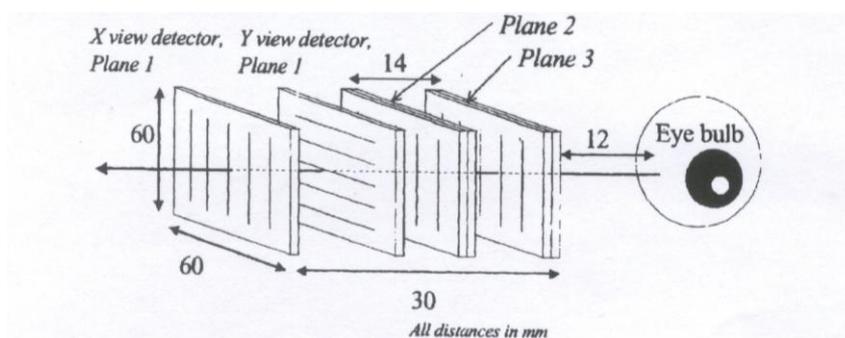


Рис. 6. Схема телескопа кремниевых детекторов для эксперимента SilEye-2 на борту космической станции МИР. На рисунке не показаны пассивные

железные поглотители 1-миллиметровой толщины, вставленные между плоскостями (согласно [15]).

Эти эксперименты не имели своей основной научной целью изучение радиационной обстановки на станции. Тем не менее, аппаратура SilEye-2 позволила измерить полную эквивалентную дозу для частиц с большим Z , поглощенных станцией «МИР». Было выявлено, что такие частицы, составляющие только приблизительно 1% от полного потока ионизирующих частиц, дают вплоть до 25% вклада в полную эквивалентную дозу, действовавшую на экипажи станции «МИР» [10].

Также в 1995 г. на станции «МИР» стартовала совместная российско-американская программа радиационных измерений. Ее целью являлось одновременное измерение и сравнение значений доз радиации при различных условиях экранировки и уровнях облучения экипажей. В этой миссии было использовано научное оборудование, состоящее из пассивных радиационных дозиметров (PRD) производства американских и российских исследовательских групп. Они были установлены в шести различных предварительно выбранных местоположениях внутри орбитального комплекса. В дозиметрах PRD были использованы пассивные термолюминесцентные датчики на основе ${}^7\text{LiF}$. Они обеспечивали измерение полной поглощенной дозы от заряженных частиц. Кроме этого, на станции «МИР» был установлен прибор TERC, детектором которого являлся тканеэквивалентный пропорциональный счетчик, имитирующий ячейку ткани живого организма диаметром 2 мкм. Аппаратура TERC была предназначена для измерения спектров ЛПЭ частиц с одномоментным временным разрешением. TERC также имел возможность регистрации данных о поглощенной мощности дозы с двухсекундным, двадцатисекундным и минутным временным разрешением. Измерения на приборах TERC и PRD проводились одновременно с измерениями аппаратурой P-16 во время работы 18 и 19 экспедиций на станцию «МИР».

Данные, полученные прибором ТЕРС, позволили разделить вклад в суточную мощность дозы от ГКЛ и РПЗ для временного периода с марта по июль 1995 г. [17].

После завершения эксплуатации орбитального комплекса «МИР» дозиметрические исследования были продолжены на орбитальной станции МКС. Некоторое время обе станции работали одновременно: первый элемент МКС — функционально-грузовой блок «Заря» — был выведен на орбиту 20 ноября 1998 года. Экипаж первой основной экспедиции был доставлен на борт МКС транспортным кораблем «Союз ТМ-31» 2 ноября 2000 года.

На российском сегменте МКС была установлена система дозиметрического контроля, основанная на приборе Р-16, аналогичном эксплуатировавшемуся на станции «МИР». Поступление данных с дозиметра Р-16, установленного на МКС, началось с августа 2000 г. На рис. 7 представлены данные, как для станции «МИР», так и для станции МКС, полученные с помощью этого прибора за период с 1991 по 2005 гг. (согласно [12]).

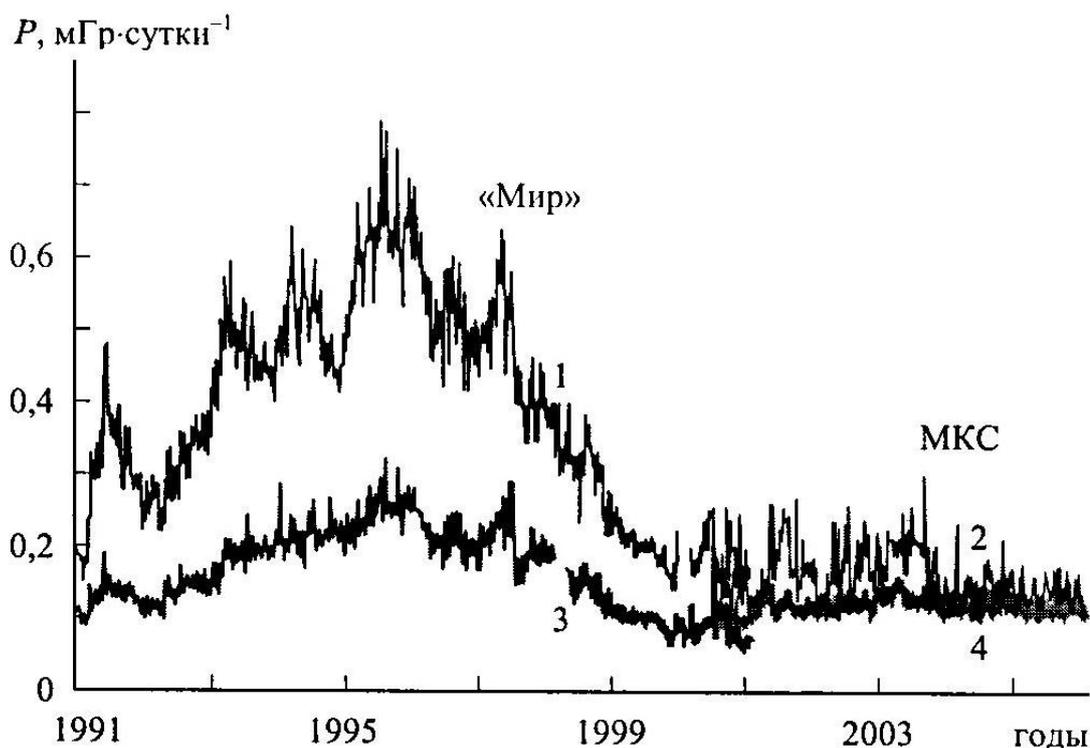


Рис. 7. Динамика среднесуточной мощности поглощенной дозы по данным дозиметра Р-16, зарегистрированная на ОК «МИР» и МКС (из показа на графике исключены дозы, обусловленные СПС; цифрами на рисунке обозначены каналы детекторов) (согласно [12])

Согласно [12], на МКС более высокая защищенность станции обеспечила снижение поглощенной дозы в 1,5-1,7 раза по сравнению с дозовыми нагрузками в отсеках орбитального комплекса «МИР».

В 2001 г. возможности радиационного контроля на борту МКС были значительно расширены. В мае 2001 г. на МКС были доставлены новые блоки системы дозиметрического контроля. В состав доставленного оборудования вошли 4 дозиметрических блока ДБ-8 с полупроводниковыми детекторами излучения. Экипаж второй основной экспедиции смонтировал и подключил эти блоки на борту российского сегмента МКС. В таком виде система радиационного контроля (СРК) работает на российском сегменте МКС с 1 августа 2001 г. [12]. Внешний вид блоков ДБ-8 представлен на рисунке 8.

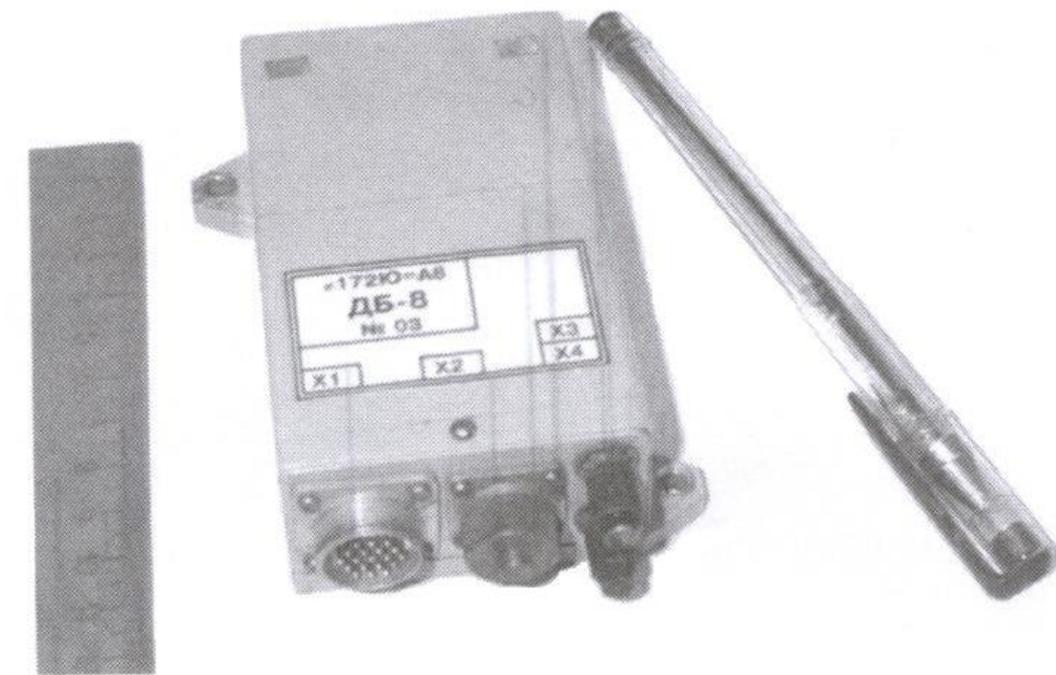


Рис. 8. Вид блока ДБ-8 (согласно [12])

Согласно [12], все 4 блока ДБ-8 идентичны. В каждом из блоков ДБ-8 смонтированы два полностью независимых канала. Чувствительным элементом является кремниевый полупроводниковый детектор. Разница между двумя каналами одного блока состоит в том, что один из детекторов имеет дополнительную защиту из свинца. Защита имеет форму сферы, окружающей детектор. Толщина стенки сферы 3 г*см^{-2} свинца (это эквивалентно толщине защиты из алюминия $1,85 \text{ г*см}^{-2}$ и из воды - $1,52 \text{ г*см}^{-2}$).

При разработке СРК большое внимание было уделено размещению блоков ДБ-8 на борту станции. Точки размещения выбирались таким образом, чтобы обеспечить различные условия экранированности детекторов СРК оборудованием станции [12]. Данные о размещении блоков СРК представлены в таблице 6 (согласно [12]).

Таблица 6.

Наименование	Размещение	Уровень защищенности
ДБ-8 № 1	По правому борту, в отсеке малого диаметра, в районе центрального поста	минимальный
ДБ-8 № 2	За панелью каюты левого борта в сторону агрегатного отсека	
ДБ-8 № 3	За панелью каюты правого борта в сторону агрегатного отсека	
ДБ-8 № 4	По правому борту, в отсеке большого диаметра, за панелью в районе рабочего стола	максимальный
P-16	На потолке в отсеке большого диаметра, за панелью	

На рис. 9 представлены данные динамики мощности дозы за три года эксплуатации СРК в расширенной комплектации, зарегистрированные детекторными каналами блоков ДБ-8, не имеющими дополнительной свинцовой защиты (блоки с минимальной и максимальной защищенностью, ДБ-8 № 1 и № 4) (согласно [12]). Резкие выбросы мощности дозы, хорошо видные на рис. 8 по данным первого блока ДБ-8, обусловлены солнечными протонными событиями [12].

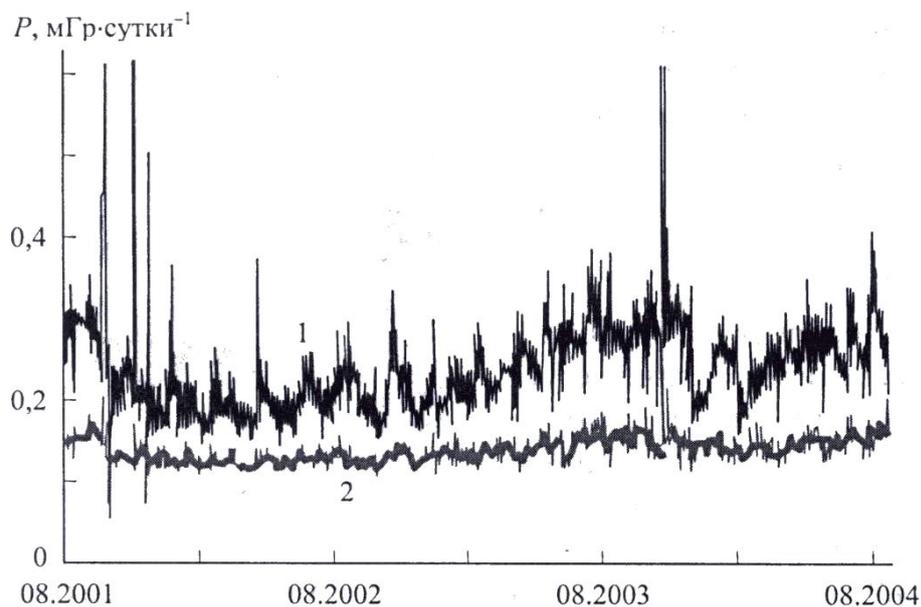


Рис. 9. Среднесуточные значения мощности поглощенной дозы, зарегистрированные детекторными каналами блоков ДБ-8, не имеющими дополнительной свинцовой защиты (цифрами на графике обозначены: (1) -

показания блока с минимальной защищенностью, ДБ-8 № 1 и (2) - с максимальной защищенностью, ДБ-8 № 4) (согласно [12])

Как и на станции «МИР», на МКС было проведено несколько различных дозиметрических исследований.

В октябре 2003 г. на МКС был введен в эксплуатацию еще один дозиметрический прибор - ПИЛЛЕ-МКС. Этот прибор был разработан, изготовлен и поставлен венгерскими специалистами [12]. В состав прибора входило 10 дозиметров и пульт, с помощью которого считывались показания этих дозиметров [12]. На рис. 10 представлен внешний вид этого прибора с расположенными на его крышке дозиметрами (согласно [12]).



Рис. 10. Дозиметрическая аппаратура ПИЛЛЕ – МКС (согласно [12])

Проведение измерений при помощи этого комплекса производилось следующим образом. Космонавт брал дозиметр и располагал его в заданном месте станции (или носил его с собой). Затем, в предусмотренное программой работы время, космонавт должен был вставить дозиметр в специальное гнездо в пульте, после чего происходил автоматический процесс считывания информации и производилось «обнуление» дозиметра [12]. Такая методика

позволяла измерять как персональную дозу, так и дозу в любом из обитаемых отсеков станции [12].

Многие исследовательские программы, посвященные изучению радиационной обстановки и начавшиеся на орбитальной станции «МИР», были продолжены и на ОК МКС. Так, проекты SilEye-1 и SilEye-2, реализованные на «МИРе», легли в основу проектов SilEye-3 и ALTEA (SilEye-4) на МКС [18, 19, 20]. Один из приборов, разработанных в рамках проекта ALTEA, усовершенствованный кремниевый телескоп (AST), был запущен в работу на Российском сегменте МКС в начале 2002 г., и использовался в качестве дискриминирующего дозиметра для потоков частиц в пределах МКС [10]. Помимо этого, целью проекта AST являлись систематические измерения ядерной компоненты космических лучей, а также пространственных и временных характеристик полей космической ионизирующей радиации [20].

Также в период 2004-2008 годов на МКС проводилась серия экспериментов в рамках проекта «Матрешка-Р».

Целью космического эксперимента «Матрешка-Р» было исследование динамики радиационной обстановки в отсеках МКС и при внекорабельной деятельности космонавтов. В эксперименте использовались тканезквивалентные антропоморфный и шаровой фантомы – с целью изучения корректности моделирования с их помощью радиационной нагрузки на критические органы человека. При помощи антропоморфного и шарового фантомов были проведены одновременные измерения поглощенной и эквивалентной доз (и их динамики) в различных условиях защищенности окружающим оборудованием станции и при различных условиях экранированности детекторов (в том числе, включая размещение антропоморфного фантома на внешней поверхности станции) [21].

Весь комплекс аппаратуры, разработанной в рамках эксперимента «Матрешка-Р», включал в себя (согласно [21]):

1. Сборки пассивной дозиметрии («Комплект СПД»), предназначенные для измерения в отсеках станции с различными условиями радиационной защищенности интегральных дозовых (поглощенная и эквивалентная доза) и спектральных (энергетический спектр и флюенсы) характеристик космического ионизирующего излучения.
2. Шаровой тканеэквивалентный фантом («Комплект Фантом»), оснащенный комплектом сменных сборок пассивных детекторов и пеналов, предназначенный для измерения доз, флюенсов и спектров космического ионизирующего излучения внутри фантома с целью моделирования нагрузки на критические органы человека с последующим сопоставлением результатов с данными, полученными с помощью антропоморфного фантома. Фантом покрывался матерчатой сферической оболочкой с карманами для наружного размещения пассивных дозиметров по его поверхности.
3. «Баббл-дозиметр», состоящий из комплекта пузырьковых детекторов и электронного блока считывания и хранения информации, предназначенный для измерения вклада в дозу частиц космического излучения с высокими ЛПЭ (преимущественно нейтронов и тяжелых заряженных частиц). Пузырьковые детекторы размещались как внутри пеналов шарового фантома, так и в отсеках с различной защищенностью.
4. Дозиметр «МОСФЕТ» (металл – окисел - полупроводник), состоящий из детекторной части, помещаемой в центральный («вертикальный») канал шарового фантома, и блока электроники. Этот прибор был предназначен для измерения динамики накопления поглощенной дозы на различных глубинах внутри фантома.
5. Полупроводниковый дозиметр «ЛЮЛИН-5», предназначенный для исследования динамики накопления дозы, спектра ЛПЭ, а также потоков заряженных частиц внутри шарового фантома.
6. Антропоморфный тканеэквивалентный фантом («РЭНДО»), оснащенный средствами активной и пассивной дозиметрии, и предназначенный для

исследования радиационной нагрузки на критические органы человека. Прибор разрабатывался для целей совершенствования и верификации методов космической дозиметрии и методики переходных коэффициентов от показаний бортовых приборов к значениям доз в органах тела космонавта.

Проект «Матрешка-Р» реализовывался в несколько этапов (согласно [21]). На рис. 11, в качестве примера, представлен внешний вид аппаратуры, подготовленной для 2 этапа реализации эксперимента «Матрешка-Р».



Рис. 11. Аппаратура «Комплект фантом» с местами размещения детекторных блоков 2 этапа реализации эксперимента «Матрешка-Р» (согласно [21])

Согласно [21], было проведено несколько включений оборудования «Матрешка-Р»: с 29 января 2004 года по 30 апреля 2004 года (общее время работы оборудования - 92 дня); и с 11 августа 2004 года по 10 октября 2005 года (общее время работы оборудования - 425 дней). Временной интервал, соответствующий периоду проведения этих измерений, характеризовался слабо возмущенной радиационной обстановкой, и совпадал с фазой

продолжающегося спада солнечной активности на подходе к минимуму 11-летнего цикла. На рис. 12, в качестве примера полученных в эксперименте «Матрешка-Р» данных, показано распределение мощности поглощенной дозы излучения на наружной поверхности шарового фантома. Максимальная мощность дозы отвечает участкам поверхности, соответствующим критическим органам тела космонавтов (согласно [21])

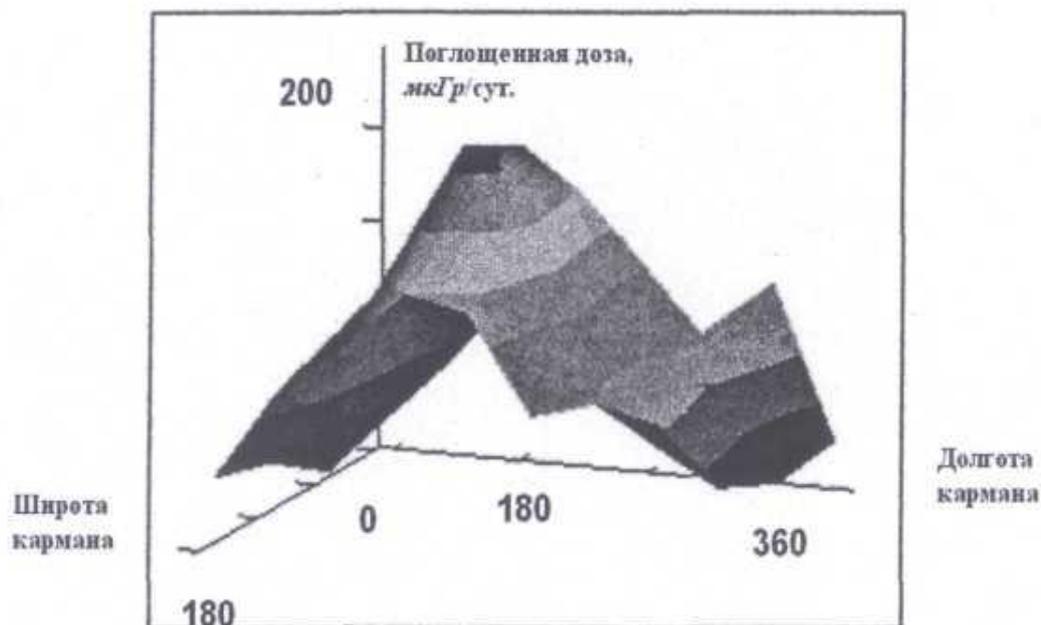


Рис. 12. Распределение поглощенной мощности дозы на наружной поверхности шарового фантома (термолюминесцентные детекторы размещались в 32 карманах, равномерно распределенных по поверхности чехла фантома) (согласно [21]).

В результате эксперимента «Матрешка-Р» были экспериментально определены дозы в критических органах в сферическом и антропоморфном фантомах в зависимости от характера защиты внутри и снаружи станции. Было получено распределение доз по поверхности сферического фантома после экспонирования в каюте по данным термолюминесцентных детекторов, расположенных в карманах чехла фантома. Также удалось оценить точность расчетных методов определения доз в критических органах человека, а также получить оценку достаточности объема радиационного

контроля и степени радиационной опасности в процессе полета (согласно [21]).

Интересные исследования радиационной обстановки были проведены при помощи аппаратуры «R3DE», установленной на внешней стороне Европейского модуля «Колумбус», находящегося в составе ОК «МКС» [22]. Дозиметр «R3DE» представлял из себя прибор, подобный уже упоминавшемуся полупроводниковому дозиметру «ЛЮЛИН», но в его работе были дополнительно задействованы четырехканальные спектрометры видимого и УФ-диапазона [22]. Прибор «R3DE» работал с 20 февраля 2008 г. по 5 сентября 2009 г., и имел 10-секундное временное разрешение получаемых с его помощью дозиметрических данных. Благодаря прибору «R3DE» удалось экспериментально зафиксировать связанный с увеличением защищенности детекторов эффект уменьшения доз, регистрируемых дозиметром в области ЮАА, во время стыковок пилотируемых кораблей системы «Спейс Шаттл» с ОК «МКС» и дальнейшего их нахождения в этом состоянии [22].

Исследования радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве (в диапазоне высот от 293 до 615 км) проводились не только на орбитальных комплексах, но и на пилотируемых кораблях системы «Спейс Шаттл»; в этих миссиях в качестве детектирующей системы использовались тканеэквивалентные пропорциональные счетчики [23].

1.2. Особенности радиационной обстановки на околоземных орбитах в различных фазах цикла солнечной активности.

Вариации радиационной обстановки

Основными источниками космической радиации на орбитах пилотируемых орбитальных станций («МИР», «МКС»); наклонение около 52° , высота орбиты около 400 км [24, 25]) являются [24, 25, 26]:

1. галактические космические лучи (ГКЛ) (энергетический спектр простирается вплоть до 10^{20} - 10^{21} эВ/нуклон)
2. частицы радиационных поясов Земли - электроны и ионы с энергиями от 50 кэВ до 1000 МэВ.
3. солнечные космические лучи (СКЛ) (с энергией вплоть до 1000 МэВ и более)
4. вторичные нейтроны, рождающиеся при прохождении частиц космических лучей через вещество (защита космического аппарата, тело космонавта, и т.д.), а также альбедные нейтроны – продукты ядерных реакций, происходящих при взаимодействии космических лучей с атмосферой.

Радиационная обстановка на околоземных орбитах значительно изменяется при изменении фазы цикла солнечной активности от максимума к минимуму и обратно. Так, согласно [27], поглощенная и эквивалентная дозы от ГКЛ на орбитах станций «Мир» и МКС за защитой 10 г/см^2 из алюминия составляют в период минимума солнечной активности (СА) ~ 60-90 мкГр/сутки и 150-200 мкЗв/сутки соответственно, а в период максимума СА — ~ 40-60 мкГр/сутки и 100-150 мкЗв/сутки – т.е. дозы от ГКЛ на околоземных орбитах в период минимума СА примерно в 1,5 раза больше, чем в период максимума СА. Значительно изменяются значения потоков частиц РПЗ: согласно [28], на высоте полета МКС в фазе максимума цикла солнечной активности потоки протонов РПЗ в $1,5 \div 2$ раза

меньше, чем для фазы минимума. Для потоков электронов РПЗ существует обратная зависимость: в фазе максимума СА поток электронов максимален и в фазе минимума — минимален. Значительные долговременные вариации среднесуточных значений мощности поглощенной дозы, согласно [12], определяются, в значительной степени, динамикой потоков ГКЛ: в период минимума солнечной активности потоки ГКЛ возрастают и, тем самым, возрастают потоки нейтронов альbedo, которые, распадаясь на протоны и электроны, в свою очередь, формируют РПЗ. В период максимума солнечная активность вызывает уменьшение потоков протонов по сравнению с периодом минимума солнечной активности (из-за возрастания влияния фактора ионизационного торможения протонов и электронов в земной атмосфере). Т.о., временная динамика дозы изменяется в противофазе с солнечной активностью. Существует также сезонная вариация дозы, имеющая локальные минимумы в зимние месяцы [26].

В ряде работ [6, 12, 26, 29, 30, 31, 32] указывается на связь вариаций среднесуточной мощности дозы с потоками частиц от солнечных вспышек (солнечных протонных событий, СПС) [12], с числами Вольфа [29, 32], с плотностью атмосферы на высоте полета орбитальных комплексов [12, 26, 29, 30, 32], а также с высотой орбиты [6, 31] и ее наклоном к плоскости экватора [6]. Увеличение наклона орбиты ($> 60^\circ$) приводит к тому, что пилотируемый комплекс попадает в область полярных шапок, где защита магнитным полем Земли существенно ослабляется, и тем самым, увеличивается вклад в дозу от частиц СКЛ; при увеличении же высоты орбиты станция все больше оказывается в области внутреннего радиационного пояса - тем самым, значительно увеличивается риск повреждения космического аппарата потоками протонов РПЗ [6].

Исследователи также отмечают характерные особенности окончания 23 цикла – начала 24 цикла солнечной активности. Так, в работе [33] отмечается рекордно низкая плотность термосферы (в работе анализируется высота 400

км) в течение минимума 23 цикла солнечной активности (рекордно низкие значения плотности за 43 года наблюдений), а в работе [34] указывается на связь между аномально низким потоком излучения Солнца в области жесткого ультрафиолета в течение минимума 23 цикла СА, и термосферной плотностью. Поскольку в период минимума солнечной активности существенно возрастают потоки ГКЛ [12], из-за чего, как уже упоминалось, возрастают потоки нейтронов альbedo, продукты распада которых (протоны и электроны) существенно пополняют РПЗ, то особенности минимума 23 цикла солнечной активности, на которые указывают авторы работ [33, 34], вероятно, могут иметь влияние на вариации радиационной обстановки на орбите Международной Космической Станции.

1.3. Модели радиационной обстановки на околоземных орбитах

Одной из задач расчетного моделирования радиационных условий на орбитах космических аппаратов является создание надежной системы краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования радиационной обстановки. Такая система должна позволять с достаточной точностью заранее предсказывать радиационную обстановку – и в соответствии с прогнозом, принимать заблаговременные меры для защиты оборудования и экипажей космических аппаратов от воздействия космической радиации.

Существующие в настоящее время модели радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве учитывают три наиболее мощных радиационных поля: галактические космические лучи, солнечные космические лучи, и потоки частиц радиационных поясов Земли [12]. Другие существующие в околоземном пространстве источники космической радиации (ионы аномальной компоненты космических лучей, ионы захваченной радиации, электроны и протоны альbedo ниже радиационных

поясов Земли), как правило, при проведении оценок радиационной опасности не рассматриваются [12].

Для каждого из трех основных радиационных полей были созданы количественные модели, позволяющие определить энергетические спектры потоков их частиц для каждой точки околоземного космического пространства (для потоков ГКЛ и СКЛ в модельных расчетах дополнительно учитывается проникновение частиц в земную магнитосферу) [12]. К сожалению, точность этих модельных расчетов ограничена несколькими объективными факторами - неполнотой имеющихся экспериментальных данных, невозможностью в настоящее время установить количественную связь между потоками частиц и влиянием на них некоторых факторов космического пространства [12].

Для потоков частиц СКЛ модели, как правило, дают вероятностные количественные оценки появления стохастических потоков частиц солнечных космических лучей [12].

Помимо этого, точность существующих моделей потоков частиц зависит еще от статистических ошибок, проявляющихся при аппроксимации экспериментальных данных, на основе которых модели устанавливают «усредненные» значения потоков частиц [12].

При реализации модельных расчетов радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве приходится учитывать множество параметров, как-то: периодические изменения солнечной активности, стохастические процессы геомагнитной активности, вековой дрейф магнитного поля Земли, пространственное распределение потоков частиц в околоземном пространстве, обусловленное конфигурацией магнитосферы Земли, наличие постоянных (частицы РПЗ и ГКЛ) и коротких спорадических потоков частиц (потоки СКЛ), и некоторые другие параметры [12]. Поэтому для оптимизации таких расчетов в настоящее время создаются специализированные информационные комплексы (ИК), объединяющие в

себе компьютерные версии моделей потоков частиц, генератор координат орбит КА, компьютерные версии моделей прохождения частиц за экраны и модели радиационных эффектов [12].

Примером таких ИК может служить американский ИК CREME96 (<https://creme.isde.vanderbilt.edu/>), европейский ИК SPENVIS (<http://www.spennis.oma.be/intro.php>), а также программно-математическое обеспечение, ориентированное на прогнозирование радиационных условий и характеристик радиационного воздействия на электронику КА, разработанное в НИИЯФ МГУ (ИК SEREIS) [12, 35]. В НИИЯФ МГУ были также разработаны модели потоков частиц в космическом пространстве, впоследствии реализованные в виде Государственного стандарта Российской Федерации [36, 37, 38, 39]. Блок-схема взаимосвязи моделей в комплексе программно-математического обеспечения, разработанного в НИИЯФ МГУ, представлена на рис. 13 (согласно [12]).



Рис. 13. Блок-схема ИК SEREIS НИИЯФ МГУ (согласно [12])

На основе ИК SEREIS, в качестве его дальнейшего развития и продолжения, в НИИЯФ МГУ к настоящему времени разработан программный комплекс COSRAD (<http://cosrad.sinp.msu.ru/manual.html>) [40].

К его преимуществам следует отнести тот факт, что модель НИИЯФ МГУ по галактическим космическим лучам, используемая в этом ИК, была в 2004 г. утверждена Международной организацией по стандартизации (ISO) в качестве международного стандарта [41]. Возможности программного комплекса COSRAD позволяют: производить расчет орбит космических аппаратов, рассчитывать усредненные по долготе потоки протонов и электронов (при помощи моделей AP8/AE8), рассчитывать спектры частиц (как ядер, так и нейтронов) в зависимости от толщины защиты, рассчитывать значения доз (как от ядер, так и от нейтронов), а также рассчитывать влияние эффектов одиночных событий в микросхемах [40].

В настоящее время в модельном расчете радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве существует ряд особенностей и ограничений. Учет долговременных изменений потоков частиц, связанных с влиянием солнечной активности, производится в современных моделях при помощи связи с такой характеристикой СА, как сглаженные (усредненные в интервале времени около одного года) среднемесячные числа Вольфа W (среднесуточное число солнечных пятен) [12].

При модельных расчетах плотности потока частиц ГКЛ также используется связь со значениями чисел Вольфа [42].

Активность Солнца в разных своих циклах отличается амплитудой колебаний, прогнозирование которой на последующие циклы СА в настоящее время не имеет достаточного научного обоснования [12]. Это затрудняет прогнозирование потоков частиц любого радиационного поля. Согласно [12], из-за этого в модельных расчетах используются числа Вольфа для «среднего» цикла СА, которые определяют для каждого года от начала

«гипотетического» цикла СА как результат усреднения чисел Вольфа, известных по нескольким предыдущим циклам СА.

За последние десятилетия из-за уменьшения дипольного момента магнитного поля Земли произошло смещение силовых линий магнитного поля вблизи Земли - и, соответственно, изменились потоки частиц РПЗ на низких высотах (до 1000 км), особенно на границах области Южно-Атлантической аномалии (ЮАА) [43]. В расчетах по моделям, разработанным в НИИЯФ МГУ, эти изменения учитываются при помощи использования моделей магнитного поля Земли IGRF и Цыганенко-89 для современной эпохи [40, 44].

Современные количественные модели радиационной обстановки на околоземных орбитах не позволяют в достаточной степени учитывать стохастические процессы, связанные с геомагнитной активностью (из-за большой сложности их математического описания) [12].

Современные модели потоков частиц позволяют сделать оценку радиационного воздействия на КА, связанного с пространственным распределением потоков частиц в магнитном поле Земли, а также позволяют количественно оценить характеристики радиационного воздействия на объекты, располагающиеся внутри корпуса КА, под его защитой. Это достаточно сложная и трудоемкая задача, и решается она отдельно для каждого конкретного случая с применением специализированных методов компьютерных вычислений [45].

Согласно [12], при прогнозировании характеристик радиационного воздействия на орбитах КА обычно рассматриваются защиты простой геометрической формы (сфера, плоская пластина) для ограниченного набора материала защиты (обычно алюминий). Это позволяет с минимальными затратами обеспечить количественные оценки радиационных условий за защитными экранами с учетом их толщины. Для этих целей применяется хорошо зарекомендовавший себя набор программ SHIELDDOSE [46].

Программное обеспечение НИИЯФ МГУ, предназначенное для аналогичных целей, дополнительно учитывает потери энергии в веществе защиты [47], а также предусматривает расчет энергетических спектров потоков вторичных протонов и нейтронов, образующихся при взаимодействии высокоэнергетических протонов космического пространства с веществом защиты (при помощи транспортного кода SHIELD) [48].

1.4. Применение моделей радиационной обстановки.

Перспективы и задачи дальнейших исследований

Как уже упоминалось в предыдущем параграфе, модели радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве применяются, в первую очередь, для решения практических задач прогнозирования и предсказания уровней радиационных нагрузок на орбитах КА и пилотируемых орбитальных станций, а также для выработки рекомендаций по защите их экипажей от радиационного поражения. Но помимо сугубо практических целей, в задачу моделей также входит описание основных закономерностей природных явлений, с которыми сталкиваются исследователи космического пространства. Экспериментальной основой для наиболее используемых в настоящее время моделей радиационной обстановки послужили результаты работы спектрометрической аппаратуры на автоматических КА.

Перспективной задачей представляется создание комплексной системы прогнозирования радиационной обстановки, позволяющей предсказывать значения и параметры потоков космической радиации на краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную перспективу с достаточной степенью надежности и точности прогноза. Для всех существующих в настоящее время расчетных моделей продолжает оставаться очень сложным вопрос точности модельных расчетов и учета всех параметров космических радиационных

полей. Кроме этого, высоты орбит КА, для которых надёжно применимы существующие модели, большей частью, находятся выше высоты орбиты МКС (~ 300 – 400 км). Крайне актуальным продолжает оставаться вопрос разработки надежной и точной модели для прогнозирования потоков СКЛ на орбитах КА [12]. Переход от, преимущественно, околоземных пилотируемых миссий к пилотируемым космическим полетам к Луне и Марсу, создание лунных и марсианских исследовательских баз требует развития и адаптации уже наработанных к настоящему времени методических подходов к проблеме радиационной защиты экипажей и оборудования КА, поскольку в условиях межпланетного перелета отсутствует защитная экранировка космического аппарата магнитным полем Земли. В этом контексте задача радиационной защиты КА и поиск возможностей уменьшения радиационной нагрузки на него получает большое практическое значение [49]. Околоземные пилотируемые миссии накопили значительный объем экспериментальных данных о параметрах радиационной обстановки в околоземном пространстве – так, было установлено, что при спокойных солнечно-геомагнитных условиях основной вклад в поглощенную дозу на орбитах пилотируемых орбитальных комплексов дают протоны РПЗ, регистрируемые на орбитах станций в области ЮОАА. Средняя суточная доза внутри орбитальных станций на 300-400-километровой высоте изменяется от 100 до 800 мкГр/сутки в зависимости от экранировки, параметров орбиты и фазы цикла солнечной активности [10, 50]. Среднегодовые значения эквивалентных доз, согласно данным измерений на орбитальной станции «Мир», составляют от 0,14 до 0,36 Зв*год⁻¹ для различных периодов солнечной активности [12]. Во время солнечных протонных событий увеличение дозы радиации вызывается солнечными протонами, проникающими сквозь магнитное поле Земли на орбиту КА [12].

Но вопросы теоретического осмысления полученных экспериментальных результатов, создания комплексных расчетных моделей

радиационной обстановки с достаточной точностью модельного описания реальных условий, надежных и точных систем заблаговременного прогнозирования неблагоприятных радиационных условий в космическом пространстве - так и остаются, до настоящего времени, далеки от своего полного разрешения.

Совершенствование методов оценки и прогнозирования радиационной обстановки на пилотируемых орбитальных комплексах и перспективных пилотируемых космических аппаратах является, в связи с этим, весьма актуальным и важным моментом в изучении радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве.

Глава 2. ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы данные, получаемые штатной системой радиационного контроля (СРК) Международной Космической Станции. В данной главе представлены описание СРК, структура получаемой с нее телеметрической информации, и методика обработки данных измерений доз на МКС.

2.1. Описание аппаратуры

Система радиационного контроля (СРК), развернутая в модуле «Звезда» Международной космической станции, является частью системы обеспечения радиационной безопасности экипажей станции. Основная цель СРК - дать информацию для определения доз облучения экипажа в полете.

Основными задачами СРК являются [51]:

- мониторинг радиационной обстановки внутри станции;
- прогнозирование уровней облучения экипажа и выработка рекомендаций по снижению уровней радиационной опасности;
- обеспечение Службы радиационной безопасности экипажей пилотируемых космических комплексов информацией, необходимой для контроля и прогноза уровней облучения космонавтов и выработки оптимальных рекомендаций по обеспечению их радиационной безопасности.

Система РК МКС состоит, согласно [51], из следующих блоков:

- дозиметр Р-16 (чувствительный элемент - 2 ионизационные камеры)
- Четыре дозиметрических блока ДБ-8 (чувствительный элемент – полупроводниковые детекторы излучения)

- Блок анализа информации (АИ) и блок коммутации и передачи данных (БКП) (предназначены для обработки и анализа результатов измерений).

Структурная схема СРК и ее связь с другими бортовыми системами модуля «Звезда» представлена на рис. 11 (согласно [52]).

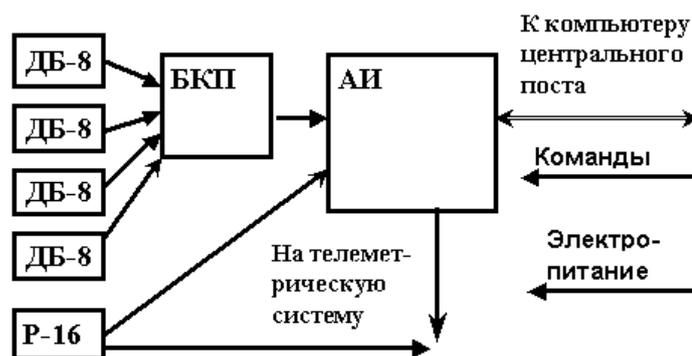


Рис. 11. Структурная схема системы радиационного контроля.

Детекторы радиации СРК находятся внутри блоков ДБ-8 и Р-16.

Блоки ДБ-8 состоят из двух одинаковых электронных плат. Каждая из плат представляет собой полноценный дозиметр, состоящий из чувствительного элемента (кремниевый полупроводниковый детектор площадью $1,0 \text{ см}^2$ и толщиной 300 мкм), предусилителя, масштабирующего усилителя, аналого-цифрового преобразователя и последующей схемы цифровой обработки сигнала. Детектор одной из плат снизу экранирован днищем корпуса блока ДБ-8 толщиной 2 мм. Детектор второй платы дополнительно защищен слоем свинца толщиной 2,5 мм.

Сигнал, поступающий с детекторов, подвергается аналоговой обработке в блоке ДБ-8, преобразуется в цифровую форму подвергается программной обработке в блоке ДБ-8, затем передается через двухпроводную шину RS485 в блок БКП и далее в блок АИ. Интеграция СРК с другими системами модуля «Звезда» позволяет передавать данные на Землю по телеметрическому каналу, а также непосредственно отображать параметры радиационной обстановки экипажу станции через персональный компьютер).

Внешний вид блока ДБ-8 представлен на рис. 12. Блок-схема работы одного из двух дозиметров, составляющих блок, представлена на рис. 13.



Рис. 12. Внешний вид блока ДБ-8

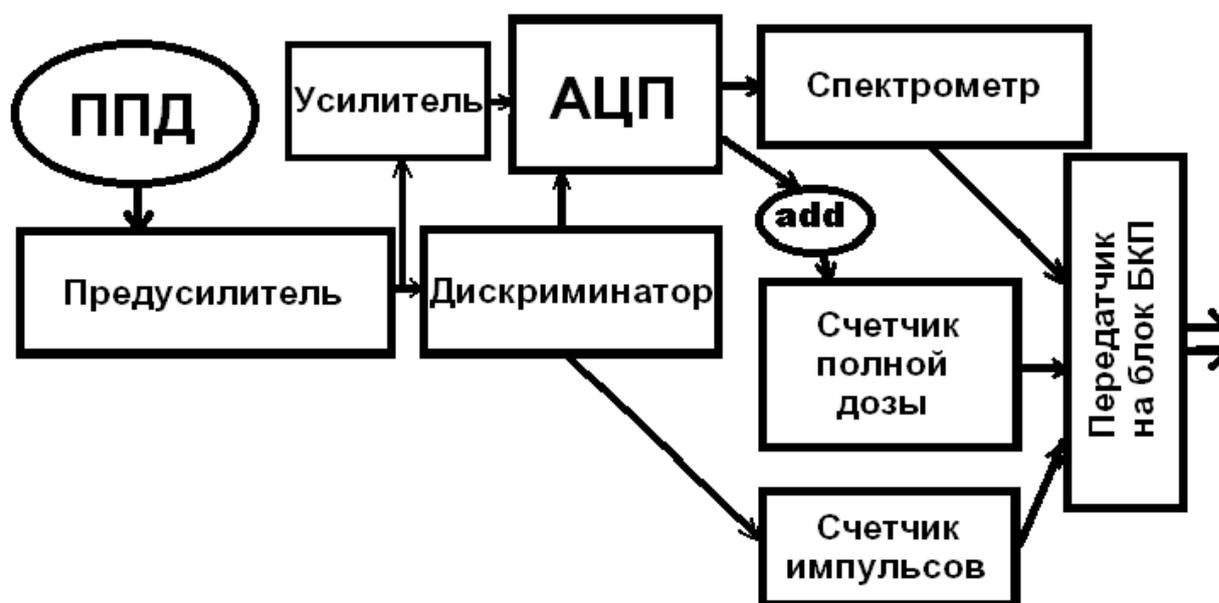


Рис. 13. Блок-схема работы дозиметра ДБ-8

Дозиметрическая методика, использованная при разработке детекторов ДБ-8, состоит в следующем. Поглощенная в теле полупроводникового детектора доза линейно связана с зарядом, образовавшимся в чувствительном объеме детектора под действием излучения (это следует из соотношения

$$D = \frac{E}{m} = \frac{\omega_i \times \frac{q}{e}}{m} \quad (1),$$

где D - поглощенная доза;

E - поглощенная в чувствительном объеме энергия;

m - масса чувствительного объема;

ω_i - энергия образования электрон - дырочной пары;

q - образовавшийся в детекторе электрический заряд;

e - электрический заряд одного электрона).

Следовательно, корректность определения поглощенной дозы целиком определяется корректностью измерения заряда, образовавшегося в чувствительном объеме детектора, и точностью определения массы чувствительного объема.

Как уже говорилось, сигнал, поступающий с детекторов ДБ-8, преобразуется в цифровую форму при помощи АЦП. Зависимость кода на выходе АЦП от заряда, образовавшегося в детекторе, имеет вид соотношения

$$K = \left[\frac{\frac{q}{C} \times \eta}{\Delta U} \right] \quad (2),$$

где: K - код на выходе АЦП;

q - заряд, образовавшийся в чувствительном объеме детектора;

C - входная емкость системы детектор-предусилитель;

η - общий коэффициент усиления сигнала до АЦП;

ΔU - шаг квантования АЦП;

квадратные скобки [] обозначают операцию взятия

целой части числа.

Из (1) и (2) следует, что если пренебречь ошибками округления, то поглощенная доза связана с суммой кодов, получаемых от АЦП, следующим соотношением:

$$D = \frac{\omega_i \times \frac{q}{e}}{m} = \frac{\omega_i \times \Delta U \times C}{m \times e \times \eta} \times \sum K = V \times \sum K \quad (3),$$

значения символов те же, что и в соотношениях (1) и (2).

Следовательно, для определения величины поглощенной дозы необходимо корректно регистрировать сумму кодов, поступающих с АЦП, и знать постоянный множитель V , стоящий перед этой суммой.

Обработка кодов АЦП производится в блоке ДБ-8 программным путем. Значения с АЦП поступают в виде 16 бит (2 по 8), из которых старший и 3 младших не содержат информации. Это значение нормируется так, что остается 12-битовое значение, у которого биты 15-12 обнулены. Полученный код записывается в буфер. По окончании чтения данных с АЦП, программа сбрасывает триггер управления АЦП, после чего АЦП готов к обработке следующего импульса.

Дальнейшая обработка осуществляется по прерываниям от таймера, которые поступают каждые 1 мсек. Детектор ДБ-8 имеет возможность функционирования в нескольких режимах; в случае обычного (штатного) режима работы обработка сигналов происходит следующим образом: значение кода АЦП (12 бит) выбирается из буфера, добавляется к значению счетчика полной накопленной дозы, затем по нему определяется соответствующий номер в таблице каналов (верхние границы (пороговые точки) каналов соответствуют значениям 3, 6, 8, 12, 18, 26, 36, 60, 80, 120, 180, 260, 360, 600, 800, 1200, 1800, 2600, 3600, 4096).

Счетчик с номером, соответствующим найденному, увеличивается на 1. Массив из 20 счетчиков хранится во внешнем статическом ОЗУ, в виде двух

подмассивов, используемых попеременно (один - как текущий массив для работы, другой - как массив, передаваемый по интерфейсу в БКП). Как уже упоминалось, БКП передает полученную информацию в блок АИ, и после обработки в блоке АИ данные с детекторов ДБ-8 передаются на Землю по телеметрическому каналу.

Структура передаваемой с блока АИ на Землю информации имеет следующий вид (таблица 6):

Таблица 6.

Название	Описание	Тип	Способ представления
Размер массива	Длина информационной части массива в байтах.	Unsigned char	PC
Номер массива	Идентификационный номер массива	Unsigned char	PC
Время формирования	Время формирования массива в АИ от начала суток по Гринвичу. 1 младшего разряда соответствует 2 секундам.	Unsigned short	PC
Массив данных	Информационная часть массива. Её длина задаётся полем “размер массива”.	Char[]	Зависит от структуры массива
Контрольная сумма	Контрольная сумма массива.	Unsigned short	PC

Переданная по каналам телеметрии информация по потокам и дозам, полученная с дозиметров ДБ-8, содержит 3 группы данных:

- дозы, получаемые со счетчиков дозы в блоках ДБ-8,
- дозы, рассчитываемые в блоке АИ по данным о спектрах энерговыделений в детекторах блоков ДБ-8;
- значения числа частиц, зарегистрированных в каждом детекторе блоков ДБ-8.

Массивы данных содержали 24 типа информационных сообщений; часть из них давала информацию о функционировании системы и ее программном обеспечении. Но большая часть информации представляла данные измерений доз, потоков и спектров энерговыделений в детекторах, регистрируемых блоками ДБ-8. В первоначальной версии программы блока АИ обеспечивалась регистрация данных с временным разрешением 10 секунд.

Эксплуатация СРК на Международной Космической Станции началась в августе 2001 года [12], и обеспечила получение данных о динамике накопления дозы на борту МКС в четырех различных точках Служебного модуля станции. При проектировании СРК места размещения блоков ДБ-8 выбирались таким образом, чтобы они имели различную экранировку оборудованием и элементами конструкции станции. На рис. 14 представлены функции экранированности для точек расположения блоков ДБ-8 системы радиационного контроля на МКС (данные взяты из работы [53]):

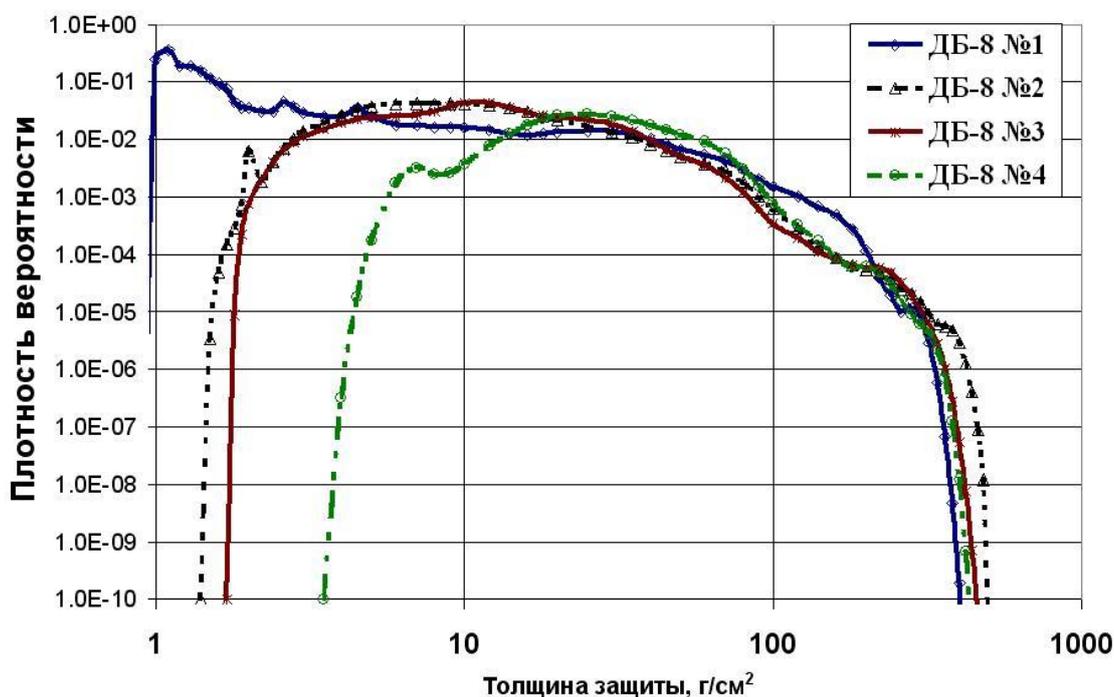


Рис. 14. Функции экранированности блоков ДБ-8

В качестве примера получаемой с детекторов ДБ-8 информации на рис. 15 представлено распределение мощности дозы в области ЮАА за

сентябрь 2002 года, построенное (согласно [2]) по данным детектора ДБ-8 №1 (наименее защищенный детектор СРК).

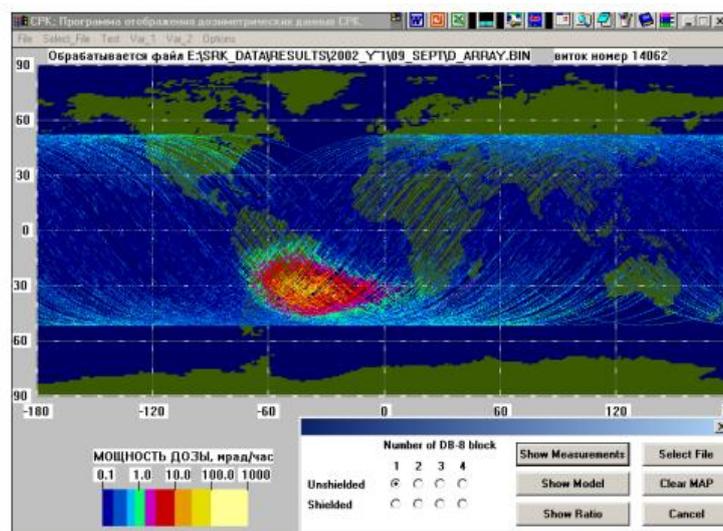


Рис. 15. Распределение мощности дозы в области ЮАА за сентябрь 2002 г.

Вместе с тем, объем передаваемой за сутки по системе телеметрии информации не позволял передать весь объем результатов измерений, что приводило к пропаданию более 60% информации о динамике накопления мощности дозы в течение суток.

В июне 2005 года, в целях обеспечения полной передачи регистрируемой информации, а также улучшения качества и надежности работы СРК, силами РКК «Энергия» и ИМБП была проведена замена версии бортового программно-математического обеспечения блока АИ. Было реализовано два режима регистрации информации: в условиях низкой и повышенной мощности дозы. В условиях низкой мощности дозы временное разрешение регистрируемых данных о потоках, накопленных дозах и спектрах составляло 10 минут, а при повышенной мощности дозы дополнительно производилась регистрация данных о потоках, накопленных дозах и спектрах с периодичностью 10 секунд. Кроме этого, в режиме регистрации повышенной мощности дозы обеспечивалась регистрация общих параметров возрастания мощности дозы, таких, как: время начала, длительность, потоки и дозы, накопленные за время возрастания.

Режим с десятисекундным временным разрешением включается автоматически при превышении определенного порога регистрируемой детекторами ДБ-8 мощности дозы (пороговые значения мощности дозы для всех четырех блоков детекторов ДБ-8 представлены в таблице 7).

Таблица 7.

Номер блока	Канал	Порог срабатывания, нГр/сек
ДБ-8 №1	Без защиты	50
	Защищенный	5
ДБ-8 №2	Без защиты	30
	Защищенный	5
ДБ-8 №3	Без защиты	10
	Защищенный	5
ДБ-8 №4	Без защиты	10
	Защищенный	5

Критерием включения этого режима является превышение порога не менее, чем на двух детекторах в течение трех десятисекундных интервалов времени подряд. Критерием выключения является отсутствие превышения порога хотя бы на двух детекторах одновременно не менее трех десятисекундных интервалов времени подряд.

Активация десятисекундного режима регистрации дозиметрических данных происходит при прохождении МКС областей повышенных потоков радиации (например, области Южно-атлантической Аномалии).

Для того, чтобы увеличить надежность передачи данных, весь объем полученной информации передавался по каналам телеметрии дважды. Это потребовало изменений в структуре информации, передаваемой блоком АИ на телеметрическую систему Служебного модуля МКС. Эта структура была изменена (таблица 8) - в том числе, в той части, которая касалась информации, снимаемой с блоков ДБ-8.

Таблица 8.

Название	Описание	Тип	Размер в битах
Время формирования	Время формирования массива	unsigned long	20
Тип массива	Определяет содержимое массива.	unsigned char	6
Массив данных	Информационная часть массива. Размер массива зависит от типа.	char[]	Разный
Бит повторности	0 – сообщение передаётся первый раз. 1 – повторное сообщение	char	1
Контрольная сумма	Контрольная сумма массива.	unsigned long	27
Выравнивание	Данное поле служит для выравнивания сообщения по границе слова.		

После коррекции массивы данных содержат более 40 типов информационных сообщений; часть из них дает информацию о функционировании системы и ее программном обеспечении, навигационных параметрах и результатах расчетных оценок радиационной обстановки, выполняемых в блоке АИ. Но большая часть информации по-прежнему представляет данные измерений доз, потоков и спектров энерговыделений в детекторах, регистрируемых блоками ДБ-8.

После запуска в работу новой версии ПМО потребовалось использовать новые средства первичной дешифровки и анализа данных. К сожалению, полученный к настоящему времени с детекторов ДБ-8 массив данных, несмотря на замену бортового мат. обеспечения, не имеет достаточной полноты из-за наличия помех при передаче данных по каналу телеметрии с борта МКС на Землю, приводящих к потере или искажению информации о потоках частиц и дозах радиации, зарегистрированных детекторами ДБ-8.

Информация СРК поступала во время сеансов связи по каналам телеметрической системы Служебного модуля МКС на российские пункты приема информации, и далее передавалась в ЦУП-М. Далее, с помощью программных средств ЦУП-М производилось выделение из потока телеметрической информации данных СРК, и передача их в ИМБП. В ИМБП с помощью специализированного программного комплекса проводилась дешифровка полученных данных, и запись их в виде набора файлов на персональные компьютеры. В данной диссертации использовались именно эти дешифрованные наборы файлов.

2.2. Описание информационных массивов

СРК имеет возможность регистрации данных о потоках частиц и дозах радиации с двумя временными разрешениями: 10 минут и 10 секунд. Для этого в схеме цифровой обработки данных СРК (блок БКП) используется организованный средствами бортового ПМО счетчик дозы, опрашивающий дозиметры ДБ-8 и формирующий их показания с соответствующим временным разрешением [51].

Режим с десятиминутным временным разрешением используется как на «спокойных» в смысле радиационных условий участках траектории МКС, так и на участках траектории с повышенными потоками радиации. Режим регистрации дозиметрических данных с десятисекундным временным разрешением используется на участках траектории МКС, при прохождении которых регистрируется повышенная мощность дозы. Ниже описаны две из имеющегося набора структур данных, которые СРК передает на Землю по каналам телеметрии. Данные именно этих структур были использованы в диссертационной работе.

Структура файла с 10-минутными данными СРК по потокам частиц и дозам радиации (после предварительной обработки телеметрической информации) представлена в таблице 9.

Таблица 9.

Номер витка	Время (по Гринвичу)	Индекс информационного потока (i/S)	День недели	Время	Дата	Номер массива данных	Номер массива данных	Бит, подтверждающий корректность данных	Маркер записи N/R	Текстовое поле	Номер канала детекторов ДБ-8 (от 1 до 8)	Мощность дозы (численное значение, нГр)	Поток (численное значение)
-------------	---------------------	-------------------------------------	-------------	-------	------	----------------------	----------------------	---	-------------------	----------------	--	---	----------------------------

Структура файла с 10-секундными данными СРК по потокам частиц и дозам радиации представлена в таблице 10.

Таблица 10.

Номер витка	Время (по Гринвичу)	Индекс информационного потока (i/S)	День недели	Время	Дата	Номер массива данных	Номер массива данных	Бит, подтверждающий корректность данных	Маркер записи (N/R)	Текстовое поле	Текстовое поле	Номер канала детекторов ДБ-8 (от 1 до 8)	Текстовое поле	Мощность дозы (численное значение, нГр)	Текстовое поле	Поток (численное значение)
-------------	---------------------	-------------------------------------	-------------	-------	------	----------------------	----------------------	---	---------------------	----------------	----------------	--	----------------	---	----------------	----------------------------

Все поля данных в этих структурах разделены между собой символом табуляции. Колонки «время» и «дата» представляют собой моменты времени (по Гринвичу), для которых были сняты соответствующие показания каналов детекторов ДБ-8. Поле «Номер канала детекторов ДБ-8» представляет собой целое число (от 1 до 8), обозначающее номер канала детекторов ДБ-8. Номера каналов 1 и 2 обозначают незранированный и защищенный свинцом детекторы блока ДБ-8 №1 соответственно, каналы 3 и 4 – аналогичные детекторы для блока ДБ-8 №2, каналы 5 и 6 обозначают незащищенные и защищенные детекторы для блока ДБ-8 №3, каналы 7 и 8 - аналогичные детекторы для блока ДБ-8 №4. Канал детекторов ДБ-8 №1 имеет наименьшую защищенность, канал детекторов ДБ-8 №7 имеет наибольшую защищенность оборудованием и элементами конструкции станции из незранированных свинцом детекторов. В поле «Мощность дозы» и «Поток» для соответствующего канала записываются, соответственно, численные значения мощности дозы (в единицах нГр) и потока частиц (в единицах

частиц / см² * сек), зарегистрированные данным каналом детектора. Кроме этого, в 10-секундных данных СРК также имеется информация о времени (в секундах) пребывания МКС внутри зоны повышенной радиации (напр., ЮАА), а также информация о дозах, зарегистрированных детекторами ДБ-8 в течение всего времени пребывания МКС внутри этой области.

У обеих структур данных существует особенность. Для того, чтобы увеличить надежность передачи данных по каналам телеметрии, разработчиками бортового программного обеспечения СРК было решено добавить в структуру данных дополнительные записи, дублирующие уже зарегистрированные показания детекторов, с той целью, что если на текущем сеансе связи по системе телеметрии МКС с Центром Управления Полетами (ЦУП) по каким-либо причинам не будет полностью передана вся информация, накопившаяся за время, прошедшее с предыдущего сеанса связи, то эта информация будет передана в ЦУП уже на следующем сеансе. Такие записи особым образом помечаются (при помощи установки маркера «N» или «R» в специальном поле внутри структуры данных).

К сожалению, несмотря на этот фактор дополнительной надежности, потери информации при передаче данных СРК по каналу телеметрии с борта МКС на Землю все равно происходят. Зачастую, происходят потери дозиметрической информации, связанной с прохождением МКС области интенсивных радиационных потоков (например, зоны Южно-Атлантической Аномалии); также довольно часты потери дозиметрических данных во временном интервале между окончанием предыдущих суток и началом текущих. Всё это вносит дополнительные ошибки и искажения в значение суточной мощности дозы, затрудняет задачу ее определения за истекшие сутки, а также приводит к значительному уменьшению полноты и целостности данных СРК, пригодных для анализа.

Кроме данных по дозам, зарегистрированных детекторами ДБ-8, для анализа привлекались баллистические данные о траектории полета МКС.

Соответствующие расчеты на основе параметров орбиты МКС, полученных из Центра Управления Полетами, были выполнены Дробышевым Сергеем Геннадиевичем, сотрудником ИМБП, и представлены в виде файлов, имеющих следующую структуру (таблица 11):

Таблица 11.

Время (по Гринвичу) и дата	Широта	Долгота	Высота
----------------------------------	--------	---------	--------

Данные в этой структуре также разделяются между собой символом табуляции. Временное разрешение баллистических данных – 10 секунд или 10 минут, в соответствии с временным разрешением дозиметрических данных детекторов ДБ-8.

Для сравнения с дозиметрическими данными в процессе выполнения диссертационного исследования были использованы данные о потоках ГКЛ (скорость счета нейтронных мониторов), а также данные о потоках СКЛ (спутниковые данные). Эти данные брались в виде текстовых файлов с интернет – сайтов <http://pgia.ru/data/nm/> (нейтронный монитор в г. Апатиты, Россия), <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/query.do?group=CRI&> (нейтронный монитор в г. Киль, Германия), <http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm> (нейтронный монитор в г. Москва, Россия), <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/query.do?group=GOES> (данные со спутников GOES о потоках СКЛ). Для данных нейтронных мониторов использовалось временное разрешение 1 сутки; для данных о потоках СКЛ также использовалось односуточное временное разрешение.

Структура файлов с данными по потокам частиц ГКЛ и СКЛ представлена в таблицах 12 и 13 соответственно. Все поля данных в этих структурах разделялись между собой также при помощи символа табуляции.

Таблица 12.

Дата	Скорость счета нейтронных мониторов, имп/мин
------	--

Таблица 13.

Дата	Данные о потоке частиц СКЛ с энергией больше 5 МэВ, частиц/см ² * сек * стер	Данные о потоке частиц СКЛ с энергией больше 10 МэВ, частиц/см ² * сек * стер	Данные о потоке частиц СКЛ с энергией больше 30 МэВ, частиц/см ² * сек * стер	Данные о потоке частиц СКЛ с энергией больше 60 МэВ, частиц/см ² * сек * стер	Данные о потоке частиц СКЛ с энергией больше 100 МэВ, частиц/см ² * сек * стер
------	--	---	---	---	--

2.3. Методика обработки дозиметрических данных

Одной из задач диссертационной работы являлось разделение вклада в дозу на МКС, обусловленного ГКЛ и РПЗ.

На рис. 16 представлен пример графика накопления дозы, регистрируемой детекторами ДБ-8 (наименее защищённый детектор ДБ-8 №1) за 1 сутки (31.07.2008). Красными точками на рисунке показаны отражающиеся на значениях счета детектора моменты времени входа и выхода МКС из области ЮАА.

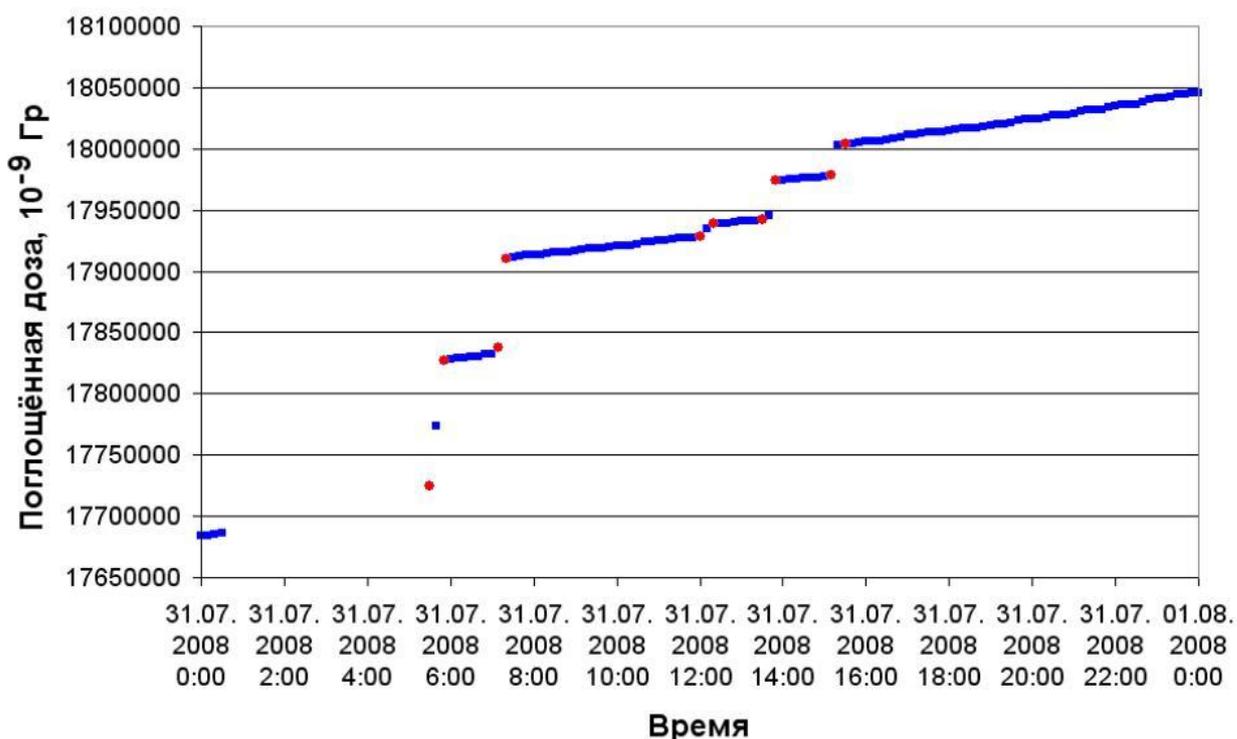


Рис. 16. График накопления дозы за 1 сутки (31.07.2008)

Для решения задачи разделения вклада в дозу на МКС, обусловленного ГКЛ и РПЗ, была разработана соответствующая методика, заключающаяся в следующем.

Расчет мощности дозы, полученной МКС в течение суток, происходит при помощи следующего алгоритма: значение поглощенной дозы, зарегистрированное в 0 часов 00 минут рассматриваемых суток вычитается из значения поглощенной дозы, зарегистрированного в 0 часов 00 минут следующих суток. Поэтому, для определения вклада в среднесуточную мощность дозы от РПЗ, было решено, используя баллистическую информацию, определить все интервалы времени в течение суток, во время которых МКС проходит зону ЮАА, и просуммировать приращения поглощенной дозы, накопленные за эти интервалы времени, а соответствующую дозу от ГКЛ вычислить как разность между среднесуточной мощностью дозы и мощностью дозы от РПЗ, накопленной за соответствующие сутки. Для реализации этой методики было решено

использовать дозиметрические и баллистические данные с десятиминутным временным разрешением.

При реализации такого подхода возникает необходимость определять моменты времени входа в область ЮАА и выхода из неё. Для этого требуется задать ее границы. Представить область ЮАА в виде «прямоугольника» по широте и долготе будет в данном случае слишком грубым приближением, поэтому для расчета границы области ЮАА было решено использовать эмпирическую аппроксимацию мощности дозы, зарегистрированной СРК, в виде квазигауссовского распределения S , спадающего от центра ЮАА к ее краям по формуле [54]:

$$S = \left(\frac{\Delta\varphi}{\delta\varphi} \right)^2 + \left(\frac{f(\Delta\lambda)}{\delta\lambda} \right)^2, \quad (4),$$

где:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{SAA},$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{SAA},$$

параметры λ_{SAA} и φ_{SAA} задают долготу и широту географического центра ЮАА; параметры λ и φ – долготу и широту ОК «МКС». Параметры $\delta\lambda$, $\delta\varphi$, $f(\Delta\lambda)$, λ_{SAA} и φ_{SAA} - представлены в таблице 14.

Таблица 14.

Параметр	Значение	Размерность
λ_{SAA}	-40	градус
φ_{SAA}	-30	градус
$\delta\lambda$	11,45	градус
$\delta\varphi$	5,773	градус
$f(\Delta\lambda)$	= $\Delta\lambda$ при $\Delta\lambda < 0$ = $q \cdot \Delta\lambda$ при $\Delta\lambda > 0$	градус
q	0,75	-
S	6,86	-

При расчетах границей ЮАА принималось значение параметра S , равное 6,86.

В качестве примера реализации такой эмпирической аппроксимации на рис. 17 представлено сравнение уже упоминавшегося распределения мощности дозы в области ЮАА за сентябрь 2002 года, и его аппроксимации

квазигауссовским распределением [2] (левая панель – экспериментальное распределение мощности дозы в области ЮАА за сентябрь 2002 года, правая панель – эмпирическая аппроксимация).

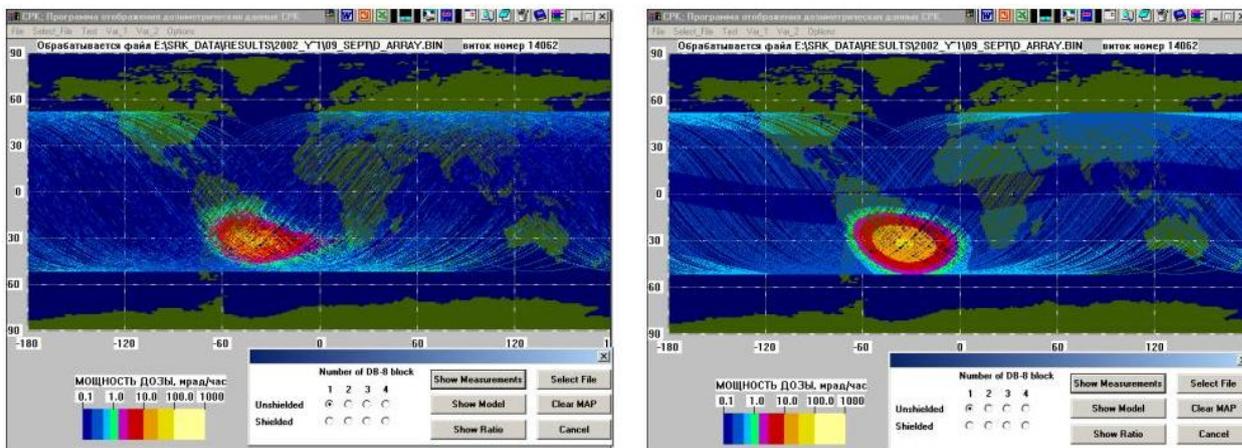


Рис. 17. Сравнение экспериментально наблюдавшегося распределения мощности дозы в области ЮАА за сентябрь 2002 г. и его аппроксимации

Для проведения обработки данных было разработано соответствующее прикладное математическое программное обеспечение (реализованное в виде программы, написанной на языке NI LabView 8.2). При его разработке был использован следующий алгоритм:

- Для рассматриваемых суток вычислить все интервалы времени прохождения области ЮАА.
- Для каждого такого интервала времени определить значение дозы, зарегистрированное СРК в конце 10-минутного интервала времени, предшествующего моменту входа в ЮАА. Затем определить значение дозы в конце 10-минутного интервала времени, в котором произошел выход из области ЮАА. Приращение дозы между этими моментами времени считать дозой, полученной от РПЗ. Вклад в дозу от ГКЛ за этот период считать незначительным.
- Вклад в суточную дозу от РПЗ вычислить как сумму вкладов от всех прохождений области ЮАА в течение рассматриваемых суток.

- Вклад в суточную дозу от ГКЛ вычислить как разность полной суточной дозы и вклада в суточную дозу от РПЗ.

Иногда один из интервалов времени прохождения области ЮАА оказывался на границе суток. Данные для таких суток исключались из анализа. Исключались из анализа также сутки, во время которых наблюдались провалы в данных измерений, попадающие на интервалы времени прохождения области ЮАА. Несомненным достоинством этой методики являлась сравнительная простота ее программной реализации. Недостатком же этой методики явилась выявленная в процессе программной реализации ее значительная чувствительность к полноте и целостности данных. Имеющаяся степень полноты данных СРК позволила получить данные по суточным дозам внутри ЮАА и вне её границ лишь за период со второй половины 2005 г. до конца 2009 г. Эксплуатация же комплекса СРК на Международной Космической Станции началась в августе 2001 года (согласно [12]), и продолжается вплоть до настоящего времени.

Кроме этого, из-за довольно грубого временного разрешения (10 минут) точность определения моментов входа ОК «МКС» в область ЮАА и выхода из нее также являлась недостаточно высокой, равно же, как и точность определения дозы, получаемой МКС за одно прохождение области ЮАА (а, соответственно, и за сутки). Всё это заставило начать разработку методики обработки экспериментальных данных, дающую более надежные результаты.

С целью расширения временного диапазона массива анализируемых данных СРК, было принято решение изменить методику их обработки. Помимо этого, еще одной целью новой методики обработки данных предполагалось сделать возможность восстановления целостности данных СРК, потерянных при передаче по телеметрическому каналу.

Для реализации этой методики были использованы возможности режима работы детекторов СРК с временным разрешением 10 секунд. Как уже упоминалось, функционирование системы радиационного контроля на МКС

позволяет автоматически определять начало и окончание зоны повышенной радиации и величину дозы, накопленной за этот промежуток времени. Кроме этого, регистрируется мощность дозы и плотность потока частиц в области повышенной радиации с временным разрешением 10 секунд.

Таким образом, 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° , 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 – «нисходящий». Обработка телеметрической информации СРК совместно с данными баллистики позволяет поставить в соответствие численному значению поглощенной дозы для каждого из прохождений ЮАА момент времени и значение географических координат, которые имела МКС при пересечении широты -30° , которую было решено обозначить термином «референтная широта».

Реконструкцию потерянных данных по мощностям доз предполагалось осуществить на основании экспериментальной зависимости между мощностью дозы, регистрируемой детекторами ДБ-8, и долготой прохождения МКС области ЮАА при фиксированной широте -30° ю.ш., а именно: графическое представление эмпирической зависимости мощности дозы для каждого из прохождений ЮАА от долготы, которую имела МКС при каждом пересечении референтной широты, дает возможность получить математическое описание - аппроксимацию подобных эмпирических зависимостей, что, в свою очередь, позволяет реконструировать потерянные

в результате каких-либо причин данные по мощностям доз, зарегистрированных системой СРК МКС при прохождении ЮАА. Реконструированные таким образом данные по мощностям доз, получаемым МКС при прохождении ЮАА, позволяют, 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. Несомненным достоинством этой методики является ее нечувствительность к точности определения моментов входа и выхода МКС из области ЮАА, т.к. используемый режим функционирования СРК позволяет автоматически определять начало и окончание зоны повышенной радиации. Также достоинством этой методики является возможность раздельного анализа «нисходящих» и «восходящих» участков траектории полета МКС. Эти участки траектории различаются своими баллистическими параметрами (в частности, высотой), что приводит к несколько различным значениям доз для «восходящих» и «нисходящих» витков.

Еще одним достоинством этой методики является большая точность определения дозы, получаемой МКС за одно прохождение области ЮАА (соответственно, и за сутки), чем при обработке данных по первой методике: это связано с более точным определением моментов входа и выхода МКС из зоны Южно-Атлантической Аномалии. Также к достоинствам этой методики следует отнести переход от трехмерного описания координат МКС (широта, долгота, высота) к двухмерному (долгота при фиксированной широте, высота), при том, что такое описание оказывается достаточным для корректной оценки дозы облучения на борту МКС.

Как уже отмечалось, для того, чтобы увеличить надежность передачи данных по каналам телеметрии, разработчиками бортового программного обеспечения СРК было решено добавить в структуру данных дублирование уже зарегистрированных показаний детекторов. Такая компоновка данных, хотя и увеличивает надежность передачи данных СРК по каналам телеметрии, но несколько затрудняет последующую наземную обработку данных СРК. В связи с этим, было решено разработать программный модуль, осуществляющий предварительную обработку данных и, тем самым, упрощающий процесс их последующей основной обработки.

Был разработан специализированный программный модуль на языке программирования Visual Basic, преобразующий исходные данные детекторов ДБ-8 (таблица 10) в следующий формат (таблица 15):

Таблица 15.

Время (по Гринвичу) и дата	Бит, подтверждающий корректность данных	Маркер записи (N/R)	Текстовое поле	Текстовое поле	Номер канала детекторов ДБ-8 (от 1 до 8)	Текстовое поле	Мощность дозы (численное значение, нГр)	Пустое поле (символ «табуляция»)	Время (по Гринвичу) и дата	Текстовое поле	Текстовое поле	Время нахождения МКС внутри области ЮАА (в секундах)
----------------------------	---	---------------------	----------------	----------------	--	----------------	---	----------------------------------	----------------------------	----------------	----------------	--

В этом представлении данных отсутствует дублирование уже зарегистрированных показаний детекторов, что упрощает последующий процесс автоматизированной программной обработки информации.

Основная автоматизированная программная обработка предварительно подготовленных данных СРК МКС производилась, как и в случае с первой методикой, при помощи специализированного пакета программ, написанных на языке визуального программирования National Instruments LabView 8.2. При его разработке был использован следующий алгоритм:

- Для рассматриваемых суток выделить все области повышенных радиационных потоков, зарегистрированные СРК, а также момент времени входа МКС в область ЮАА и время нахождения МКС внутри этой области (в секундах).

- Вычислить время выхода МКС из области ЮАА. Для каждого момента времени входа и выхода МКС из области ЮАА определить соответствующие географические координаты (широту, долготу, высоту), а также долготу и высоту точки пересечения станцией референтной широты 30° ю.ш. Все вычисления производить отдельно для «восходящих» и «нисходящих» витков.

- Для каждого из «восходящих» и «нисходящих» витков поставить в соответствие координатам точки пересечения станцией референтной широты 30° ю.ш. мощность дозы, полученную МКС за одно пересечение ЮАА (для каждого из каналов детекторов ДБ-8). Вклад в дозу от ГКЛ за время нахождения МКС внутри области ЮАА считать незначительным.

Пример программной обработки данных СРК МКС (для временного интервала 01.07.2005 – 30.11.2011, наименее и наиболее защищенные блоки ДБ-8 №1 и №4 соответственно, каналы без свинцовой защиты) в виде зависимости дозы, регистрируемой блоками ДБ-8 за одно прохождение ЮАА, от долготы пересечения станцией референтной широты 30° ю.ш., представлен на рис. 18.

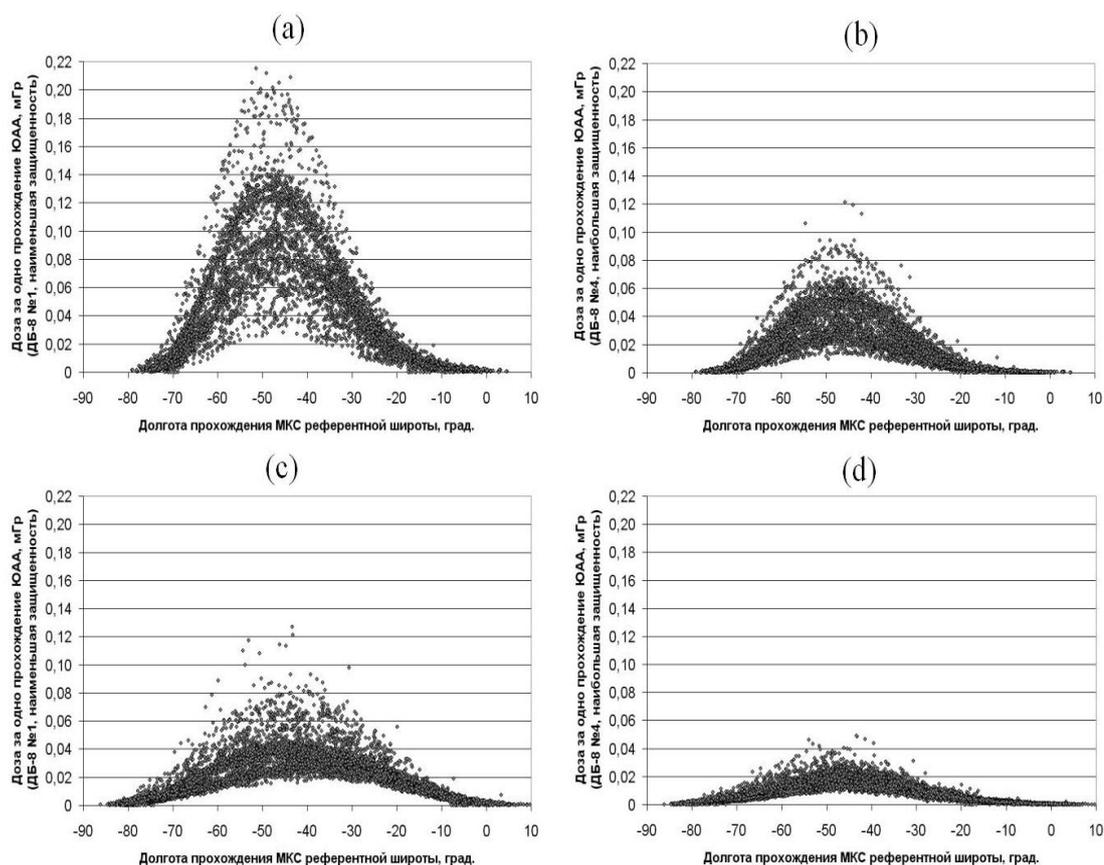


Рис. 18. Зависимость дозы, получаемой МКС в области ЮАА за одно прохождение, от долготы пересечения МКС референтной широты (нисходящие витки, детектор ДБ-8 №1 (наименьшая защищенность) – рис. (а); нисходящие витки, детектор ДБ-8 №4 (наибольшая защищенность) – рис. (б); восходящие витки, детектор ДБ-8 №1 (наименьшая защищенность) – рис. (с); восходящие витки, детектор ДБ-8 №4 (наибольшая защищенность) – рис. (д))

Как видно из рис. 18, 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. 18 можно видеть весьма значительный разброс зарегистрированных показаний детекторов. Было предположено, что этот разброс обусловлен значительным диапазоном высот прохождения Международной космической станцией зоны ЮАА. 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. 18. Для этих распределений оказалось возможным ввести математическое описание, аппроксимирующее экспериментальные зависимости. Подробнее полученные результаты рассмотрены в параграфе 3.3. Главы 3.

Глава 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

3.1. Результаты обработки данных с десятиминутным временным разрешением (первая методика обработки данных)

Программная обработка данных СРК МКС была проведена для временного интервала 01.01.2005 – 31.12.2009 (поскольку, как уже говорилось, имеющаяся степень полноты данных СРК позволила получить, используя эту методику, данные по суточным дозам внутри ЮАА и вне её границ лишь за период со второй половины 2005 г. до конца 2009 г.) Результаты обработки данных представлены на рис. 19 (зависимость суточных доз внутри ЮАА от времени) и на рис. 20 (временная зависимость вклада в суточную дозу от ГКЛ). На обоих рисунках представлены зависимости для наименее защищенного и наиболее защищенного каналов детекторов ДБ-8 соответственно (блоки ДБ-8 №1 и №4, каналы без свинцовой защиты).

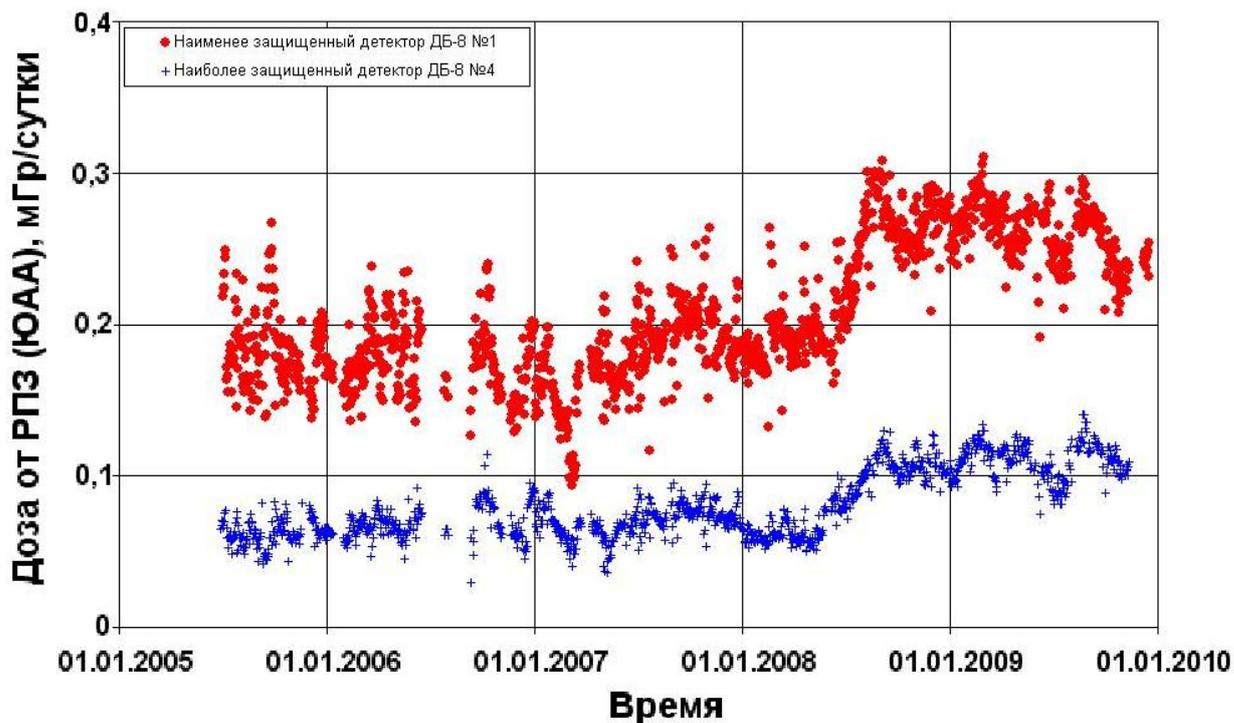


Рис. 19. Вклад в суточную дозу от РПЗ

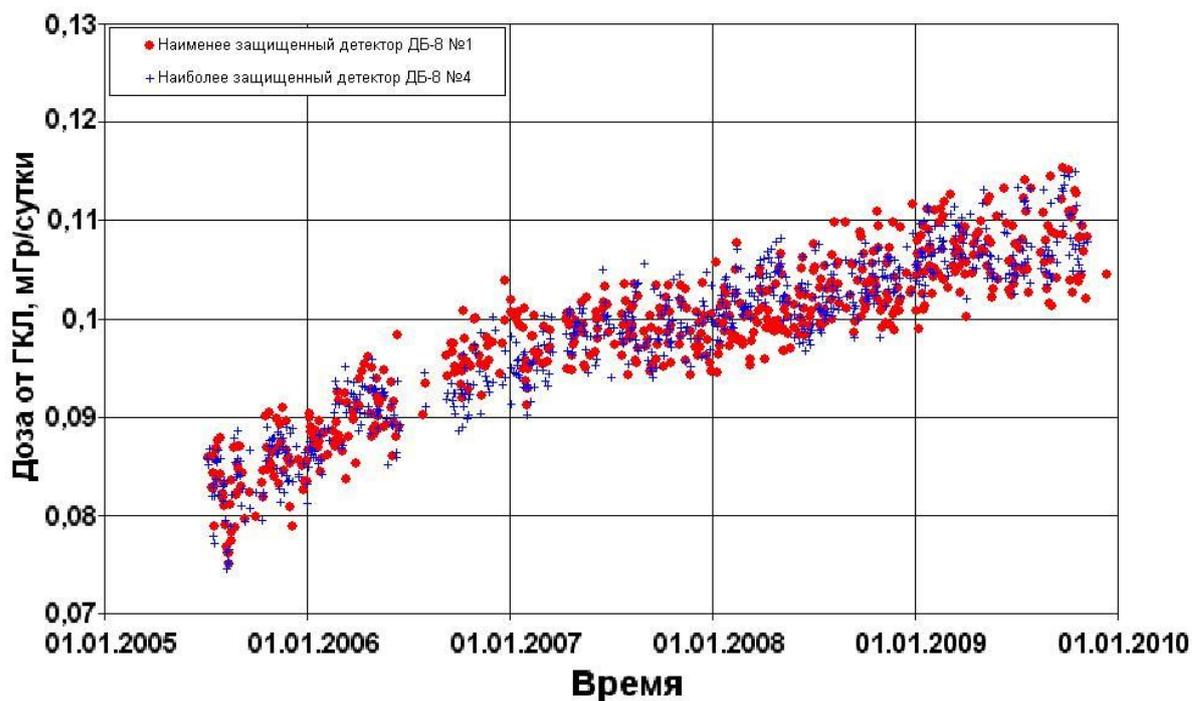


Рис. 20. Вклад в суточную дозу от ГКЛ

Для последующего анализа данные, представленные на рис. 14 и 15, были сглажены методом скользящего среднего [55], и для дальнейшего анализа использовались уже сглаженные данные. Использование этой операции для данных по вкладу в суточную мощность дозы от РПЗ и ГКЛ

позволяет убрать из рассмотрения данные, связанные с различными артефактами в исходных данных, а также с несовершенством алгоритмов математической обработки и интерполяции данных.

В результате анализа сглаженных данных было установлено, что поглощенная доза на МКС в 2005 - 2009 гг. определялась, в основном, потоками ГКЛ и РПЗ (в области ЮАА). Была установлена связь вклада в суточную мощность дозы от ЮАА с высотой прохождения области ЮАА орбитальным комплексом МКС (рис. 23). Было установлено, что влияние вклада от РПЗ на среднесуточную мощность дозы, связанное с изменением высоты ОК «МКС», прослеживается на временном интервале с середины 2006 г. до окончания 2009 г. Была проведена количественная оценка этого влияния. Связи вклада в суточную дозу от ГКЛ с высотой прохождения МКС области ЮАА не наблюдается.

Подробнее полученные результаты рассмотрены в параграфах 3.2 и 3.3. Главы 3.

3.2. Вклад в суточную дозу от ГКЛ

На рис. 21 представлена полученная в результате анализа данных временная зависимость вклада в суточную дозу от ГКЛ (использованы сглаженные данные). 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 (это составляет от 57% до 44% вклада в среднесуточную мощность дозы для наиболее защищенного детектора ДБ-8 №4 и от 35% до 27% вклада в среднесуточную мощность дозы для наименее защищенного детектора ДБ-8 №1), что указывает на то, что условия экранировки детекторов не оказывают существенного влияния на вклад в суточную мощность дозы от ГКЛ.

Необходимо отметить, что согласно уже упоминавшейся работе [17], данные, полученные прибором ТЕРС на ОК «МИР», позволили не только разделить вклад в суточную мощность дозы от ГКЛ и РПЗ для временного периода с марта по июль 1995 г., но и получить усредненную по времени численную оценку вклада в суточную мощность дозы от ГКЛ – 0,142 мГр/сут [17]. Этот результат, представленный в [17], охватывает сравнительно небольшой временной период – 4 месяца (март, апрель, май, июнь) 1995 года, пришедшиеся на период минимума солнечной активности, в то время как представленный в данной работе результат получен для значительно большего временного диапазона - со второй половины 2005 г. до конца 2009 г. Отметим также, что данное диссертационное исследование, как и работа [17], содержит численную оценку вклада в суточную мощность дозы от ГКЛ для периода минимума солнечной активности. Оценка вклада в суточную мощность дозы от ГКЛ в работе [17] была произведена по данным тканеэквивалентного счетчика, в то время как в данном диссертационном исследовании используются данные кремниевых полупроводниковых детекторов. Отношение дозы в ткани к дозе в кремнии определяется отношением ионизационных потерь заряженных частиц в их веществе, которое для протонов с энергией больше 50 МэВ составляет $\sim 1,25$ [47]. Полученная нами численная оценка вклада в суточную мощность дозы от ГКЛ для периода минимума солнечной активности (2009 г.), 0,11 мГр/сут по кремнию, при пересчете на дозу в ткани составит 0,138 мГр/сут, что близко к данным измерений, полученным в работе [17].

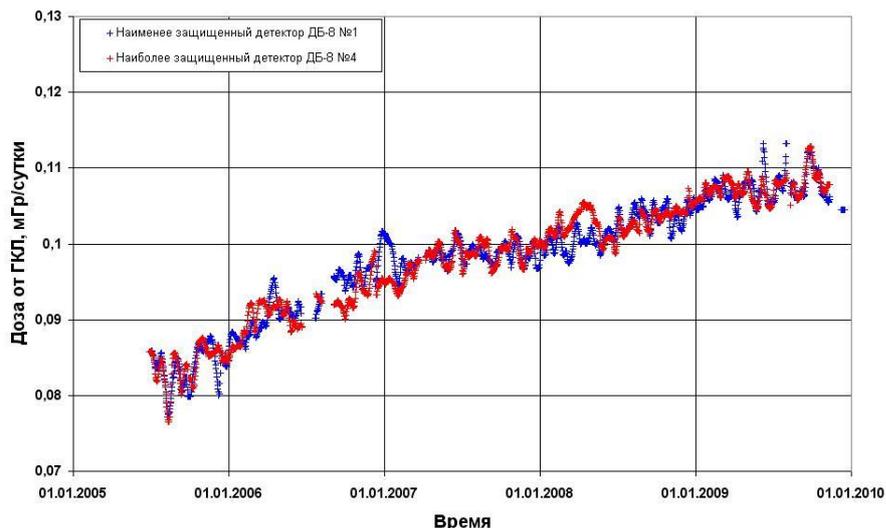


Рис. 21. Вклад в суточную дозу от ГКЛ (сглаженные данные)

На рис. 22 представлено сравнение вклада в суточную дозу от ГКЛ (сглаженные данные) со скоростью счета нейтронного монитора по данным станции в г. Апатиты (Россия) и в г. Киль (Германия). Было установлено, что вклад в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ изменяется в соответствии с трендом, прослеживаемым по данным мониторинга потоков ГКЛ за 2005 - 2009 гг.

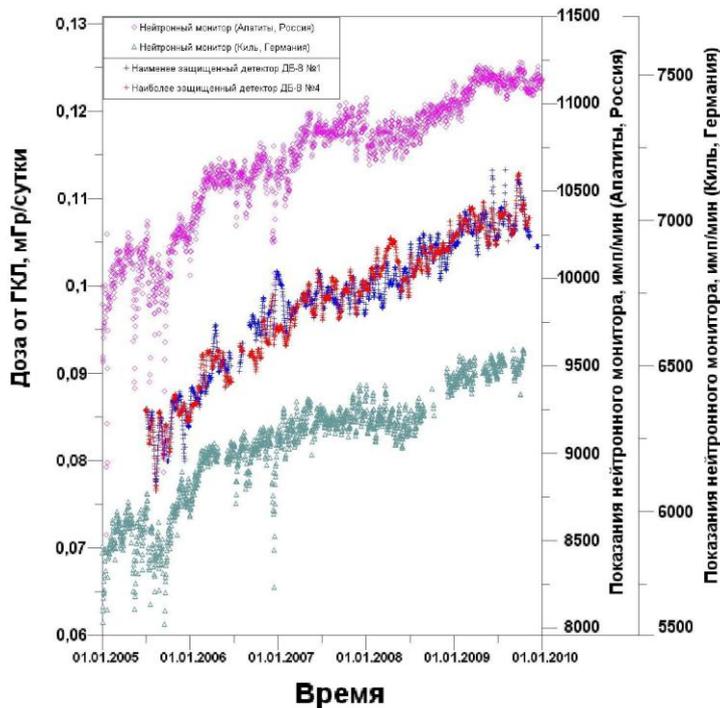


Рис. 22. Сравнение вклада в суточную дозу от ГКЛ (сглаженные данные) со скоростью счета нейтронных мониторов

Была также произведена количественная оценка – за 2005 - 2009 гг. были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона [56] между вкладом в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ и скоростью счета нейтронного монитора по данным станции в г. Апатиты. Они составили 0,91 и 0,92 для наименее защищенного и наиболее защищенного блоков ДБ-8 соответственно. Это 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. Выбор станции в г. Апатиты в качестве источника данных нейтронного монитора был связан, во-первых, с расположением станции в области высоких широт (на $\sim 68^\circ$ с.ш., поэтому ее данные являются чувствительным индикатором вариаций ГКЛ), во-вторых, с тем, что, благодаря расположению станции в высоких широтах, частицы ГКЛ, регистрируемые посредством нейтронного монитора этой станции, мало подвержены влиянию эффекта геомагнитного обрезания.

3.3. Вклад в суточную дозу от РПЗ

На рис. 23 приведено сравнение временной зависимости вклада в среднесуточную мощность дозы от РПЗ («сглаженные» значения мощности дозы для наименее защищенного и наиболее защищенного блоков ДБ-8) с графиком временной зависимости высоты прохождения МКС области ЮАА на восходящих и нисходящих витках. В результате сопоставления верхней и нижней панели рис. 23 можно видеть, что в течение периода окончания 23-го цикла солнечной активности (2005 - 2006 гг.) вклад в среднесуточную мощность дозы от РПЗ не претерпевает значительных изменений в зависимости от высоты МКС; в течение же периода минимальной солнечной активности (2007 – 2009 гг.), захватившего начало 24-го цикла активности

Солнца, вклад в среднесуточную мощность дозы от РПЗ испытывает сильные вариации в зависимости от высоты орбиты МКС.

Была произведена количественная оценка связи этих параметров между собой – а именно, были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона 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.

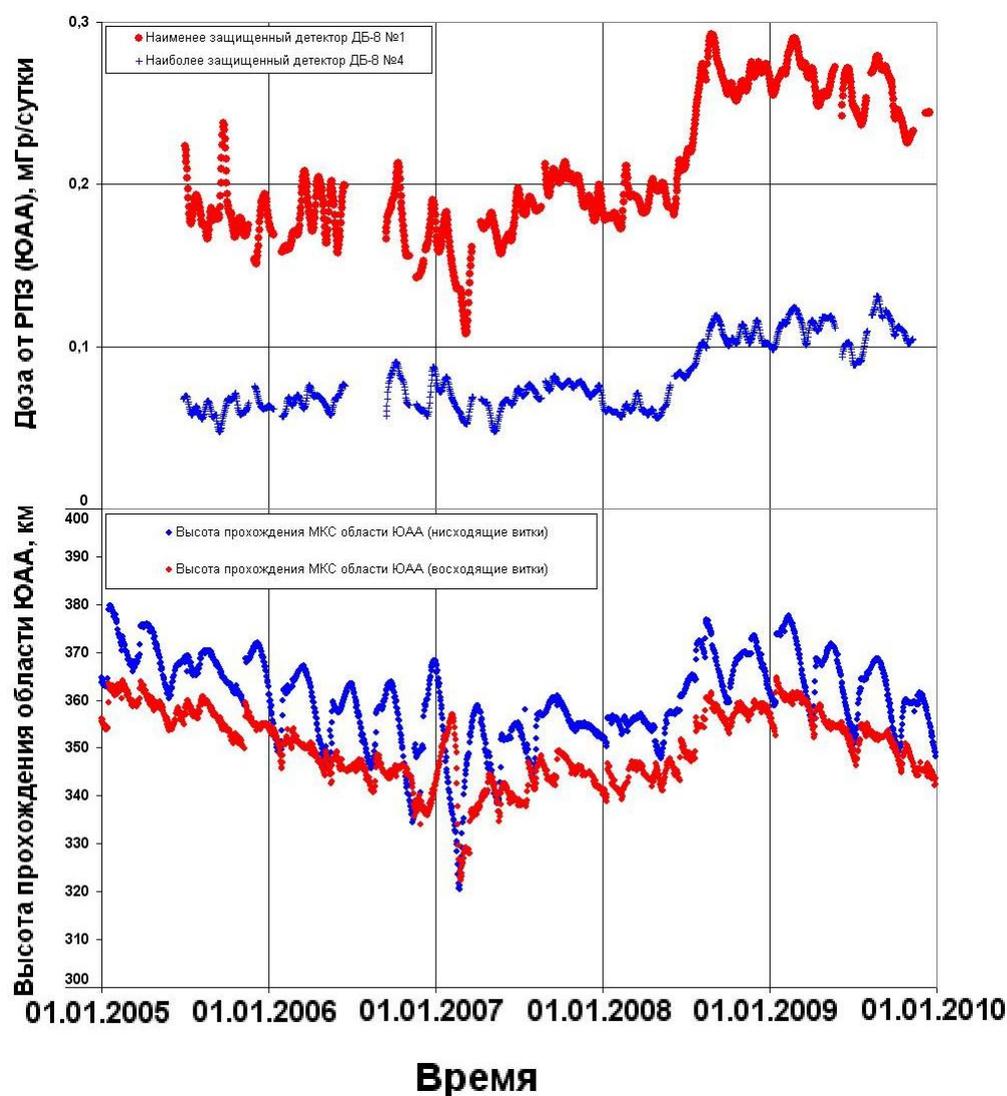


Рис. 23. Сравнение вклада в среднесуточную мощность дозы от РПЗ с зависимостью высоты прохождения МКС области ЮАА от времени

Было также установлено, что в период 2005 - 2009 гг. вклад от РПЗ в среднесуточную мощность дозы изменялся от $0,06 \pm 0,03$ до $0,14 \pm 0,04$ мГр/сут (что составляет от 43% до 56% среднесуточной дозы) для наиболее защищенного детектора ДБ-8 №4 и от $0,15 \pm 0,08$ до $0,30 \pm 0,06$ мГр/сут (что составляет от 65% до 73% среднесуточной дозы) для наименее защищенного детектора ДБ-8 №1, т.е. для вклада от РПЗ в среднесуточную мощность дозы экранировка детекторов имеет существенное значение (в отличие от аналогичного вклада в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ).

Среднегодовые значения доз от РПЗ и погрешностей их определения, также, как и для ГКЛ, получены как средние значения и три среднеквадратичных отклонения за 2005 и 2009 годы соответственно. Обращает на себя внимание значительный, доходящий до 50% от значения, уровень погрешностей в определении вклада от РПЗ в среднесуточную мощность дозы (в отличие от аналогичного вклада в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ). Подобные высокие значения погрешностей измерений в определении вклада от РПЗ в среднесуточную мощность дозы связаны с сочетанием двух процессов: с естественным процессом торможения станции о верхние слои земной атмосферы и с искусственным процессом управляемой коррекции (подъемом высоты) орбиты МКС. Поэтому, в отличие от аналогичных значений погрешностей измерений в определении вклада в среднесуточную мощность дозы от ГКЛ, полученные значения погрешностей в определении вклада в среднесуточную мощность дозы от РПЗ не отражают естественные физические процессы в полной мере, и при дальнейшем рассмотрении не учитываются.

Необходимо также отметить, что в работе [17] приводятся (для временного интервала март – июнь 1995 г., период минимума солнечной активности) аналогичные численные оценки вклада от РПЗ в среднесуточную мощность дозы: $0,153$ мГр/сут [17]. При пересчете на дозу в кремнии это составит $0,12$ мГр/сут, что близко к значениям, полученным по

данным наиболее защищенного детектора ДБ-8 №4 для 2009 г. (также период минимума солнечной активности).

Как уже упоминалось, 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. Кроме этого, степень целостности исходных данных сделала актуальной задачу реконструкции потерянных данных за отдельные прохождения МКС области ЮАА, а для этой задачи параметр, которым оперирует методика обработки десятиминутных данных (вклад в дозу от ЮАА за одни сутки) является слишком грубым приближением; необходим переход к более детальным характеристикам радиационной обстановки. Поэтому, с целью расширения временного диапазона массива анализируемых данных и реализации алгоритма реконструкции потерянных данных, была проведена обработка данных СРК, имеющих временное разрешение десять секунд.

3.4. Результаты обработки данных с десятисекундным временным разрешением (вторая методика обработки данных)

Обработка данных СРК МКС была проведена для временного интервала 01.07.2005 – 30.11.2011; результаты обработки представлены на рис. 18.

Изначально предполагалось, что графическое представление эмпирической зависимости мощности дозы для каждого из прохождений ЮАА от долготы, которую имела МКС при каждом пересечении референтной широты -30° ю.ш., будет представлять собой множество точек, с минимальным отклонением укладываемое на одну кривую. Однако, на рис. 18 можно видеть весьма значительный разброс зарегистрированных показаний детекторов. Было предположено, что этот разброс может быть

обусловлен значительным диапазоном высот прохождения Международной космической станцией зоны ЮАА.

Для того, чтобы проверить это предположение, было решено провести разделение экспериментальных данных по высотам, на которых, согласно баллистическим данным, находилась МКС при пересечении референтной широты -30° ю.ш. в течение всего рассматриваемого периода времени.

Временная зависимость высоты, на которой происходило пересечение МКС референтной широты -30° ю.ш. (для нисходящих и для восходящих витков), представлена на рис. 24.

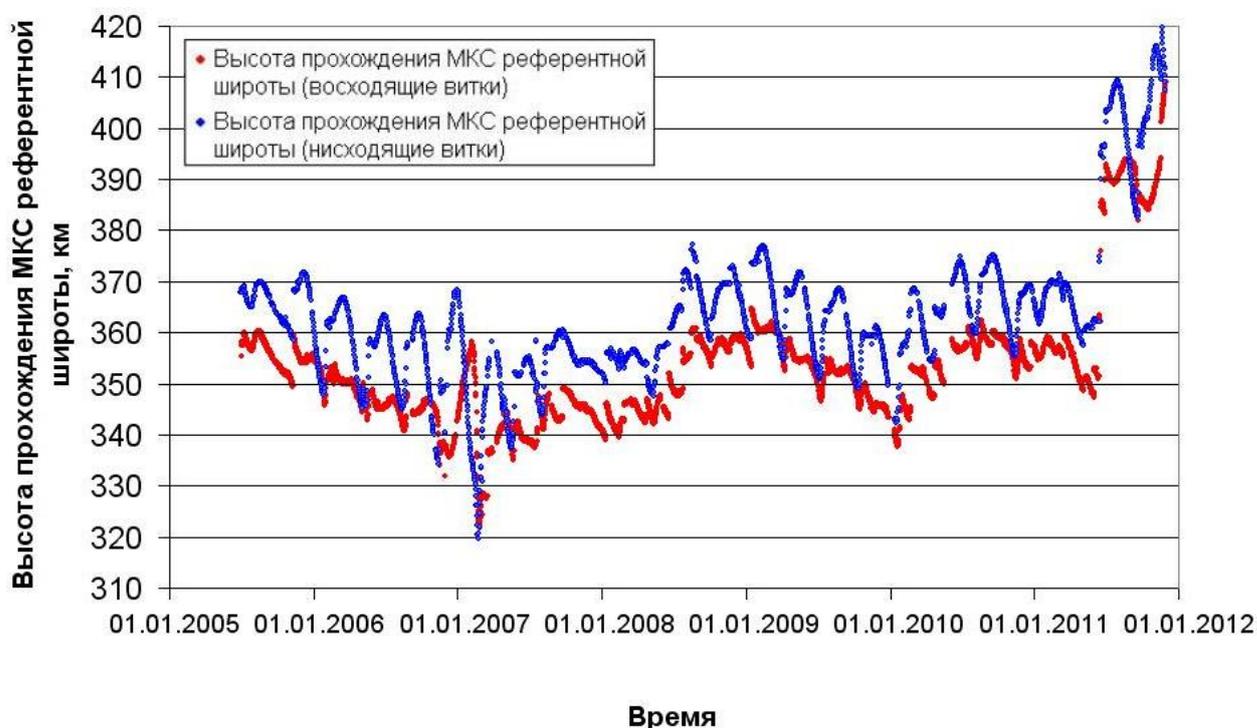


Рис. 24. Зависимость высоты пересечения МКС референтной широты от времени

Исходя из временной зависимости, представленной на рис. 24, было решено разбить весь диапазон высот, на которых происходило пересечение МКС референтной широты -30° ю.ш., на следующие интервалы: 320 - 330 км, 330 - 340 км, 340 - 350 км, 350 - 360 км, 360 - 370 км, 370 - 380 км, 380 - 390 км, 390 - 400 км, 400 - 410 км, 410 - 420 км, и провести соответствующее этим диапазонам высот разделение экспериментальных зависимостей доз, получаемых МКС в ЮАА за одно прохождение, от долготы прохождения

МКС референтной широты. Результаты такого разделения представлены на рис. 25 - 34.

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

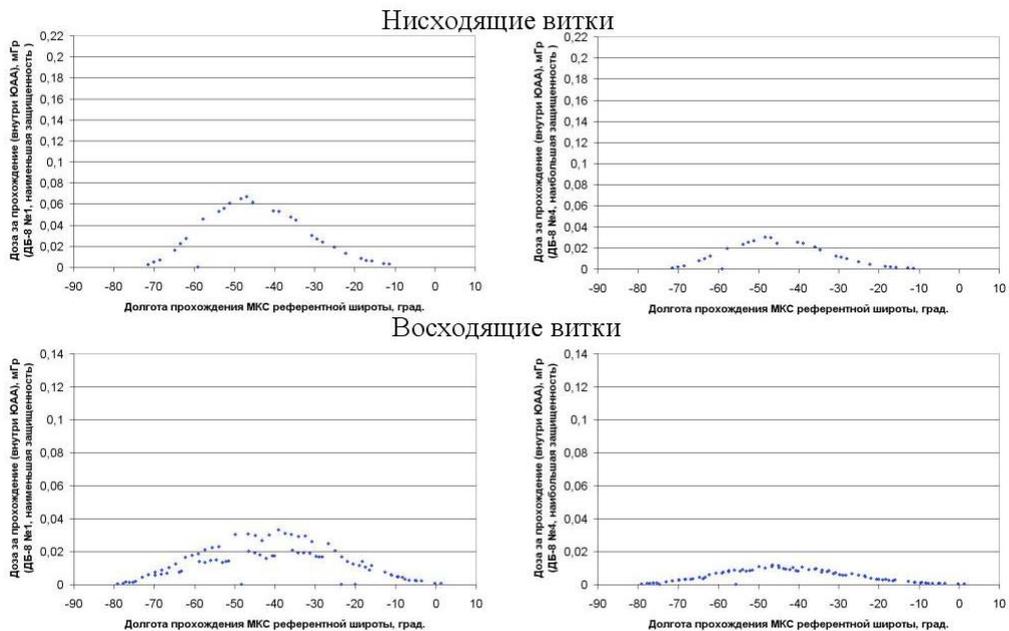


Рис. 25. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 320-330 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

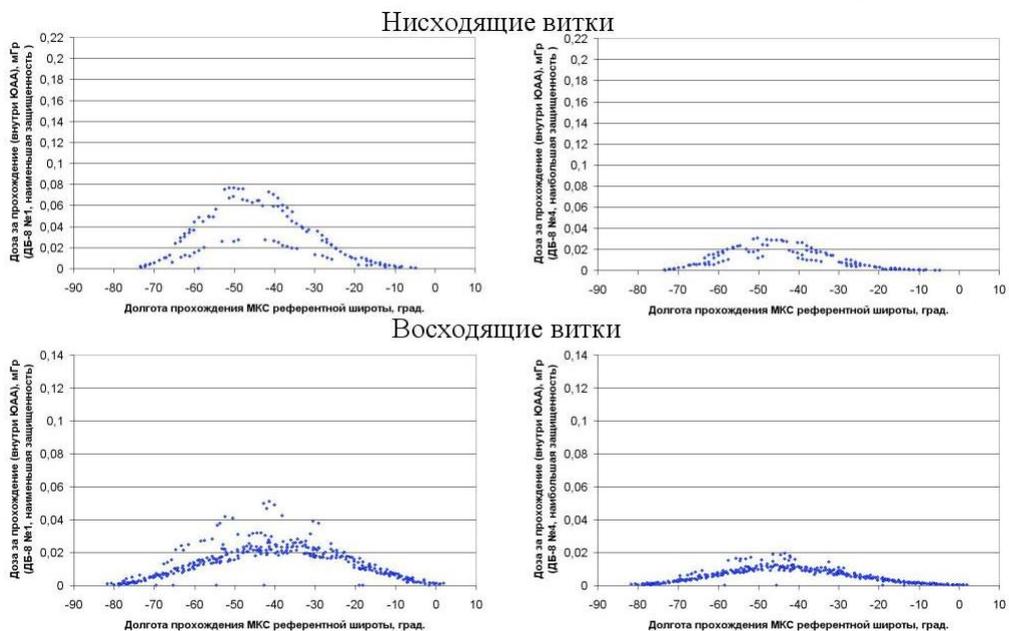


Рис. 26. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 330-340 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

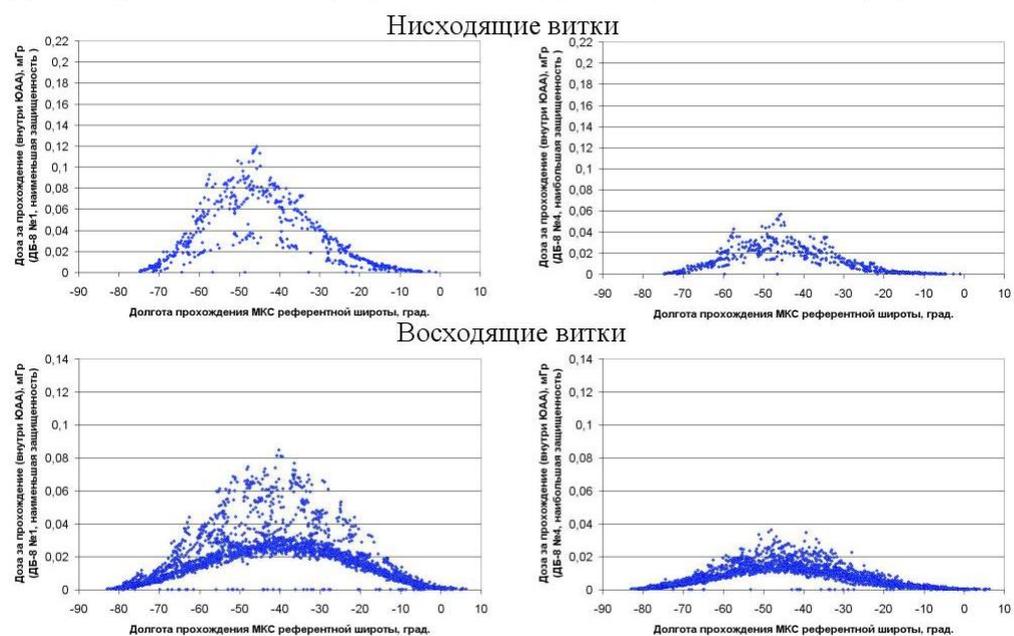


Рис. 27. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 340-350 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

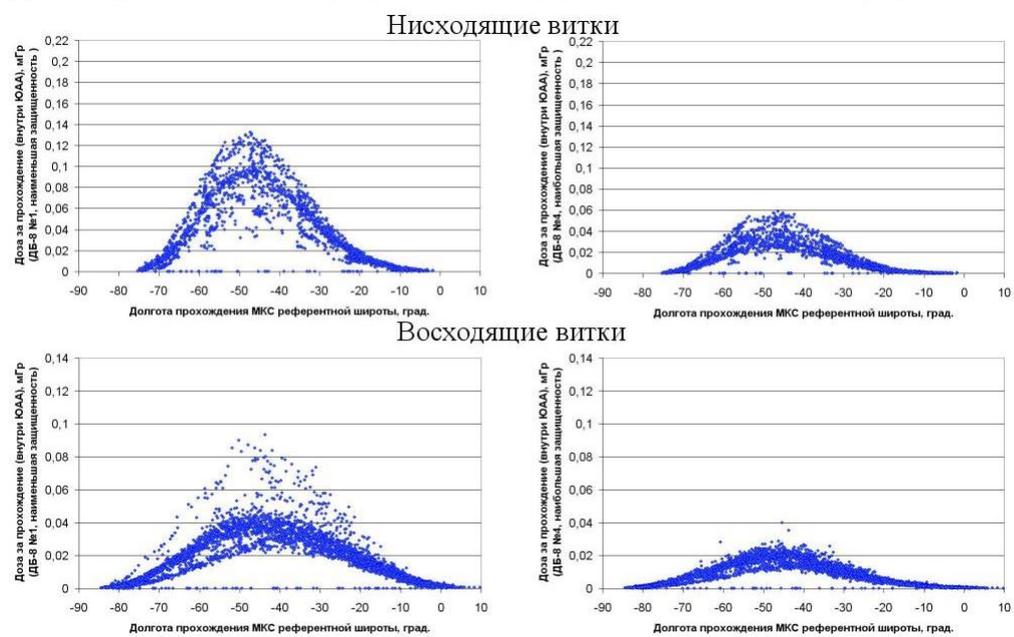


Рис. 28. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 350-360 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

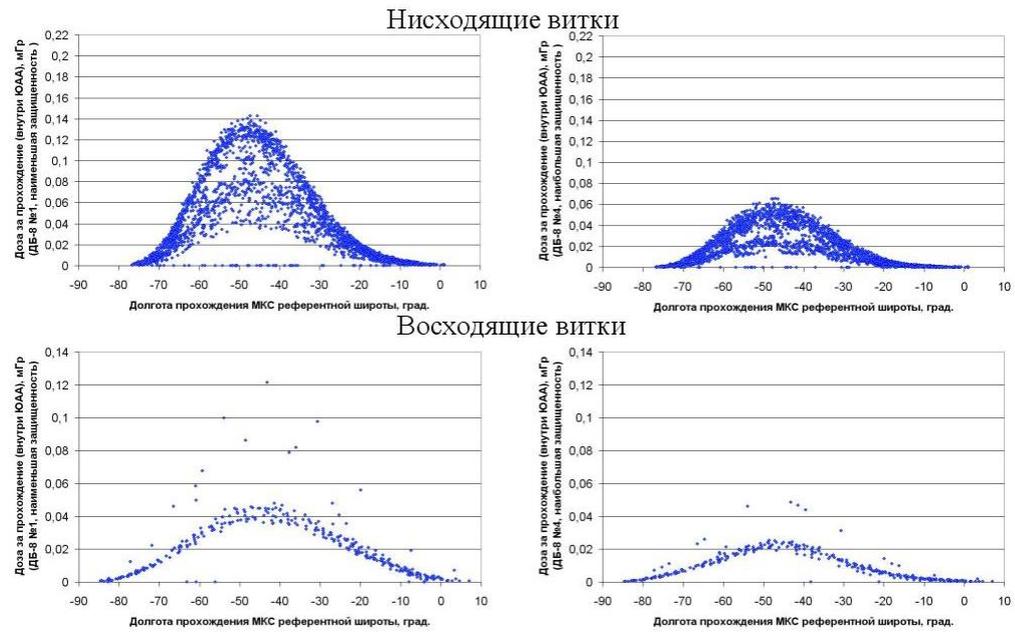


Рис. 29. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 360-370 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

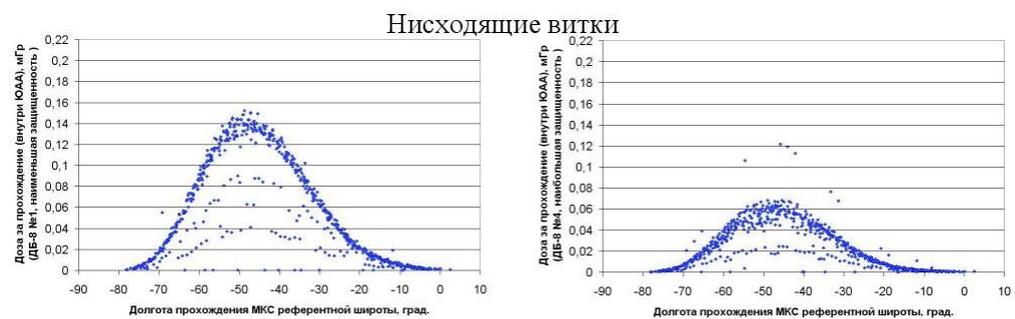


Рис. 30. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 370-380 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

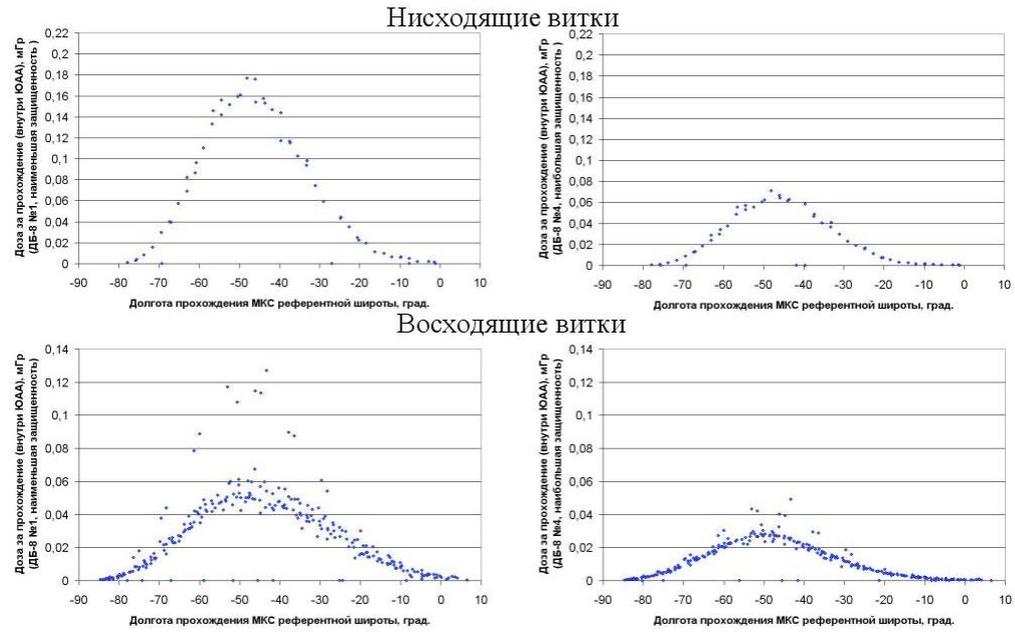


Рис. 31. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 380-390 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

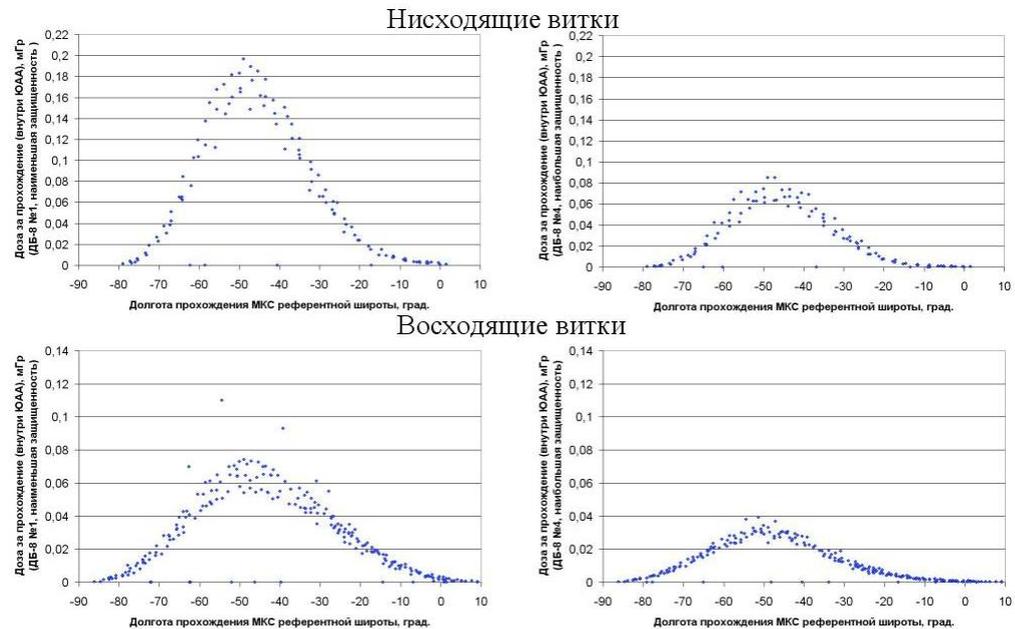


Рис. 32. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 390-400 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

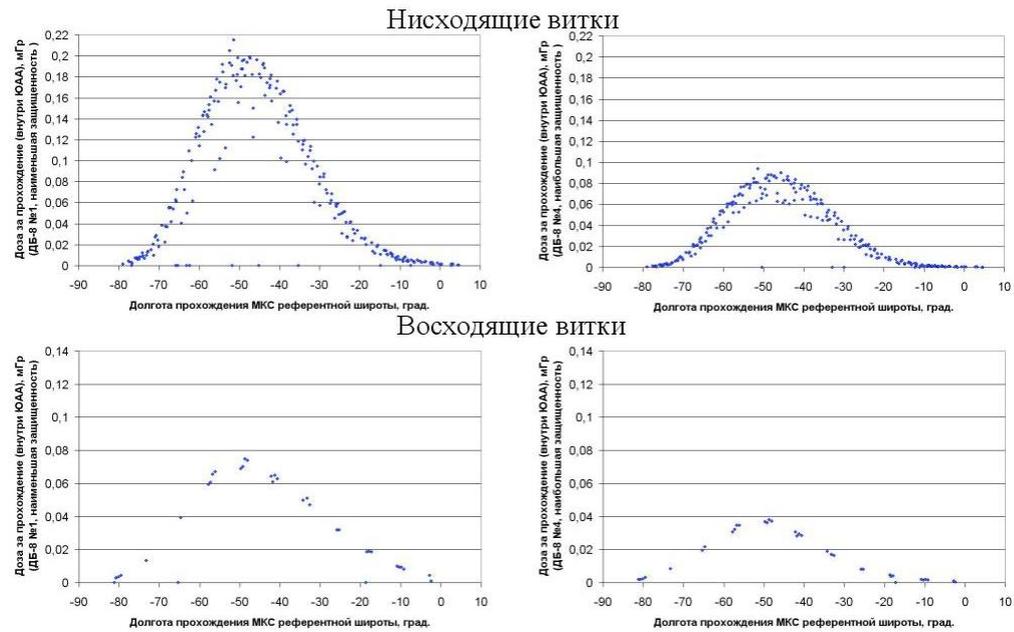


Рис. 33. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 400-410 км)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

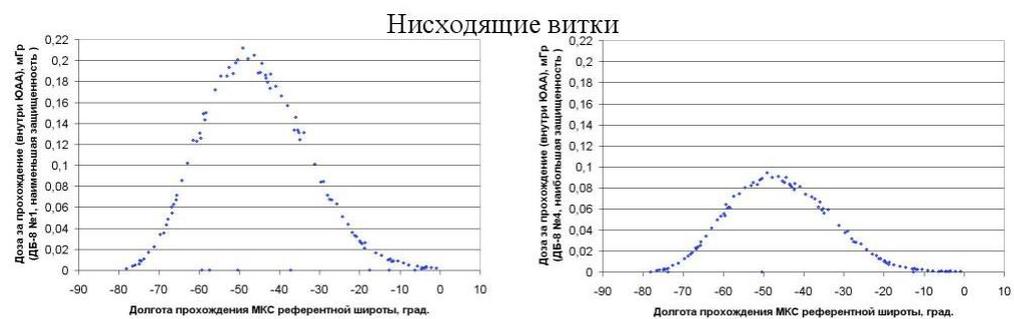


Рис. 34. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 410-420 км)

Как видно из рис. 25 - 34, для различных диапазонов высот эмпирические зависимости мощности дозы для каждого из прохождений ЮАА от долготы прохождения референтной широты имеют вид

«колоколообразного» распределения по долготе, причем для отдельных диапазонов высот на одном и том же графике может быть выделено несколько «колоколообразных» распределений, описывающих экспериментальные зависимости. Подобный эффект может быть связан с вариациями внутреннего радиационного пояса Земли в течение длительного времени, а также с изменением ориентации МКС, влияние которой на дозу за прохождение ЮАА рассмотрено в работе [22].

Была предпринята попытка аппроксимировать эти «колоколообразные» экспериментальные распределения по долготе при помощи функции вида:

$$f(\lambda) = A \cdot e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где A , σ - численные коэффициенты, λ - долгота, $\lambda_{\text{ср}}$ - долгота, на которой данная аппроксимационная функция достигает максимального значения, численно равного A (рис. 35):

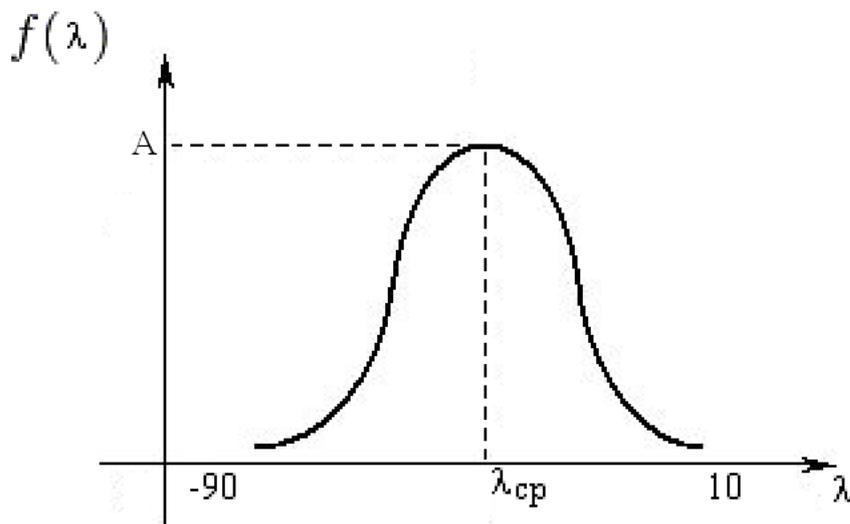


Рис. 35. Графическое представление аппроксимационной функции $f(\lambda)$

Для случая, когда на одном и том же графике может быть выделено несколько экспериментальных «колоколообразных» распределений, аппроксимация производилась несколькими функциями $f(\lambda)$ с

использованием численных параметров, отличающихся для разных экспериментальных распределений. Результат аппроксимации эмпирических зависимостей мощности дозы для каждого из прохождений ЮАА от долготы прохождения МКС референтной широты представлен на рис. 36 – 45:

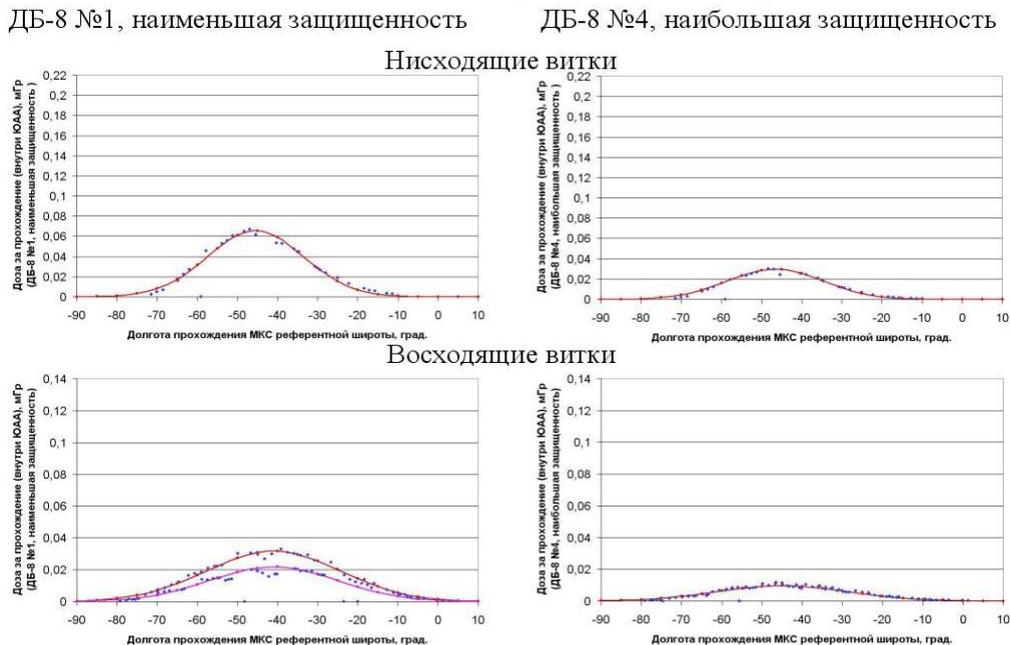


Рис. 36. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 320-330 км, добавлена аппроксимация)

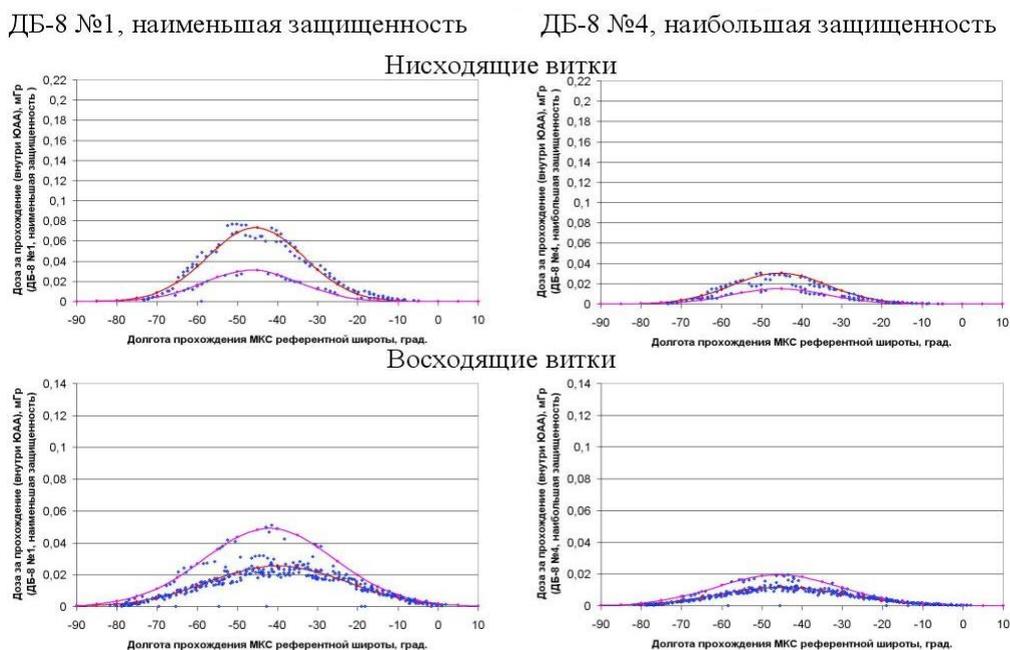


Рис. 37. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 330-340 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

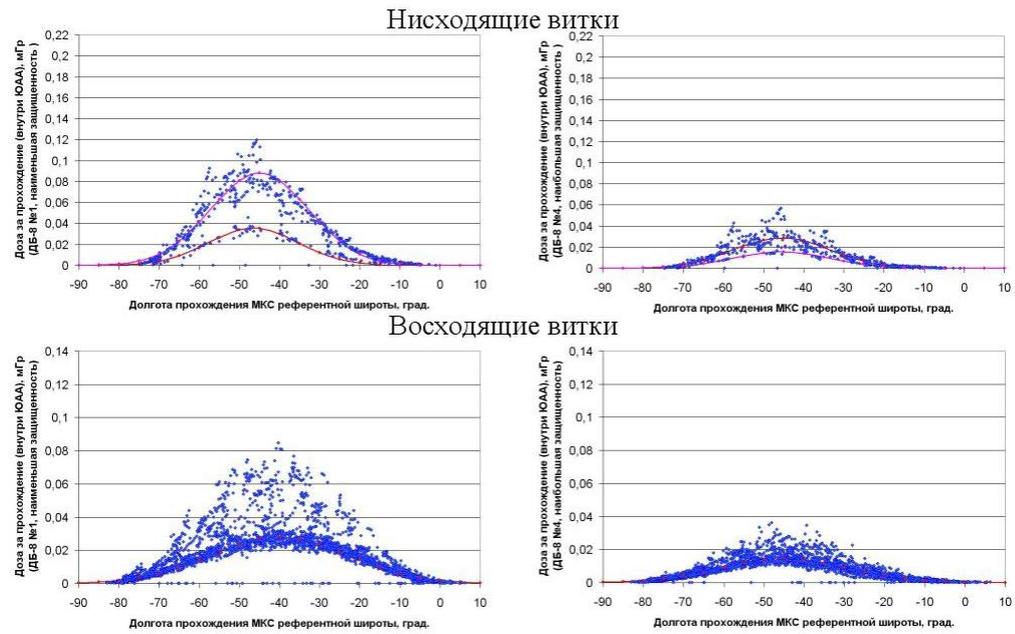


Рис. 38. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 340-350 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

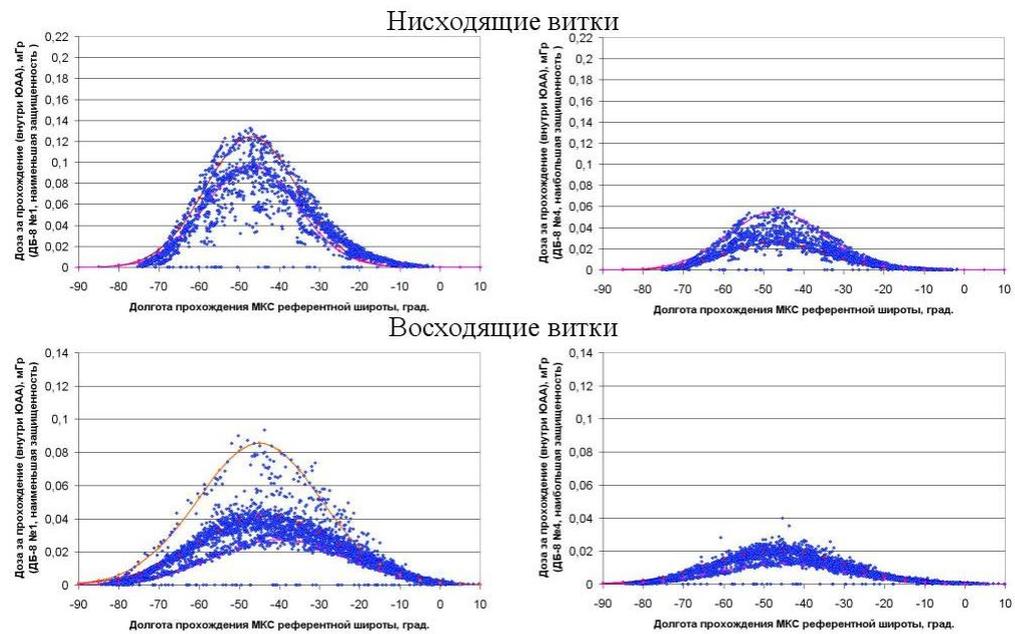


Рис. 39. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 350-360 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

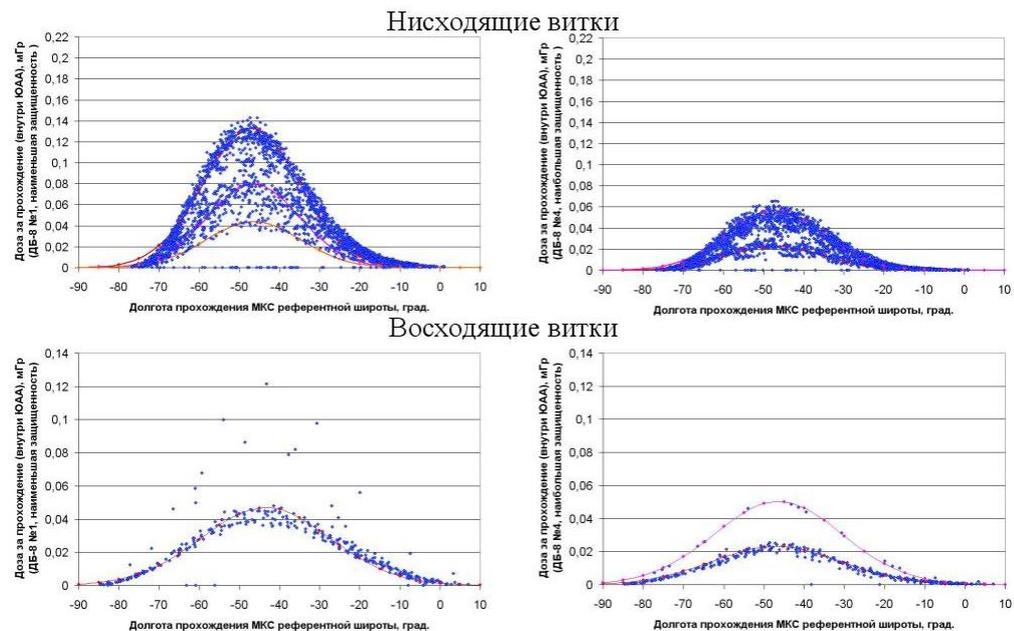


Рис. 40. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 360-370 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

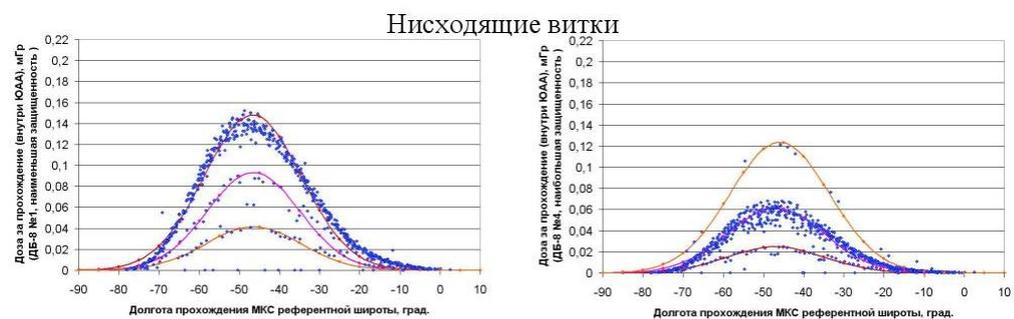


Рис. 41. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 370-380 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

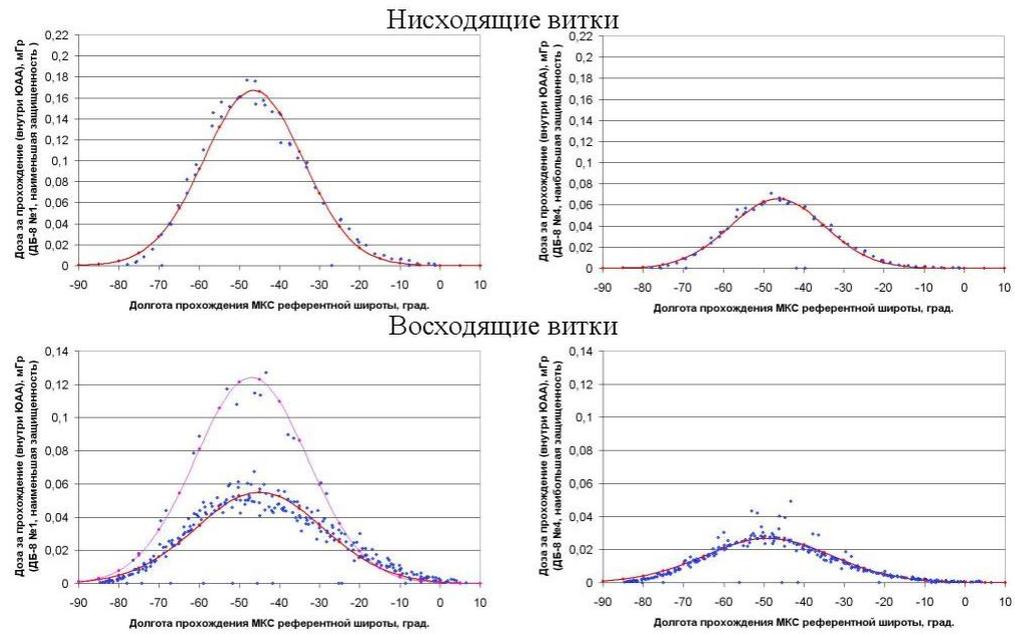


Рис. 42. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 380-390 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

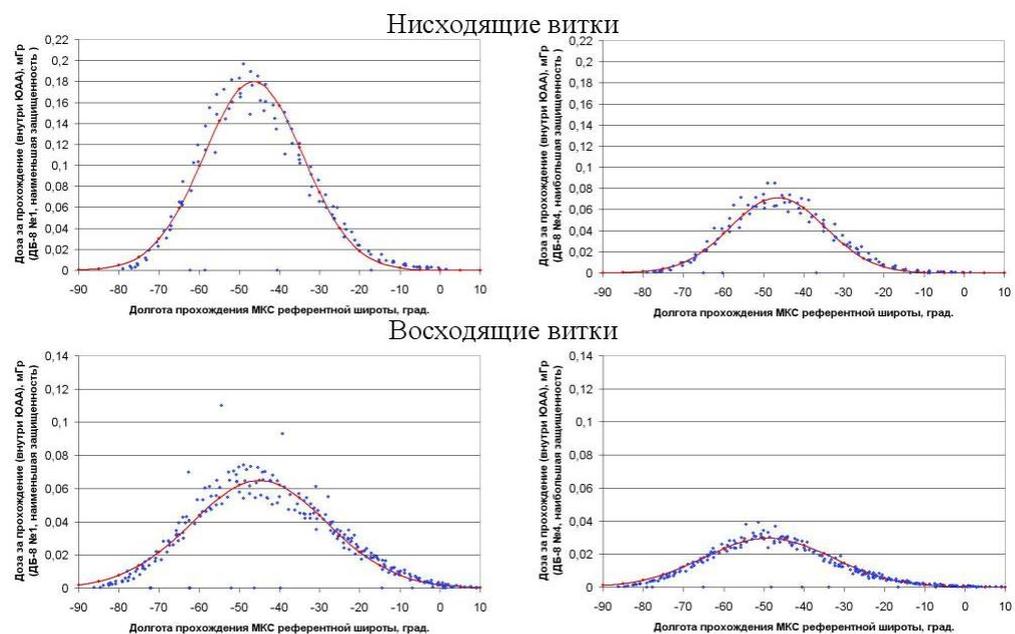


Рис. 43. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 390-400 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

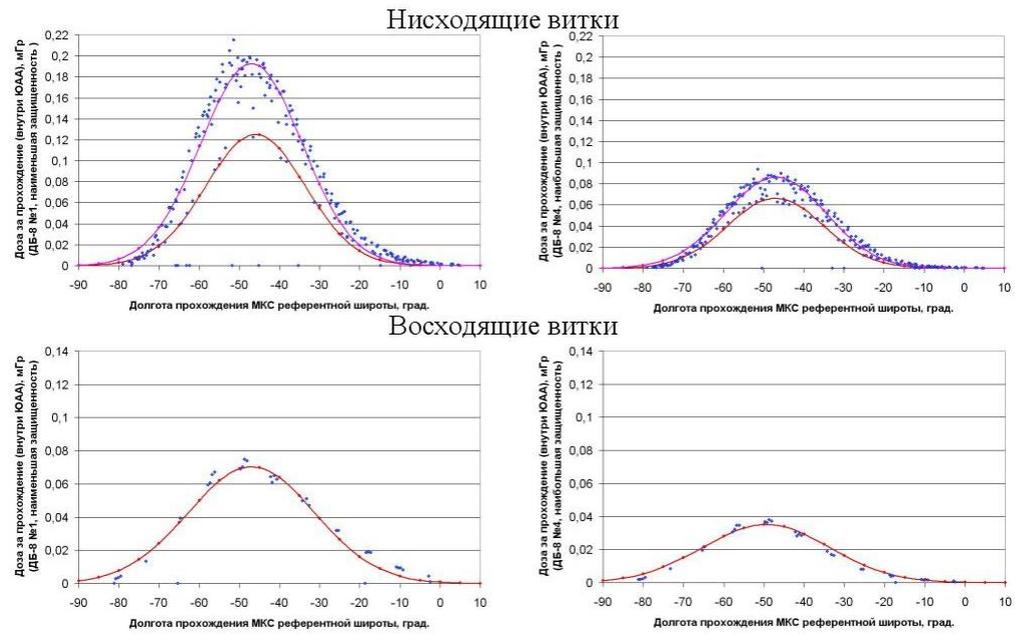


Рис. 44. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 400-410 км, добавлена аппроксимация)

ДБ-8 №1, наименьшая защищенность

ДБ-8 №4, наибольшая защищенность

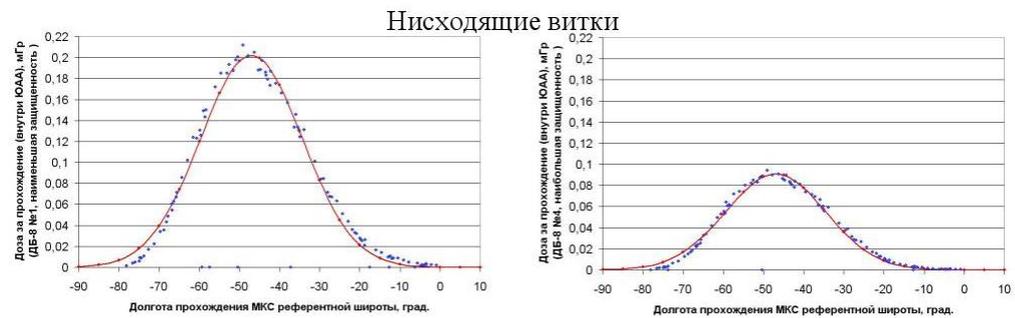


Рис. 45. Разделение зависимости от долготы по высотам (диапазон высот 410-420 км, добавлена аппроксимация)

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° ю.ш. Для этого были построены графики зависимости коэффициента A от высоты пересечения МКС референтной широты (рис. 46-47). Для случая, когда по результатам аппроксимации (рис. 36 – 45) было выделено несколько экспериментальных «колоколообразных» распределений с различными коэффициентами A для одного и того же диапазона высот, на графиках зависимости коэффициента A от высоты пересечения МКС референтной широты были отображены все эти коэффициенты для соответствующего высотного диапазона.

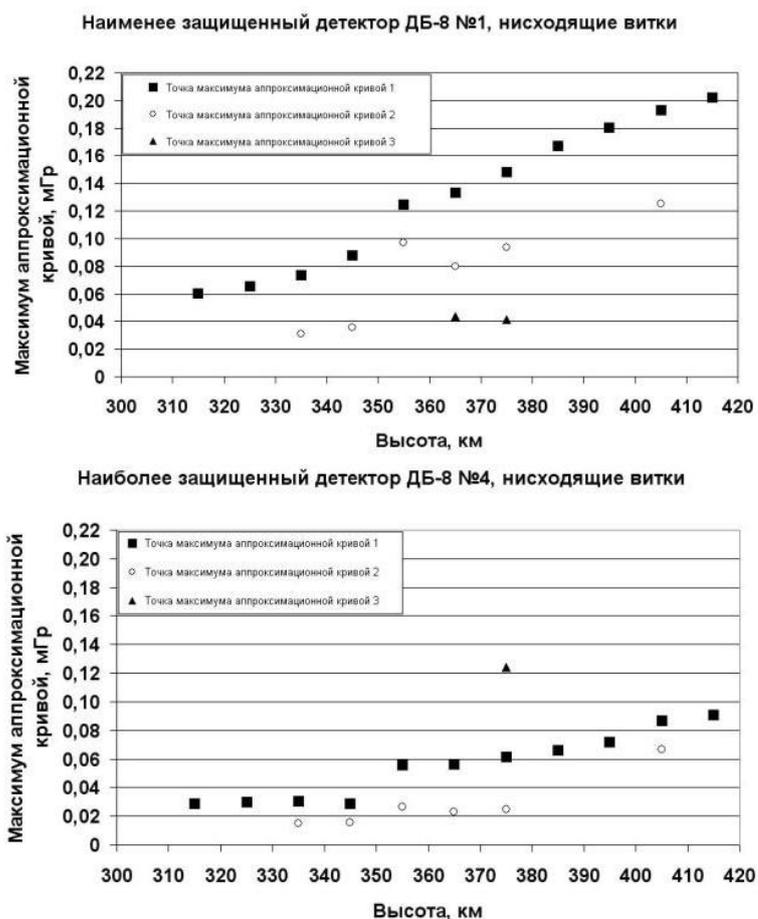


Рис. 46. Зависимость коэффициента A от высоты пересечения МКС референтной широты, нисходящие витки

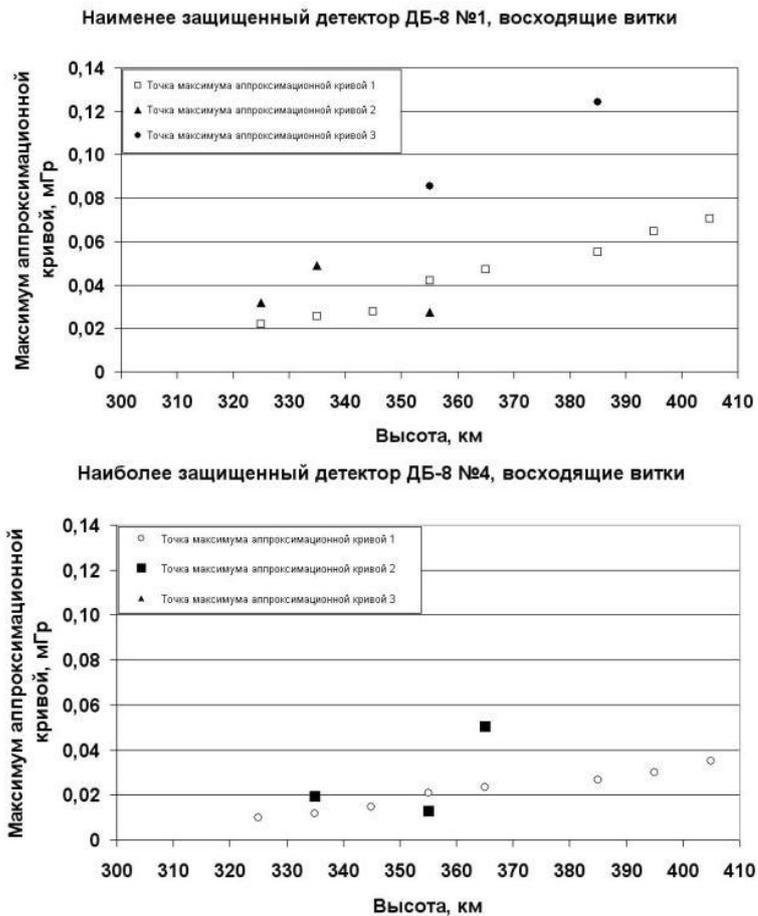
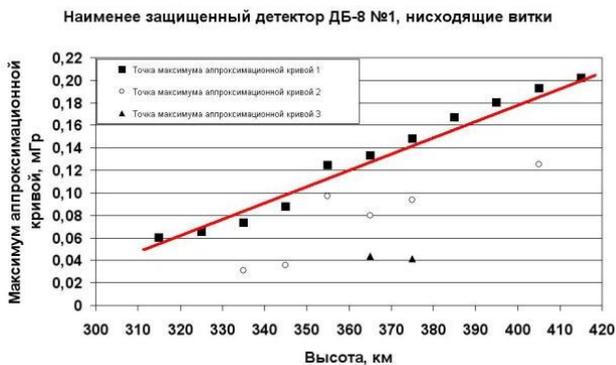


Рис. 47 Зависимость коэффициента А от высоты пересечения МКС референтной широты, восходящие витки

В результате анализа полученных графических зависимостей было установлено, что коэффициент А зависит от высоты пересечения МКС референтной широты, и эта зависимость может быть аппроксимирована функцией вида

$$A(h) = k * (h - h_0) + b, (6)$$

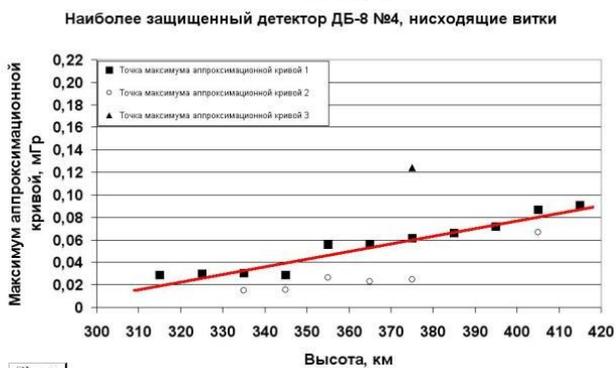
где k, b – численные коэффициенты, h – высота пересечения МКС референтной широты, h₀ – минимальное значение высоты, равное 300 км. Результат аппроксимации высотной зависимости коэффициента А для наименее и наиболее защищенных детекторов ДБ-8, а также для восходящих и нисходящих витков представлен на рис. 48-49.



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

$$k = 0,0015$$

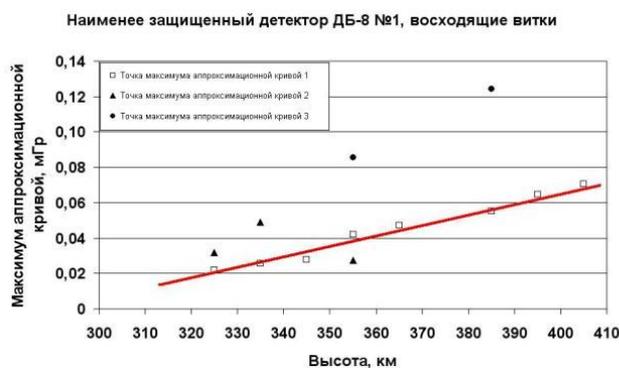
$$b = 0,028$$



$$k = 0,00073$$

$$b = 0,0079$$

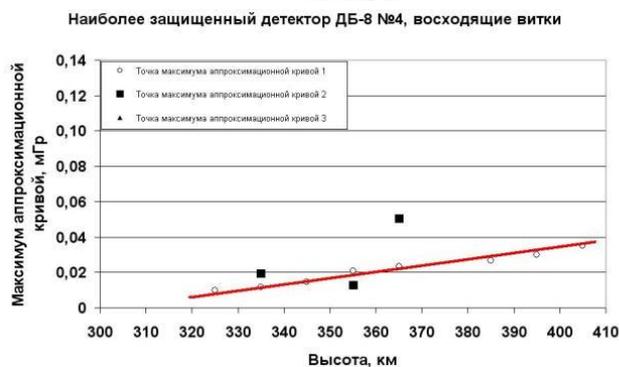
Рис. 48. Результат аппроксимации зависимости коэффициента А от высоты, нисходящие витки



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

$$k = 0,00066$$

$$b = 0,0038$$



$$k = 0,00032$$

$$b = 0,00088$$

Рис. 49. Результат аппроксимации зависимости коэффициента А от высоты, восходящие витки

Возможность аппроксимации эмпирических зависимостей мощности дозы для каждого из проходов МКС области ЮАА от долготы прохода МКС референтной широты функцией вида (5), вместе с высотной зависимостью коэффициента A , которую также оказалось возможно аппроксимировать (линейной функцией вида (6), позволили построить математическое описание для эмпирических зависимостей мощности дозы за каждое из проходов 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° ю.ш.)

Сравнение эмпирических зависимостей мощности дозы за каждое из проходов МКС области ЮАА от долготы пересечения МКС референтной широты ($D_{\text{эксп}}$), с соответствующими расчётными значениями функции $D_{\text{расч}}$ (в виде графического представления временной зависимости отношения $D_{\text{эксп}} / D_{\text{расч}}$), приведены на рис. 50 - 53.

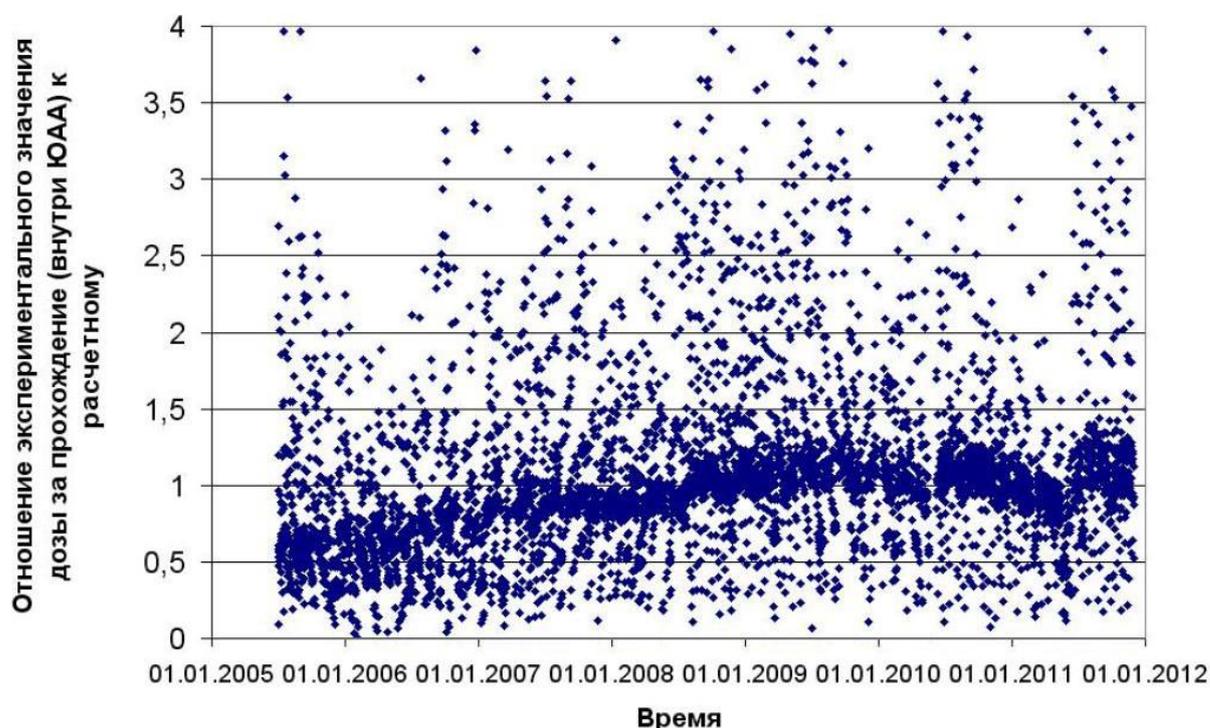


Рис. 50. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №1, наименьшая защищенность, нисходящие витки)

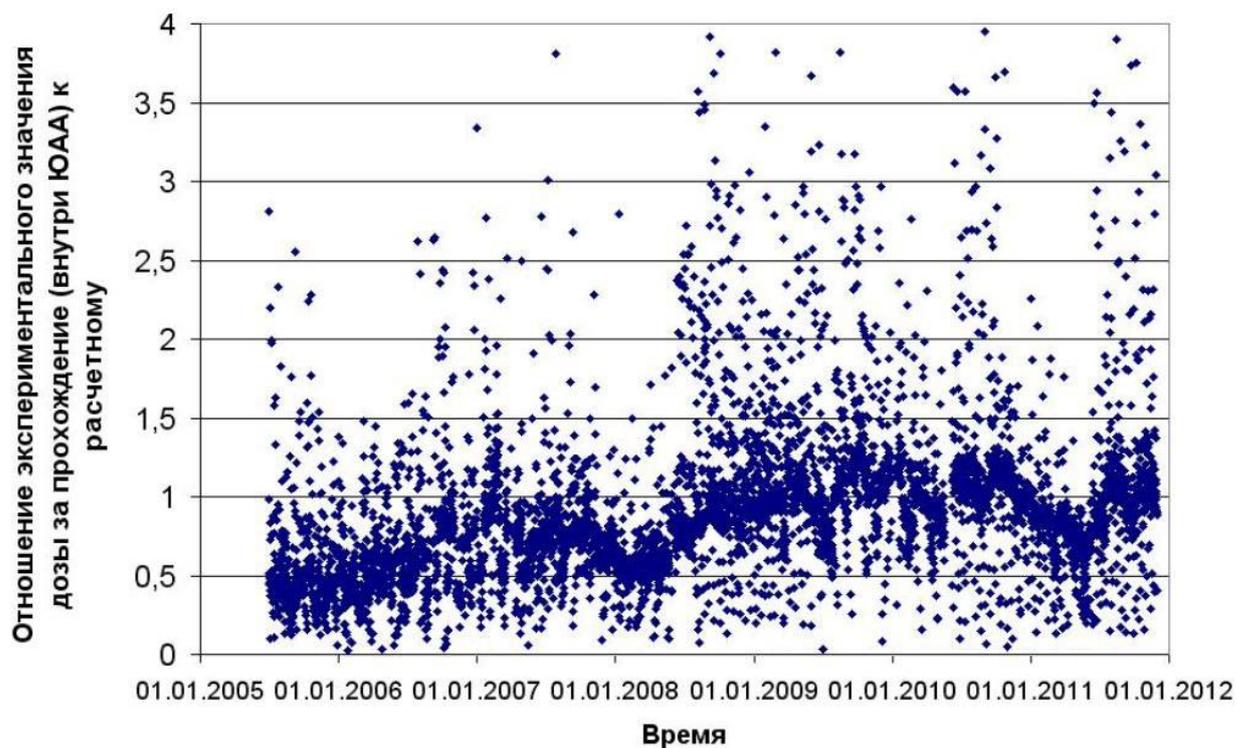


Рис. 51. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №4, наибольшая защищенность, нисходящие витки)

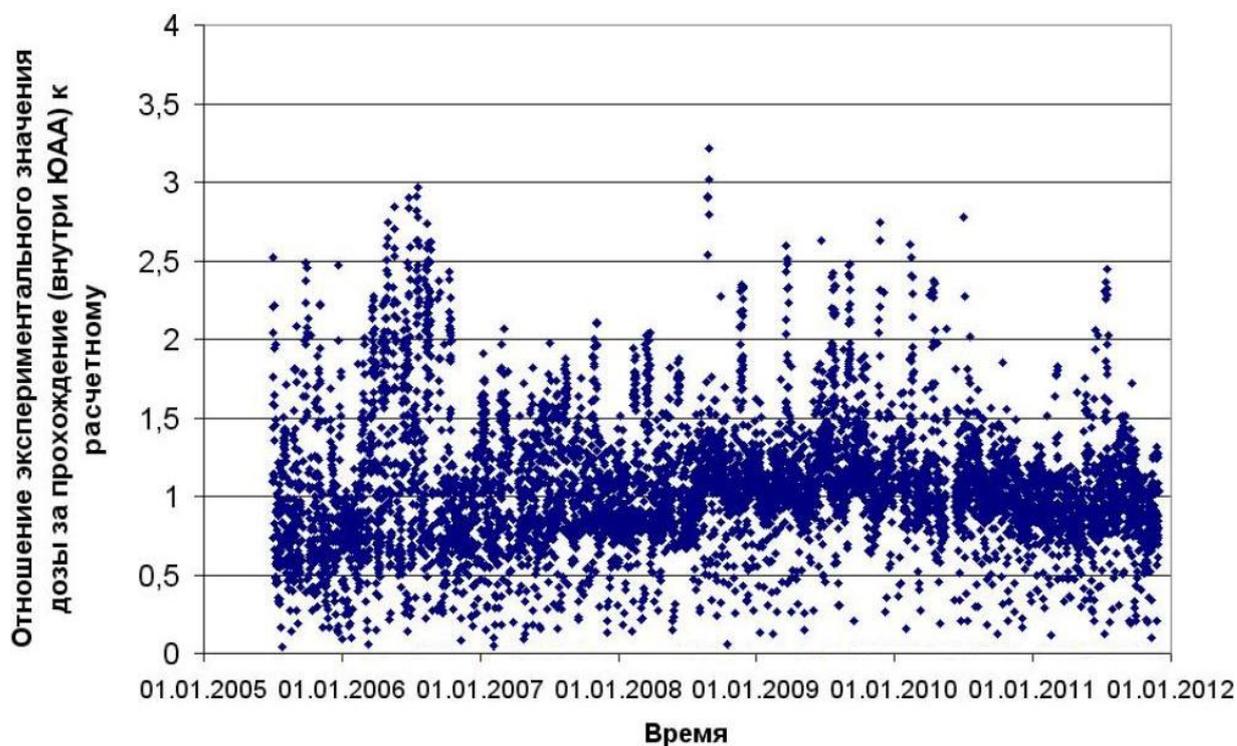


Рис. 52. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №1, наименьшая защищенность, восходящие витки)

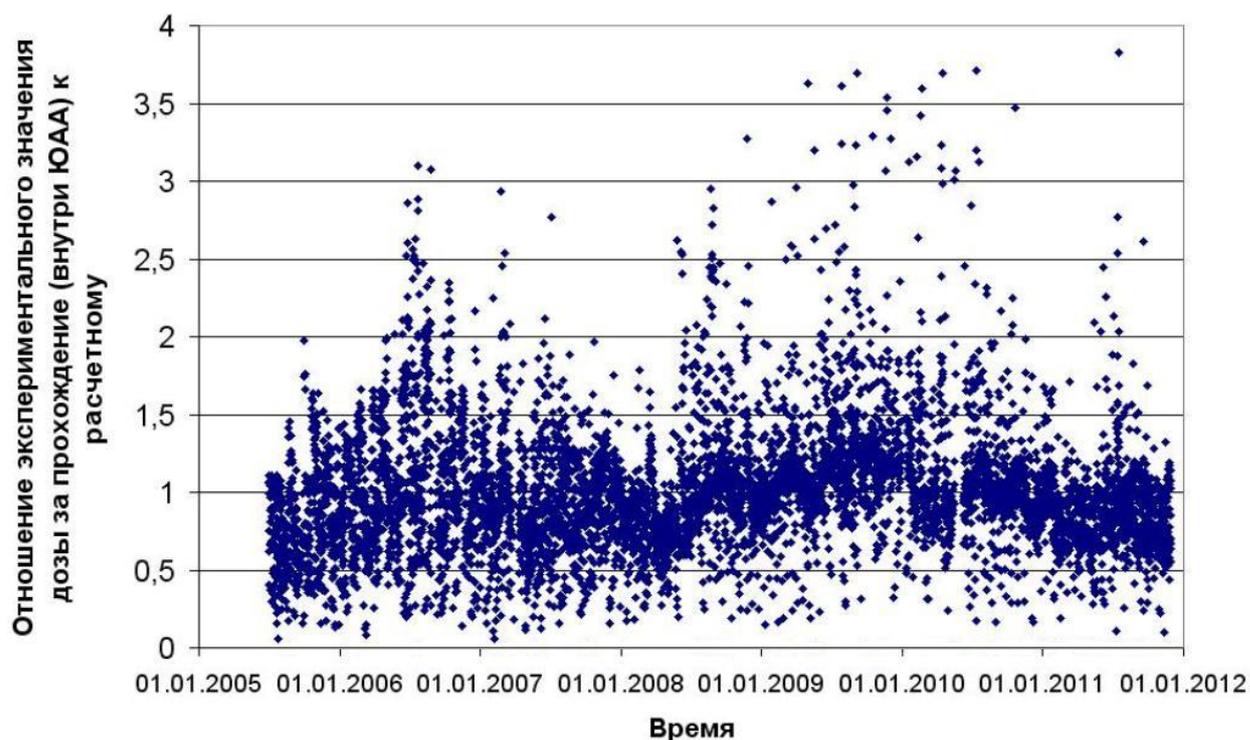


Рис. 53. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №4, наибольшая защищенность, восходящие витки)

При построении зависимостей, изображенных на рис. 50 - 53, использовались как все имеющиеся значения $D_{\text{эксп}}/D_{\text{расч}}$, так и все имеющиеся значения λ (долготы пересечения МКС референтной широты).

Можно видеть, что большая часть точек группируется вблизи некоторой области, варьирующейся со временем в диапазоне значений $D_{\text{эксп}}/D_{\text{расч}}$ от 0,5 до 1,5. Однако значительная часть точек достаточно сильно отклоняется от этой области. Для дальнейшего анализа получившихся временных зависимостей было предложено ограничить используемый диапазон долгот λ центральной частью ЮАА, областью от 50 градусов западной долготы до 30 градусов западной долготы ($-50 < \lambda < -30$), поскольку, во-первых, в этой области долгот ЮАА имеет в наименьшей степени подверженные изменениям границы [24] и, во-вторых, эта область является наиболее значимой с точки зрения дозы, регистрируемой на МКС. Получившийся результат представлен на рис. 54 - 57.

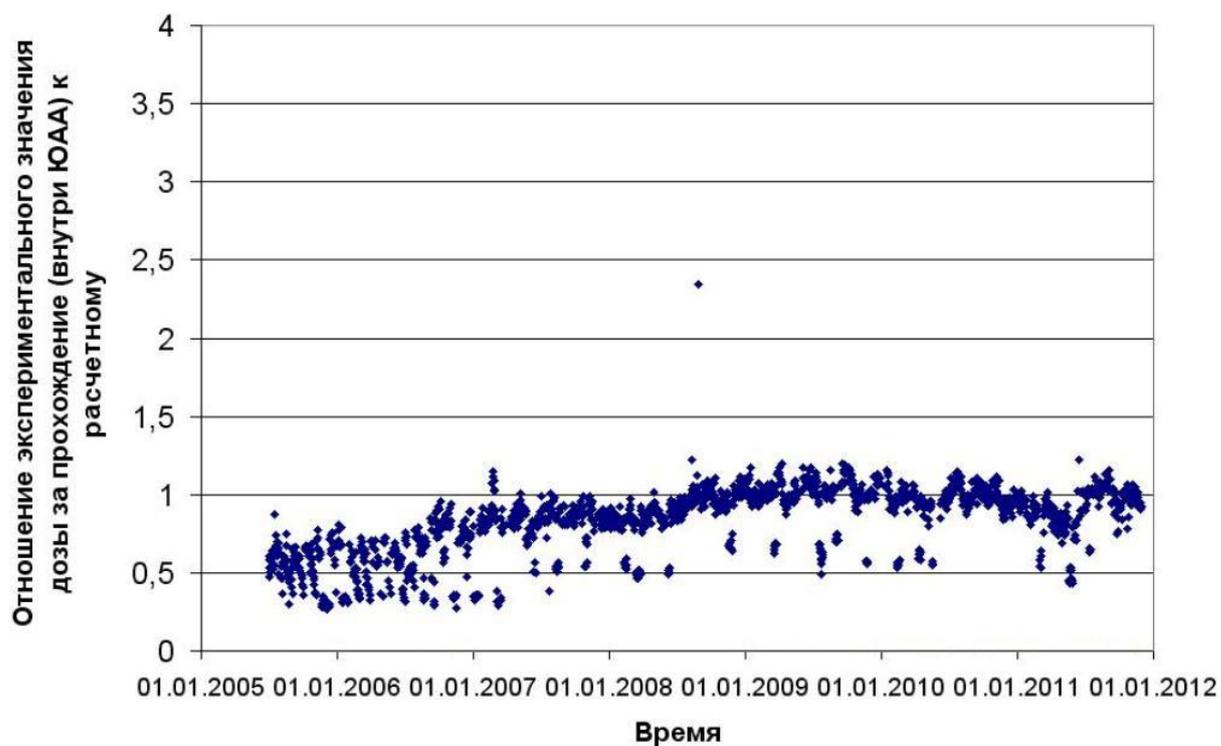


Рис. 54. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №1, наименьшая защищенность, нисходящие витки)

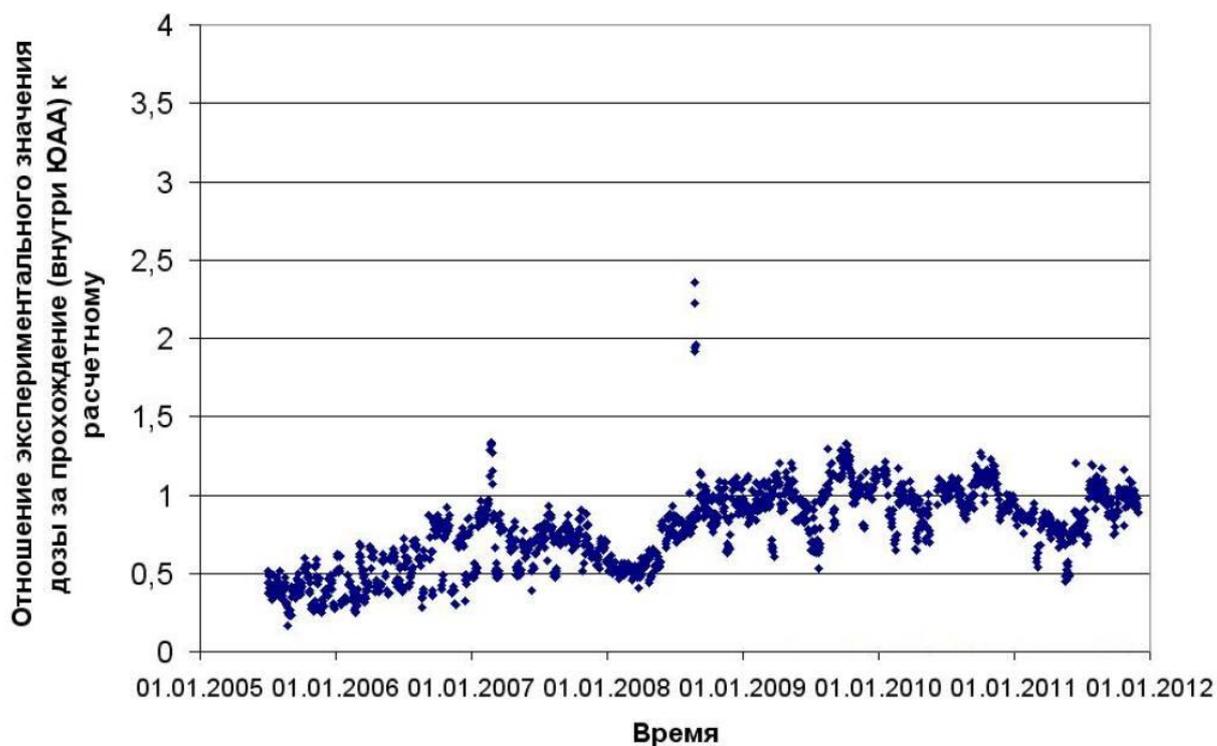


Рис. 55. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №4, наибольшая защищенность, нисходящие витки)

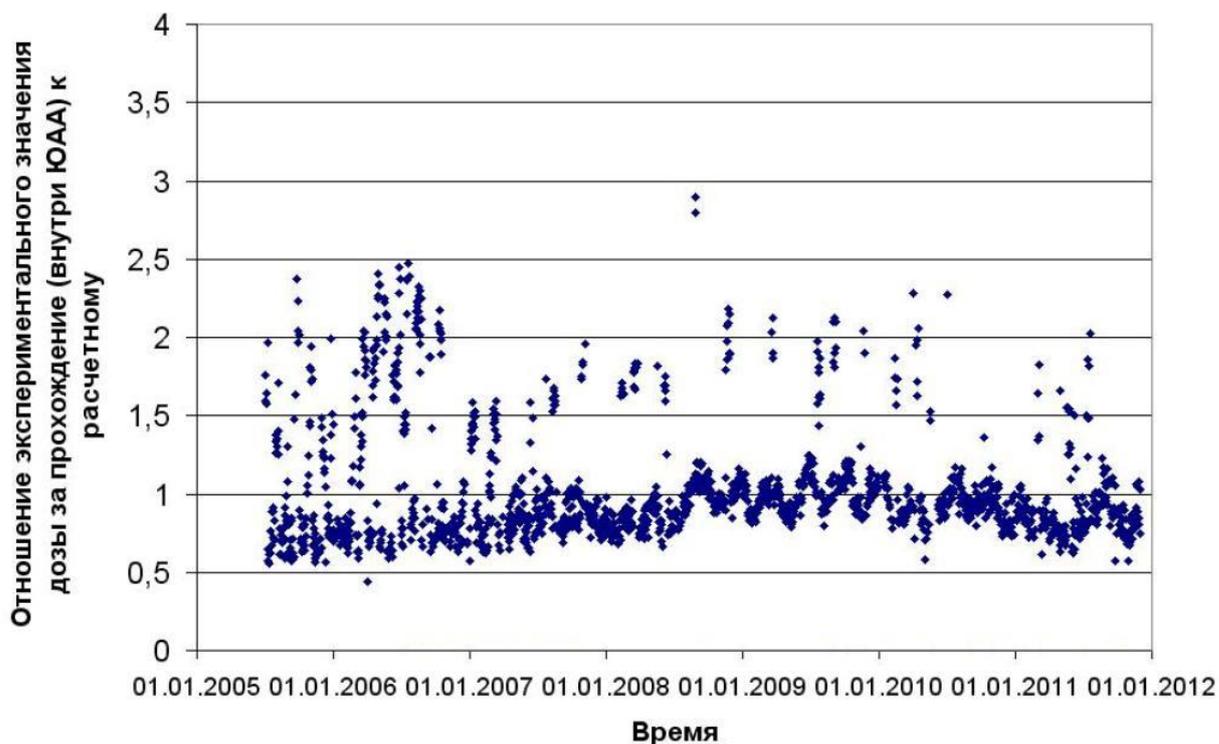


Рис. 56. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №1, наименьшая защищенность, восходящие витки)

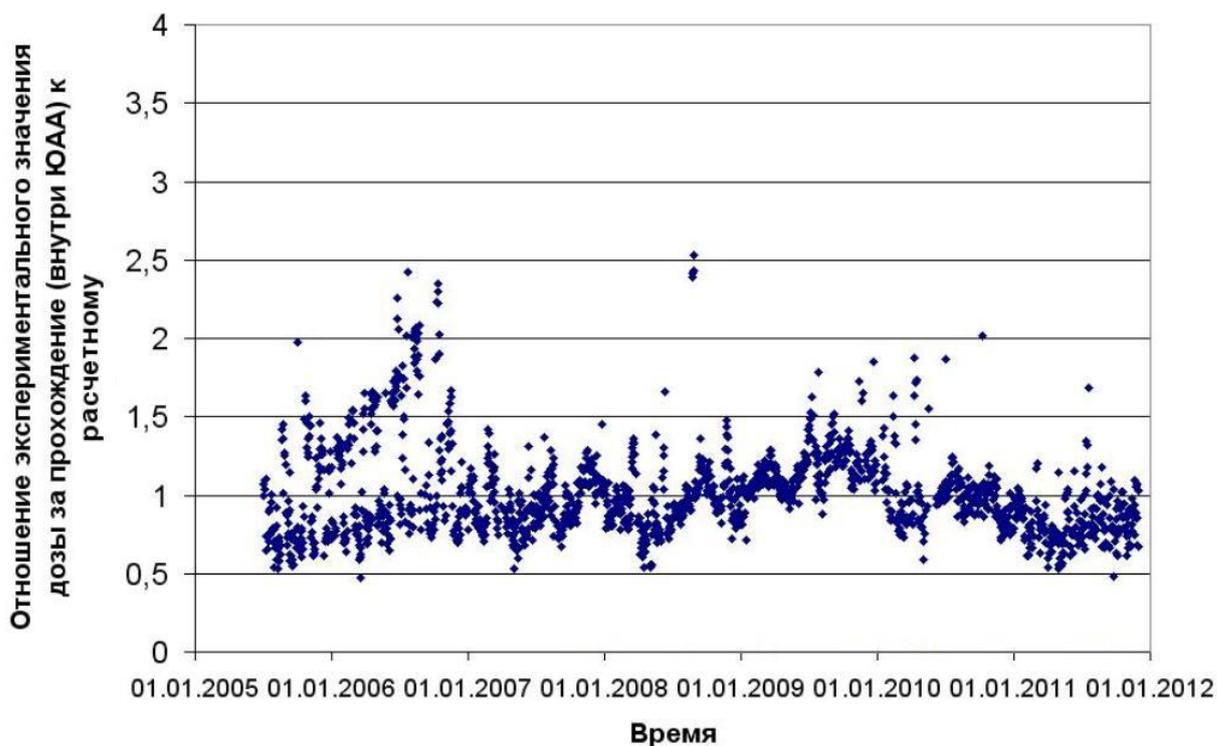


Рис. 57. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №4, наибольшая защищенность, восходящие витки)

Как можно видеть из рис. 54 - 57, разброс в данных существенно уменьшился. Выпадение из общей последовательности отдельных групп точек связано с периодами совместного полёта МКС с космическими кораблями «Спейс Шаттл». Этот эффект анализировался в уже упоминавшейся работе [22] и далее здесь не рассматривается.

Далее, было предложено еще раз изменить границы используемого диапазона долгот λ , и заменить использовавшийся до этого диапазон $-50 < \lambda < -30$ на $-20 < \lambda < -10$. Целью этого являлось определить степень корректности полученного математического описания эмпирических зависимостей мощности дозы за каждое из прохождений МКС области ЮАА от долготы пересечения МКС референтной широты не только для центральной части области ЮАА ($-50 < \lambda < -30$), но и для её восточной периферийной части, в значительно большей степени подверженной вариациям, чем центральная часть, и тем самым, выяснить, с чем связаны наблюдаемые отклонения отношения $D_{\text{эксп}}/D_{\text{расч}}$ от диапазона значений 0,5 - 1,5. Получившиеся результаты представлены на рис. 58 - 61.

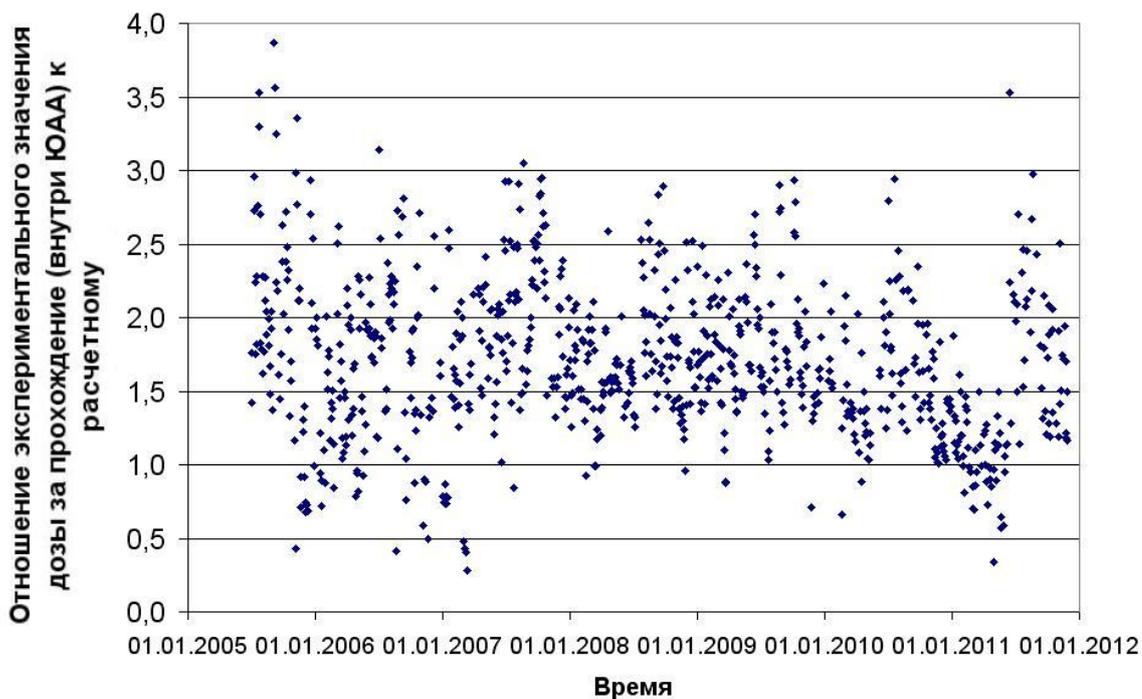


Рис. 58. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №1, наименьшая защищенность, нисходящие витки)

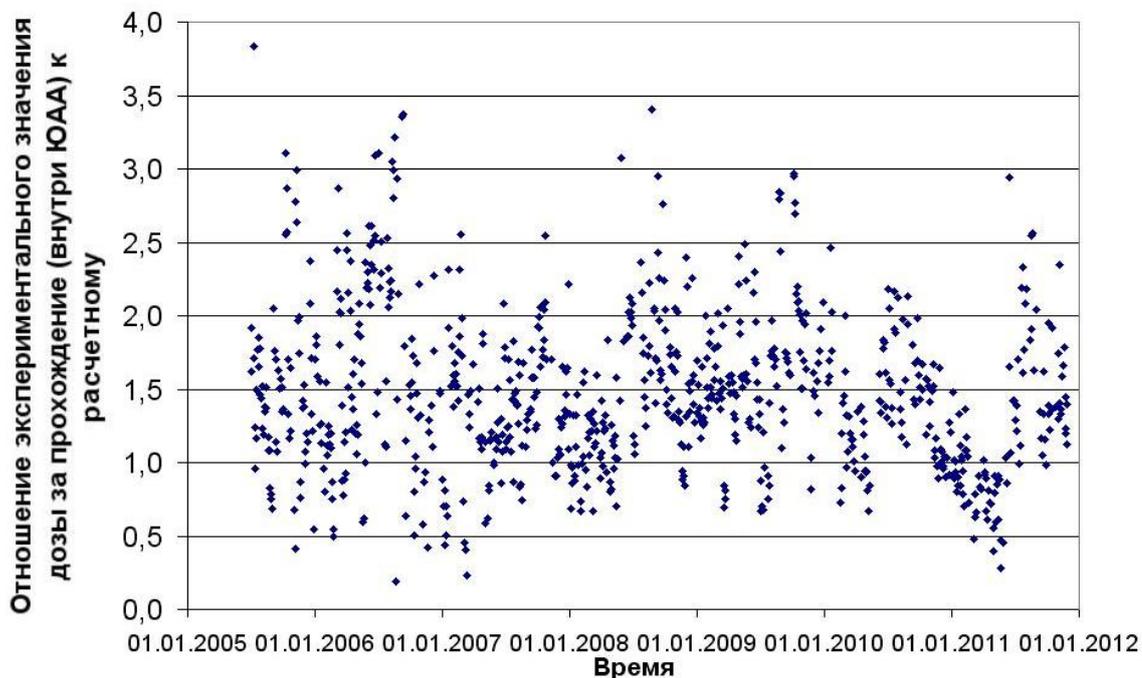


Рис. 59. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №4, наибольшая защищенность, нисходящие витки)

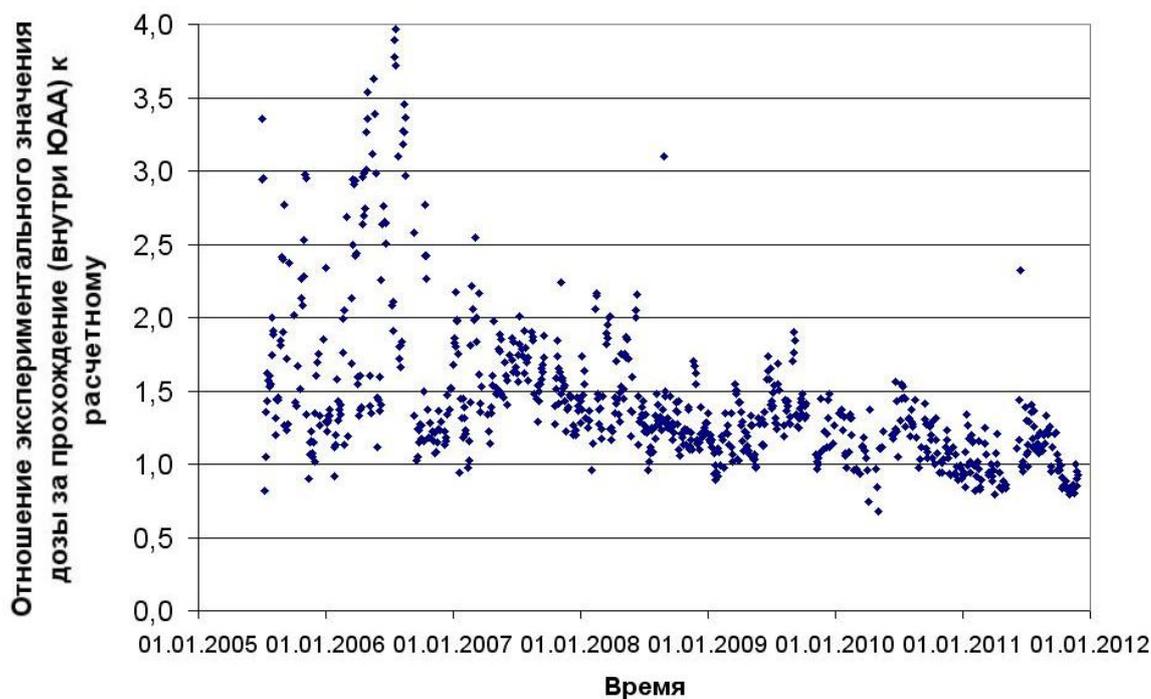


Рис. 60. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №1, наименьшая защищенность, восходящие витки)

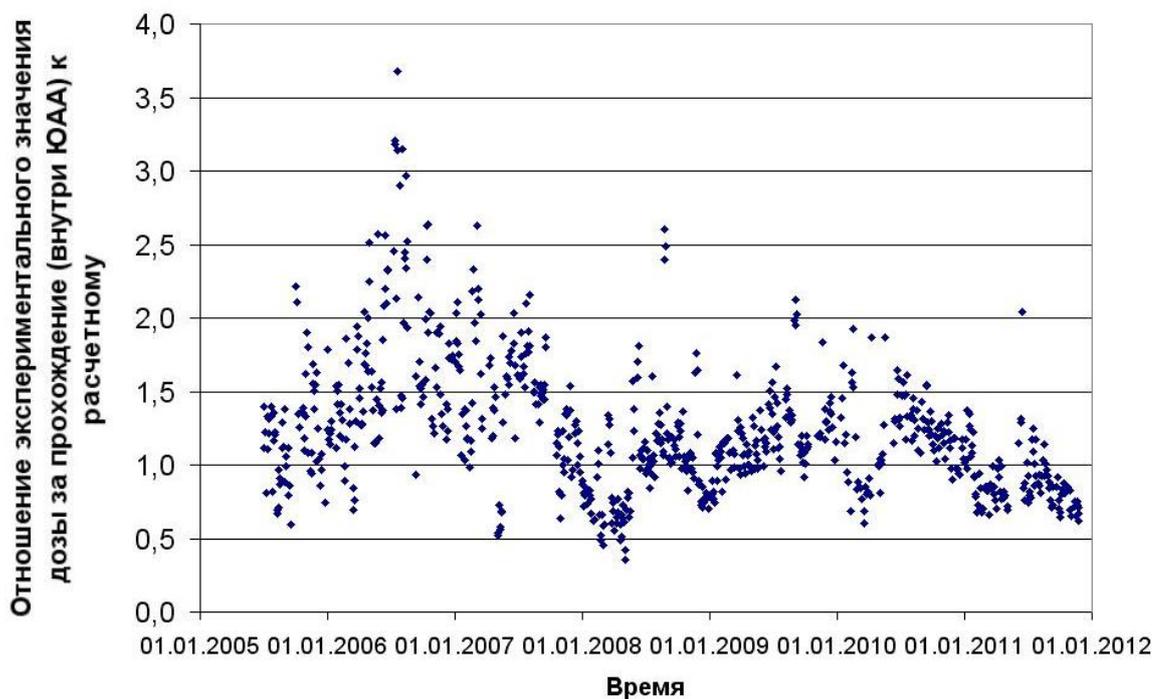


Рис. 61. Отношение экспериментального значения дозы за прохождение (внутри ЮАА) к расчетному (ДБ-8 №4, наибольшая защищенность, восходящие витки)

Из сравнения данных, представленных на рис. 58 – 61 и рис. 54 – 57, видно, что наибольшие отклонения отношения $D_{\text{эксп}}/D_{\text{расч}}$ от диапазона значений 0,5 - 1,5 наблюдаются на «краях» «колоколообразного» распределения, описывающего зависимость дозы за каждое из проходов МКС области ЮАА от долготы прохождения МКС референтной широты, при наибольших различиях между λ и $\lambda_{\text{ср}}$.

Также, наблюдаемое (рис. 54 – 57) существенное уменьшение разброса в данных при ограничении используемого диапазона долгот λ центральной частью ЮАА ($-50 < \lambda < -30$) свидетельствует о более стабильных значениях потоков протонов в центральной зоне ЮАА по сравнению с ее периферийными областями.

Кроме этого, на рис. 54 – 57 наблюдаются вариации среднего значения отношения $D_{\text{эксп}}/D_{\text{расч}}$ со временем, однако разброс точек внутри небольшого (2 ÷ 3 месяца) отрезка времени не превышает 20% - 30%. Это позволяет предположить, что изменения мощности дозы для разных траекторий (внутри выбранного диапазона долгот) и разных высот прохождения ЮАА происходят пропорционально. Можно также предположить, что параметры k и b , определяющие высотную зависимость «амплитуды» A «колоколообразного» распределения дозы за одно прохождение ЮАА характеризуют степень «заселенности» протонного РПЗ на малых высотах, и могут использоваться при верификации соответствующих модельных описаний. Вариации же отношения $D_{\text{эксп}}/D_{\text{расч}}$ можно интерпретировать как вариации «заселенности» «нижней» зоны внутреннего РПЗ.

Глава 4. МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ ДОЗЫ НА МКС

Изложенные в Главе 3 результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности разработки методики оценки и краткосрочного прогнозирования радиационной обстановки на МКС на основе эмпирических данных. Данная глава посвящена описанию этой методики и обсуждению получаемых с ее помощью результатов.

4.1. Описание методики расчетной оценки радиационной обстановки на МКС

Как уже упоминалось в Главе 3, зависимость дозы за каждое из прохождений МКС области ЮАА от долготы пересечения МКС референтной широты можно представить в виде функции $D_{\text{расч}} = f(h, \lambda)$; иначе говоря, $D_{\text{расч}} = A * e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}$, при этом коэффициент A связан линейной зависимостью с высотой прохождения МКС 30° ю.ш. Но это же означает, что коэффициент A можно выразить следующим образом:

$$A = \frac{D_{\text{расч}}}{e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}} \quad (7)$$

Приняв во внимание, что в идеальном случае $D_{\text{расч}} = D_{\text{эксп}}$ (расчётное значение дозы за одно прохождение тождественно равно экспериментальному значению), получим:

$$A = \frac{D_{\text{эксп}}}{e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}} \quad (8)$$

То есть, оказывается возможным для каждого из прохождений МКС референтной широты определить соответствующее этому прохождению значение высотного коэффициента A (поскольку все остальные параметры, –

$D_{\text{эксп}}$, σ , λ , $\lambda_{\text{ср}}$, – известны либо из дозиметрических данных, либо из данных баллистики (а также - из результатов обработки дозиметрических данных, подробно представленных в Главе 3)). Это открывает возможности для эмпирической оценки дозы за одно прохождение МКС области ЮАА.

Пусть существует два интервала времени, для первого из них имеются как дозиметрические, так и баллистические данные, для второго – имеются данные баллистики. Допустим, что первый из них, называемый далее «базой прогноза», имеет большую, чем второй интервал, длительность (например, 1-2 недели). Вторым интервал, называемый далее «диапазоном прогноза», имеет длительность, к примеру, 1-2 суток и следует непосредственно за первым. Усреднив вычисленные по формуле (8) значения коэффициента А для «базы прогноза», и приняв в качестве допущения, что в течение «диапазона прогноза», непосредственно следующего за «базой прогноза» временного периода, имеющего длительность в несколько (1-2) суток, среднесуточное значение коэффициента А не подвержено значительным вариациям, оказывается, таким образом, возможно получить следующую формулу для расчетной оценки дозы за одно прохождение МКС 30° ю.ш. для интервала времени, непосредственно следующего за тем, для которого было вычислено среднее значение коэффициента А:

$$D_{\text{расч}} = A_{\text{ср}} * e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}} \quad (9),$$

где $A_{\text{ср}}$ – усредненное значение коэффициентов А, вычисленных для «базы прогноза», $D_{\text{расч}}$ – расчетное значение дозы за одно прохождение для «диапазона прогноза», λ - долгота пересечения МКС 30° ю.ш., σ , $\lambda_{\text{ср}}$ – численные коэффициенты.

Поскольку массивы данных о параметрах траектории МКС, используемые в данной диссертационной работе, независимы от дозиметрических данных (и, соответственно, не зависят от их целостности),

то по формуле (9) для временного интервала «диапазон прогноза» оказывается возможным рассчитать абсолютно все значения дозы ($D_{\text{расч}}$), получаемой МКС за одно прохождение области ЮАА, лишь на основе баллистической информации и вычисленного ранее значения коэффициента $A_{\text{ср}}$. Дозу, которую МКС получает от РПЗ за весь «диапазон прогноза» ($\langle D_{\text{расч}} \rangle$), легко вычислить, произведя суммирование для этого временного диапазона всех вычисленных ранее значений $D_{\text{расч}}$.

Доза, которую МКС получает от ГКЛ в течение «диапазона прогноза», вычисляется следующим образом. В соответствии моментам начала и окончания «базы прогноза» ставятся соответствующие этим моментам времени значения 10-минутных данных о поглощенных дозах. Далее вычисляется полная доза, полученная МКС за этот временной интервал (путем вычитания из поглощенной дозы, связанной с окончанием «базы прогноза», поглощенной дозы, связанной с ее началом). Из получившейся разности вычитается $\langle D_{\text{расч}} \rangle$. После этого доза от ГКЛ, которую МКС получает за временной интервал «диапазон прогноза», вычисляется при помощи деления получившегося значения на длительность «базы прогноза», выраженную в единицах и десятых долях суток (здесь используется допущение о том, что в течение 1-2 суток, прошедших с момента окончания «базы прогноза», среднесуточная доза от ГКЛ не претерпевает значительных вариаций).

Для реализации рассмотренной выше методики прогнозирования было разработано соответствующее прикладное математическое программное обеспечение (реализованное в виде пакета программ, написанных на языке NI LabView 8.2). При его разработке был использован следующий алгоритм:

- В качестве входных параметров используются даты начала и окончания периодов «диапазон прогноза» и «база прогноза», а также численные коэффициенты σ и $\lambda_{\text{ср}}$; расчеты производятся отдельно для восходящих и нисходящих участков траектории станции.

- Для интервала «база прогноза» выбираются соответствующие этому диапазону дозиметрические данные (с временным разрешением 10 секунд) и данные баллистики.

- Используя эти данные, для интервала «база прогноза» определяются все моменты времени пересечения МКС 30° ю.ш. в интервале долгот от -30° до -50° . Для этих моментов времени производится, с использованием дозиметрических данных, расчет соответствующих значений коэффициента A .

- Для наименее и наиболее защищенных блоков детекторов вычисляется среднее арифметическое значение полученных значений коэффициента A (это значение различно для восходящих и нисходящих участков траектории МКС (из-за следующих причин)):

1. на восходящих и нисходящих участках траектории МКС точка пересечения станцией 30° ю.ш. имеет различную высоту
2. для восходящих и нисходящих участков траектории МКС различны условия прохождения станцией области ЮАА: различно время, в течение которого МКС находится внутри этой области; различны также координаты (широта, долгота, высота) точек входа и выхода станции из ЮАА
3. Путь, который станция проходит внутри этой области, также различен для восходящих и нисходящих участков траектории станции.
4. Необходимо также отметить, что, хотя коэффициент A линейно зависит от высоты станции ($A = k \cdot (h - h_0) + b$, h – высота МКС в точке пересечения 30° ю.ш., k , b , h_0 – численные коэффициенты), но для малых длительностей интервала «база прогноза» (1-2 недели) подобной зависимостью можно пренебречь. В дальнейших расчетах эта зависимость не учитывается.

- Для периода «диапазон прогноза» по баллистическим данным вычисляются моменты времени и параметры орбиты, которые имела МКС в моменты пересечения 30° ю.ш. в интервале долгот от $+20^\circ$ до -90° .

- Используя полученные в предыдущем пункте параметры орбиты станции и вычисленное ранее среднее значение коэффициента A , для периода «диапазон прогноза» вычисляются все значения доз, которые получает МКС при пересечении области ЮАА.

- Для временного интервала «база прогноза» подбираются соответствующие ему дозиметрические данные с 10-минутным разрешением (в случае, если для этого временного диапазона 10-минутные данные по каким-либо причинам отсутствуют, границы «базы прогноза» корректируются в сторону увеличения наименьшей границы и уменьшения наибольшей, до момента, пока не будут найдены моменты времени, для которых будут существовать 10-минутные данные по дозам, отличные от нулевого значения).

- Для уточненного таким образом интервала времени «база прогноза» производится расчет доз, получаемых МКС за 1 прохождение области ЮАА, согласно уже описанному выше алгоритму и с использованием вычисленных в одном из предыдущих пунктов усредненных значений коэффициента A . Далее вычисленные таким образом дозы за 1 пересечение МКС 30° ю.ш. суммируются – таким образом, вычисляется полная доза от РПЗ, полученная МКС за интервал времени «база прогноза».

- Используя 10-минутные данные по дозам, вычисляется суммарная доза, которую МКС получила в течение «базы прогноза» (в виде разности между поглощенной дозой, полученной в момент окончания «базы прогноза», и дозой, полученной в момент начала этого периода).

- Из суммарной дозы, полученной МКС в течение «базы прогноза» вычитается полная доза от РПЗ, полученная МКС за этот же период, и получившаяся разность делится на длительность «базы прогноза», выраженную в единицах и десятых долях суток. Получившееся значение является среднесуточной дозой, которую МКС получает от ГКЛ в течение «базы прогноза».

- Для формирования массивов данных, по которым строится окончательный результат прогнозирования дозы, получаемой МКС в течение «диапазона прогноза», используются расчетные значения доз, которые МКС получает при пересечении области ЮАА в течение этого периода времени, а также значение среднесуточной дозы, которую МКС получает от ГКЛ в течение «базы прогноза». Окончательный результат прогнозирования формируется в виде графиков накопления дозы в течение интервала времени «диапазон прогноза». Подобное представление результатов прогнозирования делает простым и удобным сравнение результатов прогноза с реальными экспериментальными данными.

4.2. Описание информационных массивов

При реализации методики прогнозирования накопленных доз в качестве исходных данных были использованы текстовые файлы, полученные как результат обработки десятисекундных дозиметрических данных (результаты обработки дозиметрических данных с 10-секундным временным разрешением подробно представлены в разделе 3.4 Главы 3). Необходимо отметить, что данные для восходящих и нисходящих участков траектории МКС, хотя и имеют идентичную структуру представления данных, но хранятся по отдельности, в различных файлах. Структура этих файлов данных представлена в таблице 16.

Таблица 16.

Время входа в ЮАА	Широта входа в ЮАА	Долгота входа в ЮАА	Высота входа в ЮАА	Время выхода из ЮАА	Широта выхода из ЮАА	Долгота выхода из ЮАА	Высота выхода из ЮАА	Доза за одно прохожд ение над центром ЮАА для каждого из каналов ДБ-8 (от 1 до 8)	Время прохожд ения над центром ЮАА	Широта прохожд ения над центром ЮАА	Долгота прохожд ения над центром ЮАА	Высота прохожд ения над центром ЮАА	Доза за одно прохожд ение ЮАА (числен ное значени е, мГр) для наимене е защище нного детектор а ДБ-8	Доза за одно прохожд ение ЮАА (числен ное значени е, мГр) для наболее защище нного детектор а ДБ-8
-------------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	----------------------------	-----------------------------	----------------------------	--	--	---	--	---	---	--

Все поля данных в этой структуре разделены между собой символом табуляции. Колонки «Время входа в ЮАА» и «Время выхода из ЮАА» представляют собой моменты времени (по Гринвичу), в которые МКС входит в область повышенных потоков радиации над южной Атлантикой и, соответственно, выходит из нее. Поля «Широта входа в ЮАА», «Долгота входа в ЮАА», «Высота входа в ЮАА», «Широта выхода из ЮАА», «Долгота выхода из ЮАА», «Высота выхода из ЮАА» представляет собой географические координаты (широту, долготу, высоту), соответствующие моментам времени входа МКС в область ЮАА и выхода из нее. Поле «Доза за одно прохождение ЮАА для каждого из каналов ДБ-8 (от 1 до 8)» представляет собой численное значение (в нГр) дозы, которую МКС получает в области ЮАА, для каждого из 8 каналов детекторов ДБ-8 (значения доз для каждого из каналов разделяются между собой символом табуляции). Как уже упоминалось, канал детекторов ДБ-8 №1 имеет наименьшую защищенность; наибольшую защищенность оборудованием и элементами конструкции станции из неэкранированных свинцом детекторов имеет канал детекторов ДБ-8 №7. Поле «Время прохождения над центром ЮАА» представляет собой моменты времени (по Гринвичу), в которые МКС пересекает 30° ю.ш.; поля «Широта прохождения над центром ЮАА», «Долгота прохождения над центром ЮАА», «Высота прохождения над центром ЮАА» соответственно, представляют собой географические

координаты (широту, долготу, высоту), соответствующие моментам времени пересечения МКС 30° ю.ш. Колонки «Доза за одно прохождение ЮАА для наименее защищенного детектора ДБ-8» и «Доза за одно прохождение ЮАА для наиболее защищенного детектора ДБ-8» представляют собой, соответственно, численные значения доз за одно прохождение ЮАА (в мГр) для канала детекторов ДБ-8 №1 и канала детекторов ДБ-8 №7.

Описанный выше алгоритм прогнозирования накопленных доз был реализован в два этапа. На первом этапе из исходных дозиметрических данных в результате программной обработки формируются текстовые файлы, различные для данных по восходящим и нисходящим участкам траектории МКС; в этих файлах представлены дозы, которые МКС получает за одно прохождение ЮАА в течение «диапазона прогноза» (как рассчитанные по алгоритму прогнозирования, так и экспериментальные их значения).

Структура этих файлов данных представлена в таблице 17.

Таблица 17.

Эмпирические значения дозы						Экспериментальные значения дозы						Параметры дозы от ГКЛ
Время пересечения -30 ю.ш.	Широта пересечения -30 ю.ш.	Долгота пересечения -30 ю.ш.	Высота пересечения -30 ю.ш.	Доза, мГр, наименее защищенный детектор	Доза, мГр, наиболее защищенный детектор	Время пересечения -30 ю.ш.	Широта пересечения -30 ю.ш.	Долгота пересечения -30 ю.ш.	Высота пересечения -30 ю.ш.	Доза, мГр, наименее защищенный детектор	Доза, мГр, наиболее защищенный детектор	

Все поля данных в этой структуре разделены между собой символом табуляции. Первые шесть столбцов данных представляют собой информацию, связанную с расчетом доз за 1 прохождение ЮАА по алгоритму прогнозирования; последующие шесть – представляют собой информацию об экспериментально зарегистрированных детекторами ДБ-8

показаниях. Количество строчек в последних шести столбцах может отличаться от аналогичного количества в первых шести – из-за уже упоминавшейся недостаточной полноты массивов экспериментальных данных.

Колонка «Время пересечения -30° ю.ш.» представляет собой моменты времени (по Гринвичу), в которые МКС пересекает 30° ю.ш.; поля «Широта пересечения -30° ю.ш.», «Долгота пересечения -30° ю.ш.», «Высота пересечения -30° ю.ш.» соответственно, представляют собой географические координаты (широту, долготу, высоту), соответствующие моментам времени пересечения МКС 30° ю.ш. Колонки «Доза, мГр, наименее защищенный детектор» и «Доза, мГр, наиболее защищенный детектор» представляют собой, соответственно, численные значения доз за одно прохождение ЮАА (в мГр) для канала детекторов ДБ-8 №1 и канала детекторов ДБ-8 №7, как для случая расчетных значений доз, так и для их экспериментально зарегистрированных значений.

В структуре файла данных также присутствует столбец «Параметры дозы от ГКЛ». Он представляет собой набор численных значений параметров, позволяющий (на втором этапе прогнозирования) учесть не только дозу, связанную с РПЗ, но и дозу, получаемую МКС от ГКЛ в течение «диапазона прогнозирования». В этот столбец записываются, последовательно, как для наименее защищенного детектора ДБ-8, так и для наиболее защищенного, следующие параметры: значение полной дозы от РПЗ, полученной МКС за интервал времени «база прогноза» (для восходящих и для нисходящих участков траектории станции это значение будет различным), значение суммарной дозы, которую МКС получила в течение «базы прогноза» (вычисленное по данным с 10-минутным временным разрешением), длительность «базы прогноза» (в сутках). Всего, таким образом, в поле «Параметры дозы от ГКЛ» записываются 6 значений.

Кроме представленного выше описания файлов дозиметрических данных, на первом этапе прогнозирования накопленных доз в результате программной обработки формируется еще один тип текстовых файлов, также различных для данных по восходящим и нисходящим участкам траектории МКС. Эти файлы в процессе прогнозирования накопленных доз не используются; информация, записанная в этих файлах, используется для контроля корректности обработки данных и носит справочный характер.

Структура этих справочных файлов выглядит следующим образом (таблица 18), разделение столбцов данных в ней производится, как и в предыдущих случаях, при помощи символа табуляции.

Таблица 18.

Дозы, используемые как опорные для прогноза (экспериментальные значения)									
Время пересечения -30 ю.ш.	Ширина пересечения -30 ю.ш.	Долгота пересечения -30 ю.ш.	Высота пересечения -30 ю.ш.	Доза, мГр, наименее защищенный детектор	Доза, мГр, наиболее защищенный детектор	Коэффициент А (наименьшая защищенность)	Коэффициент b (наименьшая защищенность)	Коэффициент А (наибольшая защищенность)	Коэффициент b (наибольшая защищенность)
Коэфф_А_наим_защ_средн =	Лямбда_наим_защ =	Сигма_наим_защ =	Коэфф_А_наиб_защ_ср_дн =	Лямбда_наиб_защ =	Сигма_наиб_защ =	Коэфф_К_наим_защ =	Коэфф_b_наим_защ_ср_дн =	Коэфф_К_наиб_защ =	Коэфф_b_наиб_защ_ср_дн =
База прогноза: XX.XX.XXXX – YY.YY.YYYY					Временной диапазон прогноза: XX.XX.XXXX HH:MM:SS–YY.YY.YYYY HH:MM:SS				

В ней содержатся значения экспериментальных доз за одно прохождение ЮАА (для наименее и наиболее защищенных каналов ДБ-8), которые МКС получает в течение «базы прогноза», время и географические координаты (широта, долгота, высота) для каждого из пересечений МКС 30° ю.ш., а также (для каждого из прохождений ЮАА) значения коэффициентов А и b (коэффициент b вычисляется по несколько видоизмененной, но уже упоминавшейся формуле для коэффициента А: $b = A - k \cdot (h - h_0)$ (h – высота МКС в точке пересечения 30° ю.ш., h_0 , k , b – численные коэффициенты); значение коэффициента k задается пользователем; в данном случае, вычисленный таким образом коэффициент b носит справочный характер и в

дальнейшем не используется). Также, в структуре данных есть поля для средних арифметических значений коэффициентов A и b для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8, есть также поля для численных значений коэффициентов σ , λ_{cp} , k (аналогично - для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8). Также в структуре данных предусмотрены поля «База прогноза» и «Временной диапазон прогноза», в которые записываются значения моментов начала и окончания временных интервалов «база прогноза» и «диапазон прогноза».

На втором этапе прогнозирования все текстовые файлы данных, имеющие структуру из таблицы 17, как для восходящих, так и для нисходящих участков траектории МКС, подвергаются обработке, конечным результатом которой являются файлы данных со структурой, представленной в таблице 19. В дальнейшем, для анализа результатов использования вышеописанной методики прогнозирования накопленной дозы, используется графическое представление этих файлов данных.

Таблица 19.

Время	Доза, наименее защищенный детектор	Доза, наиболее защищенный детектор
-------	------------------------------------	------------------------------------

Данные, находящиеся в этой структуре, разделяются между собой символом табуляции, имеют временное разрешение 10 минут и являются результатом прогнозирования динамики накопления дозы для периода «диапазон прогноза». Значения в столбце «Время» этой структуры имеют вид ДД.ММ.ГГГГ ЧЧ:ММ:СС, и представляют собой дату и моменты времени (с точностью до секунд), соответствующие значению накопленной к этому моменту времени дозы. Первым и последним значением, записываемым в столбец «Время», являются моменты начала и окончания временного интервала «диапазон прогноза». Поля «Доза, наименее защищенный детектор» и «Доза, наиболее защищенный детектор» представляют собой

численные значения накопленных доз для канала детекторов ДБ-8 №1 и канала детекторов ДБ-8 №7, как имеющих наименьшую и наибольшую защиту соответственно.

4.3. Результаты прогнозирования динамики накопленных доз на МКС

Пакет программ, предназначенный для прогнозирования динамики накопленных доз на МКС, был опробован на реальных экспериментальных данных. Ниже, на графиках (рис. 62 – 73), приводятся примеры прогнозных оценок динамики накопленных доз (на графиках обозначены красным) в сравнении с реальными экспериментальными данными (на графиках обозначены черным). На графиках на левой панели представлены данные для наименее защищенного канала детекторов ДБ-8, на правой – для наиболее защищенного. Даты, для которых производится прогноз, были выбраны произвольным образом.

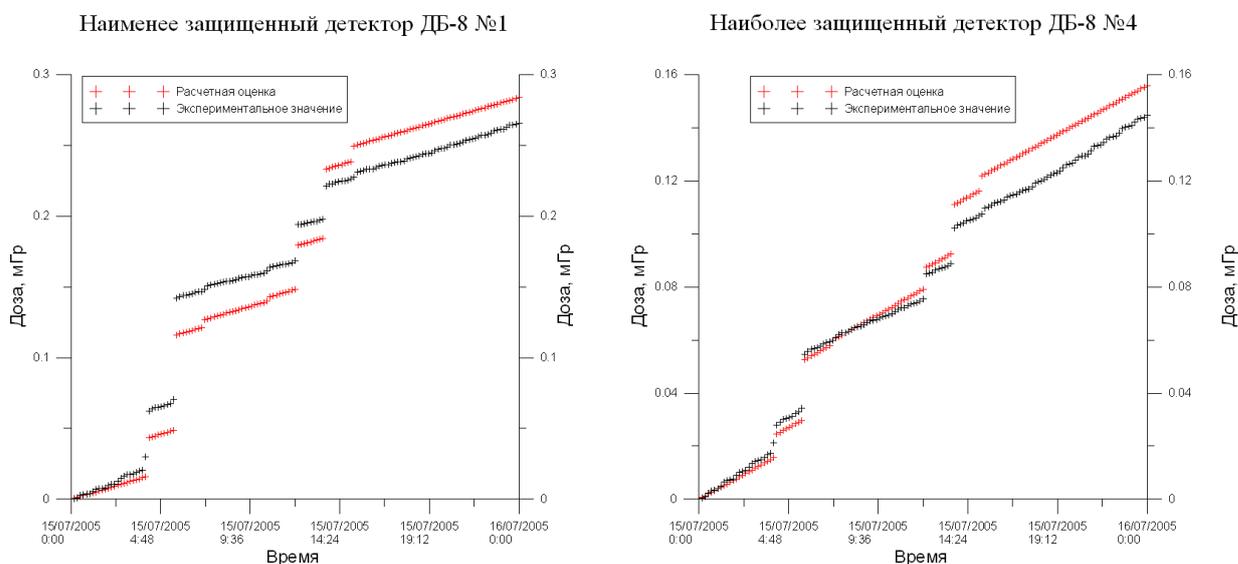


Рис. 62. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2005, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.07.2005 по 14.07.2005)).

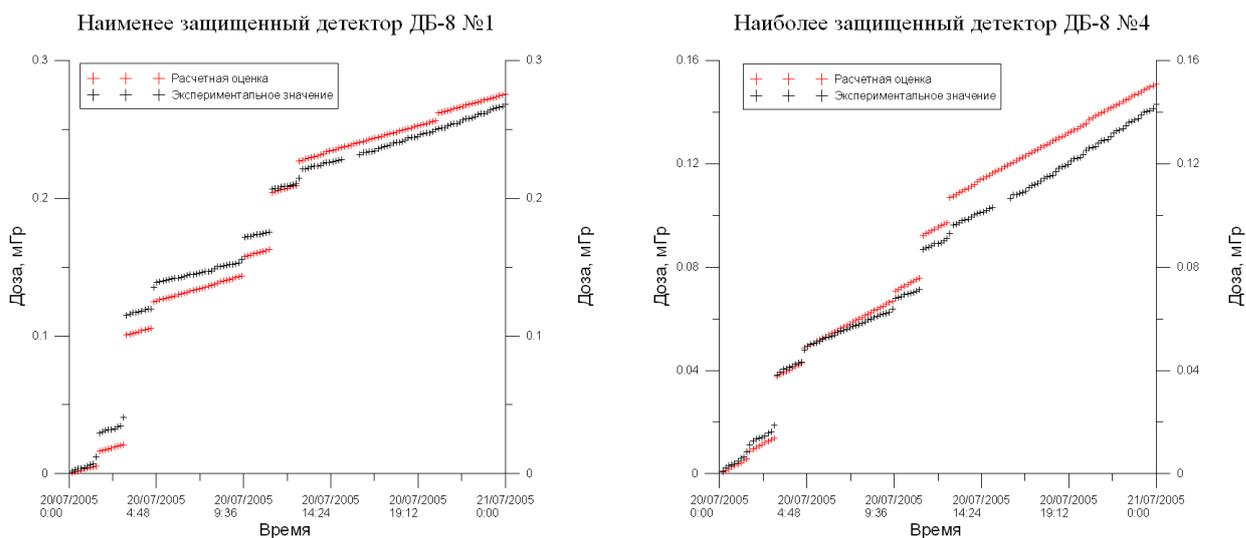


Рис. 63. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 20.07.2005, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 06.07.2005 по 19.07.2005)).

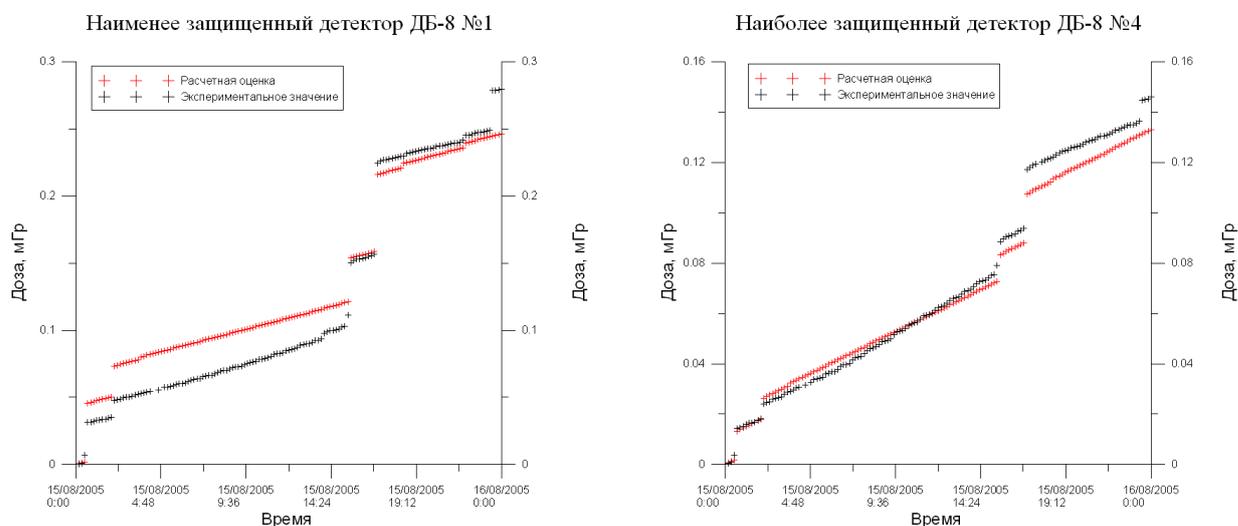


Рис. 64. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.08.2005, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.08.2005 по 14.08.2005)).

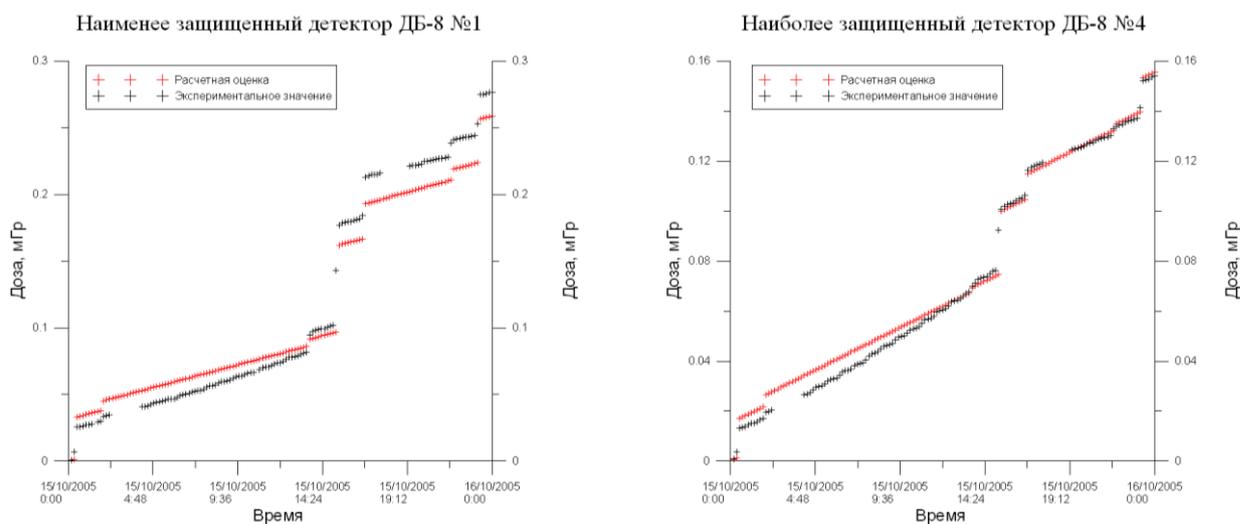


Рис. 65. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.10.2005, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.10.2005 по 14.10.2005)).

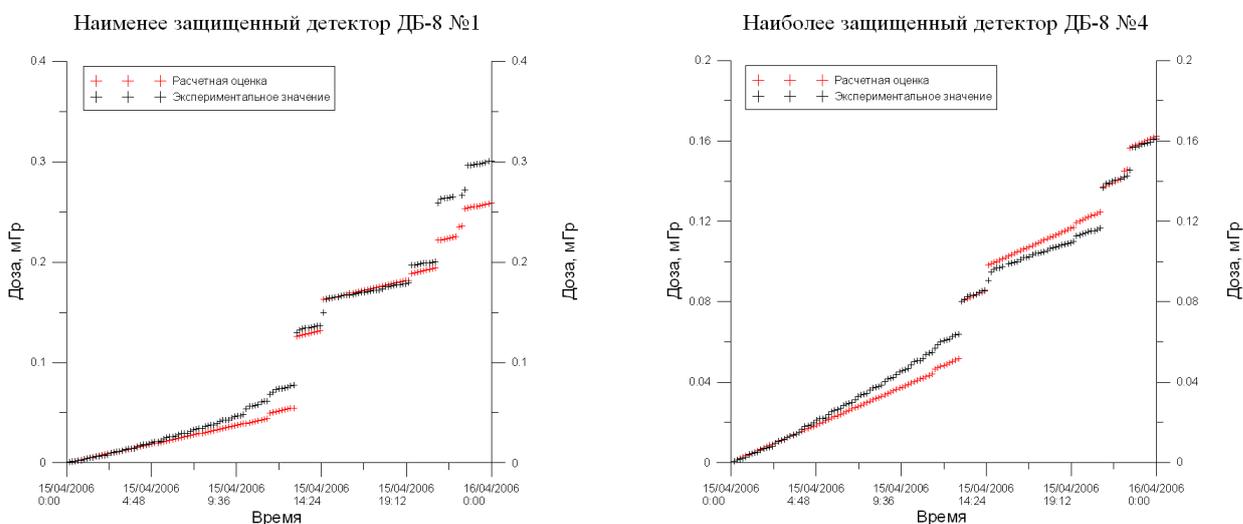


Рис. 66. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.04.2006, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.04.2006 по 14.04.2006)).

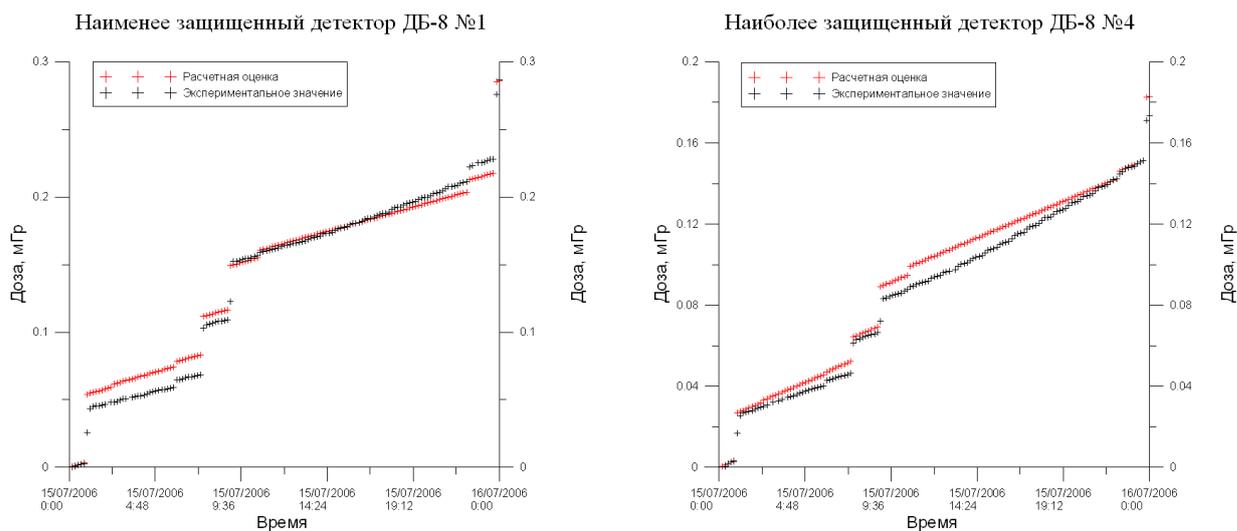


Рис. 67. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2006, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.07.2006 по 14.07.2006)).

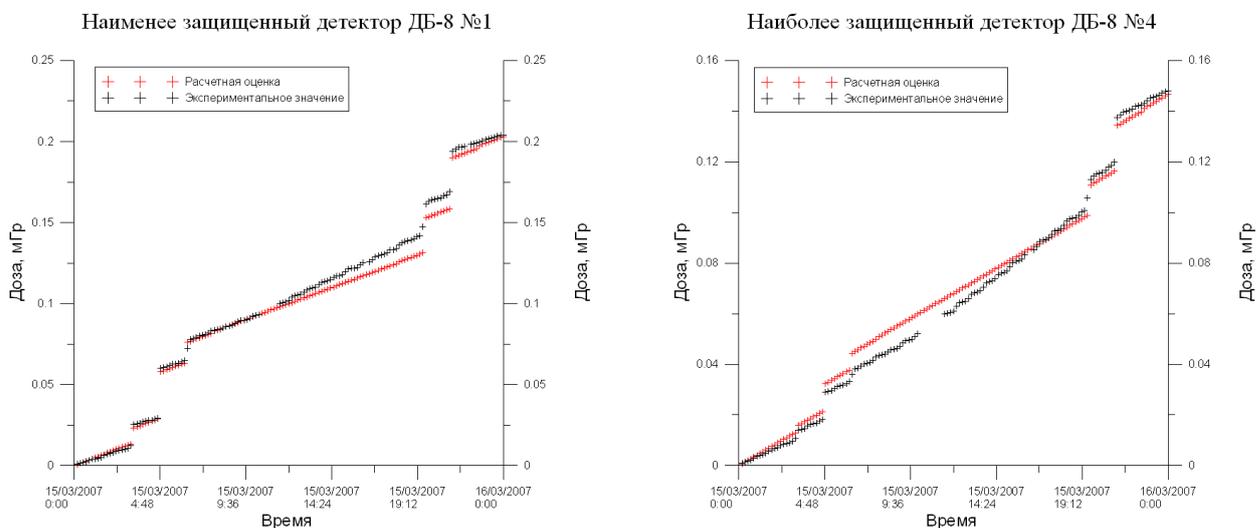


Рис. 68. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.03.2007, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.03.2007 по 14.03.2007)).

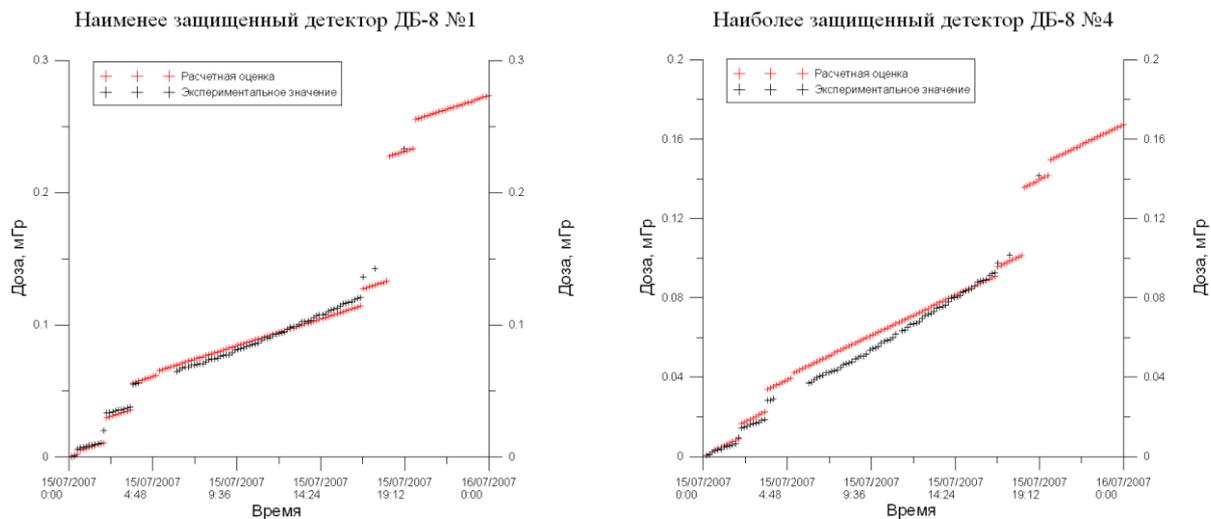


Рис. 69. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2007, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.07.2007 по 14.07.2007)).

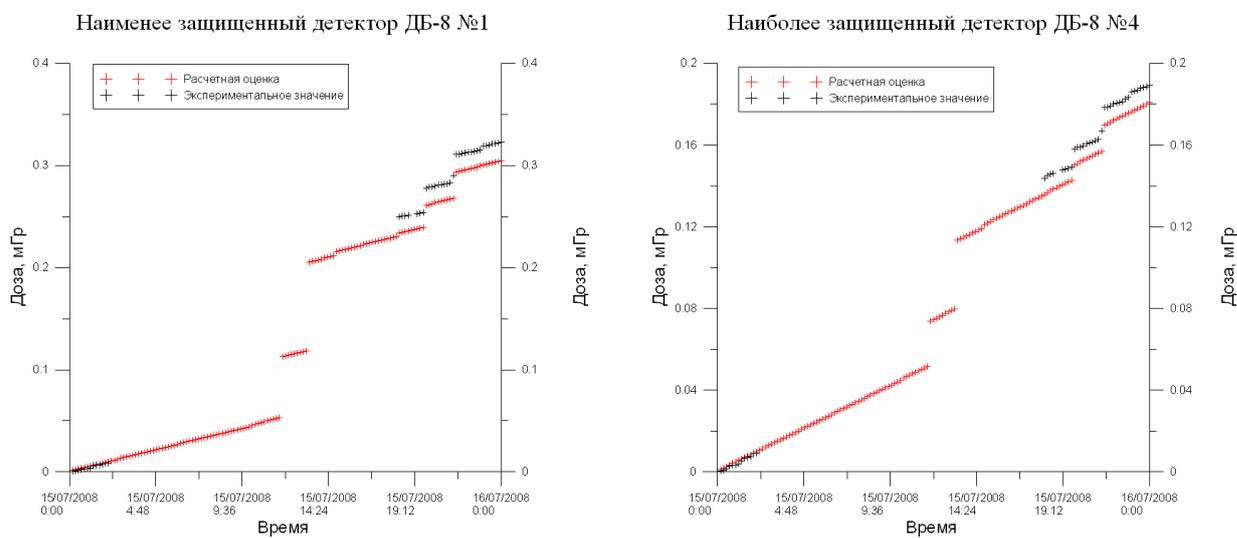


Рис. 70. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2008, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.07.2008 по 14.07.2008)).

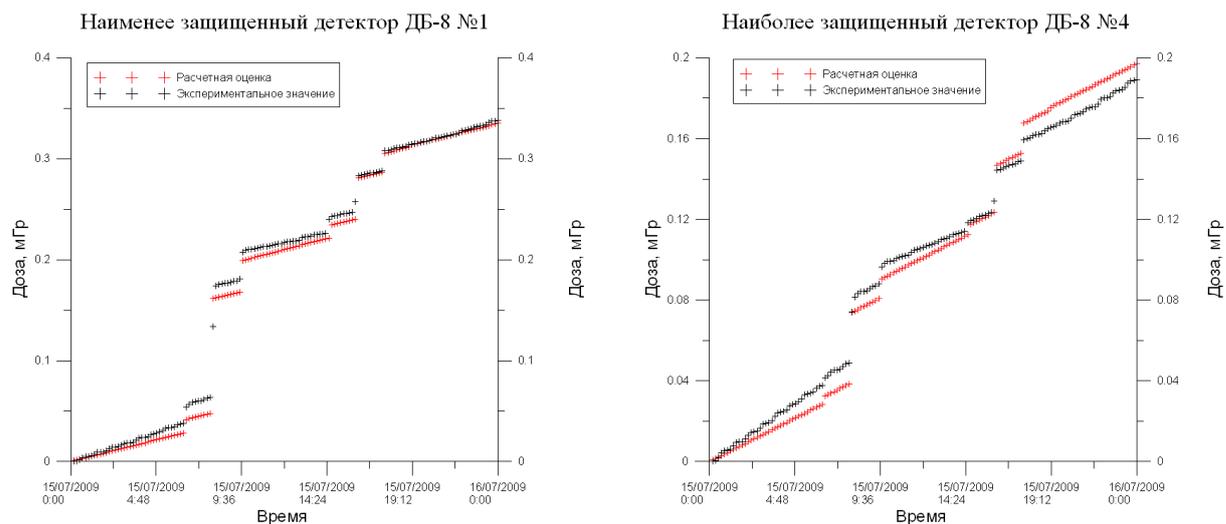


Рис. 71. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2009, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.07.2009 по 14.07.2009)).

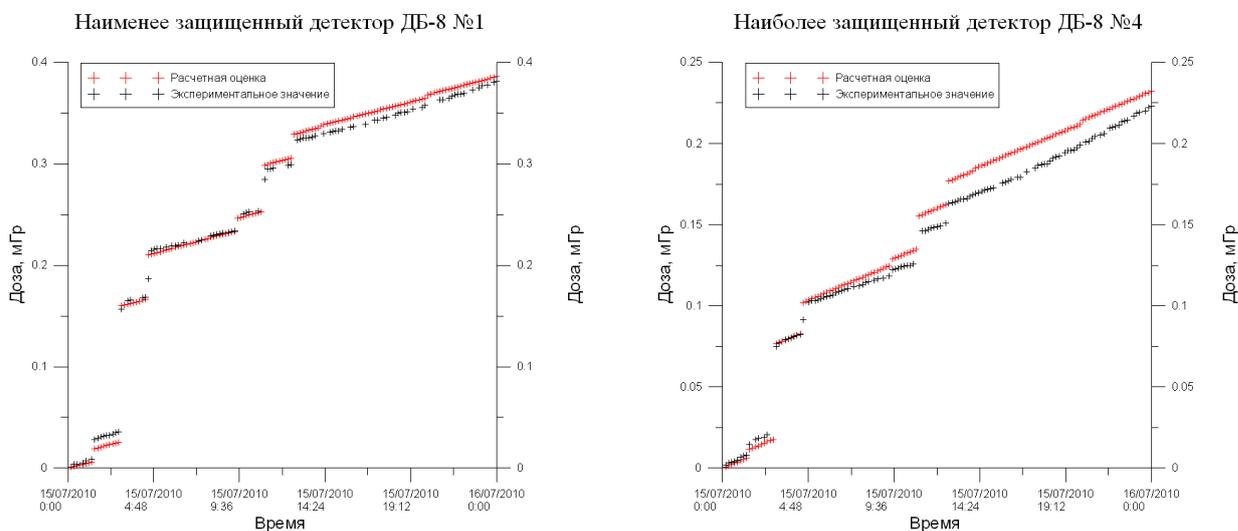


Рис. 72. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2010, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.07.2010 по 14.07.2010)).

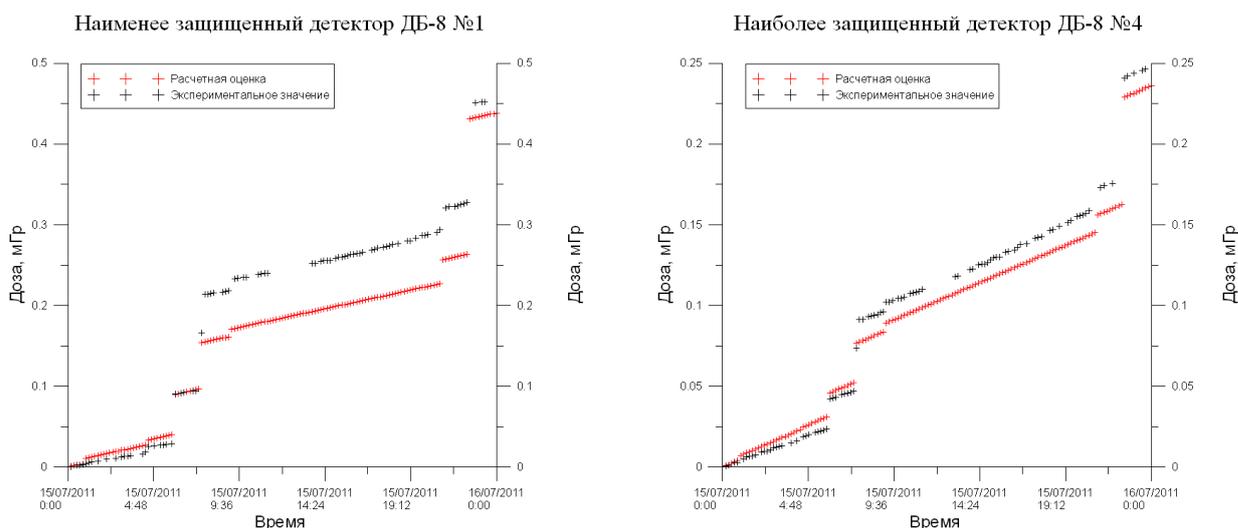


Рис. 73. Сравнение расчетной оценки динамики накопленных доз с экспериментальными данными (для 15.07.2011, длительность «диапазона прогноза» - 1 сутки, длительность «базы прогноза» - 2 недели (с 01.07.2011 по 14.07.2011)).

Как видно из приведенных выше примеров, степень близости прогнозных оценок динамики накопленных доз к реальным экспериментальным данным различается для различных дат. Чтобы количественно оценить точность прогноза динамики накопления дозы, для всего временного интервала имеющихся данных (01.07.2005 – 30.11.2011) со скважностью в 14 дней была проведена оценка точности прогнозирования (при длительности «диапазона прогноза» равной 1 суткам, «базы прогноза» - 14 дням) согласно формуле

$$M = \frac{|D_{\text{эксп}} - D_{\text{расч}}|_{\text{макс}}}{D_{\text{сут}}} * 100 \% \quad (10), \text{ где:}$$

M – функция расстояния [57] экспериментальных данных и их расчетной оценки, $D_{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение дозы, $D_{\text{расч}}$ – расчетное значение дозы, $D_{\text{сут}}$ – доза за интервал «диапазон прогноза» (в данном случае, за 1 сутки), $|D_{\text{эксп}} - D_{\text{расч}}|_{\text{макс}}$ – супремум – норма [57], значение модуля разности экспериментального и расчетного значений дозы, максимальное из всех значений, вычисленных для периода «диапазон прогноза».

Временное распределение функции расстояния экспериментальных и расчетных значений доз представлено на рис. 74.

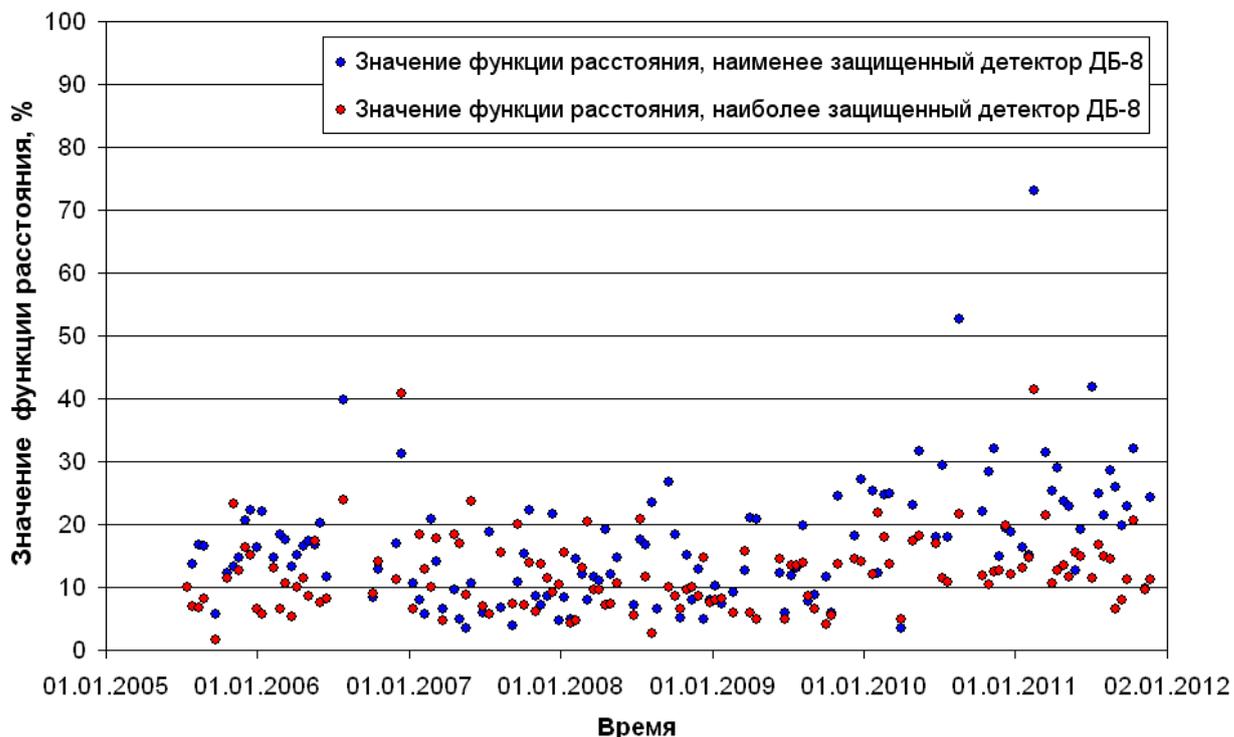


Рис. 74. Временное распределение количественной оценки близости прогнозных оценок динамики накопленных доз к реальным экспериментальным данным для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8.

Далее, были рассчитаны функции распределения супремум – норм экспериментальных данных и их расчетных оценок для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8 (рис. 75).

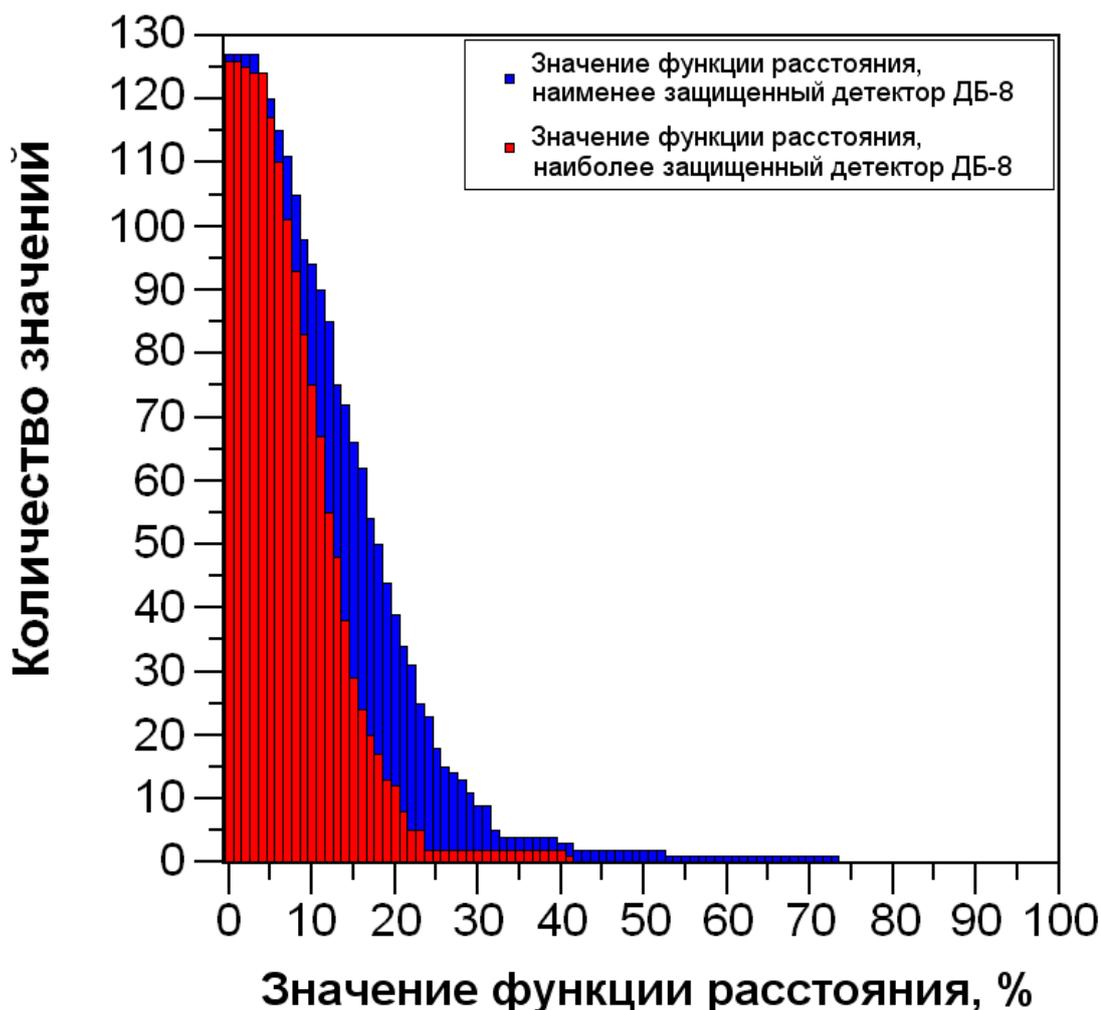


Рис. 75. Функция распределения количественной оценки близости прогнозных оценок динамики накопленных доз к реальным экспериментальным данным для наименее и наиболее защищенных каналов детекторов ДБ-8.

Как можно видеть из рис. 75, для наиболее защищенного детектора ДБ-8 удастся 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным СРК МКС исследованы вариации мощности дозы на орбитальном комплексе МКС за период 2005 – 2011 гг. Получены следующие результаты:

- Проведенный анализ данных СРК за период 2005 – 2009 гг., характеризовавшийся низким уровнем солнечной активности, позволил определить вклад в суточную дозу, вносимый ГКЛ и РПЗ.
- Установлено, что доза от ГКЛ практически не зависит от условий защищенности детекторов СРК оборудованием МКС.
- 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 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.
- Показано, что доза от РПЗ на МКС существенно зависит от условий защищенности детекторов и высоты орбиты, соответствующие изменения могут превышать 2 раза и более.
- Получены эмпирические формулы, позволяющие производить оценки дозы, получаемой МКС при прохождении через зону ЮАА.
- 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.
- На основе данных СРК разработана инженерная методика прогнозирования динамики накопления дозы на МКС. Показано, что погрешность методики не более 25% для наиболее защищенного

детектора ДБ-8, для наименее защищенного – погрешность не более 32% (при значении доверительной вероятности, равном 96%).

ВЫВОДЫ

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.

В заключение автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, директору НИИЯФ МГУ, доктору физ.-мат. наук, профессору Панасюку Михаилу Игоревичу за интересную тему работы, ведущему научному сотруднику ГНЦ РФ ИМБП РАН, кандидату физ.-мат. наук Бенгину Виктору Владимировичу за постоянную помощь при её разработке, обсуждение полученных результатов и помощь при её написании, а также за исключительно тёплые и плодотворные отношения сотрудничества, сложившиеся в процессе работы над диссертацией.

Автор также считает своим долгом поблагодарить Дробышева Сергея Геннадьевича, сотрудника ГНЦ РФ ИМБП РАН, за предоставленные данные о баллистических параметрах траектории МКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Space Storms and Space Weather Hazards // Edited by I.A. Daglis, NATO Science Series, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute Space Storms and Space Weather Hazards, Hersonissos, Crete, Greece, 19-29 June, 2000. V. 38. Published by Kluwer Academic Publishers. PP. 79-96.

2. *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., 2010. Т. 48. №3. С. 212-217.

3. *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.

4. *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.

5. *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.

6. *Логачев Ю.И.* Исследования космоса в НИИЯФ МГУ: Первые 50 лет космической эры / Под ред. проф. М.И. Панасюка, М.:КДУ, 2007. С. 24-121.

7. *Новиков Л.С., Панасюк М.И.* Исследования космической радиации и ее воздействия на материалы и оборудование космических аппаратов. // *Вопросы атомной науки и техники*. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып. 4. С. 3-13.

8. Результаты медицинских исследований, выполненных на орбитальном научно-исследовательском комплексе «Салют-6» - «Союз». М.: Наука. 1986. С. 335-348.
9. Орбитальная станция «Мир». М., Учреждение РАН Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН. 2002. Т.2. С. 412 - 459.
10. *Miroshnichenko L.I.* Radiation Hazard in Space, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 2003. PP. 198-204.
11. *Mitrikas V.G.* Dynamic Model of Radiation Conditions for the Operative Provision of Radiation Safety for Cosmonauts in Space Flight. Doctoral Dissertation. Institute of Medical and Biological Problems. Moscow. 2000. P. 180.
12. Научно-технический сборник «Модель космоса». М., 2007. Т. 1. Гл. 3.9, 3.10. С. 627–667.
13. *Morselli A., on behalf of the SilEye Collaboration.* Cosmic rays studies on the MIR station: The experiment SilEye, Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf, Durban, South Africa. 1997. V.5. PP. 45-48.
14. *Furano G., Bacciarelli F., Bidoli, V., et al.* (in all 33 authors) Measurements of nuclear mass distribution of primary and recoil heavy ions inside Mir space station with SilEye silicon detector, Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, USA. 1999. V.5. PP. 128 – 131.
15. *Casolino M., Bidoli V., De Grandis E., et al.* (in all 28 authors): Cosmic ray measurements on board space station Mir with SILEYE-2 experiment, Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany. 2001. V.9. PP. 4011-4014.
16. *Avdeev S.V.* Experimental studies of particles inducing a light flash phenomenon in the cosmonaut's eyes by position-sensible semiconductor strip detectors, Candidate Dissertation (Ph.D. Thesis), Moscow Engineering and Physical Institute (MEPhI), Moscow. 2001. P. 120.
17. *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.

18. *Bidoli, V., Casolino, M., De Pascale, M.P., et al* (in all 37 authors) Experiment ALTEA for the International Space Station, Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, USA. 1999. V.5. PP. 120 – 123.

19. *Narici, L., Bidoli, V., Casolino, M., et al.* (in all 34 authors) ALTEA: Visual perception studies on astronauts on board the ISS, Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany. 2001. V.5. PP. 2322 – 2324.

20. *Avdeev, S.V., Galper, A.M., Vavilov, N.R., et al.* (in all 26 authors) Spectrometer of charged particles based on silicon strip detectors for radiation measurements on board the International Space Station, *Izvestiya RAN, Phys. Series.* 2002. V.66. №. 11. PP. 1670 – 1672.

21. Международная космическая станция, Российский сегмент. М., Учреждение РАН Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН. 2011. Т.2, С. 389 - 426.

22. *Dachev T. P., Semkova J., Tomov B., Matviichuk Yu., Dimitrov Pl., Koleva R., Malchev St., Reitz G., Horneck G., de Angelis G., Häder D.-P., Petrov V., Shurshakov V., Benghin V., Chernykh I., Drobyshev S., Bankov N. G.* Space Shuttle drops down the SAA doses on ISS // *Adv. Space Res.*, V. 47, Issue 11. PP. 2030 – 2038.

23. *Badhwar Gautam D., Cucinotta Francis A. and Konradi Andrei* Shuttle measurements of galactic cosmic radiation LET spectra, *Adv. Space Res.* 1996. V. 18. № 12. PP. (12)159 - (12)165.

24. *Мирошниченко Л.И., Петров В.М.* Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985.

25. *Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф.* Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве: Справочник. Спб.: Гидрометеоздат, 1994.

26. Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 193- 202.

27. Дудкин В.Е., Ковалев Е.Е., Коломенский А.В., Сакович В.А. Оценки массы радиационного убежища при пилотируемом полете к Марсу. Материалы V Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Протвино. 1989. С. 190.

28. Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г. Межпланетные и орбитальные космические полеты. Радиационный риск для космонавтов (радиобиологическое обоснование). М.: ЗАО Издательство Экономика, 2009 . С. 42-73.

29. V.G. Mitrikas, V.V. Tsetlin, M.V. Teltsov, V.I. Shumshurov. Radiation dose measurements aboard the Mir using the R-16 instrument //Radiation measurements. 2002. V. 35. №. 5. PP. 515-525.

30. Badhwar G.D., Shurshakov V.A., Tsetlin V.V. Solar Modulation of Dose Rate Onboard the Mir Station //IEEE Transactions of Nuclear Science. 1997. V. 44. №6.

31. Митрикас В.Г., Цетлин В.В. Крупномасштабные вариации радиационной обстановки на орбите станции «Мир» //Космические исследования. М., Наука. 1995. Т. 33. №4. С. 389-394.

32. Vampola A. L. Solar Cycle Effects on Space Systems // Journal of Spacecraft and Rockets. 1989. V. 26. № 6. PP. 393 – 444.

33. Emmert J. T., Lean J. L. and Picone J. M. Record - low thermospheric density during the 2008 solar minimum // Geophys . Res. Lett., 2010. V. 37. L12102.

34. Solomon S. C., Woods, L. V. Didkovsky, J. T. Emmert, and L. Qian Anomalously low solar extreme ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum // Geophys. Res. Lett., 2010. V. 37, L16103.

35. *Кузнецов Н.В., Панасюк М.И.* Космическая радиация и прогнозирование сбое- и отказоустойчивости интегральных микросхем в бортовой аппаратуре космических аппаратов. // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ), серия радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. Вып. 1-2. С. 3-8.

36. ГОСТ 25645.138-86. Пояса Земли радиационные. Пространственно-энергетические характеристики плотности потоков протонов. М., Издательство стандартов. 1987.

37. ГОСТ 25645.139-86. Пояса Земли радиационные. Пространственно-энергетические характеристики плотности потоков электронов. М., Издательство стандартов. 1987.

38. ГОСТ 25645.150-90. Галактические космические лучи. Модель изменения потоков частиц. М., Издательство стандартов. 1991.

39. ГОСТ Р 25645.165-2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. М., Издательство стандартов. 2001.

40. *Кузнецов Н.В., Малышкин Ю.М., Николаева Н.И., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Ужегов В.М., Яковлев М.В.* Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. № 2. С. 72 – 78.

41. *Nymmik R.A.* Space systems-space environments-model galactic cosmic rays: International standard ISO-DIS 15390. In International Standards, pages 1–6. ISO 15390:2004(E), Switzerland, 2004.

42. *Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Suslov A.A.* Galactic Cosmic Ray Flux Simulation and Prediction // Adv. Space Res., 1995. V. 17(2). PP. 19-22.

43. *Dyer C.S., Sims A.J., Underwood C.* Measurements of the SEE environment from sea level to GEO using the CREAM&CREDO experiment. IEEE Trans. On Nucl. Sci., 1996. V. 43. PP. 383-402.

44. *Баширов В.Ф., Панасюк М.И., Тельцов М.В.* Динамическая модель захваченной радиации на низких высотах в магнитосфере Земли. // Космические исследования. М., Наука. 1998. Т. 36. С. 359-368.
45. *Пичхадзе К.М., Хамидуллина Н.М., Зефиоров И.В.* Расчет локальных доз с учетом реальной конфигурации космического аппарата // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов. М., НПО им. С.А. Лавочкина. 2004. С. 401-406.
46. *Seltzer S.* SHIELDOSE: A compute Code For Space Shielding Radiation Dose Calculation. NBS Technical Note 1116, National Bureau of Standards, May 1980.
47. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press, 1985.
48. *Dementyev A., Sobolevsky N.* SHIELD - universal Monte Carlo hadron transport code: scope and applications. Rad. Meas., 1999. V. 30. PP. 553-557.
49. *Simonsen L.C., Nealy J.E., Sauer H.H., and Townsend L.W.* Solar flare protection for manned lunar missions: Analysis of the October 1989 proton flare events. SAE Techn. Pap. Ser., 1991. № 911351. PP. 1 – 11.
50. *Ковалев Е.Е.* Радиационный риск на Земле и в космосе. М., Атомиздат. 1976. С. 256.
51. Техническое описание. Система радиационного контроля (СРК) Em 1.320.017 ТО. НИИЯФ МГУ. 1999.
52. *Петров В.М., Бенгин В.В., Шуршаков 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.
53. *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.

54. *Панасюк М. И., Кузнецов С. Н., Кутузов Ю. В., Юшков Б. Ю. Мяжкова И. Н., Петров В. М., Бенгин В. В.* Дозы радиации на российском сегменте Международной космической станции в октябре 2003 года. Сопоставление оценок, полученных на основе данных ИСЗ КОРОНАС-Ф, с результатами дозиметрического контроля // *Астрономический вестник*. 2007. Т. 41. № 5. С. 458–465.

55. Сато Ю. Без паники! Цифровая обработка сигналов. / Пер. с японского Т.Г.Селиной. М.: Додэка-XXI. 2010.

56. *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.

57. *Дюран Б., Оддел П.* Кластерный анализ . М.: Статистика. 1977. С. 17.