

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

Золотарев Иван Анатольевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ
В КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ ПРИ ПОЛЕТЕ
ПО ВЫСОКОШИРОТНОЙ ОРБИТЕ**

Специальность 01.03.03 - Физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва - 2022

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

Научный руководитель – Бенгин Виктор Владимирович
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты – Михайлов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), профессор

Махмутов Владимир Салимгереевич, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУН «Физический институт имени П. Н. Лебедева» Российской академии наук, заведующий лабораторией

Хамидуллина Наталья Мугалимовна, кандидат физико-математических наук, АО "Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина" (Роскосмос), ведущий математик

Защита состоится «22» июня 2022 года в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, 19-й корпус НИИЯФ МГУ, аудитория 2-15.

E-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/454564929/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.05,
кандидат физико-математических наук

Наталия Андреевна Власова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Актуальность работы обусловлена планами создания нового пилотируемого транспортного корабля, предназначенного для широкого диапазона орбит, в том числе и высокоширотных [ФКП, 2016]. Сейчас прорабатывается план создания российской орбитальной станции, одним из вариантов ее размещения является высокоширотная орбита [Статья о РОС, 2022].

Имеющиеся модели радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, опираются на очень большой объем экспериментальной информации. Они позволяют достаточно детально рассчитать уровни радиационного воздействия на экипаж и аппаратуру космических аппаратов. Тем не менее, предварительное дозиметрическое зондирование трасс полета перспективных пилотируемых космических аппаратов является важным элементом подготовки к обеспечению радиационной безопасности их экипажей.

Цель исследования

Целью данной работы является экспериментальное определение вклада галактических космических лучей (ГКЛ) и радиационных поясов Земли (РПЗ) в уровень радиационного воздействия на борту спутника, находящегося на околоземной солнечно-синхронной орбите, за небольшой толщиной защиты.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Создать прибор для дозиметрических измерений на борту спутника «Ломоносов»;
2. Интегрировать прибор в состав аппаратуры спутника и отработать порядок управления и получения с него информации;
3. Провести летно-конструкторские испытания прибора;
4. Разработать методику и программные средства, обеспечивающие обработку полученной телеметрической информации. Обработать полученную

информацию и сформировать массивы данных для дальнейшего анализа;

5. Провести анализ данных для определения вклада различных видов излучения в дозу радиации на борту спутника и оценки возможной связи с уровнем геомагнитной активности.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются уровни радиации космического излучения естественного происхождения в околоземном космическом пространстве. Предмет исследования – вариации вклада различных источников космического излучения в дозу облучения на околоземной орбите.

Научная новизна

1. Впервые определены дозиметрические характеристики космического излучения естественного происхождения на высокоширотной орбите за малой толщиной защиты;

2. Получены количественные оценки вариации величины суточной дозы, получаемой от электронов внешнего пояса и отмечена связь этих вариаций с геомагнитной активностью и с давлением солнечного ветра;

3. Показано что вклад кратковременных интенсивных возрастаний потоков электронов внешнего пояса в величину суточной дозы не достигает радиационно-опасных величин.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость обусловлена необходимостью определения соотношения вкладов в дозу различных видов излучения на высокоширотной околоземной орбите. Практическая значимость обусловлена экспериментально определенными количественными оценками уровней мощности дозы, которые следует ожидать при полёте перспективных космических аппаратов по высокоширотной орбите.

Методология диссертационного исследования

Исследование было проведено с использованием специально созданного для этой цели прибора ДЭПРОН в ходе проведения эксперимента на борту

спутника «Ломоносов» и последующего анализа полученных экспериментальных данных по потокам и мощности поглощенной дозы космического излучения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод определения оптимальных порогов детекторов и реализующая его программа дают возможность автоматизировать процесс оценки чувствительности телескопов детекторов;

2. На орбите с наклоном 98° и высотой около 500 км, при толщине защиты $0,45 \text{ г/см}^2$ вклад в суточную дозу за счет прохождения областей внешнего пояса сопоставим с вкладом в Южно-Атлантической Аномалии (ЮАА). При увеличении толщины защиты до $0,81 \text{ г/см}^2$ вклад в суточную дозу от электронов внешнего пояса падает на порядок величины и становится сравнимым с вкладом от ГКЛ;

3. Вариации суточной дозы во внешнем поясе для толщины защиты $0,45 \text{ г/см}^2$ могут достигать порядка величины, наибольшие значения наблюдаются в период геомагнитных возмущений;

4. На спутнике «Ломоносов» прибором «ДЭПРОН» зарегистрированы кратковременные интенсивные возрастания мощности дозы в области внешнего пояса. Частота появления возрастаний увеличивалась при повышенной величине давления солнечного ветра;

5. За 6 месяцев проведения эксперимента на спутнике «Ломоносов» вклад кратковременных интенсивных возрастаний мощности дозы в суточную дозу во внешнем поясе не превышал 1% для защиты $0,45 \text{ г/см}^2$.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается большим объемом проанализированного материала и полнотой охвата данных для анализа, использованием соответствующих поставленным цели и задачам методов статистики и моделирования. К данным измерений радиационных условий предоставлен доступ на сайте НИИЯФ МГУ.

Результаты исследования использовались при подготовке патента [Брильков

и др., 2015].

Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: международной конференции Committee on Space Research - COSPAR (г. Москва, 2014 г., г. Пасадена, 2018 г.), международной конференции «Объединение молодых ученых и специалистов» - ОМУС (г. Дубна, ОИЯИ, 2015 г.), общеуниверситетской научной конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, 2019 г.), научной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2019 г., 2022 г.), рабочих совещаниях проекта космического аппарата «Ломоносов» (Москва, 2016 г.), а также 43-ем ежегодном семинаре в Апатитах "Физика авроральных явлений" (2020 г.).

Личный вклад автора

Автор лично принимал активное участие во всех этапах исследования и разработки прибора ДЭПРОН, а также в проведении испытаний полупроводникового детектора с усилительным трактом прибора. Автором проведены проверки работоспособности усилительного тракта с радиоактивными источниками. Автор участвовал в проведении испытаний детекторов тепловых нейтронов на лабораторном источнике нейтронов. Проведены работы по стыковке и согласованию платы цифровой обработки сигналов с аналоговыми усилительными трактами и дискриминирующими блоками прибора.

Автором вместе с его научным руководителем написана программа на C++ для контроллера платы цифровой обработки сигналов. Автором для наземной отработки и испытаний написана программа для ПК на WinForms/C#, позволяющая оперативно контролировать параметры работы прибора и выходные данные. Впоследствии программа использована для декодирования бинарных данных измерений во время проведения эксперимента на борту спутника.

Автором создана трехмерная модель дозиметра ДЭПРОН в системе Catia и подготовлена для использования в Монте-Карло моделировании. Написана программа на базе пакета Geant4 для математического моделирования характеристик прибора ДЭПРОН, а также программы для моделирования характеристик приборов ДБ-8 и других приборов для радиационных измерений.

Автором разработана статистическая методика определения спектрометрических характеристик приборов на основе полупроводниковых детекторов с использованием данных численного моделирования.

Автором подготовлены программы для анализа данных прибора ДЭПРОН, и программы визуализации данных детекторов прибора. Автором подготовлена методика точной привязки спутниковых данных с прибора ДЭПРОН ко всемирному времени. С использованием оригинальной методики получена полная база данных измерений прибора ДЭПРОН за все время работы прибора. Проведен анализ полученных данных.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях [A1–A4], индексируемых Scopus. Получен патент [A5]. Результаты исследований обсуждались с соавторами, но вклад автора диссертации в статьи A1 и A4 был определяющим. Вклад автора диссертации в статьи A2 и A3 был важен для выполнения работы. Вклад автора диссертации в подготовку патента A5 был существенным.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации с приложением составляет 114 страниц, 57 рисунков и 9 таблиц, общее число наименований литературы во всех главах, включая публикации автора — 124.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во **введении** описаны актуальность исследования, поставленная цель и задачи, требующие решения в работе. Также обоснована научная и практическая значимость, выдвинуты положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** «Обзор дозиметрических исследований радиационной обстановки на околоземных орбитах» изложен обзор литературы по современному состоянию дозиметрических исследований радиационной обстановки в околоземном пространстве, в том числе в высокоширотной области.

Разработан и успешно используется на пилотируемых и автоматических космических аппаратах целый ряд методов дозиметрии. Получена весьма подробная картина распределения радиационных характеристик космического излучения в околоземном пространстве. Однако, данные о распределении мощности дозы за малыми толщинами защиты, в особенности для орбит с большим наклоном, крайне немногочисленны. Вместе с тем в литературе отмечается появление в зоне внешнего радиационного пояса Земли высыпаний релятивистских электронов, которые могут создать потенциально опасные уровни облучения при проведении внекорабельной деятельности космонавтов.

Это свидетельствует о целесообразности экспериментального изучения дозиметрических параметров космического излучения за малой толщиной защиты на космических аппаратах с наклоном орбиты, позволяющим пересекать зону внешнего радиационного пояса на каждом витке. Временное разрешение измерений должно обеспечивать регистрацию возрастаний мощности дозы длительностью порядка 20 секунд, а динамический диапазон измерений – регистрацию мощности поглощенной дозы до 6 мкГр/с.

Во **второй** главе «Приборы и методы исследования» изложены устройство и этапы создания прибора для дозиметрического исследования на спутнике.

Прибор ДЭПРОН разрабатывался как исследовательский инструмент для решения нескольких научных задач. Основной задачей прибора является измерение мощности дозы и потоков ионизирующих излучений. Дополнительными задачами выделены регистрация нейтронов тепловых энергий и высокоэнергичных частиц. Такое сочетание решаемых задач, для прибора относительно небольшого веса, является уникальным и позволяет надеяться на получение достаточно подробной информации о радиационной обстановке на борту КА.

Устройство прибора

В состав прибора ДЭПРОН входят два узла с полупроводниковыми детекторами и два узла с газоразрядными гелиевыми счетчиками нейтронов (Рисунок 1). Также в состав прибора входят узлы усиления и формирования

сигналов от полупроводниковых и нейтронных детекторов и узел цифровой обработки сигналов.



Рисунок 1. — Внутренняя компоновка модулей прибора ДЭПРОН.

Поглощенная доза регистрируется узлами с полупроводниковыми детекторами. Для получения информации о величине поглощенной дозы используется принцип регистрации величины заряда в объеме полупроводника, пропорционального энерговыделению в данном объеме.

Приведены результаты калибровки детекторного и усилительного тракта прибора на источниках излучения.

Получены оценки геометрических факторов и моделирования чувствительности прибора с использованием пакета Geant4. С помощью набора макросов “CATIA-GDML geometry builder” [Belogurov и др., 2011; Belogurov и др., 2014] была подготовлена геометрия прибора ДЭПРОН для использования в среде Geant4 (рисунок 2).

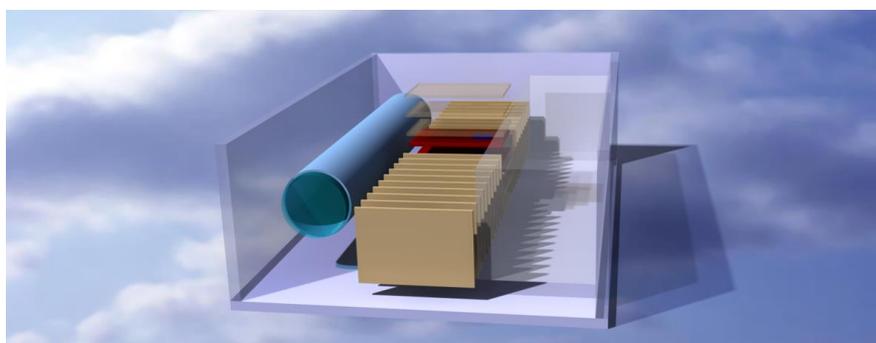


Рисунок 2. — Подготовка модели прибора в САД системе. Для наглядности часть деталей, составляющих корпус модели показаны полупрозрачными.

Проведено Монте-Карло моделирование регистрации падающего излучения детекторами прибора в среде Geant4. На рисунке 2 представлена зависимость расчетной доли регистрируемых частиц от их начальной энергии. Границей чувствительности мы принимаем минимальную энергию, при которой вероятность регистрации составляет 0,01 при изотропном падении электронов – эта величина для электронов равна 1,5 МэВ (рисунок 3). Для второго детектора граница чувствительности составляет 2,2 МэВ.

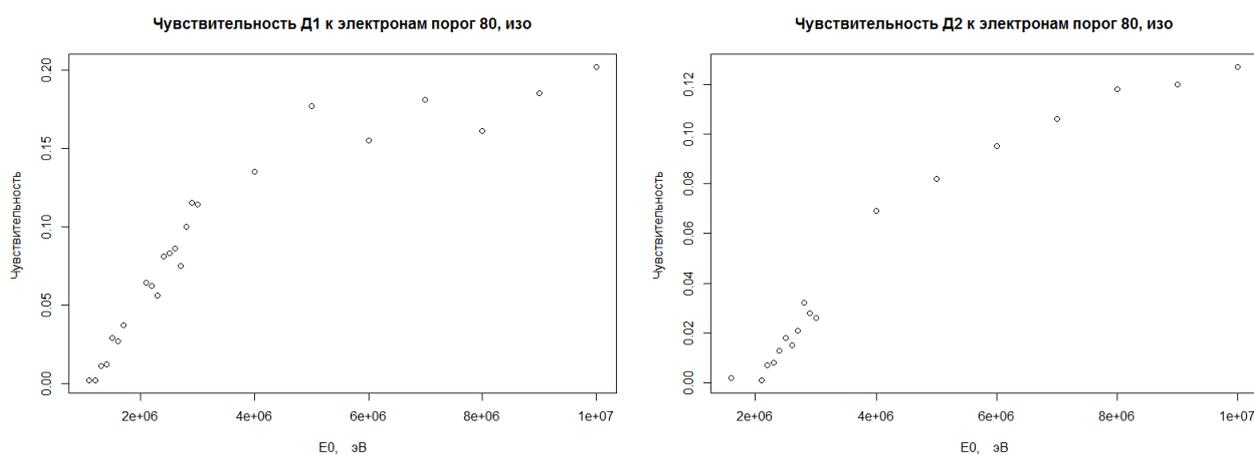


Рисунок 3. Чувствительность полупроводниковых детекторов ДЭПРОН к электронам при изотропном падении. По оси x обозначена энергия первичных частиц, по оси y отношение числа зарегистрированных к числу запущенных частиц.

Для протонов минимальная регистрируемая энергия равна 16,8 МэВ для первого детектора и 21,8 МэВ для второго.

Предложен метод численного моделирования и разработан комплекс программ для исследования телескопической системы детекторов. Статистические методы обработки данных численного моделирования позволяют определить чувствительность и селективность энергетических каналов детекторов.

Разработанная методика численного моделирования с применением комплекса программ OptimSpectrometer может быть эффективно использована для исследования телескопической системы, построенной на основе детекторов разных типов и позволяющей отдельно регистрировать потоки протонов и электронов в достаточно узких интервалах энергосодержания. Статистические

методы обработки данных численного моделирования позволяют уточнить критерии отбора событий, определить чувствительность и селективность отдельных энергетических каналов детектора и выбрать наилучший метод отбора.

В **третьей главе** «Обработка информации с прибора» приводится описание программ для летных испытаний прибора и предобработки данных измерений, полученных при полете.

Автономные испытания ДЭПРОН проходили с момента создания первых версий программно-математического обеспечения до ноября 2011. В ходе этих испытаний были проведены основные калибровки усилительных трактов прибора с помощью генератора сигналов и источников ионизирующего излучения.

Отладка работы прибора в комплексе научной аппаратуры позволяет использовать штатный способ передачи информации по каналу CAN, в это время были опробованы программы для обработки полетных данных.

В результате предполётных и лётных испытаний прибора ДЭПРОН разработано программное обеспечение, позволяющее оперативно анализировать информацию с результатами измерений прибора. Также решен ряд вопросов по точной временной привязке массивов измерений. Решение этих вопросов позволило провести содержательный анализ данных физических измерений.

В **четвертой главе** «Планетарное распределение мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения по данным эксперимента ДЭПРОН на ИСЗ «Ломоносов» приводится анализ полученных в полете данных.

На ИСЗ «Ломоносов» в 2016-2017 гг. были проведены дозиметрические исследования радиационной обстановки на круговой орбите высотой около 500 км и наклоном 98° . В исследовании использовались два полупроводниковых детектора прибора ДЭПРОН.

Получено планетарное распределение мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения на высоте полёта ИСЗ «Ломоносов», которое было разделено на 4 характерных области: зона низких и средних широт и средней широты, зона Южно-Атлантической аномалии, зона внешнего радиационного пояса Земли и высокоширотная зона полярных шапок. Определены

среднесуточные значения мощностей дозы, регистрируемых в течение суток в каждой из этих областей. Наиболее сильные вариации (до порядка величины) испытывает суточная доза во внешнем поясе. Подтверждена связь вариаций мощности дозы во внешнем поясе с уровнем геомагнитной возмущенности.

В таблице 1 приведены медианы, минимальные и максимальные значения распределений поглощенных доз в различных областях за время непрерывной работы прибора с конца мая до конца ноября 2016 года. Для нормально распределенных данных приведены также среднее значения. Как можно видеть, для таких величин средние значения практически совпадают с медианными.

Таблица 1. Суточная доза в различных областях. Период измерений прибора с 25 мая 2016 до 29 ноября 2016

		Область низких и средних широт	Область полярных шапок	Область ЮАА	Внешний радиационный пояс
Верхний детектор, мкГр/сут	Минимум	45	41	460	81
	Медиана	56	47	767	558
	Максимум	85	67	1049	3299
Нижний детектор, мкГр/сут	Минимум	35	35	279	30
	Медиана	42	41	432	42
	Максимум	48	47	557	137
	Среднее	42	41	430	-

Дозы радиации в области низких и средних широт и в области полярных шапок обусловлена, в основном, частицами галактических космических лучей, обладающими значительной проникающей способностью, а также вкладом альбедного излучения [Галкин, 2007]. Поэтому разница доз между первым и вторым детектором незначительный. Для области полярных шапок разница обусловлена также отсутствием солнечных протонных событий во время проведения измерений [Aráthy и др., 2007].

В зоне ЮАА регистрируются, в основном, протоны внутреннего радиационного пояса, спектр которых заметно мягче, чем у ГКЛ. Это сказывается и на разнице доз между первым и вторым детектором. Отношение медианных значений составляет около 56%. Как видно из графиков, представленных на рисунке 4, суточная доза в зоне внешнего пояса (ВП) испытывает значительные

вариации во времени.

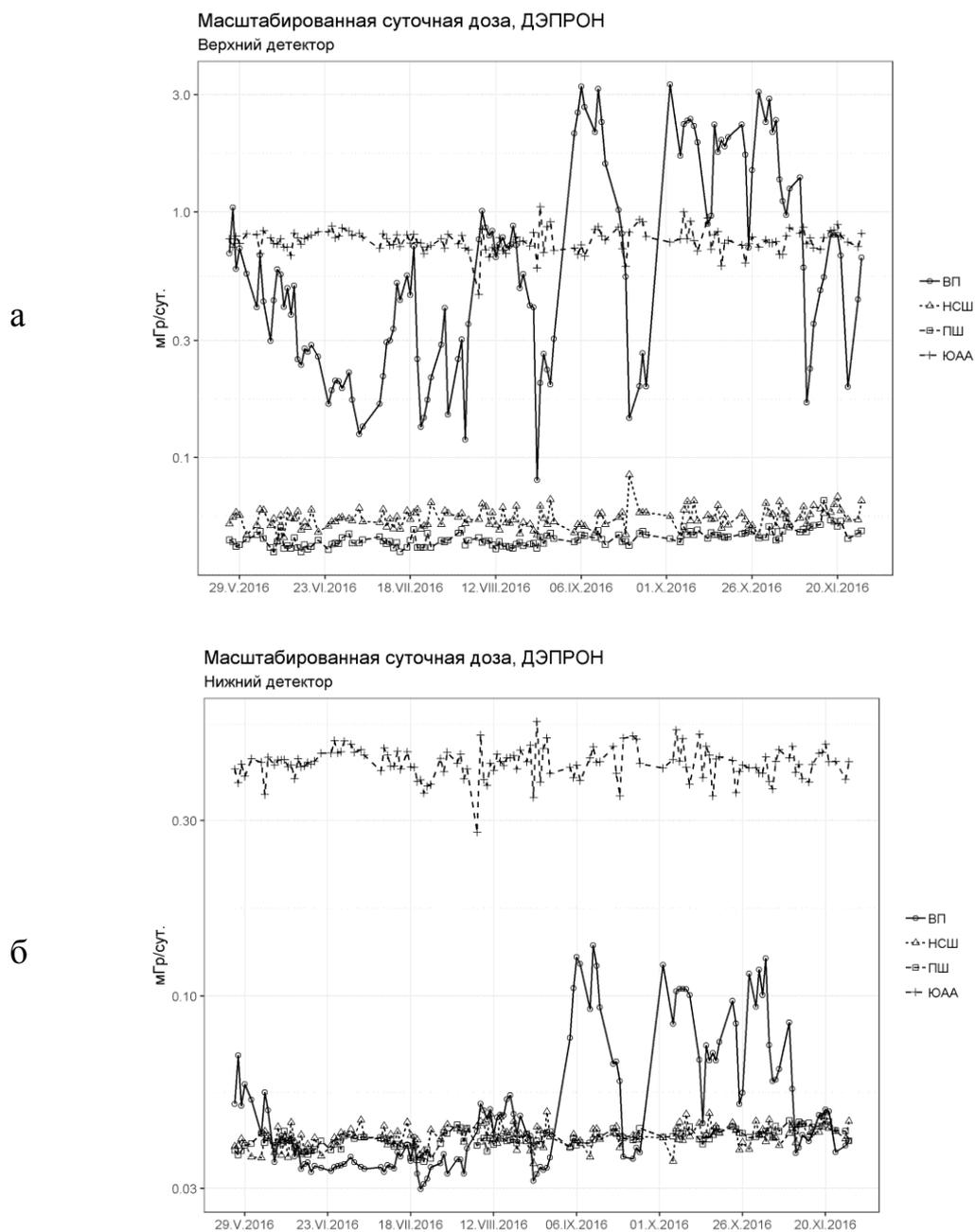


Рисунок 4. — Масштабированная суточная доза, в верхнем (а) и нижнем (б) детекторе ДЭПРОН за 2016. Защищенность верхнего детектора – $0,45 \text{ г/см}^2$, нижнего - $0,81 \text{ г/см}^2$. По оси ординат – мГр/сут. НСШ - область низких и средних широт, ПШ - области полярных шапок, ВП – область внешнего радиационного пояса Земли, ЮАА – область Южно-Атлантической Аномалии.

В зоне внешнего радиационного пояса Земли, где доза обусловлена воздействием электронов, разница доз между первым и вторым детектором составляет больше порядка величины.

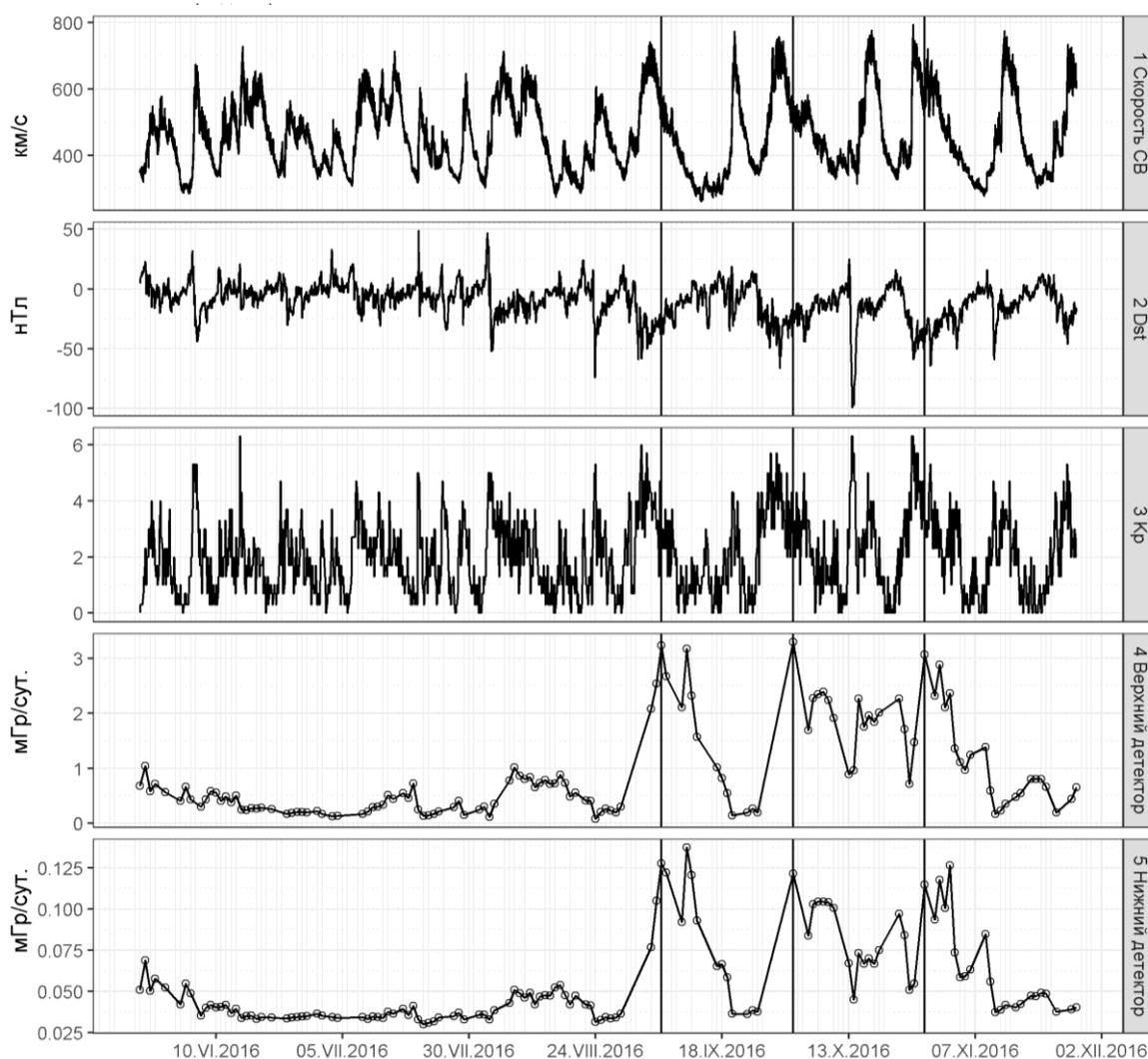


Рисунок 5. — Первая панель – скорость солнечного ветра (*Speed*), км/с, вторая панель –геомагнитный индекс – *Dst*, нТл. Третья панель – планетарный индекс, *Kp*. Четвертая панель –масштабированная суточная доза по ВП в верхнем детекторе ДЭПРОН. Нижняя панель - масштабированная суточная доза по ВП в нижнем детекторе ДЭПРОН.

На графике 5 видна периодичность повышенных доз во ВП, длительность периода примерно равна 25 дней. Вертикальными линиями мы выделили три характерных случая регистрации максимальной дозы во ВП. Максимумы суточной дозы во ВП наблюдаются через несколько дней после прихода высокоскоростного потока солнечного ветра. Максимумы высокоскоростного потока зарегистрированы за 3 дня до выделенных моментов максимальной дозы во ВП.

Три выделенных момента находятся на фазе медленного восстановления

после минимумов в *Dst* индексе. Длительность понижения в *Dst* индексе составляет от 5 до 7 дней до пика в дозе во ВП. При этом начало понижения в *Dst* плавное, продолжается 3-4 дня. Нами замечено, что величина суточной дозы во ВП связана с усредненным - *Dst* за предшествующие 4 дня.

В пятой главе «Возрастания мощности дозы во внешнем радиационном поясе» описаны повышения потоков частиц и мощности дозы длительностью от 10 до 30 секунд. При этом длительность пересечения области $2 < L < 8$ на орбите ИСЗ «Ломоносов» составляет около 200 с. Пример такого возрастания представлен на рисунке 6. Можно видеть плавное увеличение мощности дозы с последующим спадом в области *L* от 3,5 до 5,5 с максимумом около *L*=4, после которого наблюдается сравнительно кратковременный «всплеск» мощности дозы в виде резкого подъема интенсивности около *L*=6.

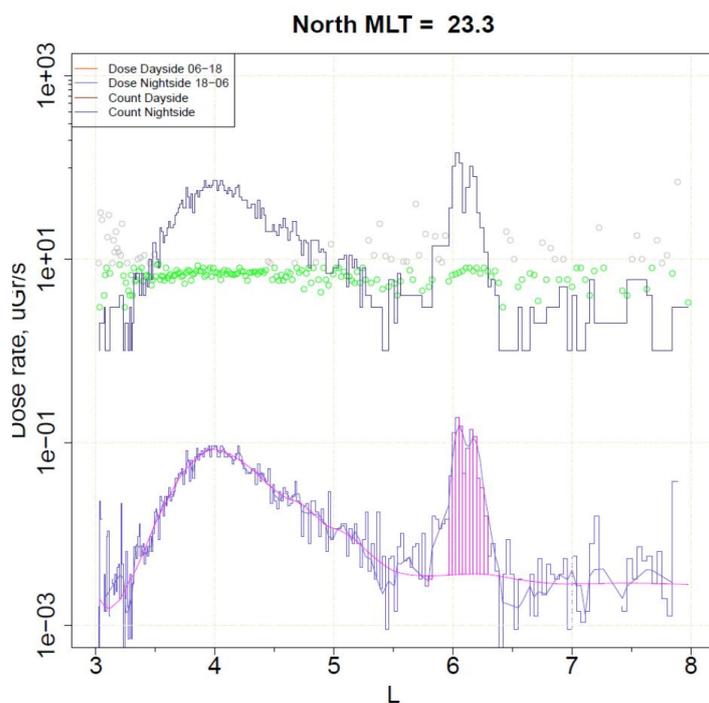


Рисунок 6. — Кратковременное возрастание мощности поглощенной дозы и потока на внешнем крае ($L = 6$) внешнего радиационного пояса. Верхний график – скорость счета в первом детекторе, нижний график – мощность дозы в первом детекторе. Зеленые и серые маркеры – отношение дозы к потоку.

Мы связываем этот «всплеск» с появлением потоков релятивистских электронов. Такое явление возрастаний потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе было описано в начале 1970х годов [Thorne,

Kennel, 1971] и недавно подробно проанализировано по данным спутников POES с 2-х секундным временным разрешением [Yahnin и др., 2016; Yahnin и др., 2017].

Был разработан алгоритм автоматического поиска возрастных в данных прибора ДЭПРОН во время пересечений ВП. Алгоритм поиска для каждого пересечения находит максимум радиационного пояса и максимум кратковременных возрастных дозы. Далее для предполагаемого возрастания подсчитываются суммарная и максимальная доза и ожидаемая доза в области возрастания. Вычисляется разница между измеренной и ожидаемой дозой. Все рассчитанные величины возрастания и максимума ВП были собраны в файл для последующего анализа. Проведен анализ качества работы алгоритма автоматического поиска кратковременных возрастных. Для этого был выбран период измерений с 1 по 9 января 2017 года. Проведено сравнение результатов автоматического поиска с данными, полученными при визуальной оценке графиков. Всего было просмотрено 528 графиков. Получены результаты: Алгоритмом правильно найдено 90% возрастных северного полушария с ночной стороны; найдено 70% возрастных южного полушария с ночной стороны; найдено 80% возрастных северного полушария с дневной стороны; найдено 40% возрастных южного полушария с дневной стороны. Алгоритм правильно определил 77% возрастных во всех секторах орбиты КА. Это позволило использовать его для обработки всего массива данных. Всего за все время работы прибора ДЭПРОН на борту спутника «Ломоносов» были получены данные по 12863 пересечениям зоны внешнего пояса, из них в 1642 случаях были обнаружены кратковременные возрастания мощности дозы.

Данные за период измерений с 1 по 9 января 2017 года были рассмотрены более подробно, как наиболее достоверно классифицированные. На рисунке 7 представлено географическое распределение отобранных кратковременных возрастных мощности дозы на КА «Ломоносов» за этот период.

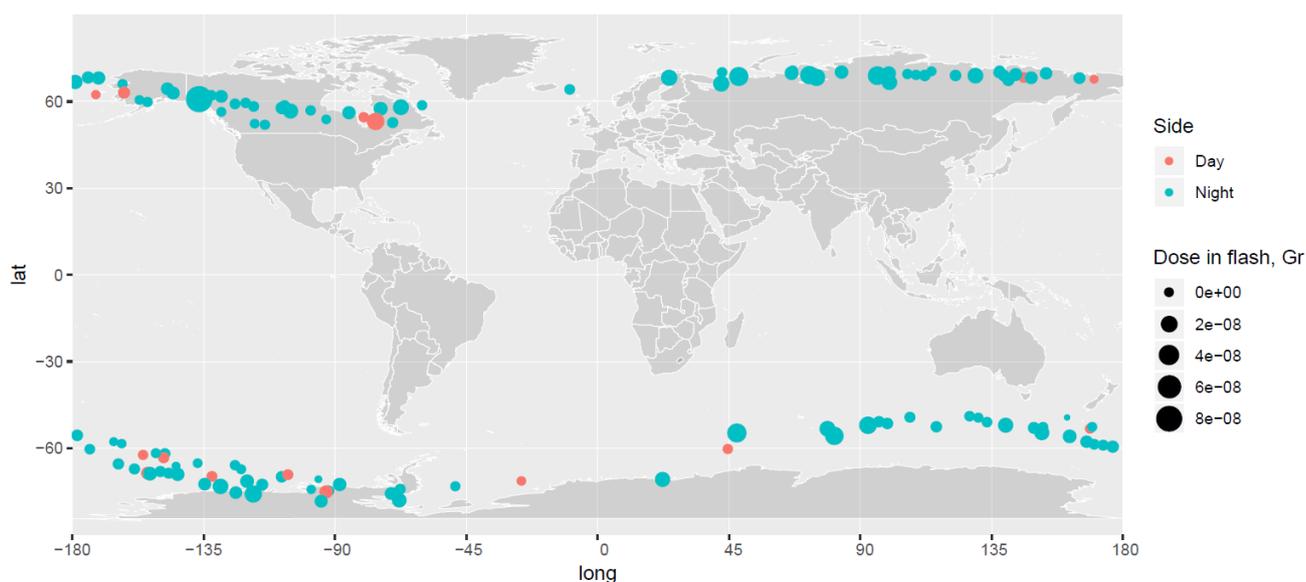


Рисунок 7. — Географическое распределение отобранных кратковременных возрастаний мощности дозы на КА «Ломоносов». Красным цветом показаны возрастания на дневной стороне магнитосферы, синим цветом – на ночной стороне. Величина маркера соответствует суммарной дозе за возрастание.

Из географического распределения (рисунок 7) мы видим, что возрастания наблюдаются в области внешнего радиационного пояса. Возрастания равномерно распределены по полушариям. Возрастания преобладают с ночной стороны магнитосферы. На дневной стороне обнаружены 11% из всех найденных возрастаний.

Таблица 3. Распределение возрастаний по полушариям

	Северное полушарие	Южное полушарие
День	6	8
Ночь	56	53

Интегральная доза в возрастаниях в среднем меньше, чем доза за пересечение ВП. Вклад в дозу при пересечении при наличии возрастаний составил 15%. Вклад возрастаний в дозу ВП за 1-9 января от возрастаний составил 2,5%. Вклад в суточную дозу по всей орбите за 1-9 января от возрастаний составил около 1%.

Проведен анализ геомагнитной обстановки для поиска предпосылок образования потоков энергичных частиц. По геомагнитному индексу SYM/H в

начале рассматриваемого периода (с 1 по 9 января 2017 года) наблюдается геомагнитное возмущение в -75 нТл. Возрастания потоков частиц происходят во второй половине временного периода, через 10 часов после минимума DST (SYM/H). Отклонения индекса SYM/H при наличии возрастаний не велики, до -50 нТл. Длительные периоды пониженного SYMH соответствует большей частоте возрастаний. Также наблюдалось соответствие увеличения скорости солнечного ветра и увеличения частоты наблюдаемых возрастаний.

Так как возрастания наблюдаются в авроральных зонах, в качестве одного из рассматриваемых параметров был выбран AE индекс. Однако сопоставление времени обнаружения возрастаний потоков не выявляет совпадения величины AE с наличием и величиной возрастаний потоков частиц.

Далее полученный на данных января 2017 г. классификатор для поиска возрастаний был применен к данным, полученным за весь период работы прибора ДЭПРОН. Поиск выявил 1642 возрастаний, это составляет 16% пересечений ВП. В северном и южном полушарии найдено сравнимое число возрастаний: 57% - северное и 43% южное полушарие. Возрастания в основном находятся на L около 6, но также найдены и ближе к максимуму ВП около $L=4$, поэтому среднее для всех возрастаний $L=5.4$

Распределение пересечений ВП по MLT бимодальное, это обусловлено орбитальным движением спутника. На дневной стороне Земли пересечения происходят при MLT от 8 до 14, на ночной стороне при MLT от 20 до 2, число дневных и ночных пересечений одинаковое. При этом на ночной стороне найдено больше возрастаний - 86%, чем на дневной стороне 14%. Максимум числа возрастаний находится на MLT ~ 23 ч.

Возрастания наблюдаются весь период измерений, провалы в измерениях несколько дней связаны с отсутствием измерений в эти периоды. Возрастание, зарегистрированное на ночной стороне, регистрируется на нескольких последующих проходах. Это может быть признаком регистрации квазистабильных образований во ВП.

Возрастания наблюдаются весь период измерений, провалы в измерениях

несколько дней связаны с отсутствием измерений в эти периоды. Частота возникновения возрастаний увеличивается во время роста скорости солнечного ветра. Также периоды повышенной частоты наблюдения возрастаний совпадают по времени с повышенной величиной давления солнечного ветра. Однако были выявлены также 3 периода увеличения частоты возрастаний до 1 недели, одновременно с падением скорости солнечного ветра. Такие периоды зарегистрированы в середине июля, начале сентября и начале ноября 2016 г.

Во время регистрации возрастаний в южном полушарии на ночной стороне моментальное значение АЕ в среднем равно 300, тогда как для пересечений без возрастаний оно составляет 190. Во время регистрации возрастаний в северном полушарии на ночной стороне моментальное значение АЕ в среднем равно 230, а для пересечений без возрастаний оно составляет 200. Моментальное значение скорости солнечного ветра и среднее за час не отличается для пересечений с возрастаниями и без них. SYMH индекс понижен для пересечений с возрастаниями, среднее значение SYMH минус 15 по сравнению со средним минус 12 без возрастаний.

Интенсивные возрастания с мощностью дозы в максимуме более 7 мкГр/с наблюдаются при повышенном уровне АЕ. Среднее значение АЕ при регистрации интенсивных возрастаний 410, тогда как среднее за период измерений АЕ = 200.

Проведенный анализ дал следующие результаты:

1. Кратковременные возрастания на внешнем крае внешнего пояса потоков заряженных частиц и дозы наблюдаются в 16% пересечений ВП (25% в январе 2017) и большая их часть находятся на L~6
2. Вклад возрастаний при пересечении ВП составил 15%, в дозу ВП за январь 2017 – 2,5%, а в суточную дозу не превышает 1%, поэтому возрастания не представляют серьезной радиационной опасности для экипажа КА
3. Частота возникновения возрастаний увеличивается во время роста скорости солнечного ветра и при повышенной величине давления солнечного ветра
4. Возрастания регистрируются подряд, в течение нескольких оборотов спутника, а при спокойной геомагнитной обстановке АЕ < 500

наблюдаются периоды когда всплески отсутствуют несколько витков подряд

5. Количество возрастаний в северном полушарии и в южном почти одинаково, при этом на ночной стороне число возрастаний на порядок больше
6. Интенсивные возрастания > 7 мкГр/с наблюдаются при повышенном уровне АЕ индекса

Заключение

В процессе разработки аппаратуры для радиационного мониторинга на борту высокоширотного спутника были выделены основные требования к дозиметру, которые позволили создать прибор ДЭПРОН, для дозиметрического мониторинга радиационной обстановки.

Построено планетарное распределение мощности поглощенной дозы в ходе эксперимента. Планетарное распределение разбито на области пространства, содержащие внешний радиационный пояс, внутренний радиационный пояс, области низких и средних широт и полярные шапки. Каждая из областей проявляет существенно различную динамику накопления дозы. Показано что суточная доза во внешнем радиационном поясе испытывает значительные изменения от 0,2 мГр до 3,5 мГр за защитой 0,45 г/см² (от 0,01 мГр до 0,013 мГр для нижнего детектора за защитой 0,81 г/см²).

Получены новые результаты по всплескам интенсивности потоков заряженных частиц, которые наблюдаются в основном на ночной стороне магнитосферы. За время наблюдений выделено и исследовано 1642 всплеска. Максимальные мощности дозы во время всплесков являются максимумами мощности дозы за день в полярной области для обоих детекторов. Вклад в суточные дозы в авроральных областях от всплесков не превышает 1%.

Результаты:

1. Разработан прибор ДЭПРОН для радиационного мониторинга на борту спутника «Ломоносов»;
2. Проведено моделирование характеристик прибора, для этого разработан метод и программа для оценки чувствительности телескопов детекторов излучения;
3. Проведена обработка и анализ данных измерений прибора ДЭПРОН, полученных в полете спутника, сформированы массивы экспериментальных данных;
4. На орбите с наклоном 98° и высотой около 500 км, при толщине защиты $0,45 \text{ г/см}^2$ вклад в суточную дозу за счет прохождения областей внешнего пояса сопоставим с вкладом в ЮАА. При увеличении толщины защиты до $0,81 \text{ г/см}^2$ вклад во внешний пояс падает на порядок величины и становится сравним с вкладом от ГКЛ;
5. Наблюдаются вариации суточной дозы во внешнем поясе, которые для толщины защиты $0,45 \text{ г/см}^2$ могут достигать порядка величины, наибольшие значения наблюдаются в период геомагнитных возмущений;
6. На спутнике «Ломоносов» наблюдаются кратковременные интенсивные возрастания мощности дозы в области внешнего пояса. Частота появления возрастаний увеличивалась во время роста скорости солнечного ветра и при повышенной величине давления солнечного ветра;
7. За 6 месяцев проведения эксперимента на спутнике «Ломоносов» вклад кратковременных интенсивных возрастаний мощности дозы в суточную дозу во внешнем поясе не превышал 1% для защиты $0,45 \text{ г/см}^2$.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Необходим более подробный анализ данных измерений с попыткой разделить пространственные и временные явления. А также требуется подробный анализ связи вариации радиационной обстановки с условиями в солнечном ветре и изменениями в магнитосфере.

Отдельное направление работ – анализ имеющихся данных по спектрам энерговыделений в детекторах для вклада различных видов излучения в эквивалентную дозу.

Обнаруженные вариации радиационной мощности дозы в области внешнего радиационного пояса получены для ограниченного периода времени в течении полугода в период низкого уровня солнечной и геомагнитной активности. Целесообразно продолжить исследование дозиметрической обстановки в условиях малой защищенности, предусмотрев проведение следующих экспериментов таким образом, чтобы попытаться более подробно проанализировать кратковременные процессы в магнитосфере.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых журналах, индексируемых RSCI и SCOPUS:

A1. Numerical simulation of metrological characteristics of cosmic radiation detectors / **I. A. Zolotarev**, L. S. Novikov, V. I. Osedlo et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2017. — Vol. 8, no. 2. — P. 222–228. [DOI <http://dx.doi.org/10.1134/S2075113317020241>] IF(SCOPUS) = 0,75

A2. An experiment in radiation measurement using the DEPRON instrument / V. V. Benghin, O. Y. Nechaev, **I. A. Zolotarev** et al. // *Space Science Reviews*. — 2018. — Vol. 214, no. 1. — P. 1–20. [DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-017-0445-6>], IF (SCOPUS) = 8

A3. Dose Rate Bursts Onboard the ISS and the “Lomonosov” Satellite in the Earth’s Outer Radiation Belt / Antonyuk G.I. , Benghin V. V., Dachev T. P., Nechaev O. Yu., **Zolotarev I. A.**, Petrov V. L. // *Problems of Geocosmos–2020*. : Springer, Cham, 2022. С. 351–363. Part of the *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences* book series (SPEES) [DOI http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-91467-7_26] IF (SCOPUS)=нет.

A4. Planetary Distribution of the Space Radiation Dose Rate Based on Results of the DEPRON Experiment Onboard the Lomonosov Satellite / **I. A. Zolotarev**, V. V. Benghin, B. Yu. Yushkov, O. Yu. Nechaev, V. L. Petrov & I. V. Yashin // *Cosmic Research*, 2022. Т. 60. № 2. С. 99–104. [DOI <http://dx.doi.org/10.1134/S0010952522020071>] IF (SCOPUS)= 0,544

Патент:

A5. СПЕКТРОМЕТР ЭНЕРГИЧНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ (СПЭР)/ **Брильков (Золотарев) И. А.**, Оседло В. И., Панасюк М. И., Рубинштейн И. А., Тулупов В. И. // 2015. Заявка № 2015149253, патент RU165028U1.

Список литературы

1. Apáthy I. и др. TL dose measurements on board the Russian segment of the ISS by the «Pille» system during Expedition-8, -9 and -10 // Acta Astronaut. 2007. Т. 60. № 4- 7 SPEC. ISS. С. 322–328, doi:10.1016/j.actaastro.2006.09.037.
2. Belogurov S. и др. CATIA-GDML geometry builder // J. Phys. Conf. Ser. 2011. Т. 331. № 3. С. 032035, doi:10.1088/1742-6596/331/3/032035.
3. Belogurov S. и др. Development and application of CATIA-GDML geometry builder // J. Phys. Conf. Ser. 2014. Т. 513. № 2. С. 022003, doi:10.1088/1742-6596/513/2/022003.
4. Thorne R.M., Kennel C.F. Relativistic electron precipitation during magnetic storm main phase // J. Geophys. Res. 1971. Т. 76. № 19. С. 4446–4453, doi:10.1029/JA076I019P04446.
5. Yahnin A.G. и др. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2016. Т. 121. № 9. С. 8286–8299, doi:10.1002/2016JA022765.
6. Yahnin A.G. и др. Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2017. Т. 122. № 9. С. 9169–9182, doi:10.1002/2017JA024249.
7. Брильков И.А. и др. Пат. 165028 Российская Федерация, МПК G01T 3/00, Спектрометр энергичной космической радиации (СПЭР). № 2015149253/28; заявл. 17.11.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27 – 10 с. // 2015. № 19.
8. Галкин В.И. Излучение на малых высотах. // Модель космоса. Том 1. / под ред. М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. , 2007. Вып. КДУ Москва. 852 с.
9. Статья о РОС. РКК «Энергия» разработает несколько версий новой российской орбитальной станции [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax.ru/world/817871> (дата обращения: 22.04.2022).
10. ФКП. Постановление Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230. Федеральная космическая программа России на 2016 – 2025 годы. , 2016.