

На правах рукописи



Чирская Наталья Павловна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ГЕТЕРОГЕННЫМИ
МИКРОСТРУКТУРАМИ**

Специальность:

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре физики космоса физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель:

Новиков Лев Симонович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом ядерных и космических исследований НИИЯФ МГУ, Москва

Официальные оппоненты:

Сакута Станислав Борисович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отделения ядерной физики и пучковых технологий (ОЯФиПТ) института общей ядерной физики ФГУП Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

Тютнев Андрей Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической химии и экологии Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ), Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.М. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва

Защита диссертации состоится «__» _____ 2014 г. в __ часов на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 5 («19-й корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова, Ломоносовский проспект 27, Москва.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.77
на базе МГУ им. М.В. Ломоносова
профессор

С.И. Страхова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Воздействие на космические аппараты (КА) потоков электронов и ионов с энергиями выше $\sim 0,1$ МэВ, входящих в состав радиационных поясов Земли (РПЗ), солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ), которые относят к основным составляющим ионизирующего излучения космического пространства, или космической радиации, является одной из главных причин возникновения отказов в работе бортового оборудования КА и уменьшения сроков активного существования аппаратов. На материалы и элементы оборудования, находящиеся на поверхности КА, значительное радиационное воздействие оказывают также электроны и ионы горячей магнитосферной плазмы с энергиями $\sim 1-100$ кэВ. Согласно имеющимся оценкам, воздействием космической радиации обусловлено от 30 до 50 % аномалий в работе бортового оборудования КА.

С развитием космической техники происходит усложнение бортового оборудования КА и насыщение его большим количеством элементов микроэлектроники с высокой степенью интеграции. Многие современные и перспективные КА проектируются в негерметичном исполнении, т.е. они лишены общего корпуса, защищающего внутренние отсеки с расположенным в них оборудованием от воздействия космической радиации. Важным современным направлением в развитии космической техники является создание малых КА разных классов, которые, как правило, также являются негерметичными. Все эти факторы приводят к увеличению чувствительности оборудования КА к радиационным воздействиям.

В то же время происходит повышение требований к срокам активного существования КА, которые могут устанавливаться на уровне 15-20 лет, и к надежности аппаратов.

В этих условиях важнейшую роль при проектировании КА, оценке радиационной стойкости бортового оборудования и прогнозировании сроков активного существования аппаратов начинает играть математическое моделиро-

вание воздействия различных компонентов космической радиации на КА, позволяющее определять с высокой точностью значения поглощенных доз космической радиации в элементах оборудования и достаточно малых объемах материалов. Такой подход к оценке радиационных воздействий на КА все в большей степени заменяет широко использовавшуюся в недавнем прошлом методику расчетной оценки средних для КА значений поглощенной дозы за защитными экранами простой конфигурации.

Помимо микросхем с высокой степенью интеграции, при создании современных и перспективных КА в составе оборудования используется значительное количество разнообразных сенсоров и устройств, содержащих микро-размерные элементы, а в конструкции КА применяются новые полимерные композиты с нано- и микро-размерными наполнителями, многослойные тонкопленочные изделия и покрытия различного назначения, тонкостенные сотовые конструкции и другие новые материалы и элементы, радиационное воздействие на которые требуют детального изучения.

По мере усложнения оборудования и конструкции КА возникает необходимость доведения степени пространственной детализации расчета поглощенных доз до микронных и субмикронных масштабов.

Следует отметить, что точные расчеты с высоким пространственным разрешением необходимы не только при определении значений поглощенной дозы, но также при вычислении величин объемного электрического заряда, возникающего в диэлектрических материалах КА под действием ионизирующих излучений, и спектров линейной передачи энергии, используемых при анализе одиночных радиационных сбоев в элементах микроэлектроники.

Поэтому развитие методов математического моделирования взаимодействия космических излучений с неоднородными микроструктурами, присутствующими в элементах оборудования и конструкции КА, и проведение с использованием этих методов расчетов для реальных КА является весьма актуальным для анализа широкого круга проблем, связанных с радиационными воз-

действиями.

Важно подчеркнуть, что в настоящей работе такой анализ проводится с единых методических позиций с использованием универсального комплекса методов и программных средств численного моделирования. Выбранный подход позволяет успешно решать и многие смежные задачи, связанные, например, с воздействием холодной ионосферной плазмы на полимеры и полимерные композиты.

Целью диссертационной работы является исследование расчетно-теоретическими методами процессов взаимодействия космических корпускулярных излучений с энергиями $\sim 10^5 - 10^8$ эВ и частиц ионосферной плазмы с полимерными микрокомпозитами и многослойными тонкопленочными элементами конструкции и оборудования КА с последующей выработкой рекомендаций по повышению стойкости современных и перспективных КА к воздействию космических излучений.

Новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты диссертации

1. Численными методами с использованием программных комплексов GEANT, SRIM/TRIM, MULASSIS и др. исследованы радиационно-защитные свойства различных по структуре и составу полимерных микрокомпозитов и многослойных экранов. Показано, что применение полимерных композитов с наполнителями на основе легких элементов (H, B и др.) позволяет существенно улучшить характеристики защитных экранов за счет снижения эффективности образования вторичных нейтронов в веществе экранов. Установлено, что степень ослабления потока ионизирующего излучения слоистыми структурами зависит от последовательности расположения материалов с отличающимися физическими свойствами (Al, W), но при числе слоев более 4–6 она определяется усредненными параметрами вещества экрана.

2. Рассчитаны энергетические спектры и угловые распределения заряженных частиц, прошедших через сотовые элементы конструкции КА при изо-

тропном падении потоков электронов РПЗ с распределенными энергетическими спектрами и для моноэнергетических пучков электронов. Установлена определяющая роль процессов многократного рассеяния электронов стенками сотовой структуры в ослаблении исходного электронного потока.

3. Обнаружено и исследовано явление формирования биполярных электрических слоев в тонких (толщина слоев ~ 100 мкм) многослойных структурах типа «металл-диэлектрик-металл», характерных, например, для кабельных сетей космических аппаратов. Показано, что этот эффект обусловлен возникновением δ -электронов в материалах под действием первичного пучка электронов с энергиями 1–10 МэВ.

4. Разработана и апробирована новая методика определения эффективности регистрации электронов РПЗ телескопическими детектирующими системами на основании истинных потерь энергии электронов в детекторах. Показаны значительные преимущества предложенной методики расчета эффективности регистрации по сравнению с традиционно применяемой методикой расчетов с применением значений средних потерь энергии.

5. С использованием полученных в НИИЯФ МГУ экспериментальных данных построена количественная модель эрозии полимерных композитов под действием пучков атомов кислорода с энергиями 5–30 эВ при плотности потока $\sim 10^{15} - 10^{16}$ см⁻²с⁻¹ и значениях флюенса $10^{19} - 10^{21}$ см⁻². С помощью созданной модели показано, что при фиксированном количестве вещества наполнителя потери массы полимера снижаются с уменьшением диаметра частиц наполнителя.

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим при выборе расчетных методов, выполнении работ по программированию геометрии исследуемых структур, моделировании воздействия излучений и интерпретации полученных результатов.

Научная новизна работы

Впервые исследованы радиационно-защитные свойства современных сотовых элементов конструкции КА для случаев облучения их изотропными по-

токами электронов РПЗ с распределенными энергетическими спектрами и моноэнергетическими пучками электронов.

Разработана новая методика определения эффективности регистрации электронов РПЗ телескопическими детектирующими системами с использованием истинных потерь энергии электронов в детекторах, обладающая значительными преимуществами по сравнению с традиционно применяемой методикой расчетов на основании средних потерь энергии электронов.

Впервые обнаружено и исследовано явление формирования биполярных электрических слоев в тонких (толщина слоев ~ 100 мкм) многослойных структурах типа «металл-диэлектрик-металл», обусловленное возникновением δ -электронов в материалах под действием первичного пучка электронов с энергиями 1-10 МэВ.

На основании полученных в НИИЯФ МГУ экспериментальных данных построена количественная модель эрозии полимерных материалов под действием пучков атомов кислорода с энергиями 5–30 эВ при плотности потока $\sim 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и значениях флюенса $10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Созданная модель применена для исследования особенностей разрушения полимерных микрокомпозитов в зависимости от размера и распределения в матрице частиц наполнителя при разных углах падения атомов кислорода.

Научная и практическая значимость работы

В диссертации на основании сопоставительного анализа методов математического моделирования разработана обобщенная схема моделирования воздействий космической радиации на материалы и элементы оборудования КА с использованием современных алгоритмов и программных комплексов. Применение совокупности выбранных расчетных методов к сформулированным в работе задачам позволило выработать ряд практических рекомендаций по оптимизации параметров радиационно-защитных экранов и тонкослойных элементов оборудования, повышению стойкости полимерных композитов к воздействию космической плазмы.

Результаты исследования обнаруженного явления формирования биполярных электрических слоев в многослойных структурах «металл-диэлектрик-металл» позволили значительно повысить точность определения условий возникновения электростатических разрядов в элементах кабельных сетей и другого оборудования КА, а также устранить методические ошибки при проведении лабораторных испытаний подобных структур на электронных ускорителях.

Разработанная методика определения эффективности регистрации электронов телескопическими детекторами позволила повысить точность лабораторной калибровки аппаратуры КА и достоверность интерпретации результатов измерений потоков электронов с помощью КА, функционирующих на низких и высоких околоземных орбитах.

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

21st Annual Student Conference «Week of doctoral student 2012», Prague, 2012; 12th International Symposium on Materials in the Space Environment, ESA-ESTEC Noordwijk, 2012; International conference on Computational modelling of nanostructured materials (ICCMNM-2013), Frankfurt am Main, 2013; IX, X, XII-XIV Межвузовских научных школах молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», Москва, 2008, 2009, 2011 – 2013; XIX, XXI и XXII Международных конференциях «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 2009, 2011, 2012; 2-й Всероссийской научной школе для молодежи «Концентрированные потоки энергии в индустрии наносистем материалов и живых систем», Москва, 2009; 1-й и 2-й Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых «Функциональные наноматериалы для космической техники», Москва, 2010, 2011; XVIII, XIX Международных конференциях по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям (ESACCEL), Обнинск, 2010, 2012; 9-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым

телом», Минск, 2011; IX Курчатовской молодежной научной школе, Москва, 2011; XI Российско-Китайском Симпозиуме с элементами научной школы для молодежи «Новые материалы и технологии», Санкт-Петербург, 2011.

Публикации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 26 печатных работах, в том числе в 7 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК, в 17 докладах в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 5 разделов и Заключения, изложена на 129 страницах и содержит 67 рисунков, 9 таблиц и 131 библиографическую ссылку.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость результатов, представлена структура диссертации.

В **Разделе 1** описаны основные методы математического моделирования трехмерного пространственного распределения поглощенной дозы и внедренного электрического заряда в неоднородных структурах конструкции КА: лучевые модели и модели, основанные на использовании метода Монте-Карло. Представлена разработанная обобщенная схема моделирования радиационных воздействий на материалы и элементы оборудования КА (рисунок 1).

Лучевые методы расчета чаще применяются при проведении инженерных расчетов и обладают меньшей точностью, но гораздо *большой* скоростью счета, чем модели, использующие метод Монте-Карло. Кроме того, в лучевых моделях результат счета представляет собой усредненное значение, в то время как при использовании метода Монте-Карло могут быть получены данные об отдельных событиях. Для решения задач диссертационной работы выбраны программные комплексы GEANT3.21, GEANT4.9.4, TRIM/SRIM и программа DICTAT онлайн-проекта SPENVIS.

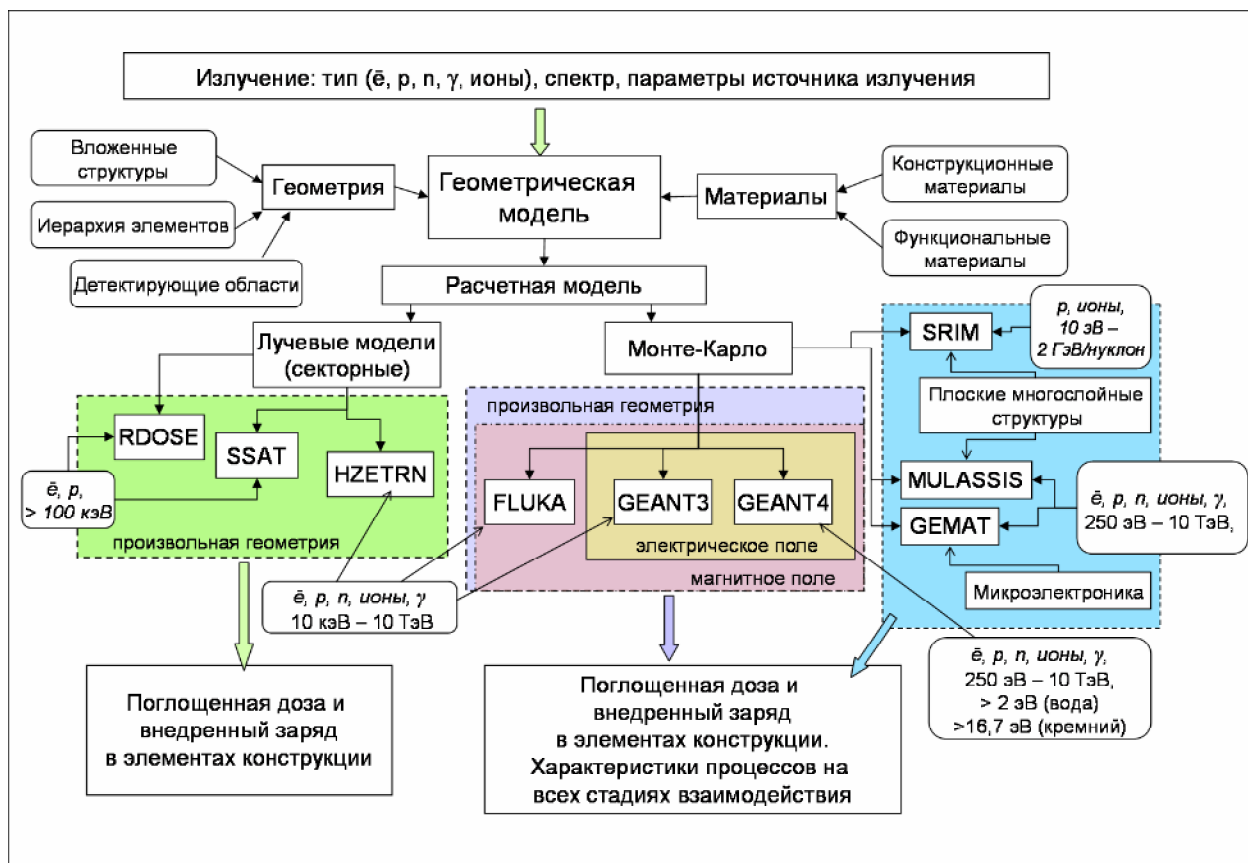


Рисунок 1. Обобщенная схема моделирования радиационных воздействий на материалы и элементы оборудования КА

Рассмотрены характерные примеры и особенности использования комплекса GEANT для моделирования воздействия космических излучений на материалы и элементы оборудования КА.

Выполненные расчетные оценки показали, что при прохождении пучков протонов с энергиями 100 МэВ, 50 МэВ и 10 МэВ через типичные для космической техники материалы с сильно отличающимися свойствами (алюминий и полиэтилен) основную роль в поглощении энергии пучков играют ионизационные потери. Для мишени из алюминия доля энергии, передаваемой нейтронам и ядрам отдачи, составляет ~4,5% от полного потока энергии при исходной энергии протонов 100 МэВ, ~1,5% при энергии протонов 50 МэВ и ~0,12% - при энергии 10 МэВ. Для мишени из полиэтилена эти величины составляют ~4,4%, ~1,2% и ~0,06% соответственно.

В Разделе 2 с помощью программных комплексов GEANT и TRIM исследованы радиационно-защитные свойства композиционных материалов и соото-

вых конструкционных материалов КА при воздействии на них потоков электронов и протонов.

Проведено моделирование распределения поглощенной дозы в микроструктурах, характерных для новых композиционных материалов космической техники при облучении электронами и протонами. Исследованы радиационно-защитные свойства полимерных композитов, применение которых в ряде случаев является более эффективным по сравнению с традиционно используемыми экранами из алюминия. Показано, что структура композита определяет особенности пространственного распределения поглощенной энергии излучения, однако радиационно-защитные свойства композитов определяются усредненным химическим составом и плотностью материала. Увеличение содержания в композиционном материале легких элементов (В, Н) приводит к улучшению его радиационно-защитных свойств за счет малых сечений образования вторичных нейтронов в ядерных взаимодействиях протонов с атомами материала экрана.

Выполнено математическое моделирование процессов прохождения электронов и протонов с энергиями, характерными для космических излучений ($\sim 0,1-10$ МэВ), через различные слоистые экраны. Для двухслойных экранов, состоящих из металлических материалов с отличающимися физическими свойствами (Al, W), показано, что последовательность расположения слоев может играть существенную роль в ослаблении воздействующего потока ионизирующего излучения. При этом в зависимости от порядка размещения слоев и вида излучения эффективность ослабления потока энергии такими экранами может быть выше, чем для однородных экранов из эквивалентного сплава Al и W. Различие в свойствах двухслойных структур Al/W и W/Al определяется различием в характере преобразования спектра потока ионизирующего излучения первым и вторым слоем материала (рисунок 2). Показано, что при количестве слоев более 4–6 роль чередования материалов снижается, а степень ослабления потока ионизирующего излучения определяется усредненными параметрами вещества экрана.

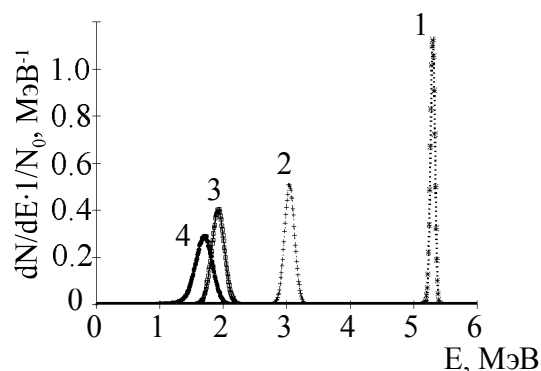


Рисунок 2. Спектры первичных протонов ($E_0 = 6$ МэВ) после прохождения каждого слоя при различном порядке чередования слоев Al и W: 1 – Al/W после слоя 1; 2 – W/Al после слоя 1; 3 – Al/W после слоя 2; 4 – W/Al после слоя 2

Анализ защитных свойств многослойных биметаллических экранов Вi/Si (количество слоев: 24, 36 и 392) и полимерных экранов с добавлением карбида бора (от 6 до 60 слоев) при воздействии электронов и протонов показал, что в обоих случаях равномерное распределение материалов по объему оказывается более эффективным, чем распределение по большому количеству тонких чередующихся слоев.

Исследованы радиационно-защитные свойства современных сотовых конструкционных материалов (рисунок 3) для случаев облучения их электронами РПЗ и моноэнергетическими пучками электронов.



Рисунок 3. Модель сотового конструкционного материала

Для изотропного потока электронов РПЗ проведены расчеты эффективности поглощения энергии в сотовых панелях различной конфигурации. Эффективность поглощения энергии определялась как отношение прошедшего через данную толщину экрана потока энергии P к полному потоку энергии P_0 падающего на экран излучения. Как видно из рисунка 4, изменение параметров внешних пластин панели (рисунок 4а) или увеличение толщины стенок ячеек сотовой структуры (рисунок 4б) значительно увеличивает эффективность по-

глощения энергии электронного излучения.

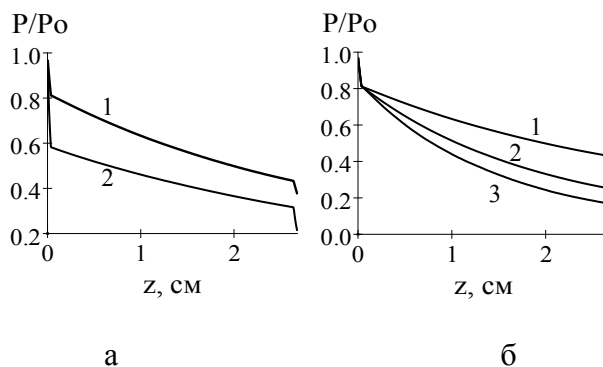


Рисунок 4. Эффективность поглощения энергии электронов в сотовой панел: а – в зависимости от выбора материала внешних пластин (толщина стенок сотовой конструкции 0,1 мм): 1 - углепластик; 2 – алюминий; б – в зависимости от толщины стенок: 1 – 0,1 мм; 2 - 0,2 мм; 3 – 0,3 мм (внешние пластины из углепластика)

Вычислены толщины алюминия, эквивалентные сотовым панелям по эффективности поглощения энергии электронов РПЗ. Получены угловые и энергетические характеристики электронов, прошедших через сотовую панель и эквивалентный слой алюминия.

В условиях облучения сотовых панелей изотропными потоками электронов определяющую роль в ослаблении потока радиации играет внутренняя сотовая структура материала. При воздействии нормально падающего потока электронов радиационно-защитные свойства сотового материала определяются главным образом толщиной внешних обкладок панели, а внутренняя сотовая структура практически не участвует в ослаблении потока радиации.

В Разделе 3 представлены результаты исследования процессов накопления объемного электрического заряда и условий образования электрического пробоя в тонкослойных элементах кабельной сети под воздействием электронов с энергиями в диапазоне 0,1-10 МэВ.

Показано, что при воздействии моноэнергетических потоков электронов с энергиями 5-10 МэВ в тонкослойных структурах металл-диэлектрик-металл может происходить процесс накопления положительного заряда. Накопление положительного электрического заряда обусловлено процессами образования и выхода из объема модели вторичных электронов. Рассчитанные распределения

внедренного заряда в поперечном сечении модели одиночного проводника, состоящего из внешней проводящей оплетки (0,1 мм), тонкого изолирующего слоя (0,05 мм) и внутренней медной жилы (0,9 мм), показаны на рисунке 5.

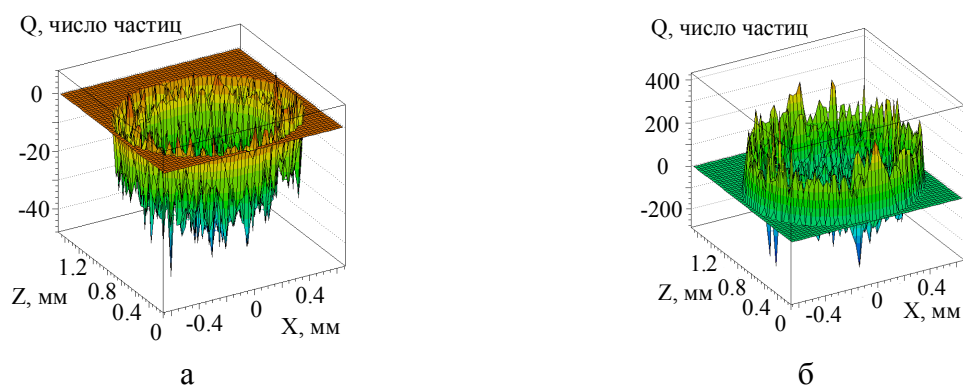


Рисунок 5. Распределение внедренного заряда в поперечном сечении модели одиночного проводника при облучении изотропным потоком электронов с энергией $E=5$ МэВ: а – без учета эффекта образования вторичных частиц; б – с учетом эффекта образования вторичных частиц. Заряд выражен в единицах заряда электрона

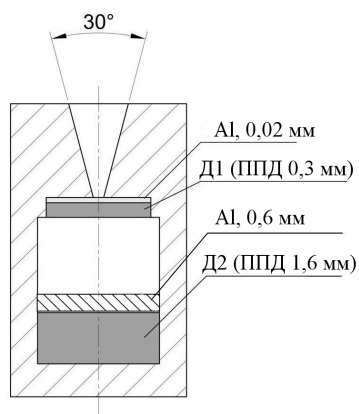
В случае облучения модели одиночного проводника электронами со спектром, характерным для электронов РПЗ, значительная часть первичных электронов останавливается во внешней металлической оплетке проводника, накопления положительного заряда не происходит. Отличия в распределениях объемного заряда объясняют сильное расхождение пороговых значений флюенса электронов, вызывающих электрический пробой в лабораторных и натуральных условиях. С помощью программы DISTAT проведено дополнительное исследование объемной электризации и электрических пробоев диэлектриков с заземлением металла.

Проведен расчет величин объемных электрических зарядов, накапливающихся в элементах кабельной сети КА при облучении моноэнергетическими потоками электронов с энергиями 1-10 МэВ, а также в случае применения рассеивающих алюминиевых экранов толщиной 5-12 мм. С ростом исходной энергии электронов увеличивается доля положительно заряженных диэлектрических и проводящих элементов модели кабельной сети. На основе полученных данных даны рекомендации по выбору режимов облучения кабеля при проведении лабораторных испытаний на электростатическом ускорителе электронов.

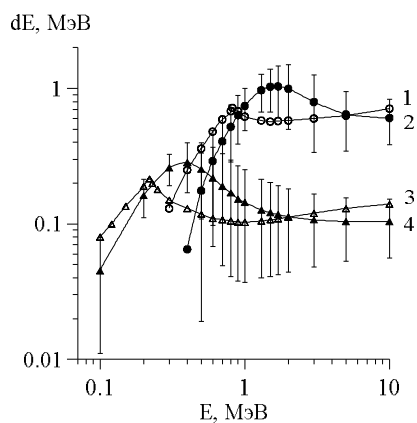
Так, для получения отрицательных зарядов в диэлектрических элементах модели при облучении электронами с энергией 10 МэВ следует использовать рассеивающие экраны из алюминия толщиной 10-12 мм.

В Разделе 4 представлены результаты исследования характеристик телескопических спектрометров и калориметрических детекторов. Описана разработанная методика расчета метрологических характеристик телескопических детекторов при регистрации электронов.

Модель исследуемой телескопической системы, состоящей из двух кремниевых полупроводниковых детекторов, показана на рисунке 6а. Расчеты проводились для двух вариантов геометрии: для полной трехмерной модели телескопической системы и для упрощенной модели без коллиматора и с увеличенной площадью детектирующих слоев. При регистрации протонов границы энергетических диапазонов телескопического детектора устанавливаются на основе зависимостей средних потерь энергии частиц от их исходной энергии. Использование классической методики определения границ энергетических диапазонов при регистрации электронов сопряжено со значительными ошибками из-за сильного разброса значений потерь энергии электронов в веществе детектора (рисунок 6б). Более высокая точность определения метрологических параметров детектирующей системы может быть достигнута, если в качестве характеристики детектирующей системы рассматривать эффективность регистрации, равную отношению числа зарегистрированных детектором частиц N к числу частиц N_0 , попавших в детектор. При таком подходе корректно учитывается разброс значений потерь энергии электронов в материале детектора, являющийся главным источником ошибок при определении метрологических параметров детектирующей системы.



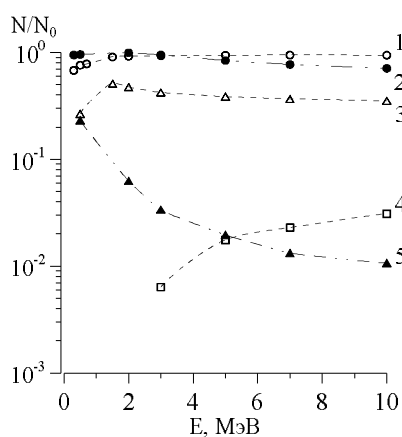
а



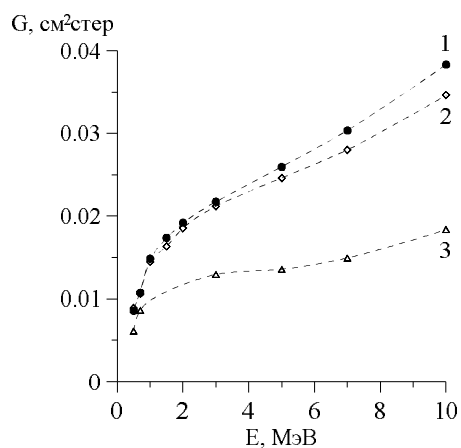
б

Рисунок 6. Расчетная модель исследуемой телескопической системы (а) и зависимость потерь энергии в первом (кривые 3,4) и втором (кривые 1,2) детекторах телескопической системы от энергии регистрируемых электронов (б): аналитический (1,3) и численный (2,4) расчет

Рассчитанные зависимости эффективности регистрации электронов от их энергии в первом детекторе открытой (без коллиматора) телескопической системы при разных порогах регистрации показаны на рисунке 7а. На основании сопоставления результатов прямого расчета методом Монте-Карло числа регистрируемых частиц детектором без коллиматора и с коллиматором определен геометрический фактор прибора (рисунок 7б). При таком методе определения геометрический фактор детектора зависит от энергии электронов и выбранного порога регистрации.



а



б

Рисунок 7. Эффективность регистрации электронов разных энергий первым детектором при нормальном (темные значки) и изотропном (светлые значки) падении (а). Пороги регистрации: 0,1 МэВ (кривые 1, 2), 0,4 МэВ (кривые 3, 5) и 2,1 МэВ (кривая 4); б – геометрический фактор детектора Д1 в зависимости от исходной энергии электронов при порогах регистрации: 1 - 0,01; 2 - 0,1; 3 - 0,4 МэВ

Более полно метрологическая характеристика телескопической детектирующей системы, показывающая зависимость эффективности регистрации электронов от их энергии E и порога регистрации dE , представлена в трехмерном изображении (рисунок 8а). С ее помощью можно получить полную картину распределения в координатах $E - dE$ числа зарегистрированных событий для произвольно задаваемого энергетического спектра падающих на детектор частиц. Пример такого распределения при регистрации изотропного потока электронов с энергетическим спектром, характерным для геостационарной орбиты, приведен на рисунке 8б.

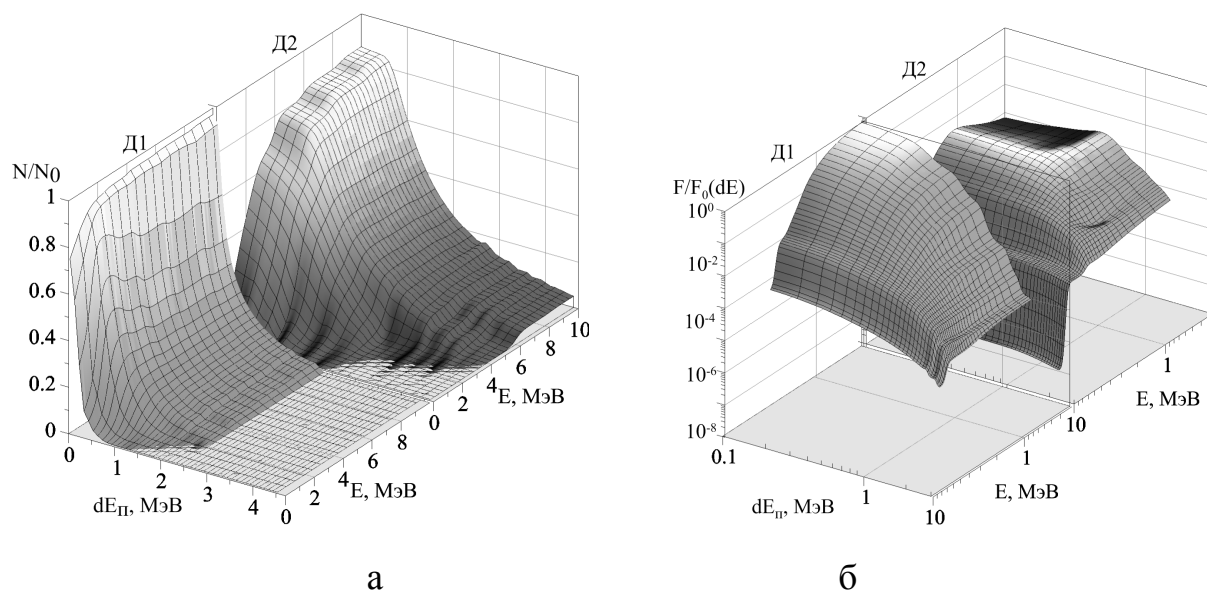


Рисунок 8. Метрологическая характеристика детекторов Д1 и Д2 (а) и зависимость числа электронов, регистрируемых детекторами Д1 и Д2 телескопической системы, от их энергии и порога регистрации (б)

Проведены расчеты метрологических коэффициентов для калориметрических детекторов фотонного и ионизирующего излучений. Схема детектора показана на рисунке 9. Исследованы две конфигурации детектора: с чувствительным элементом толщиной 120 мкм – для измерений в диапазоне от 10 до 50 кэВ; с чувствительным элементом толщиной 2 мм - для регистрации излучения в диапазоне энергий от 50 кэВ и выше.

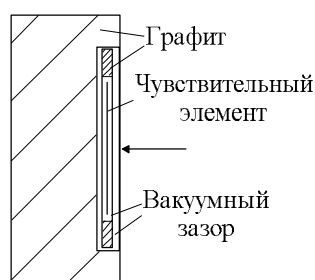


Рисунок 9. Схема графитового калориметра. Стрелкой показано направление потока излучения

Для точного измерения мощности дозы излучения используются поправочный коэффициент K_{gap} , учитывающий влияние вакуумных зазоров, который определяется следующим образом:

$$K_{gap} = \frac{I_0}{I_{gap}},$$

где I_0 – значение мощности дозы в сплошном (гомогенном) калориметре, I_{gap} – величина мощности дозы в реальном калориметре.

В большинстве случаев расчеты коэффициентов коррекции проводятся для гамма-излучения с энергией ~ 1 МэВ. В данной работе приводятся результаты расчетов для фотонов более низких энергий. С увеличением энергии фотонного излучения от 10 до 50 кэВ преобладающим механизмом взаимодействия с материалом калориметра становится Комптон-эффект, а энергия вторичных электронов возрастает, что приводит к уменьшению коэффициента K_{gap} . Значение коэффициентов коррекции также зависит от диаметра пучка фотонного излучения, падающего на калориметр (рисунок 10а). Максимальные значения K_{gap} при использованных параметрах детектора соответствуют энергиям фотонов 30–50 кэВ, что соответствует области с минимальными значениями средней поглощенной в детекторе энергии на одно событие (фотон) (рисунок 10б).

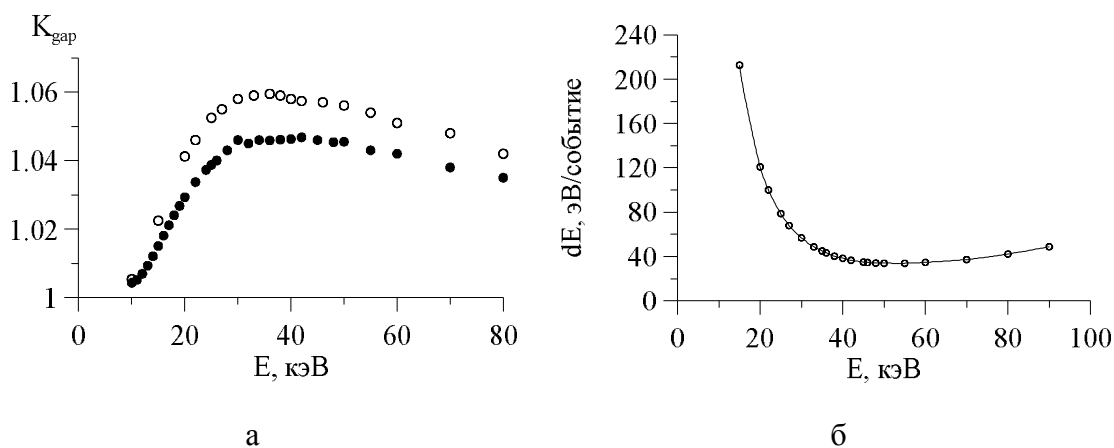


Рисунок 10. Зависимости: а - величины коэффициента K_{gap} от энергии фотонов в диапазоне энергий 10 - 50 кэВ при диаметрах источника фотонов 1 мм (светлые значки) и 25 мм (темные значки); б - средних потерь энергии фотонов в чувствительной области калориметра от исходной энергии фотонов

В Разделе 5 описана созданная с использованием метода Монте-Карло математическая модель эрозии полимерных композитов под действием потока атомарного кислорода. Выполнено моделирование эрозии полимерного композита со сферическими конгломератами защитного наполнителя.

На основе полученных в НИИЯФ МГУ экспериментальных данных определены численные значения параметров математической модели эрозии полимерных материалов под действием пучков атомов кислорода с энергиями 5–30 эВ при плотности потока $\sim 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и значениях флюенса $10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-2}$: количество атомов кислорода в одной укрупненной частице, размер ячеек и вероятности процессов взаимодействия частиц с ячейками. Сравнение полученных расчетными (рисунок 11а,б) и экспериментальными (рисунок 11в) методами профилей позволяет заключить, что при использованном соотношении ширины дефекта в защитном покрытии и глубины образующейся в полимере канавки применяемая математическая модель достаточно хорошо воспроизводит процесс эрозии полимера.

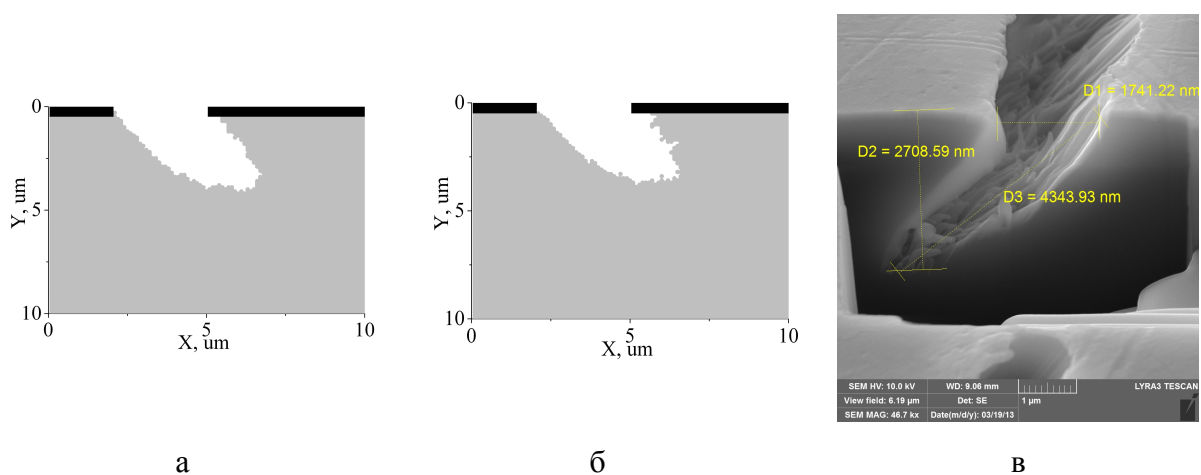


Рисунок 11. Поперечный срез каверны в полиимиде с защитным покрытием после облучения потоком АК при угле падения 30 градусов: а – расчет с помощью модели, учитывающей однократное отражение частиц; б – расчет с помощью модели, учитывающей многократное отражение частиц с уменьшением энергии до тепловой; в – эксперимент

Также исследовались полимерные композиты, которые широко используются в ракетно-космической технике, поскольку являются достаточно устойчивыми к воздействию АК и других факторов космического пространства. Для создания композитов используется полимерная матрица, в которую на стадии изготовления материала в качестве наполнителя вводятся защитные нано- и микрочастицы. В большинстве случаев наноразмерные частицы наполнителя в полимерной матрице объединяются в конгломераты диаметром 1-10 мкм. При облучении кислородной плазмой частицы наполнителя выступают в роли экрана, защищающего нижележащий полимер от растравливания.

С помощью созданной математической модели взаимодействия атомарного кислорода с полимерным материалом выполнено моделирование эрозии полимера с введенным в его приповерхностный слой одним рядом шарообразных частиц наполнителя. Количество частиц наполнителя выбиралось таким образом, чтобы общее количество вещества наполнителя во всех случаях оставалось неизменным. Полученная в результате моделирования структура композита при различных диаметрах частиц наполнителя показана на рисунке 12а,б. На рисунке 12в приведена рассчитанная в рамках моделей с однократным рассеянием зависимость объема разрушенного полимера от диаметра частиц наполнителя и угла падения атомов кислорода. Уменьшение размера конгломера-

тов и увеличение угла падения атомов кислорода приводит к уменьшению объема разрушенного полимера.

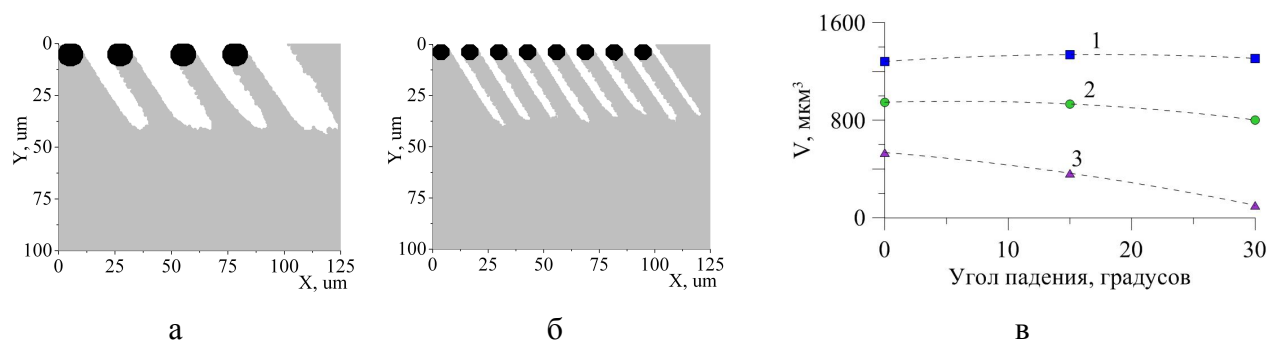


Рисунок 12. Результаты моделирования эрозии полимерного композита: а - с введенными в приповерхностный слой шарообразными частицами диаметром 10 мкм; б - диаметром 7 мкм; в - зависимость объема удаленных ячеек полимера от угла падения частиц кислорода при различном диаметре конгломератов наполнителя 10 мкм (1), 7 мкм (2) и 5 мкм (3)

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основное содержание диссертации представлено в работах:

1. Журналы из списка ВАК

1. Воронина, Е.Н. Математическое и экспериментальное моделирование воздействия атомарного кислорода верхней атмосферы земли на наноструктуры и полимерные композиты / Е.Н. Воронина, Л.С. Новиков, В.Н. Черник, Н.П. Чирская, К.Б. Вернигоров, Г.Г. Бондаренко, А.И. Гайдар // Перспективные материалы. — 2011. — № 6. — С. 29–36.
2. Воронина, Е.Н. Математическое моделирование радиационных воздействий на перспективные материалы космических аппаратов / Воронина Е., Новиков Л., Чирская Н. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2011. — Т. 75, № 11. — С. 1593–1601.
3. Чирская, Н.П. Математическое моделирование характеристик гетерогенных радиационно-защитных экранов космических аппаратов / Н.П. Чирская, Е.Н. Воронина, В.Н. Милеев, Л.С. Новиков, В.В. Синолиц // Перспективные материалы. — 2011. — № 13. — С. 948–957.

4. Чирская, Н.П. Полимерные композиты для создания высокоэффективных систем радиационной защиты космических аппаратов / Н.П. Чирская, Е.Н. Воронина, В.Н. Милеев, Л.С. Новиков, В.В. Синолиц // Физика и химия обработки материалов. — 2011. — № 4. — С. 20–24.
5. Власова, Н. А. Метрологические характеристики детекторов космического излучения / Н.А. Власова, Л.С. Новиков, И.А. Рубинштейн, А.В. Спасский, Н.П. Чирская // Физика и химия обработки материалов. — 2013. — № 6. — С. 32–39.
6. Новиков, Л.С. Особенности радиационных воздействий на наноструктурированные материалы/ Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина, Н.П. Чирская // Перспективные материалы. — 2013. — № 11. — С. 12–21.
7. Воронина, Е.Н. Оценка эффективности применения многослойных микроструктур в системах радиационной защиты / Е.Н. Воронина, Н.П. Чирская // Физика и химия обработки материалов. — 2013. — № 5. — С. 23–28.

II. Прочие работы

1. Voronina, E. Mathematical modeling of radioaction impact on advanced spacecraft materials / E. Voronina, L. Novikov, N. Chirskaya // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2011. — Vol. 75, no. 11. — P. 1500–1506.
2. Чирская, Н.П. Математическое моделирование свойств неоднородных структур для систем радиационной защиты / Н.П. Чирская, Е.Н. Воронина, В.Н. Милеев и др. / Труды XXI Международной конференции «Радиационная физика твердого тела». — Т. 2. — ГНУ "НИИ ПМТ" Москва, 2011. — С. 436–443.
3. Chirskaya, N. Computer modeling of polymer structures degradation under the atomic oxygen exposure / N. Chirskaya, M. Samokhina / WDS'12 Proceedings of Contributed Papers: Part III – Physics. — Matfyzpress Prague, 2012. — P. 30–35.
4. Voronina, E. Mathematical and experimental simulation of impact of atomic oxygen of the earth's upper atmosphere on nanostructures and polymer composites /

E. Voronina, L. Novikov, V. Chernik et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2012. — Vol. 3, no. 2. — P. 95–101.

5. Чирская, Н.П. Моделирование отклика детекторов космического излучения методом Монте-Карло / Н.П. Чирская, Л.С. Новиков, И.А. Рубинштейн / Труды XIII Межвузовской научной школы молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", Москва 19-20 ноября 2012. Под ред. Б.С. Ишханова, Л.С. Новикова. — НИИЯФ МГУ Москва, 2012. — С. 123–127.
6. Чирская Н.П. Анализ эффективности регистрации космического излучения полупроводниковыми детекторами / Н.П. Чирская, Л.С. Новиков / Труды XIV Межвузовской научной школы молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", Москва 26-27 ноября 2013. — НИИЯФ МГУ Москва, 2013. — С. 87–93.
7. Чирская, Н.П. Численное моделирование распределения поглощенной дозы и внедренного заряда в композиционных материалах при воздействии космической радиации / Н.П. Чирская, Л.С. Новиков, В.В. Синолиц, Е.Н. Воронина / Труды XIX Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям. — ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, 2013. — С. 60–66.