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

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ**
**ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА**

**АКИШИН А.И.**

# КОСМИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**МОСКВА**

**2007**

ББК 22.383
УДК 621. 315.3; 537.226; 537.311

**Акишин А.И. Космическое материаловедение.** Методическое и учебное пособие.–М: НИИЯФ МГУ, 2007, с. 209.

Описан период становления в НИИЯФ МГУ (1962-1991гг.) нового научного направления-«Космического материаловедения». Показана выдающаяся роль академика С.Н.Вернова, профессоров С.С.Васильева и И.Б.Теплова в развитии этой науки. Изложены методы имитации воздействия различных факторов космического пространства на материалы и элементы космических аппаратов, в том числе космических корпускулярных излучений, с использованием ускорителей заряженных частиц НИИЯФ МГУ и других организаций. Исследована радиационная стойкость оптических стекол, в том числе механизм электрического пробоя радиационно-заряженных стекол и других диэлектриков. Изложен процесс кумуляции энергии в разрядном канале. Исследовано влияние радиационных и электроразрядных эффектов на работоспособность фотопреобразователей солнечных батарей ИСЗ в процессе их облучения в вакууме электронами и протонами с энергией 0,03 – 10 МэВ. Рассмотрены методы имитации и природа радиационных одиночных сбоев микросхем при воздействии ядер космического излучения. Приведены данные по имитации воздействия на космические материалы частиц космической пыли с v~0,1-20 км/с, потоков атомарного кислорода с энергией 5-20 эВ и продуктов собственной внешней атмосферы космических аппаратов. В пособии приведен обширный список научных публикаций по космическому материаловедению.

Издание предназначено для студентов и аспирантов отделения ядерной физики Физического факультета МГУ и МИЭМ.

**© Московский государственный университет**
**© НИИЯФ МГУ**
**© Акишин А.И.**

## ОГЛАВЛЕНИЕ


| | | |
|---|---|---|
| | **Введение** | 4 |
| 1 | **Истоки космического материаловедения** | 5 |
| 2 | **Методы радиационных испытаний материалов космической техники** | 22 |
| 3 | **Объемные разряды в радиационно-заряженных диэлектриках** | 45 |
| 4 | **Электрический взрыв при разряде в стеклах, облученных протонами** | 67 |
| 5 | **Воздействие космических корпускулярных излучений на оптические материалы** | 77 |
| 6 | **Эмиссионные и разрядные явления на поверхности диэлектриков и в вакууме** | 93 |
| 7 | **Радиационные и электроразрядные эффекты в солнечных батареях ИСЗ** | 106 |
| 8 | **Роль электроразрядных явлений в радиационных аномалиях ИСЗ** | 118 |
| 9 | **Взаимодействие ионосферных частиц с материалами космических аппаратов** | 123 |
| 10 | **Имитация воздействия микрометеорных частиц на космические материалы** | 151 |
| 11 | **Воздействие собственной внешней атмосферы космических аппаратов на их материалы и оборудование** | 166 |
| 12 | **Опасность электроразрядного повреждения изоляционных материалов ядерных установок при радиационной зарядке** | 182 |
| | **Литература по разделам** | 186 |

## ВВЕДЕНИЕ.

Одним из важнейших факторов, воздействующих на космические аппараты (КА), являются заряженные частицы средних и высоких энергий (~0,01 – 100 МэВ), входящие в состав радиационных поясов Земли, космического корпускулярного излучения солнечного и галактического происхождения. Потоки этих частиц состоят преимущественно из электронов и протонов с относительно небольшим содержанием альфа-частиц и более тяжелых ионов. Радиационные условия на борту КА зависят прежде всего от типа орбиты аппарата, т.е. от того через какие зоны космической радиации проходит аппарат, а также от особенностей конструкции КА. Под действием корпускулярных излучений в материалах и элементах КА возникают различного рода обратимые и необратимые эффекты, приводящие к нарушению нормального функционирования бортовых систем КА. Современные КА имеют срок службы ~7-10 лет. В этой связи повышению радиационной стойкости материалов и аппаратуры КА уделяется большое внимание.

Проблема радиационной стойкости бортовой аппаратуры КА обостряется, в связи с внедрением в космическое аппаратостроение элементов современной микроэлектроники с высокой степенью интеграции, волоконной и интегральной оптики, криоэлектроники и т.п. В последнее десятилетие резко возросло внимание к радиационным одиночным сбоям в элементах памяти и микропроцессорах бортовых компьютеров при воздействии одиночных ядер космических излучений.

Диэлектрические материалы при облучении заряженными частицами с энергией 1-100 МэВ могут аккумулировать избыточный электрический заряд и создавать в объеме облученного материала высокие электрические потенциалы. Способность диэлектрика эффективно аккумулировать электрический заряд определяется его высоким удельным сопротивлением ($\rho > 10^{14}$ ом·см), гетерогенностью структуры и наличием глубоких энергетических ловушек в запрещенной зоне. Если напряженность электрического поля в объеме облученного диэлектрика от внедренного заряда превысит его электрическую прочность (1-1,5 МВ/см), то произойдет электрический пробой диэлектрика на его поверхность. При некоторых условиях характер кумуляции энергии в разрядном канале соответствует электрическому взрыву, при этом в окружающую среду инжектируется плазмоид, создающий широкий спектр электромагнитных помех( ЭМП).

При определенных условиях объемные разряды, протекающие в радиационно-заряженных изоляционных материалах сверхпроводящей магнитной системы международного термоядерного реактора (ТЯР)

типа ИТЕР, функционирующих при криогенных температурах, могут быть опасны для этой системы в связи с возможной электроразрядной деструкцией изоляционных материалов.

Большое влияние на работоспособность космических материалов оказывают и другие факторы космической среды: космическая пыль, потоки атомарного кислорода, продукты собственной внешней атмосферы КА.

В настоящем пособии рассмотрены методы радиационных испытаний материалов космической техники и проанализированы физические и технические проблемы, связанные с разрядными явлениями в объеме радиационно-заряженных диэлектрических материалах и элементах, и их влиянием на работу космического оборудования, в том числе солнечных батарей геостационарных ИСЗ.

Автор признателен М.И. Панасюку, Б.С. Ишханову, Е.А. Романовскому за поддержку, А.В. Спасскому, К.И. Стратилатовой, Я.А. Тепловой за полезные замечания, В.П.Бабаеву, Э.А.Витошкину, Г.А.Симонову, Ю.И. Тарасову за помощь в подготовке издания методического и учебного пособия.

## 1. ИСТОКИ КОСМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДНИЯ

Подготовка к первым экспериментам в НИИЯФ МГУ по имитации воздействия космических корпускулярных излучений на материалы и элементы оборудования искусственных спутников Земли (ИСЗ) и, в частности, на терморегулирующие покрытия началась по инициативе директора НИИЯФ МГУ академика С.Н. Вернова в конце 1961 г. Испытания проводились в лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) НИИЯФ МГУ (заведующий лабораторией профессор С.С.Васильев) на электромагнитном сепараторе. Организация таких исследований в НИИЯФ МГУ была связана с обращением Главного конструктора космической техники С.П. Королева к С.Н. Вернову. Необходимо было выявить наиболее устойчивые типы терморегулирующих покрытий для долгоживущих космических аппаратов (КА). Впоследствии, неоднократно приходилось выполнять срочные задания от С.Н. Вернова (рис.1) по исследованию и прогнозированию работоспособности различных материалов и элментов космических аппаратов: фотопреобразователей солнечных батарей ИСЗ "Электрон", элементов системы астронавигации и оптического оборудования, электронных приборов и пр.

Испытания проводились, как правило, в связи с личным обращением к С.Н. Вернову главных конструкторов космических аппаратов (В.Н. Челомея, М.Ф. Решетнева, Г.Н. Бабакина, Н.С. Лидоренко и др.).

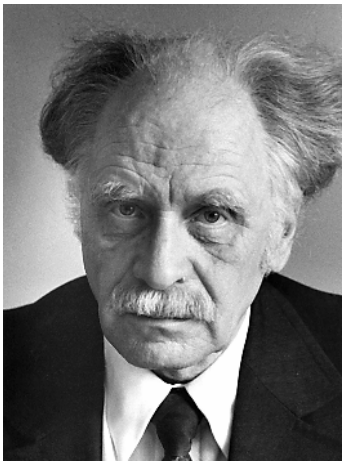


Рис.1. Академик С.Н. Вернов (1910-1982)

В 1965 г. в институте была создана лаборатория космического материаловедения (ЛКМ) под руководством профессора А.И. Акишина. В 1981 г. ЛКМ вошла в состав Отдела ядерных и космических исследований (ОЯКИ), возглавляемого профессором И.Б.Тепловым, где исследования получили дальнейшее развитие. С 1993 г. руководитель ОЯКИ - профессор Л.С. Новиков.

Благодаря созданному по замыслам заведующего лабораторией ядерных реакций профессора С.С.Васильева (рис.2) ускорительному комплексу НИИЯФ МГУ, на всех установках удалось развить исследования по радиационной стойкости материалов и элементов космической техники, и эти первые научные исследования, выполненными в НИИЯФ МГУ, заложили основы нового научного направления – космического материаловедения.



Рис.2. Профессор С.С. Васильев (1908-1981)

Уже ко второй половине 1960–х годов были получены важнейшие результаты в этой новой области, признанные как у нас в стране, так и за рубежом. Предложены и осуществлены рекомендации по повышению радиационной стойкости материалов и элементов бортового оборудования КА. Результаты исследований, проведенных в 1962-1978гг. [1-15] под руководством академика С.Н.Вернова, профессоров А.И. Акишина и И.Б.Теплова (рис.3), вошли в цикл работ, удостоенных Государственной премии СССР (1979г.).

Для этих работ в основном использовалась экспериментальная база ЛЯР НИИЯФ МГУ: циклотрон У-120 с энергией протонов до 6,3 МэВ, электростатический ускоритель ЭГ-8 с напряжением 4МВ, каскадный генератор КГ-500 с энергией протонов 100-500 КэВ, электромагнитный сепаратор с энергией протонов до 30 КэВ..

Для воздействия на материалы фотонных ионизирующих излучений использовалась кобальтовая пушка и рентгеновская установка РУП-400.

Исследования также проводились на электронных ускорителях с энергиями электронов 2 и 22 МэВ (ИМЕТ им. А.А. Байкова, зав. лаб., профессор, лауреат Государственной премии СССР Л.И.Иванов) и на протонном инжекторе с энергией протонов 100 МэВ (ИФВЭ г. Протвино).

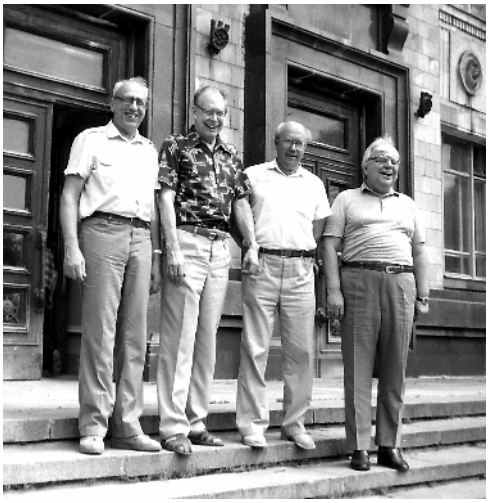


Рис.3 Профессора, Лауреаты Государственной премии СССР: А.И. Акишин, И.Б. Теплов, Ю.И. Логачев, Е.В. Горчаков (слева направо)

В ЛКМ было создано и запущено несколько оригинальных имитационных установок:

- Плазмотроны для генерации и имитации потоков ионосферной кислородной плазмы с энергией ионов в 10 - 20 эВ (рис.4).
- Установка комплексного воздействия на материалы (электроны с Е=30 КэВ, имитатор солнечного излучения, вакуум $10^{-6}$ Па).
- Установка по имитации радиационных одиночных сбоев (РОС) в микросхемах с использованием осколков деления радиоактивного изотопа калифорния-252 и лазерных импульсных пучков.
- Ускорители потоков заряженных металлических микрочастиц, с массой $10^{-10}$ -$10^{-12}$г., имитирующих потоки космической пыли.



Рис. 4. С.К. Гужова, Г.Г. Соловьев, В.А. Кудичев, В.И. Титов, А.И. Акишин исследуют воздействие высокочастотной кислородной плазмы на терморегулирующее покрытие КА

С.Н. Вернов много внимания уделял постановке исследований по радиационной стойкости кремниевых фотопреобразователей солнечных батарей ИСЗ на ускорителях заряженных частиц НИИЯФ МГУ.

В реальной космической обстановке типичное проявление радиационного повреждения кремниевых фотопреобразователей солнечной батареи – снижение напряжения и тока короткого замыкания, что обнаружилось при запуске в 1964г. ИСЗ "Электрон-1" в течение первого месяца его полета. Как показали последующие имитационные радиационные испытания фотопреобразователей на циклотроне и каскадном ускорителе НИИЯФ МГУ снижение рабочих характеристик солнечных батарей ИСЗ "Электрон-1" было вызвано в основном протонами с энергией менее 1 МэВ, т.к. солнечные батареи эксплуатировались без радиационной защиты в виде покровных стекол. Последующее экранирование фотопреобразователей солнечных батарей искусственных спутников Земли "Электрон-3,4" тонким слоем лака непосредственно перед запуском на стартовой площадке позволила уменьшить скорость снижения напряжения солнечных батарей в десятки раз и таким образом продлить ресурс их работы до года.

В дальнейшем при активной поддержке С.Н. Вернова совместно с научно-производственным объединением "Квант" был проведен

большой объем исследований радиационной стойкости различных типов кремниевых фотопреобразователей при облучении протонами и ионами гелия в энергетическом интервале 0,1-30 МэВ.

Известно, что материалы и элементы оборудования ИСЗ подвергаются воздействию тяжелых одиночных ядер космических лучей высокой энергии. Плотность потока таких ядер низка по сравнению с плотностью потока протонов, однако, из-за высокого ядерного заряда линейные потери энергии, например в треке ядра железа с Е~1 МэВ/нуклон в кремнии составляют около 27 МэВ $см^{2} \cdot мг^{-1}$ . Время релаксации ионизационной составляющей трека ~ $10^{-12}$ с, диаметр трека менее 0,1 мкм. Доза излучения в центре трека $10^{5}$Гр. При воздействии таких ядер на микросхемы с высоким уровнем интеграции возникают радиационные одиночные сбои (РОС). В микропроцессорах радиационные шумы создают ложные команды. Наблюдаются случаи необратимых отказов микросхем за счет выгорания мощных транзисторов. Радиационные одиночные сбои (РОС) микросхем – одна из причин радиационных аномалий искусственных спутников Земли.

В 1979 г. автор этих строк ознакомил С.Н. Вернова с проблемой радиационных сбоев больших интегральных схем, возникающих в бортовом электронном оборудовании американских ИСЗ. В те годы в США стали уделять много внимания этому явлению. С.Н. Вернов заинтересовался этой проблемой, т.к. сразу понял, что появился новый аргумент для расширения исследований химического состава ядер в космических лучах галактического происхождения на борту ИСЗ в виду его научного и прикладного значения. Сергей Николаевич рекомендовал как можно быстрее организовать в лаборатории изучение физических основ радиационных одиночных сбоев микросхем.

В лаборатории космического материаловедения для изучения радиационных сбоев микросхем развивались две методики. Первая была основана на имитации РОС микросхем с помощью радиоактивного изотопа калифорний-252, в котором за счет спонтанного деления ядер образуются осколки деления со средней энергией около 80 и 110 МэВ с высоким ядерным зарядом и с линейной потерей энергии 40-45 МэВ $см^{2}мг^{-1}$, что выше, чем у ядер железа космических лучей. Этот метод позволяет оценить верхний предел сечения радиационных одиночных сбоев микросхем, однако критический заряд РОС измерить невозможно. Недостаток методики состоял в том, что облучение микросхем приходилось проводить в вакууме, так как пробег осколков деления в кремнии составляет около 15 мкм.

Другая методика имитации радиационных сбоев микросхем была основана на применении остросфокусированного импульсного лазерного пучка. Хотя характер генерации электронно-дырочной плазмы по толщине материала микросхемы при воздействии лазерного импульсного луча отличается от генерации в ионном треке, этот метод находит применение в имитационных экспериментах.

Исследование электроразрядных процессов в диэлектриках, находящихся в радиационно-заряженном состоянии, были начаты в лаборатории космического материаловедения в 1963г. Интерес к этому явлению в космическом материаловедении сильно возрос еще в 1962г. после образования мощного искусственного радиационного пояса Земли в результате проведения США в южной части Тихого океана, на высоте около 400 км термоядерного взрыва. Под действием электронов искусственного радиационного пояса Земли ряд ИСЗ США уменьшили свой ресурс. Стало ясно, что диэлектрические элементы бортового оборудования, микросхемы и ИСЗ в целом могут быть также подвержены сильной радиационной электризации в зоне такого образования, поскольку интенсивность и средняя энергия электронных потоков в них заметно больше, чем в естественном радиационном поясе Земли. С.Н. Вернов проявлял исключительный интерес к физике формирования искусственного радиационного пояса Земли и воздействия его излучений на аппаратуру ИСЗ. Ответы на эти вопросы были отражены в научных программах и экспериментах, проводимых в НИИЯФ МГУ, МИЭМ и других организациях.

С проблемой значительного влияния радиационной электризации от электронов радиационного пояса Земли на работоспособность геостационарных и высокоэллиптических советских ИСЗ типа "Горизонт", "Радуга" и "Молния" пришлось столкнуться в конце 70-х годов, хотя в США интерес к этому явлению возник на несколько лет раньше. С.Н.Вернов, понимая значимость этой задачи, активно подключился к ее решению. Секция №2 Межведомственного координационного научно-технического совета (МКНТС) под руководством С.Н. Вернова подготовила общесоюзную научно-техническую программу по разработке методов борьбы с радиационной электризацией ИСЗ. Согласно решению Совета Министров СССР НИИЯФ МГУ стал головной организацией по этой проблеме. Ключевая тема программы – создание физико-математической (исполнители: Милеев В.Н., Новиков Л.С.–НИИЯФ МГУ) и электротехнической (исполнители: Пожидаев Е.Д., Саенко В.С.–МИЭМ) моделей радиационной электризации геостационарных ИСЗ и получение экспериментальных данных по физике элек-

троразрядных процессов в диэлектриках, используемых в аппаратуре ИСЗ.

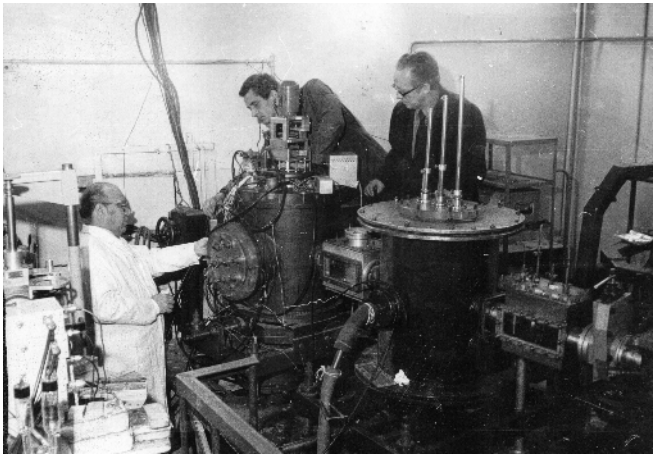


Рис.5. Л.И. Цепляев, Э.А. Витошкин, Ю.С. Гончаров готовят эксперимент для исследования радиационной стойкости стекол при облучении протонами с энергией 6,3МэВ на циклотроне

В течение последующих нескольких лет, уже без Сергея Николаевича, но фактически по его инициативе, была разработана физико-математическая модель радиационной электризации геостационарных ИСЗ. Исследовано влияние электромагнитных помех, возникающих в процессе электроразрядных явлений облученных диэлектрических материалов, на сбои оборудования ИСЗ. Исследован механизм электроразрядного разрушения твердых диэлектриков при воздействии пучка протонов с энергией 100 МэВ. Эти данные могут быть полезны при использовании направленных пучков атомарных частиц в космосе.

В результате проведенных исследований (1961-1991 гг.), многие из которых были инициированы С.И. Верновым, коллективом лаборатории космического материаловедения (рис. 5,6) получены следующие основные результаты [1-24]:

1. Разработаны методы имитации воздействия различного вида космических корпускулярных излучений на материалы и элементы космических аппаратов. Даны рекомендации по испытаниям, научно обоснован коэффициент ускоренности радиационных испытаний 10 – 1000 раз. Разработан и внедрен метод трансформации моноэнергетических про-

тонных и электронных пучков с энергией 2-6,3 МэВ, получаемых на ускорителях, в пучки со сплошными энергетическими спектрами, подобным космическим. Испытан метод комплексного воздействия различных факторов космического пространства (электроны, протоны, ультрафиолетовое излучение Солнца, Т= 77-600 К) на космические материалы (Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Тютрин Ю.И.)



Рис.6. Коллектив Лаборатории космического материаловедения НИИЯФ МГУ (1975г) 1 ряд: В.А.Максакова, А.А. Колыхалова, Л.И. Цепляев, Е.И. Фалинская, А.И. Акишин, Г.И. Емельянова, Л.А. Васина, Н.А. Боголюбова; 2 ряд: В.И. Титов, Ю.С. Гончаров, В.И. Туманов, В.П. Кирюхин, П.А. Кондратьев, Е.В. Блюдов, Г.А. Токарев; 3 ряд: Н.М. Дунаев, В.В. Малюков, М.П. Станиславский, Ю.И. Тарасов, И.А. Дядин, Н.И. Захаров, И.А. Иванов, А.Е. Пашин, В.А. Кудичев, С.А. Алексеев

2. Совместно с НПО «Квант» исследована радиационная стойкость кремниевых фотопреобразователей, используемых в солнечных батареях КА, к воздействию пучков (р, альфа-частицы) в интервале энергий 0,1-30 МэВ. Даны рекомендации по повышению радиационного ресурса солнечных батарей КА, в частности ИСЗ «Электрон» (Акишин А.И., Григорьева Г.М., Назаров В.Г.).
3. Совместно с НПО «Квант» исследован механизм воздействия электроразрядных процессов, вызванных радиационной электризацией электронами с энергией 10-30 кэВ покровных защитных стекол фотопреобразователей на работоспособность солнечных батарей. В процессе элек-

тризации внешней поверхности стекла может возникнуть электрический пробой на кремниевый фотопреобразователь или дуговой разряд между соседними солнечными элементами, имеющими разность потенциалов, превышающую 30-40В (рис.7).

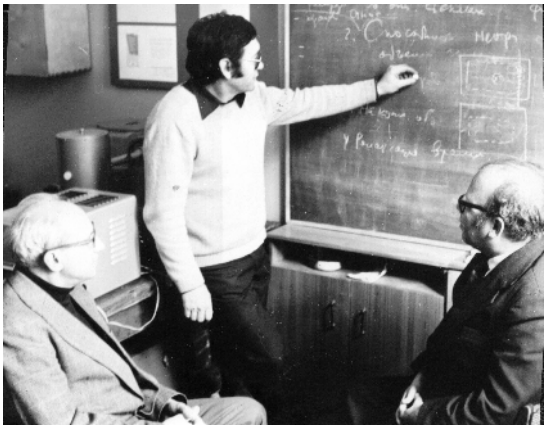


Рис.7. Доктор физико-математических наук Ю.И. Тютрин обосновывает свой новый эксперимент, сидят: А.И. Акишин., Л.И. Цепляев.

4. Совместно с ГОИ им. С.И.Вавилова исследована радиационная стойкость и уровень радиолюминесценции более 100 марок оптических стекол и покрытий при воздействии различных типов ионизирующих излучений. Дана инженерная оценка изменения основных оптических свойств стекол при эксплуатации их в радиационном поясе Земли (РПЗ) в течение 1-10 лет. (Акишин А.И., Бессонова Т.С., Васина Л.А., Гончаров Ю.С., Тютрин Ю.И., Цепляев Л.И.).
5. Совместно с НПО «Энергия», НПО завода им. Лавочкина, НПО ПМ проведены исследования изменения коэффициентов поглощения, $\alpha_s$, и излучения, $\varepsilon$, различных типов терморегулирующих покрытий (ТРП) КА при имитации комплексного воздействия факторов космического пространства (Акишин А.И., Блюдов Е.В., Исаев Л.Н., Наумов С.Ф., Рахлина С.А., РонисА.Я., Соловьев Г.Г., Тарасов Ю.И., Титов В.И.).
6. Исследован механизм объемной радиационной электризации разных диэлектриков (оптические стекла, полимеры) при воздействии пучков электронов и протонов с энергией 1-100 МэВ. Электризация диэлектрических материалов КА может вызываться также электронами РПЗ с энергиями 1-10 МэВ. Электроны такой энергии проникают в диэлек-

трик до 1 см., создавая внутри внедренный электрический заряд. Изучен механизм электрического пробоя в радиационно-заряженных диэлектриках. При этом мощность разряда составляла $10^6$-$10^7$ Вт, длительность $10^{-7}$-$10^{-6}$с, а плотность тока и удельная мощность в разрядном канале достигали $10^7$А$\cdot$ см$^{-2}$ и $10^{11}$-$10^{12}$ Вт$\cdot$см$^{-3}$ соответственно. Такие эксперименты позволяют изучать состояние вещества в экстремальных условиях при воздействии концентрированного потока энергии Проведенные исследования в рамках НИР «АнтиСОИ» (1986-1988г) показали высокую эффективность электроразрядного механизма разрушения модельных диэлектрических элементов КА (стекла) при облучении протонными пучками с энергией 100 МэВ. (Акишин А.И., Витошкин Э.А., Иванов Л.И., Тютрин Ю.И., Цепляев Л.И.)

7. Изучен механизм инициирования электрического пробоя в радиационно-заряженных диэлектриках с помощью импульсного лазерного излучения, что позволило измерить временные и другие характеристики электрического разряда. Возникающая в объеме диэлектрика лазерная искра приводит к развитию электрического пробоя внедренного заряда. ( Акишин А.И., Радченко В.В., Тютрин Ю.И.).

8. Созданы и внедрены методы имитации радиационных одиночных сбоев (РОС) в микросхемах с помощью осколков деления радиоактивного изотопа $Cf^{252}$ и импульсного лазерного излучения (Акишин А.И., Гончаров Ю.С., Кузнецов Н.В., Новиков Л.С., Токарев Ю.А., Тютрин Ю.И.).

9. Разработан метод электростатического ускорения (электростатический генератор ЭГ-8, каскадный генератор КГ-500) заряженных, металлических макрочастиц ($m\sim10^{-10}$ – $10^{-12}$ г) в интервале v~0,1-20 км/сек. Исследовано воздействие таких частиц, имитирующих потоки микрометеоров, на космические материалы, в частности, на материалы космических скафандров по заданию НПО «Звезда». Обнаружено явление инициирования локальных разрядов в радиационно-заряженных стеклах при ударах одиночных макрочастиц с массой $10^{-10}$-$10^{-12}$ г. при v ~2-10 км/сек. Изучена морфология поверхности облученных оптических материалов и характеристики образующейся ударной плазмы (Акишин А.И., Кирюхин В.П., Конаныкин Л.В.Новиков Л.С.).

10. Совместно с ГОИ им. С.И.Вавилова проведены имитационные испытания воздействия ветропылевых потоков частиц марсианской пылевой бури с v~10-100м/сек. на аналоги оптических элементов, установленных на космическом аппарате «МАРС-3».Установлено, что воздействие таких потоков на оптические элементы приводит к снижению их прозрачности и значительному росту коэффициента яркости при засветке Солнцем. Эти эксперименты косвенно подтверждают возмож-

ную версию потери визуальной связи с аппаратом « МАРС-3» из-за ветропылевого воздействия. (Акишин А.И., Кирюхин В.П.)

11. Разработан метод имитации воздействия потоков ионосферного атомарного кислорода с энергией 5 эВ на космические материалы с помощью высокочастотной кислородной плазмы. Показано, что эмалевые ТРП КА, предоставленные НПО «Энергия» и другими организациями, имеют аномально высокие потери массы связующего ТРП и мало пригодны для использования на КА с высотой орбиты 300-500 км. Это было обнаружено в 1965 г., т.е. значительно раньше, чем аналогичные наблюдения при первых полетах КА США «Спейс Шаттл» в 1992-1993 гг. (Акишин А.И., Гужова С.К., Петухов В.П., Соловьев Г.Г., Тарасов Ю.И., Титов В.И.)

12. Создан плазменный ускоритель с энергией ионов 10-20 эВ для имитации воздействия на космические материалы потоков ионосферных частиц. Исследован механизм плазмохимического распыления углеродных, полимерных материалов и терморегулирующих покрытий при ускоренных методах испытаний (Акишин А.И., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Титов В.И., Черник В.Н.).

13. Исследовано распыление рекомендуемых материалов (нержавеющие стали, графит, углеродные материалы) для первой стенки термоядерного реактора ионами кислорода и аргона с энергией 10-100 эВ (Акишин А.И., Куликаускас В.С., Черник В.Н.).

14. Рассмотрено влияние продуктов собственной внешней атмосферы (СВА) КА на работоспособность материалов и астронавигационного оборудования (КБ «Марс») в результате загрязнения поверхности оптических элементов и свечения СВА. Максимальный расчетный уровень яркости свечения СВА КА может достигать $B/B_o \sim 5 \cdot 10^{-12}$, где $B_o$-яркость Солнца (Акишин А.И., Дунаев Н.М., Константинова В.В.).

15. Создана первая версия физико-математической модели радиационной электризации космических аппаратов. НИИЯФ МГУ стал лидером расчетов на стадии проектирования КА в нашей стране по этому направлению (Милеев В.Н., Новиков Л.С.).

Результаты исследований по космическому материаловедению в НИИЯФ МГУ, полученные после 1991г., также изложены в работах [25-37].

Помимо решения научно-технических задач в области взаимодействия космических корпускулярных излучений с материалами КА, С.Н. Вернов много внимания уделял научно-организационным вопросам. С.Н. Вернов с 1965 г. по 1982 г. был председателем секции №2 Межведомственного координационного научно-технического совета (МКНТС), с 1983 г. по 1991 г. председателем секции №2 стал

И.Б.Теплов. Ученым секретарем секции №2 был А.И. Акишин (1965-1991). В 1965 г. С.Н. Вернов предложил автору этих строк организовать в НИИЯФ МГУ Всесоюзный семинар по тематике: «Имитация воздействия космической среды на материалы и элементы космических летательных аппаратов». С 1965-1991гг. было проведено 79 заседаний. Семинар решал две основные задачи:

1. Координация научных усилий многочисленных, но разрозненных научных групп на предприятиях ракетно-космической промышленности и институтов АН СССР и МВ ССО СССР, работающих в области исследования воздействия космической среды на материалы и оборудование КА.
2. Разработка идеологии и стратегии в подготовке научно- технических программ по повышению стойкости и надежности материалов и элементов КА к воздействию космической среды в течение длительного времени полета КА. С учетом такой проработки секция №2 МКНТС имела возможность подвергать экспертизе основные идеи, закладывавшиеся в научно- технические программы. Участниками семинара стали сотрудники большого числа предприятий и институтов, в том числе ЦНИИМАШ, НПО "Энергия", НПО з-д. им. Лавочкина, НПО "Салют", НПО "Квант" и др. Семинар активно посещали специалисты из институтов и производственных объединений различных регионов: из ГОИ им. С.И.Вавилова, Электронстандарта (г. Ленинград); ФТИНТа, ХГУ (г. Харьков); НПО ПМ; КрГУ (г.Красноярск), ТПИ(г.Томск), Института электроники АН УзССР (г.Ташкент), ЦСКА, КуАИ (г. Куйбышев) и других городов. С.Н.Вернов проявлял искренний интерес к работе семинара и оказывал большую помощь. С 1995г. семинар возобновил работу под руководством профессора Л.С.Новикова.

Под редакцией акад. С.Н. Вернова вышло семь изданий сборника НИИЯФ МГУ "Модель околоземного космического пространства" ("Модель космоса") (1964-1983) . Во втором томе сборника "Моделирование воздействия космической среды на материалы и оборудование космических летательных аппаратов" излагались различные аспекты космического и радиационного материаловедения.

Проблематика секции №2 МКНТС была связана с анализом надежности космических аппаратов к воздействию космической среды, в первую очередь различных видов космических ионизирующих излучений. Будучи ведущим специалистом в области космических корпускулярных излучений в СССР С.Н. Вернов пользовался непререкаемым авторитетом на заседаниях Совета и секции №2. Председатель Совета

генерал-полковник Р.П.Покровский при встрече с С.Н. Верновым любил в шутливой манере отмечать, что для него С.Н. Вернов - маршал.

С.Н. Вернов был единственным академиком среди членов Совета. В период с 1965 по 1982 годы секция №2, при личном участии С.Н. Вернова, подготовила ряд важнейших всесоюзных научно-технических программ: радиационная электризация космических аппаратов, работа бортового оборудования космических аппаратов в открытом космосе, подготовка специалистов в СССР по специализации «Космическое и радиационное материаловедение», выработка ГОСТ по факторам космического пространства, межотраслевая база радиационных испытаний и т.д. С.Н. Вернов лично докладывал о научно-технических программах, подготовленных секцией №2, на Военно-промышленной комиссии Совета министров СССР.

С.Н.Вернов считал необходимым создание филиалов НИИЯФ МГУ в различных регионах. Остановлюсь подробнее на истории создания центра имитационных испытаний в Центральном конструкторском бюро машиностроения (ЦКБМ) г. Реутов.

В 1962-1963 годы – период стремительного взлета ЦКБМ, где генеральным конструктором космической техники был В.Н. Челомей. В 1963 г. С.Н. Вернов принял предложение В.Н. Челомея об участии НИИЯФ МГУ в разработке научно-технического задания проекта создания на возглавляемом им предприятии имитационного центра для испытаний стойкости изделий космической техники к воздействию космических корпускулярных излучений. Ответственным исполнителем реализации этого проекта был определен Физико-технический институт низких температур (ФТИНТ) АН УССР (г. Харьков). В то время ФТИНТ любой ценой стремился занять достойное место в фундаментальной и прикладной науке. Директор ФТИНТа чл.-корр. АН УССР Б.И. Веркин был умнейшим и неординарным человеком. Рабочая группа НИИЯФ МГУ, созданная С.Н. Верновым (Акишин А.И., Васильев С.С., Воробьев Ю.А., Горчаков Е.В., Теплов И.Б.), должна была выработать научно-техническое задание проекта и осуществлять его сопровождение. Ситуация для НИИЯФ МГУ и особенно для ФТИНТ осложнялась тем, что проекту уделялось большое внимание со стороны вышестоящих организаций, учитывая, что в ЦКБМ работал С. Хрущев. Рабочая группа НИИЯФ отстаивала развернутое техническое задание проекта, включая строительство в имитационном центре ЦКБМ циклотрона. ФТИНТ, по-видимому, был не в состоянии реализовать проект на базе задания НИИЯФ МГУ, возникли осложнения, согласование проекта затягивалось. Развязка наступила неожиданно. В 1964г. Н.С. Хрущев был освобожден с поста Первого

секретаря ЦК КПСС. В последующие годы на предприятии был смонтирован разработанный Физико-техническим институтом низких температур по техническому заданию НИИЯФ МГУ электронно-протонный инжектор с энергией частиц 200 кэВ с вакуумной камерой, который работает и, по сей день. С тех пор ФТИНТ им акад. Б.И. Веркина НАН Украины вырос в мощный научно-технический центр в области низких температур и криогенных технологий.

В связи с бурным развитием космических исследований и ракетно-космической промышленности С.Н. Вернов с 1965 г. начал активно интересоваться организацией подготовки студентов по профилю «Космическое и радиационное материаловедение» (КРМ). С.Н. Вернов считал это важной государственной проблемой. По инициативе С.Н. Вернова этот вопрос неоднократно обсуждался на секции №2 МКНТС. В начале 1971 г. с помощью известного мне ученого Д.Б. Зворыкина, заведующего кафедрой в МИЭМ, удалось наладить контакт с ректором Московского института электронного машиностроения профессором Е.В. Арменским, который активно подключился к решению поднятой проблемы. Подготовка инженеров по профилю КРМ в МИЭМ осуществлялось на факультете «Электроника» на кафедрах: «Материаловедение электронной техники» и «Физические основы электронной техники». Большой вклад в подготовке учебного процесса внесли: Акишин А.И., Бондаренко Г.Г., Вышлов В.А., Епифанов Г.И., Иванов Л.И., Лысенко А.П., Мома Ю.А., Смирнов И.С., Теплов И.Б., Тихонов А.Н., Шмыков А.А.(Рис. 8)



Рис.8. Профессора А.И.Акишин и Л.И.Иванов на ученом совете МИЭМ

При организации новой специализации в Московском институте электронного машиностроения С.Н. Вернов заверил ректора института, что учебная и экспериментальная база НИИЯФ МГУ будет открыта для подготовки студентов по этой специализации. С 1971 г. в Московском институте электронного машиностроения начались занятия студентов по специализации «Космическое и радиационное материаловедение», а в 1974г. было получено в Министерстве Высшего и Среднего специального образования СССР официальное разрешение о включении этой специализации в специальность «Электронное машиностроение». Ежегодная потребность в СССР в 1970 -1975 г. специалистов по новому профилю составляла около 100 человек. МИЭМ ежегодно готовил около 50 человек.

Академик С.Н. Вернов с 1971 по 1982гг. для студентов МИЭМ читал курс лекций "Основы космической и ядерной физики", а с 1982 г. по 1991 г. эту дисциплину вел профессор И.Б. Теплов. Профессор А.И. Акишин с 1971г. по настоящее время читает курс лекций «Радиационная техника и методы имитации воздействия космической среды на материалы и оборудования КА» (рис.9).



Рис.9. Профессор А.И.Акишин (слева) проводит экскурсию студентов 5-го курса МИЭМ на циклотроне НИИЯФ МГУ

Сотрудники ОЯКИ НИИЯФ МГУ Л.С.Новиков, Ю.И.Тютрин, Л.И.Цепляев также активно участвовали в педагогическом процессе. С 1975 г. по 1985 г. по инициативе С.Н. Вернова кафедра отделения ядерной физики физического факультета МГУ "Физика космоса и космических лучей" также начала подготавливать студентов по индивидуальным планам по профилю космического и радиационного материаловедения. Студенты и аспиранты МГУ и МИЭМ, специализирующиеся по профилю «Космическое и радиационное материаловедение», выполняли свои исследования на учебной экспериментальной базе НИИЯФ МГУ. С 1971г. в ОЯКИ около 40 студентов МГУ и МИЭМ выполнили свои дипломные работы по этому профилю.

По просьбе ряда ведущих предприятий Министерств общего машиностроения и электронного приборостроения СССР (КБ «Салют», ЦКБМ и ряд других организаций), МИЭМ в рамках специализации «Космическое и радиационное материаловедение» в 1978г создал специальный факультет по переподготовке специалистов этих предприятий. За 12 лет работы выпустили более 100 специалистов по этому профилю. Ряд вузов СССР (Красноярский государственный университет, Томский политехнический институт, Куйбышевский авиационный институт) обращались к С.Н. Вернову с просьбой о поддержке организации в этих вузах вышеназванной специализации для предприятий в их регионах.

С.Н.Вернов посвятил развитию космического материаловедения и подготовке специалистов в этой области в СССР более 20 лет своей жизни. Хотя эта проблема и не была ведущей в его научных интересах, но удивительно, как много он успел сделать. Большой вклад в период становления космического материаловедения в НИИЯФ МГУ внесли также профессора С.С. Васильев., Л.С. Новиков., И.Б. Теплов., Тютрин Ю.И. Космическому материаловедению в НИИЯФ МГУ – 45 лет, несмотря на относительно солидный возраст, это научное направление не сдает своих позиций и с новой силой продолжает развиваться (рис.10, 11).

В 2007г. выходит в свет восьмое, новое издание НИИЯФ МГУ «Модель космического пространства» т.1 и т.2: 2006. под редакцией Л.С.Новикова и М.И.Панасюка.



Рис.10. Отдел ядерных и космических исследований (2005г) 1 ряд: Л.В. Конаныкин, А.И. Акишин, А.Я. Ронис; 2 ряд: В.Н. Черник, К.К. Крупников, Л.А. Михайлова, Л.С. Новиков, Ю.И. Кузнецов, А.А. Маклецов, В.Н. Милеев



Рис.11. Коллеги и друзья (2006г.): 1ряд: М.И.Панасюк, И.А. Христиансен, А.И. Акишин, Б.М. Абрашина., А.Ф. Тулинов. 2 ряд: Л.С. Новиков, Е.А. Романовский, Ю.И. Логачев, К.И. Стратилатова, Т.И. Спасская, Е.Т. Зазулина.

## 2. МЕТОДЫ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Космический аппарат (КА) содержит много разнотипных элементов, существенно различающихся своей радиационной надежностью. Несмотря на то, что к настоящему времени накоплен значительный опыт, касающийся поведения материалов и отдельных узлов КА в условиях космического полета, непрерывное усложнения программ полетов и обновление элементной базы космической аппаратуры требует дальнейшего развития методов как прогнозирования радиационной надежности изделий космической техники, так и ее повышения.

Поскольку вся совокупность повреждающих факторов космического пространства (табл.1) не может быть воспроизведена в земных условиях, при исследовании радиационной надежности космической аппаратуры широко используется метод моделирования, состоящий в замене всего спектра космических излучений одним-двумя видами излучений и сокращения времени испытаний.

Многообразие радиационных процессов, протекающих в материалах под действием излучения, не позволяет установить единую для всех случаев методику моделирования. Выбор методики испытания радиационной надежности проводится с учетом индивидуальных свойств исследуемых объектов.

В таблице 1 приведены основные характеристики космических корпускулярных излучений.

Оценка радиационной стойкости материалов и элементов, располагаемых на внешней поверхности КА, осложняется еще тем , что на эти материалы одновременно с ионизирующими излучениями действуют другие факторы космического пространства, которые могут приводить к различным фотохимическим и плазмохимическим явлениям .

Воздействие на некоторые классы диэлектриков заряженных частиц излучений радиационных поясов Земли может приводить к аккумулированию этих зарядов в объеме и на поверхности таких материалов. Нескомпенсированность электрических зарядов в диэлектриках – к электрическому пробою и механическому разрушению элементов, например оптических стекол на внешней поверхности КА, изменению их оптических и других свойств, за счет радиационно-стимулированных физико-химических процессов, вызывающие структурные и фазовые изменения.

Таблица 1. Параметры галактических и солнечных космических лучей, радиационных поясов Земли и горячей магнитосферной плазмы.

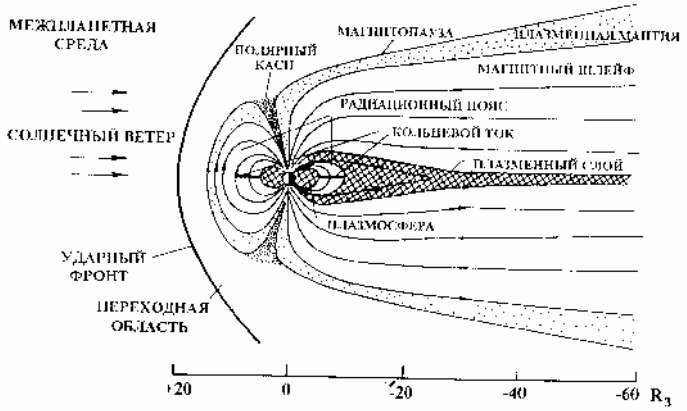
| Тип корпускулярных космических излучений | Состав | Энергия частиц, МэВ | Плотность потока, $м^{-2} \cdot с^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| Галактические космические лучи | Протоны (p)<br>Ядра He (α)<br>Тяжелые ядра | <br>$10^2$ -<br>$10^{15}$ | $1{,}5 \cdot 10^4$<br>$10^3$<br>$1{,}2 \cdot 10^1$ |
| Солнечные космические лучи | Протоны (p) | $1 – 10^4$ | $10^7$ - $10^8$ |
| Радиационные пояса Земли | Протоны (p)<br><br>Электроны (e) | 1 – 30<br>>30<br>0,1 – 1,0<br>>1,0 | $3 \cdot 10^{11}$<br>$2 \cdot 10^8$<br>$1 \cdot 10^{12}$<br>$1 \cdot 10^{10}$ |
| Горячая магнитосферная плазма | Протоны (p)<br>Электроны (e) | $10^{-3}$ –<br>$10^{-1}$ | $10^{11}$ - $10^{14}$ |

**Методы имитационных радиационных испытаний.**

Для бортовой аппаратуры космических объектов, имеющих тонкостенную защиту, наибольшую опасность в спектре космического корпускулярного излучения представляют электроны с энергиями от 0,5 до 7 МэВ, а также протоны и альфа-частицы с энергиями от 1 до 30 МэВ.

На рис.1 приведена общая картина структуры магнитосферы Земли и ее обтекания солнечным ветром.

Ионы более высоких энергий не могут вызвать заметных дозовых изменений в материалах из-за низкой плотности потока космического излучения, однако их следует учитывать как источник радиационного фона и помех в работе передающей и измерительной аппаратуры. Особо ощутимую опасность представляют высокоэнергичные ядра тяжелых элементов, входящих в состав галактических космических лучей (ГКЛ). Хотя их интенсивность крайне мала, каждая из таких частиц может вызвать очень сильную локальную ионизацию и дефектообразование в материалах узлов интегральной электроники и привести к радиационным одиночным сбоям (РОС), например, в элементах памяти бортовых ЭВМ.




РРис.1. Общая картина структуры магнитосферы Земли и ее обтекания солнечным ветром (меридиональный разрез)

На рис.2 приведена схема радиационных поясов Земли.

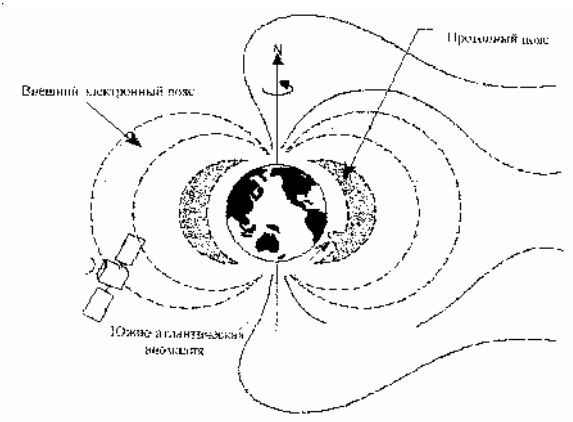



Рис.2. Схема радиационных поясов Земли

Для проведения имитационных радиационных испытаний материалов, используемых в космических аппаратах, применяется ряд подходов.

Разделение имитационных испытаний на последовательные стадии весьма условно и в отдельных случаях может дополняться и иными подходами. Приведем примеры.

1. Воспроизведение космической радиационной обстановки в точном соответствии с условиями на орбите в процессе эксплуатации материала, элемента или изделия на борту КА. Такие испытания, как правило, не требуют знания детальных механизмов взаимодействия радиационной среды с материалами и их можно проводить.
2. Разделение испытуемого объекта на составляющие части и выбор наиболее слабого звена, которое и будет определять в основном радиационную стойкость изделия.
3. Выбор одного или нескольких доминирующих типов ионизирующих излучений космического пространства, вызывающих основные радиационные изменения критического параметра исследуемого элемента, применительно к конкретной с учетом продолжительности функционирования КА.
4. Выявление и исследование в имитационных испытаниях преобладающего радиационно-физического процесса, вызывающего ухудшение основного параметра элемента, например в оптических материалах такими процессами являются образование радиационных центров окраски и радиолюминесценция.
5. .Разделение и выявление радиационных эффектов в испытуемом объекте, зависящих от дозы излучения, D, либо от мощности дозы излучения, P. Этот подход позволяет значительно упростить методику радиационных испытаний.
6. Разработка и проведение научно-обоснованных принципов ускоренных радиационных испытаний с целью удешевления и упрощения. Такой подход требует детального знания механизма радиационного взаимодействия.

Следующие сопутствующие факторы могут влиять на надежность ускоренных радиационных испытаний в зависимости от вида материала:

– радиационный разогрев испытуемого в лаборатории образца материала, подвергаемого облучению пучком заряженных частиц на ускорителе, этот фактор ограничивает коэффициент ускоренности испытаний в пределах $10^2 – 10^3$;

– радиационно-стимулированная диффузия, которая зависит от мощности дозы излучения и в имитационных ускоренных испытаниях должна всегда быть выше, чем в натурных условиях;

– радиационный отжиг дефектов; скорость этого явления также зависит от плотности потока частиц;

– каскадные радиационные процессы в облучаемых образцах, в первую очередь в полимерных материалах, терморегулирующих покрытиях, где время релаксации радиационных процессов, например, время жизни свободных радикалов, может достигать больших времен.

7. Разработка и обоснование в процессе испытаний возможности замены корпускулярных излучений со сплошными энергетическими спектрами, подобным космическим, моноэнергетическими корпускулярными излучениями, получаемыми на ускорителях заряженных частиц или от радиоактивных изотопов. Этот вид испытаний широко применяется для прогнозирования радиационной стойкости изделий, расположенных на внешней поверхности КА (солнечные элементы из кремниевых фотопреобразователей, терморегулирующие покрытия, оптические системы ориентации, лазерные зеркала .).

Поток космического корпускулярного излучения содержит частицы в широком энергетическом интервале, поэтому остановка частиц может произойти в любом элементе объема КА. Поскольку плотность потока космических частиц падает с увеличением их энергии, распределение радиационных дефектов по глубине объекта оказывается неоднородным.

Сокращению времени испытаний и повышению и повышению их надежности способствует применение специальных устройств, позволяющих преобразовывать пучки моноэнергетических частиц в пучки со спектром вида:$N(E)\sim E^{-\gamma}$,где N(E) – число частиц, энергия которых превосходит E, а γ – постоянная.

8. Применение комплексного испытания или серии последовательных раздельных испытаний материалов к воздействию радиационных факторов космического пространства. Этот подход повышает надежность испытаний и является основой для прогнозирования изменения параметров элемента в натурных условиях.

9. Натурные испытания наиболее ответственных элементов на борту КА. Они позволяют вынести окончательное суждение и дать рекомендации по их применению в штатном оборудовании, а также – возможность градуировать наземные имитационные испытания. Ценность таких испытаний возрастает при необходимости вынесения рекомендаций относительно работы элементов, расположенных в открытом космосе вне гермоотсека КА и подверженных воздействию различных факторов космического пространства. Такие испытания солнечных батарей (СБ), например, проводились на станции «Мир».

**Экспериментальные установки для радиационных испытаний.** Для имитации воздействия космических излучений на материалы и элементы оборудования КА требуется широкий спектр ускорителей заряженных частиц. Эти установки с 1963 г. применялись для имитации воздействия космических корпускулярных излучений на материалы и элементы оборудования в исследованиях, проводимых в Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ) и институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ) [1-8].

В последнее время в НИИЯФ МГУ были разработаны микротрон с энергией электронов 10 – 70 МэВ, а также серия линейных ускорителей электронов в интервале энергий 0,6 – 2,3 МэВ, которые используются как для решения фундаментальных задач, так и для моделирования воздействия космических корпускулярных излучений на материалы ИСЗ [9-10].

Таблица 2. Ускорители и радиоактивные изотопы, используемые для имитации воздействия космических корпускулярных излучений на материалы и элементы КА

| № п/п | Тип ускорителя или Радио-активного изо-топа | Тип излу-чения | Энер-гия излу-чен. МэВ | Радиационные эффекты в материалах |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Синхроцикло-трон (ОИЯИ, Дубна) | p | 650 | Радиационно-индуцированное поглощение оптических стекол |
| 2 | Линейный ин-жектор ЛИ-100 (ИФВЭ, Протвино) | p | 30,70, 100 | Протонная электриза-ция оптических сте-кол |
| 3 | Циклотрон (НИИЯФ МГУ) | p<br>α | 1–7,8<br>1-25 | Радиационные эффек-ты в ОМ и КФ |
| 4 | Электростати-ческий гене-ратор ЭГ-8 (НИИЯФ МГУ) | p<br>e<br>$He^+$<br>$He^+$<br><br>$M^+$ | 1–3<br>1–1,5<br>1-3 | Радиационные эффек-ты в ОМ<br>- “ -<br>Использ.РОР для мо-дифик. КФ.<br>Удары частиц с v~10-30 км/с |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 5 | Каскадный генератор КГ-500 (НИИЯФ МГУ) | p<br>α | 0,1– 0,5<br>0,1–1 | Радиационные воздействия на КФ и ТРП. |
| 6 | Ускоритель электронов ЭЛУ-4 ЛУ-10 (ИМЕТ) | e<br>e | 4<br>2,2 | Радиационно-индуцированное поглощение и электризация ОМ |
| 7 | Микротрон (ИМЕТ) | e | 23 | Радиационная электризация ОМ, лазерная оптика, металлы |
| 8 | Электронная пушка, лампа ДКСР (НИИЯФ МГУ) | e<br>УФ | 0,05 | Радиационные повреждения фрагментов СБ, полимеры . |
| 9 | Электромагнитный сепаратор (НИИЯФ МГУ) | p<br>$Kr^{+}$ | 0,03<br>0,03 | Радиационная стойкость ТРП, ионное распыление диэлектриков. |
| 10 | $Co^{60}$ (НИИЯФ МГУ), 0,25 Ки | γ | 1,25 | Радиационно-индуцированное поглощение ОМ |
| 11 | Изотоп $Cf^{252}$ 0,1 мкКи, НИИЯФ МГУ) | α,<br>ОД | 6,1<br>50-130 | Обратимые и необратимые РОС в микросхемах |
| 12 | Изотоп $Tl^{204}$ (10 мКи) (НИИЯФ МГУ) | β | 0,25 | Радиолюминесценция в ОМ |
| 13 | РУП-400 (НИИЯФ МГУ) | X | до 0,4 | Радиационно-индуцированное поглощение ОМ |

β – электроны от радиоактивного источника; γ – гамма-излучение; X – рентгеновское излучение, ОД – осколки деления, УФ – ультафиолетовое излучение Солнца, $M^{+}$ - ускоренные металлические частицы с $m \sim 10^{12}$ г, РОР – Резерфордовское обратное рассеяние, ОМ – оптические материалы, КФ – кремниевые фотопреобразователи, ТРП – терморегулирующие покрытия.

Ниже показаны установки, которые с 1963 года применялись для имитации воздействия космических корпускулярных излучений на материалы и элементы оборудования в исследованиях, проводимых в Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ) и Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ) (рис.3-7), [11,13].



Рис.3. Циклотрон НИИЯФ МГУ



Рис.4. Электростатический генератор (ЭГ-8) НИИЯФ МГУ



Рис.5. Каскадный генератор (КГ-500) НИИЯФ МГУ

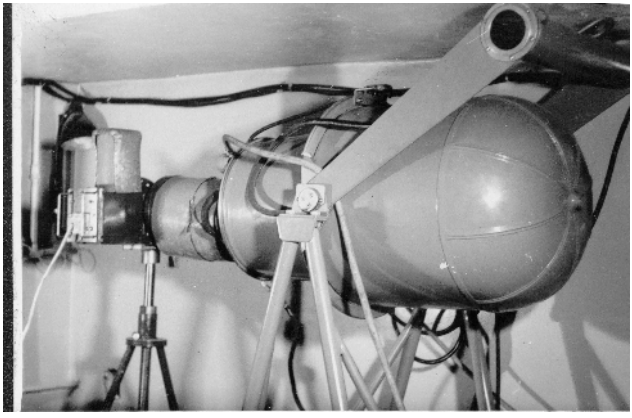


Рис.6. Рентгеновская установка промышленная (РУП-400) НИИЯФ МГУ

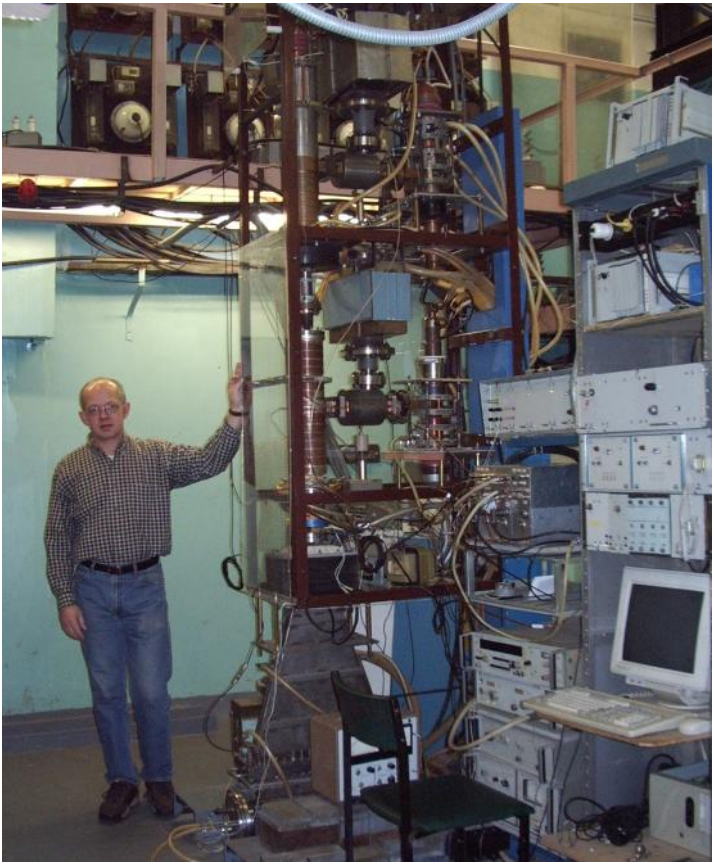


Рис.7. Линейный электронный ускоритель НИИЯФ МГУ, энергия 1,2 МэВ, ток 50 мА, средняя мощность 60 кВт

Сокращению времени испытаний и повышению их надежности может способствовать применение специальных устройств, позволяющих преобразовывать пучки моноэнергетических частиц (p, α), получаемых в ускорителях, в пучки со спектрами, близкими к космическим: $j(E) \sim j_0 E^{-\gamma}$ или $j(E) \sim j_0 e^{-E/E(0)}$, где j(E) – плотность потока частиц, энергия которых превосходит E; E(0) – const; $2<\gamma<5$; $j_0$ – константа нормировки. Такие пучки с энергиями от сотен кэВ до нескольких десятков МэВ можно

получить с помощью профилированной пластины переменного сечения, установленной на пути первичного пучка (рис.8) [4].

$$\frac{x}{M} = \left(\frac{E_{min}}{E_{max}}\right)^{\gamma}\left[\left(1-\frac{t}{R}\right)^{-\beta\gamma}-1\right]$$

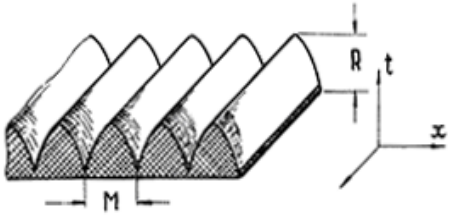



Рис.8. Схематическое изображение профилированной пластины переменного сечения

Если соотношение пробег-энергия для частиц в материале пластины удовлетворительно аппроксимируется соотношением $R^{\beta}\sim E$, то профиль пластины, преобразующий моноэнергетический пучок частиц, например, в спектр типа $E^{-\gamma}$, определяется формулой:

$$x=M(E_{min}/E_{max})^{\gamma}[(1-t/R)^{\beta\gamma}-1],$$

где t – толщина пластины в сечении x, $E_{min}$ и $E_{max}$ энергетические границы спектра, а M – модуль решетки пластины [1].

С помощью такой пластины можно в принципе получить из моноэнергетического пучка протонов и альфа-частиц непрерывный спектр частиц с энергиями от $E_{min}$ до $E_{max}$ с любым заранее заданным законом изменения спектральной плотности. Результаты преобразования моноэнергетического пучка протонов с энергией 6,3 МэВ после прохождения такой пластины приведены на рис.9 [ 1 ] .

Энергетический спектр протонов после прохождения пластины с переменным сечением был измерен с помощью сцинтилляционного спектрометра. Распределение дозы от космических корпускулярных излучений и пучков протонов и альфа-частиц, прошедших через трансформирующую пластину, имеет почти аналогичную зависимость от толщины в приповерхностной области в пределах $10^{-3}$ – $10^{-1}$ г/см$^2$ . Описанная методика находит применение в имитационных облучениях различных элементов КА (терморегулирующие покрытия, кремниевые фотопреобразователи и т.д.).

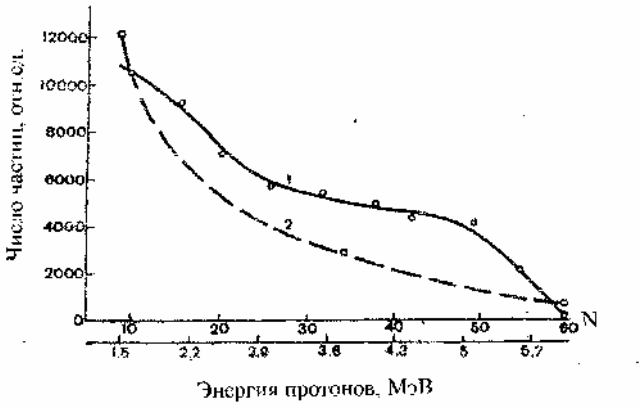



Рис.9. Преобразование монохроматического пучка протонов с энергией 6,3 МэВ:1 – дифференциальный энергетический спектр протонов после прохождения пучка протнов с энергией 6,3 МэВ через профилированную пластину. 2 – энергетический спектр протонов в космосе $j(E)\sim E^{-2}$ [1 ].

Другим возможным методом получения потоков частиц с непрерывным энергетическим спектром является использование вторичных частиц, образующихся благодаря ядерным реакциям атомов мишени с частицами первичного пучка [1].

Для получения пучков протонов могут быть использованы реакции (d,p) или (α,p). Спектр протонов, образующихся из возбужденных ядер, имеет максимум в области малых энергий.

Оценка показывает, что если использовать альфа-частицы, ускоренные на циклотроне до энергий 40 – 50 МэВ, то можно получить плотность потока $\sim 10^7$ протонов/см$^2$с. Недостатком этого метода является сопутствующий фон нейтронов и гамма-квантов [1].

Для преобразования моноэнергетических пучков электронов в пучки с энергетическими спектрами типа $j\sim e^{-E/E(0)}$ используются согнутые под углом $60^0$ танталовые пластины. Толщина пластин зависит от энергии пучка. Коэффициент преобразования электронных пучков описанным методом составляет несколько процентов [4].

Задача имитации электронного воздействия значительно упрощается, если использовать для этой цели β-излучение соответствующих радиоактивных изотопов. Применение радиоактивных источников имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием ускорителей. Радиоактивный изотоп $Sr^{90}$ – $Y^{90}$ по своей спектральной энергетической ха-

рактеристике наиболее близок к энергетическим спектрам электронов радиационных поясов Земли, рис.10. Средняя энергия β-излучения источника $Sr^{90} – Y^{90}$ около 0,8 МэВ.

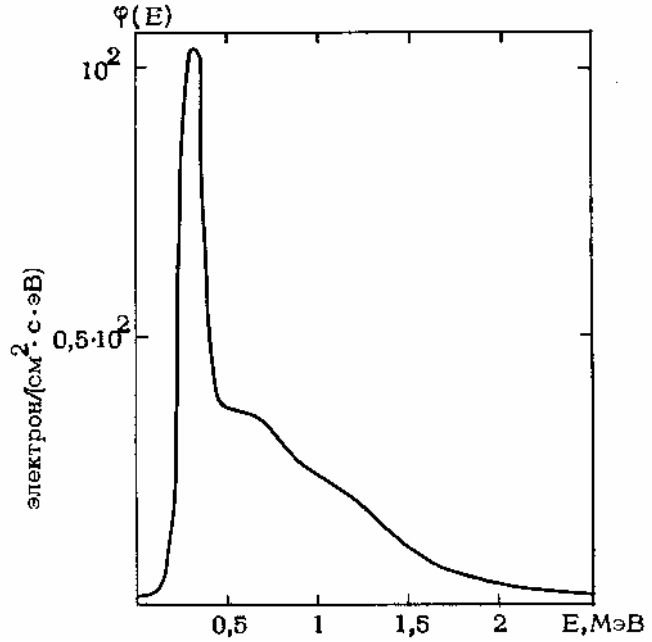



Рис.10. Дифференциальный спектр электронов радиоактивного источника $Sr^{90} – Y^{90}$, используемого в установках ВУКИ-1 и ВУКИ-2

Установки позволяют проводить исследования работоспособности изделий при комплексном воздействии с плотностью потока электронов до $10^8$ $см^{-2}·с^{-1}$, раздельном и циклическом изменении температуры от – 100 до $+100^0$С при давлении $10^{-3} – 10^{-5}$Па. Установки позволяют воспроизводить электрический режим работы изделий и измерять их параметры в процессе испытания в течение нескольких тысяч часов. Для создания вакуума до $10^{-5}$Па в установке ВУКИ-2 используются криосорбционные насосы.

Радиоизотопный источник $Sr^{90} – Y^{90}$ (2 Ки) был применен для имитации воздействия электронов радиационных поясов Земли на работоспособность изделий в вакуумных установках, имитирующих космические излучения, ВУКИ-1 и ВУКИ-2 (ИМЕТ) (рис.11)

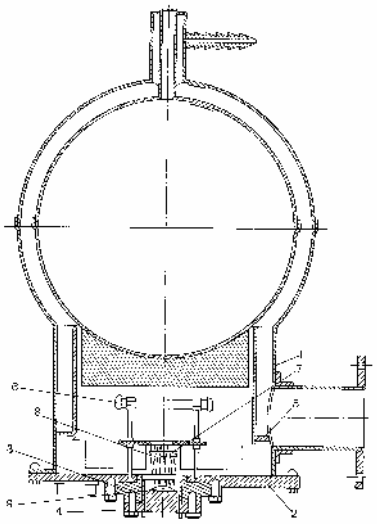


Рис.11. Вакуумная установка ВУКИ-1 для имитации факторов космического пространства: 1 – корпус; 2 – крышка; 3,4 – фланцы; 5 – мембрана; 6 – нагреватель; 7 – плата; 8 – испытываемые изделия; 9 – изотопный источник

Радиоизотопный источник $Sr^{90} – Y^{90}$ с активной зоной диаметром 20 мм вводится в гнездо, изолированное от вакуумной камеры алюминиевой фольгой – мембраной. Тепловой режим внутри вакуумных камер регулируется путем охлаждения жидким азотом внутренних стенок камер и двумя нагревателями.

Распределение плотности потока электронов от радиоактивного источника $Sr^{90} – Y^{90}$ на поверхности платы с изделиями и их энергетический спектр определялись с помощью стеклянных дозиметров и ядерного многоканального спектрометра.

Выполненные исследования работоспособности изделий электронной техники, и в частности, больших интегральных схем, на установках ВУКИ-1, ВУКИ-2 показали ее зависимость от газового состава вакуумной среды испытания. Полученные результаты показали необходимость учета в имитационных испытаниях радиационной стойкости материалов и изделий электронной техники, особенно работающих на поверхности космического аппарата, реальных вакуумных условий и, прежде всего, собственную атмосферу КА, которая возникает около любого изделия космической техники.

При облучении протонами кремниевых фотопреобразователей для трансформации моноэнергетических потоков протонов в сплошной спектр использовалась профилированная алюминиевая пластина толщиной 0,306 мм. Фотопреобразователи располагались за ней на расстоянии 2,5 см. Результаты облучения кремниевых фотопреобразователей потоком моноэнергетических протонов и потоком с энергетическим спектром типа $j(E)\sim e^{-E/E(0)}$ приведены на рис.12. Эффективность радиационного снижения тока короткого замыкания $I_{кз}$ выше в случае облучения фотопреобразователей потоком протонов со сплошным энергетическим спектром.

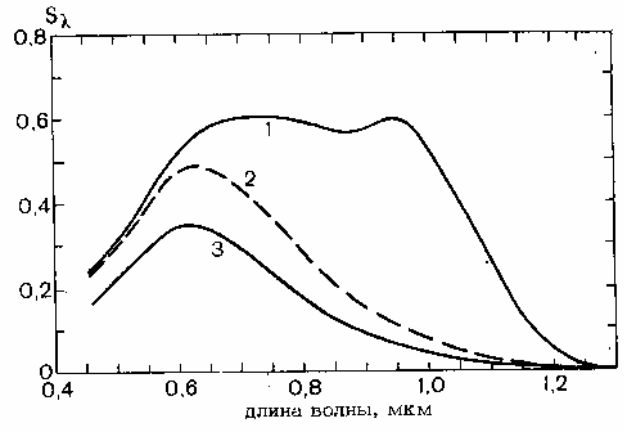



Рис.12. Спектральные чувствительности ФП до и после облучения протонами: 1, 2 – до и после облучения моноэнергетическими протонами с энергией 6,3 МэВ; 1, 3 – до и после облучения протонами с энергетическим спектром $j(E)\sim j_0 e^{-E/E(0)}$

Спектральные характеристики облученных фотопреобразователей указывают на более резкое изменение в видимой области под действием протонов низких энергий, повреждающих базовую область вблизи n-p перехода. Проведенные эксперименты свидетельствуют в пользу применения пучков со сплошным энергетическим спектром при прогнозировании радиационного повреждения фотопреобразователей в натурных условиях.

При изучении радиационного повреждения кремниевых фотопреобразователей в условиях, имитирующих воздействие космических излучений, приходится увеличивать плотность потока заряженных частиц в

$10^2 – 10^4$ раз по сравнению с космическими. Естественно, возникает вопрос о максимальной плотности потока частиц, который возможно использовать для этих целей без внесения заметных искажений. Из сравнения работы солнечных фотопреобразователей в условиях облучения естественной космической радиацией и расчетных данных, в основе которых лежат экспериментальные зависимости поведения солнечных фотопреобразователей при облучении в лабораторных условиях, следует хорошее согласие расчета и эксперимента.

Учитывая сложность процессов, происходящих при возникновении стабильных центров рекомбинации, и разные условия облучения вследствие бомбардировки фотопреобразователей потоками различной интенсивности, был поставлен эксперимент для выяснения влияния различной плотности потока протонов с $E_p$=6,3 МэВ на рабочие характеристики фотопреобразователей, Для этой цели кремниевые фотопреобразователи были облучены потоком протонов $\Phi_p=3{,}9\cdot10^{12}$ прот/см$^2$ при средней плотности потока частиц $j=8\cdot10^{11}$ прот/см$^2\cdot$с и $j=1{,}1\cdot10^9$ прот/см$^2\cdot$с. Каких-либо отличий в радиационном повреждении фотопреобразователей при плотности потока частиц, отличающейся в 800 раз, отмечено не было [5].

Экспериментальная установка для комплексного исследования электризации фрагментов солнечных батарей (S=0,35 м$^2$) состоит из вакуумной камеры с P~$10^{-5}$ Па, электронной пушки с энергией электронов 20-50 кэВ, плотностью тока от 1 до 10 нА/см$^2$, площадью пучка 0,35 м$^2$ и ксеноновой лампы высокого давления ДкСР-3000, имитирующую солнечную радиацию в интервале λ~0,2-3 мкм [14].

Исследовались разрядные процессы, возникающие в приповерхностных слоях (1-20 мкм) защитных стеклянных покрытий фрагмента солнечной батареи космического аппарата и полимерных пленочных материалов при одновременном воздействии электронных пучков и светового потока от лампы ДкСР-3000.

Одна из перспективных технологий по модификации кремниевых монокристаллических пластин, предназначенных для изготовления полупроводниковых фотопреобразователей, датчиков ИК-излучения и других полупроводниковых приборов, основывается на создании в их приповерхностной зоне тонкого дефектного слоя путем введения с помощью бомбардировки протонами или ионами гелия и последующего термоотжига. В модифицированном таким образом кремнии увеличивается подвижность электронов в приповерхностной зоне, в дефектном слое возрастает коэффициент поглощения в ИК-области и повышается удельное сопротивление. В НИИЯФ МГУ совместно с НПО «Квант» проводились исследования по разработке технологии изготовления мо-

дифицированных кремниевых пластин n- и p-типа с помощью бомбардировки ионами водорода с энергией 180 кэВ и ионами гелия с энергией 550 кэВ при флюенсе $3 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ с последующим их быстрым отжигом [15,16].

Выбор источников для исследования радиационной стойкости оптических стекол определяется следующими соображениями. Спектральные характеристики коэффициента пропускания стеклами после облучения различными видами ионизирующего излучения, например протонами и электронами, аналогичны. Зависимости оптической плотности стекла от дозы излучения хорошо совпадают для различных видов ионизирующего излучения. В первом приближении можно считать, что изменение пропускания стекол не зависит от типа корпускулярного ионизирующего излучения, если энергия заряженных частиц выше 1 МэВ и определяется только дозой излучения. Циклотрон НИИЯФ МГУ, который дает пучок протонов с энергиями 7,8 МэВ, является вполне приемлемым источником для получения характеристик радиационного окрашивания стекол. Измерение спектров пропускания оптических стекол, облучаемых протонами с энергией 6,3 МэВ на циклотроне НИИЯФ МГУ, производилось в зависимости от флюенса протонов и от времени в процессе изотермического отжига при комнатной температуре. Образцы стекол различных марок, закрепленные на диске, помещались в вакуумную камеру, в которую вводился пучок протонов от циклотрона,(рис.13).

Для измерения коэффициента пропускания стекла (0,4-0,8 мкм) в процессе облучения протонами использовался монохроматор ЗМР-3. Оптические стекла облучали электронами с энергией 2 МэВ на линейном ускорителе ЭЛУ-4 ИМЕТ, а также на ускорителе ЭГ-8 НИИЯФ МГУ (0,6-2,6 МэВ). Проводились эксперименты по термическому и фото отжигу радиационных центров окраски в оптических стеклах [17,18].

Для исследования радиационной электризации оптических стекол различных марок их облучали электронами с энергией 2 МэВ на ускорителе ЭЛУ-4 ИМЕТ и протонами с энергиями 30-100 МэВ на линейном инжекторе протонов (ИФВЭ, Протвино) [19,20].

Распределение внедренного заряда по толщине стекла, облученного электронами, измерялось в поляризованном свете (эффект Керра) [17]. На ускорителе ЭГ-8 НИИЯФ МГУ была создана установка с использованием эффекта Керра для исследования процесса электризации в процессе облучения электронами с энергией 0,6-2,6 МэВ. Распределение внедренного заряда по толщине оптического стекла марки Ф-101, облученного протонами с энергией 100 МэВ (флюенс $\sim 10^{13}$ $см^{-2}$; пробег протонов R~3 см), определялось также методом электрострикции [5]. Непо-

средственно измеряемой величиной является электрический отклик, измеряемый с помощью осциллографа, получаемый с образца при подаче на него импульсного электрического поля длительностью импульса ~$2 \cdot 10^{-8}$ с, максимальное значение поля 7 кВ. За время хранения облученных образцов в течении 10 лет в них сохраняется достаточно большой электрический заряд при E~$10^5$ В/м.

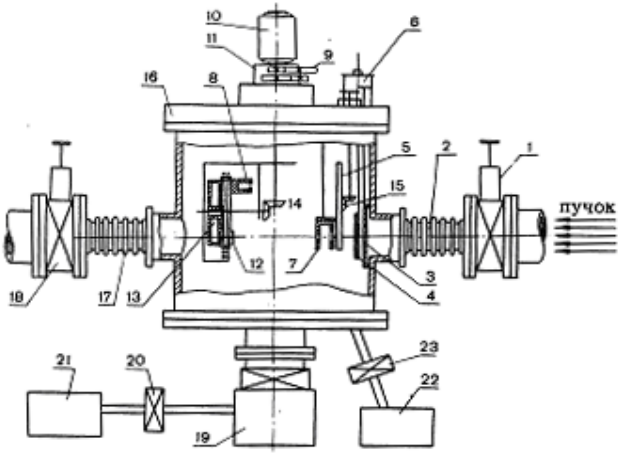



Рис.13. Принципиальная схема камеры для облучения образцов стекол на циклотроне 1, 18 – вакуумные вентили; 2, 17 – сильфоны; 3 – ограничивающая пучок диафрагма; 4, 6 – электромагнитный затвор; 5 – диск с тормозящими фольгами; 7 – коллиматор; 8 – цилиндр Фарадея на диске; 9, 10, 11 – механизм вращения диска, 12 – образец; 13 – резервуар с жидким азотом; 14, 15 – конические шестерни; 16 – съемный фланец; 19 ÷ 23 – элементы вакуумной системы.

При использовании стеклянных линз в разнообразной оптической аппаратуре, установленной на космических объектах, свечение внешней линзы, вызванное космическим корпускулярным излучением, может служить помехой основному световому сигналу. Поэтому большое значение имеет изучение радиолюминесцентных свойств стекол, установление основных закономерностей выхода свечения в зависимости от состава образцов, измерение спектров, температурной зависимости свечения и т. д. Знание этих факторов играет решающую роль при оценке возможных световых помех [18].

**Методы исследования радиационных одиночных сбоев в микросхемах**

В полупроводниковых и диэлектрических элементах микросхем, под действием одиночных ядер ГКЛ и РПЗ возникают разнообразные по своей природе ионизационные явления, связанные с треком проникающего ядра или образованием заряженных продуктов ядерных реакций в чувствительном объеме полупроводникового элемента, сопровождаемых образованием ударных волн различной природы. Как было показано в работах [19,20] эти явления могут существенно уменьшать удельное сопротивление полупроводниковых материалов и изменять характеристики базовых полупроводниковых приборов и интегральных схем, вызывая, радиационные одиночные сбои (РОС), которые условно можно разделить на четыре типа.

1. Обратимые и необратимые РОС в цифровых микросхемах оперативной памяти бортовых ЭВМ и радиационные шумы в полупроводниковых приборах.

2. Возникающие эффекты выгорания или электрического пробоя подзатворного изолятора ($SiO_2$) в силовых транзисторах за счет собирания электронов и дырок из трека тяжелого ядра, вызывающие рост напряженности электрического поля E в изоляторе и создающие благоприятные условия для его электрического пробоя. При этом возникающие при образовании трека от тяжелых ядер ударные волны также могут способствовать пробою изоляционного слоя.

3. Эффекты защелкивания КМОП-микросхем от отдельных ядер в результате возникновения в структуре критической амплитуды ионизационного тока в цепи питания.

4. Искажение передаваемой информации за счет ложных световых импульсов в элементах оптоэлектронных приборов, волоконной и интегральной оптики, возникающих в результате импульсной радиолюминесценции при прохождении одиночных ядер.

Эффективность образования РОС микросхем в значительной степени определяется линейной потерей энергии (ЛПЭ) взаимодействующего с материалами микросхем ядра, выраженной в МэВ.см$^2$ мг$^{-1}$ . Для тяжелых ядер космических лучей типа железа с энергией 100 МэВ/нуклон и выше ЛПЭ составляет около 30 МэВ.см$^2$ мг$^{-1}$, для протонов с энергией 20-100 МэВ ЛПЭ около 1-3 МэВ.см$^2$ мг$^{-1}$. По мере миниатюризации микросхем критический уровень ЛПЭ, ответственный за возникновение РОС микросхем, снижается.

Чувствительность микросхем к РОС определяется экспериментально в лаборатории путем измерением двух основных характеристик: зависимости поперечного сечения РОС от ЛПЭ и определения порого-

вого минимального значения ЛПЭ, при котором наблюдается РОС.

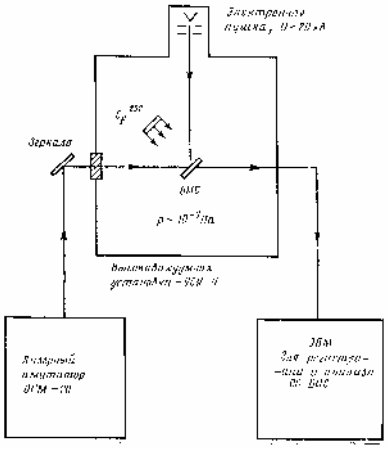



Рис.14. Схема стенда для измерения критического заряда и сечения РОС БИС калифорния-252 и лазерного импульсного излучения.

Для получения этих параметров при лабораторных испытаниях применяются разнообразные методики с использованием ускорителей тяжелых ионов, осколков деления радиоактивного изотопа ($Cf^{252}$), импульсных лазерных пучков, ионных микрозондов и импульсных электронных микропучков, получаемых на базе растрового электронного микроскопа.

Для определения сечения РОС микросхем в основном применяются циклотроны, ускорители тяжелых ионов с энергиями 1-100 МэВ/нуклон (ОИЯ, г. Дубна) с низкой интенсивностью ионных пучков в диапазоне ЛПЭ 1-100 МэВ $см^2$ $мг^{-1}$. Эта методика оптимальная, основной ее недостаток - высокая стоимость исследований.

Энергетический спектр осколков деления от радиоактивного изотопа $Cf^{252}$ имеет два пика, лежащих около 80 и 110 МэВ. Осколки деления при средней ЛПЭ около 43 МэВ.$см^2$ $мг^{-1}$ находят применение для изучения РОС микросхем (рис.14,15) [19,20]. Пробег таких осколков в кремнии около 15 мкм, поэтому приходится испытывать микросхемы без корпусов в вакууме. Недостаток этой методики состоит в том, что она не позволяет определять пороговое значение ЛПЭ, ответственное за РОС, и точное значение поперечного сечения РОС микросхем. Эта методика полезна для сравнительной оценки чувствительности разных типов микросхем.

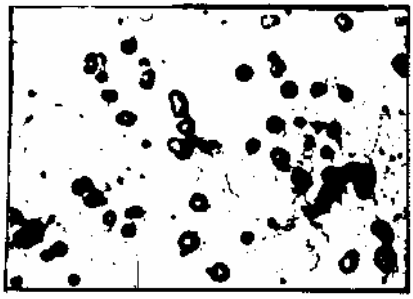


Рис.15. Фотография каналов в металлизированной полиамидной пленке, образовавшихся в результате электрических разрядов по трекам осколков деления $Cf^{252}$, $E \sim 10^6$ В/см

Лазерные импульсные пучки используются для исследования механизма РОС микросхем, имитируя взаимодействие тяжелых одиночных ионов за счет изменения длины волны и интенсивности лазерного пучка (рис.15) [20-22].

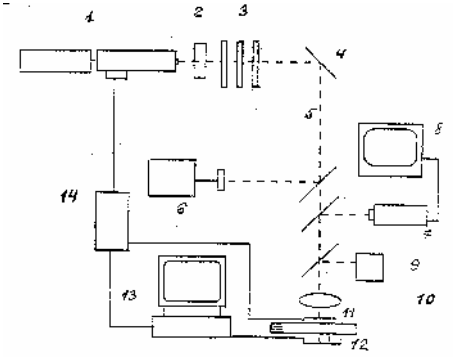



Рис.16. Схема лазерной системы, используемой для генерации РОС в БИС [22]: 1 – импульсный лазер; 2,3 – оптическая система, формирующая пучок; 4 – зеркало; 5 – ось светового пучка; 6 – измеритель энергии пучка; 7 – видеокамера; 8 – монитор; 9– осветитель; 10 – объектив; 11 – микросхема; 12 – столик; 13 – компьютер;
14 – линия задержки

Ионные микрозонды (рис.17) позволяют с высокой разрешающей способностью путем сканирования определять область микросхемы, наиболее чувствительную к РОС (рис.18) [23]. Диаметр ионного зонда составляет около 0,5 мкм. С целью снижения уровня сопутствующего радиационного повреждения облучаемых элементов микросхем при исследовании РОС, в процессе сканирования применяются пучки ионов с низкой интенсивностью вплоть до одиночных частиц.

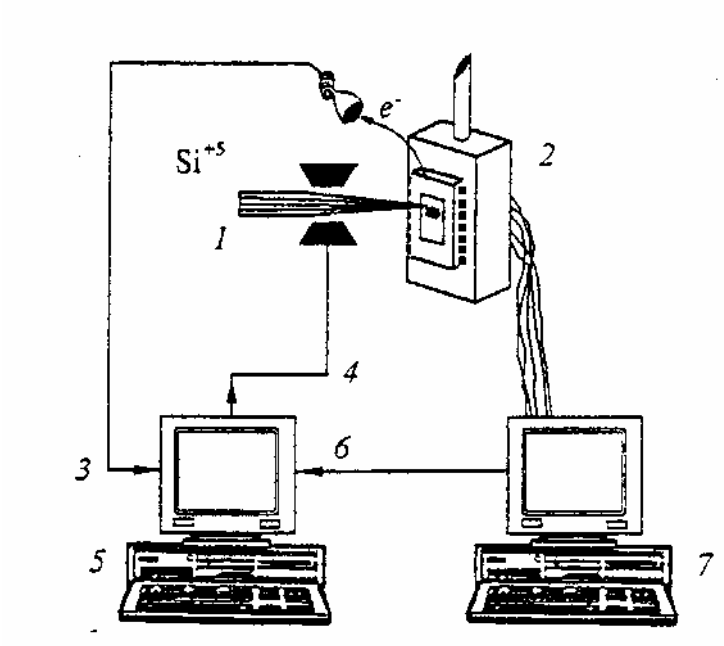



Рис.17. Блок-схема ионного микрозонда для изучения РОС микросхем: 1 – ионы $Si^{+5}$; 2– микросхема; 3 – сигнал датчика вторичных электронов; 4 – управление пучком; 5 – компьютер; 6 – сигнал РОС БИС; 7 – компьютер для управления БИС [23]

Важную информацию о природе РОС микросхем можно иметь из данных, получаемых путем анализа радиационных сбоев бортового электронного оборудования различных ИСЗ. Для КА с низкой орбитой (типа "Мир") максимальная интенсивность РОС микросхем сконцен-

трирована в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии, где РПЗ провисает на низкие высоты (250-300 км). Этот факт подтверждает, что основная доля РОС для орбит связана с воздействием высокоэнергичных протонов РПЗ.

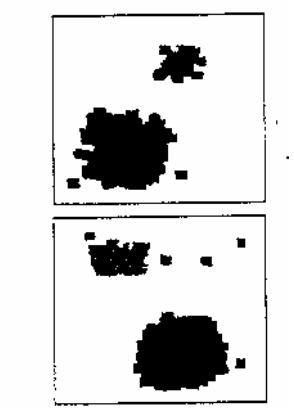


Рис.18. Изображение областей, чувствительных к РОС микросхемы, обнаруженных при облучении микросхемы ионами аргона с энергией 144 МэВ [23]

## 3. ОБЪЕМНЫЕ РАЗРЯДЫ В РАДИАЦИОННО-ЗАРЯЖЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

При облучении диэлектрических материалов заряженными частицами может возникать их радиационное заряжение. Такое состояние диэлектрика характеризуется аккумулированием в их объеме термализованного инжектированного заряда и как следствие образование высокой напряженности электрического поля, Е. Если $E > E_{пр}$, где ($E_{пр}$ - электрическая прочность диэлектрика), возникает спонтанный электрический пробой аккумулированного заряда на поверхность диэлектрика, что имеет место в случае облучения диэлектрика критическим флюенсом частиц, $Ф_{кр}$, который в свою очередь зависит от материала и условий облучения [1-6]. На рис.1 показано электрическое дерево в объеме облученного цилиндра из полиметилметакрилата (ПММА) после электрического пробоя внедренного заряда.

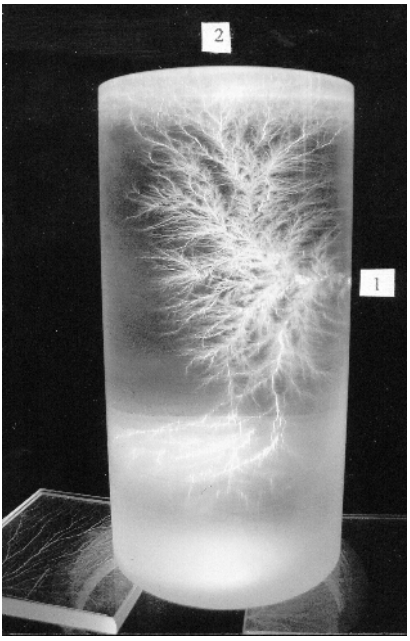



Рис.1. Образование электрического дерева (фигура Лихтенберга ) в объеме облученного цилиндра из ПММА после электрического пробоя внедренного заряда:1 – выход разрядного канала; 2 – торец цилиндра, через который проводилось облучение электронами Е=22 МэВ, Ф~$10^{13}$ $см^{-2}$

На рис.2 показана фигура Лихтенберга, образовавшаяся в шаре из ПММА диаметром 10,5см после электрического пробоя внедренного в его объем электрического заряда при облучении электронным пучком с энергией 22 МэВ, Ф~ $10^{13}$ эл. /$см^2$.

Объемное заряжение и сопутствующие электроразрядные процессы в диэлектрических материалах при облучении их потоками электронов высокой энергии имеют как научный, так и практический интерес. При функционировании ИСЗ в радиационных поясах Земли, в частности на геостационарной орбите, в период магнитосферных возмущений возникают электроразрядные аномалии ИСЗ за счет объемного заряжения и спонтанных разрядов диэлектрических элементов аппарата под действием электронов с энергией 1-10 МэВ[2,4].



Рис.2. Электрическое дерево (фигура Лихтенберга), образовавшееся в объеме шара из ПММА диаметром 10,5 см после электрического пробоя внедренного в его объем электронного заряда при облучении электронным пучком, Е=22 МэВ, Ф~$10^{13}$ эл/$см^2$

В ускорителях заряженных частиц и в установках управляемого термоядерного синтеза диэлектрические криогенные элементы могут приобретать избыточный внедренный заряд за счет рассеянных заряженных частиц и гамма-излучения, что может дестабилизировать работу установок.

**Электрический объемный пробой полимеров при облучении электронами**

В настоящей работе исследовались процессы объемного заряжения и электрического пробоя радиационно-заряженного шара диаметром 10,5 см из ПММА, при облучении электронами с энергией 22 МэВ. В качестве модельного диэлектрического материала был выбран ПММА, т.к. многие электрофизические характеристики этого диэлектрика при облучении и заряжении электронами с энергией несколько МэВ хорошо известны.

Шар из ПММА облучался на воздухе выведенным из микротрона ИМЕТ им. А.А. Байкова пучком электронов с энергией 22 МэВ. Шар размещался на расстоянии ~1м от выхода электронного пучка из микротрона, и вращался со скоростью около 2 обор/мин. Время облучения составляло несколько минут. Выходной средний ток пучка микротрона - I~3-4 мкА. Выведенный из микротрона электронный пучок рассеивался

при прохождении алюминиевой фольги и воздуха. Диаметр рассеянного электронного пучка перекрывал диаметр шара. Реальная плотность электронного пучка, которым облучался шар, соответствовала 30-60 нА/см$^2$ [7].

Как известно, коэффициент захвата термализованных электронов пучка в объеме ПММА составляет ~50%. Время, в течение которого концентрация захваченных электронов в ПММА понижается в 2 раза после выключения электронного пучка, составляет $10^3$-$10^4$ с [8].

Концентрация захваченного предпробойного электронного заряда в объеме ПММА, по оценкам, может составлять несколько мкК/см$^3$. При этом, средняя предпробойная напряженность электрического поля, Е, в объеме шара – 1,8 МВ/см. Интервал Е в объеме облученного электронами ПММА лежит в пределах 1-3,5 МВ/см.

Можно допустить, что внедренный электронный заряд распределялся относительно равномерно по всему объему облучаемого шара в результате его вращения и с учетом того, что эффективный пробег электронов с Е~22 МэВ в ПММА составляет около 12 см. В приповерхностной зоне шара толщиной 3-5 мм концентрация внедренного электронного заряда по-видимому резко снижается из-за краевого эффекта.

Шар располагался на металлической плите. При облучении ионизированный воздух в районе шара имеет высокую проводимость, что обеспечивает заземление поверхности шара. Основной разрядный канал в шаре заканчивался на заземленной металлической плите.

Флюенс электронов, при котором возникал объемный спонтанный электрический пробой радиационно-заряженного шара, составлял $10^{13}$ эл/см$^2$ (см. рис.2). Основные оценочные характеристики электронного облучения шара из ПММА и электрического пробоя внедренного заряда приведены в таблице 1.

По оценкам интегральный заряд в шаре составлял ~100-200 мкК. Энергия разряда рассчитывалась из энергии, затраченной на образование разрядного канала в ПММА. Ток разряда в основном канале при $\tau$~1 мкс оценивается как $I_p$~100 200 А. В канале имеет место концентрация мощности разряда ~$10^7$ Вт и удельной мощности ~$10^{11}$-$10^{12}$ Вт/см$^3$.

В научных публикациях отсутствует четкая физическая модель электрического пробоя объемных радиационно-заряженных полимерных диэлектриков, используемых, например, в качестве конструктивных элементов ИСЗ или других электрофизических устройствах [9-14].

Образовавшаяся объемная фрактальная разрядная структура в шаре имеет ветвистое строение. Фрактальная размерность, $d_f$, у таких структур находится в интервале $1<d_f<2$. В том случае, если электрическое дерево имеет форму кустарника, то ее фрактальная размерность лежит в

интервале $2<d_f<3$. Известно, чем выше фрактальная размерность электрического дерева, тем ниже скорость его прорастания в диэлектрике [15,16].

Таблица 1. Основные оценочные параметры электронного облучения шара из ПММА и электрического пробоя

| Параметры | Величина |
|---|---|
| Электрическая прочность (средняя) | $E_{пр\ ср}$=1,8 МВ/см |
| Энергия электронов | $E_e$=22 МэВ |
| Плотность тока электронного пучка | J=30-60 нА/см$^2$ |
| Критический флюенс электронов | $\Phi_e=10^{13}$-$10^{14}$эл/см$^2$ |
| Предпробойная доза излучения | $D=10^4$-$10^5$ Гр |
| Мощность дозы излучения | $P=10^2$-$10^3$ Гр/с |
| Время пробоя | $\tau_p$~1 мкс |
| Диаметр основного разрядного канала | $d_p$~50-100 мкм |
| Разрядный ток в основном канале | $I_p$~100-200 А |
| Плотность тока в канале | J~$10^6$ А/см$^2$ |
| Энергия разряда | $E_p$~10-20 Дж |
| Мощность разряда | $P_p$~$10^7$ Вт |
| Удельная плотность мощности в канале | $10^{11}$-$10^{12}$ Вт/см$^3$ |

Фрактальная размерность электрического дерева определяется некоторым фактором, характеризующим хаотическую природу механизма в момент его прорастания в изолятор. Электрические деревья с низкой размерностью $d_f$ должны быть связаны с более хаотичным процессом, чем электрические деревья с высокой размерностью $d_f$.

При прорастании электрического дерева в диэлектрике можно рассмотреть две стадии развития, прежде чем электрическое дерево вызывет электрический пробой. Сначала появляется стадия зарождения, в виде малой каверны (область материала с пониженной плотностью) в точке с высокой напряженностью электрического поля, E, достаточно большой для поддержания парциальных разрядов. При длительном воздействии E электрическое дерево будет прорастать через изолятор, образуя сложную форму. Последняя стадия электрического пробоя полимерного изолятора связана с формированием разрядного канала, т.к. в этот момент протекает максимальный разрядный ток.

Сопутствующим явлением при пробое полимерного изолятора будет эмиссия из основного разрядного канала плазмоида. Такой плазмоид в вакууме состоит из плазмы, газа и твердых частиц, возникающих за счет деструкции материала.

Чтобы понять формирование электрического дерева в полимерных материалах, необходимо объяснить, как возникают в объеме материала при наличии электрического поля каверны. Очевидно, этот процесс имеет хаотическую природу и требует передачи энергии от электрического поля в полимер.

Предполагается, что зарождение электрического дерева начинается с инжекции заряда в полимер, что связывается, например, с появлением электролюминесценции, которая предшествует появлению парциальных разрядов в полимерном изоляторе. Электролюминесценция – это энергия, освобожденная из полимера и не использованная для разрушения структуры полимера. Электролюминесценция характеризует наличие в объеме инжектированных зарядов, которые передают энергию и возбуждают молекулы полимера и его компонент. В этих условиях инжекция заряда доставляет в полимер энергию, которая тратится на химическую деструкцию молекулярной структуры, и как следствие, в материале возникает система сообщающихся друг с другом каверн, в которых может поддерживаться газовый разряд. Сам механизм формирования каверн до конца не ясен. Одно из предположений возникновения такого процесса связано с ударной ионизацией и возбуждением молекул полимера горячими электронами в высоком электрическом поле. Электроны имеют большую подвижность и легко ускоряются. Другое предположение - воздействие ультрафиолетового излучения от возбужденных молекул. При разрыве молекулярных связей образуются свободные радикалы, которые потом соединяются с кислородом, образуя летучие фрагменты.

Прорастание электрического дерева характеризует процесс перехода от зарождения к распространению парциальных разрядов в газонаполненных каналах, где генерируемый заряд $Q \geq 0{,}1$ пкК, а линейный размер первичной каверны $L_k \sim 5\text{-}10$ мкм, и радиус каверны $R \sim 1$ мкм, $\tau_p \sim 10\text{-}100$ нс. Давление в канале соответствует по-видимому минимуму кривой Пашена, где $P \sim 1$ Па. Такие разряды инжектируют заряды в полимер вокруг головки разряда, т.е. играют роль электрода в процессе прорастания электрического дерева, за счет многоступенчатого разрядного процесса.

Световое излучение электролюминесценции концентрируется на вершинах электрического дерева, сама структура электрического дерева является проводящей.

В тех электрических деревьях, которые прорастают посредством инжекции парциальных разрядов, главное значение имеет путь, выбранный единичным парциальным разрядом внутри структуры электрического дерева, он определяет вершины, где может произойти разрушение полимера. Электрические деревья развиваются во времени, как при

постоянном, так и при переменном напряжении, поэтому временной анализ развития электрического дерева может дать много полезной информации. В качестве примера на рис.3 приведена временная зависимость прорастания электрического дерева (фигура Лихтенберга) в полиэтилене [12].

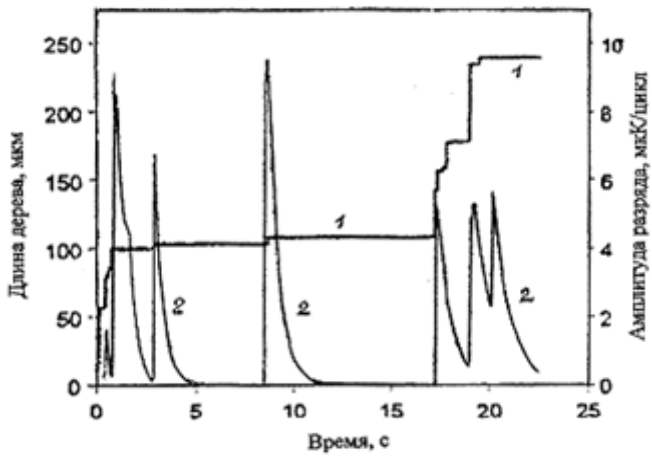



Рис.3. Временная зависимость прорастания электрического дерева (фигуры Лихтенберга) в полиэтилене:1 – временная характеристика. 2 – амплитуда разрядных импульсов за определенный период

Перспектива дальнейших исследований связывается с изучением эмиссионных явлений, возникающих из разрядного канала диэлектрика в процессе электрического пробоя. Второй аспект, определяющий интерес к исследованиям свойств полимерных плазмоидов, возникающих при пробое высоковольтных радиационно-заряженных диэлектриков, связан с поиском в их структуре лавины релятивистских убегающих электронов, которые, как предполагают, создают условия для возникновения нового типа газового разряда в воздухе при атмосферном давлении. Есть основание предполагать, что этот тип разряда может быть реализован и в конденсированных диэлектрических средах при наличии высоких потенциалов.Кроме спонтанного пробоя при облучении диэлектрических материалов заряженными частицами возможен также инициированный пробой радиационно-заряженного диэлектрика.

В условиях космического полета инициированное электроразрядное разрушение диэлектрических материалов, подвергаемых одновремен-

ному воздействию электронных и микрометеорных потоков, может наблюдаться во внешних диэлектрических покрытиях, например в защитных стеклах солнечных батарей. Диэлектрические материалы ИСЗ одновременно подвергаются воздействию электронных и протонных потоков, что приводит к образованию в объеме материалов зон с разноименными электрическими зарядами. Аналогичные явления могут протекать в диэлектрических структурах ускорителей на встречных пучках. Поэтому исследование механизма внедренного электрического пробоя разноименных зарядов в облученных диэлектриках представляет определенный практический интерес.

Количественное описание разрушений, вносимых в диэлектрик разрядными каналами, затруднено. Методика фотометрирования фигуры Лихтенберга дает возможность оценить степень механического повреждения стекол. На рис.4 показано распределение полного объема разрядных каналов в радиационно-заряженном ПММА после спонтанного электрического пробоя в зависимости от их диаметра.

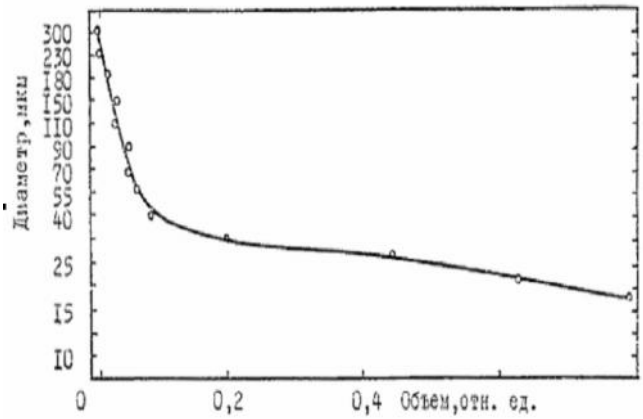



Рис.4. Распределение полного объема разрядных каналов в радиационно-заряженном ПММА после спонтанного электрического пробоя в зависимости от их диаметра.

Основной вклад в диффузионное рассеяние света обусловлен каналами диаметром в несколько десятков микрометров.

**Ступенчатый механизм электрического пробоя**

Современные модели электрического пробоя твердых полимерных диэлектриков с внешними электродами предполагают наличие ступенчатого механизма прорастания древовидных электроразрядных каналов

в объеме диэлектриков. Каждый последующий шаг такого пробоя связывается с образованием локальных (10-50 мкм) трубчатых полостей в объеме диэлектрика, заполненных газообразными продуктами за счет электроразрядной деструкции материала. Ступенчатый последовательный процесс развития разрядных каналов при пробое хорошо согласуется со схемой образования древовидных фрактальных структур и подтверждает важную роль вероятностного фактора в развитии каждого локального шага в прорастании канала. Протяженность и вероятность каждого шага в прорастании канала в основном связывается с флуктуацией напряженности локального электрического поля, E, которая в свою очередь определяется адсорбированным зарядом, который концентрируется в зоне повреждения на конце ранее созданной разрядной микрополости.

Величина E определяется из предположения, что образовавшиеся ранее разрядные каналы являются проводящим скелетом, встроенным в объем диэлектрика. Вероятность прорастания локального разрядного канала в каждой точке объема при очередном шаге пропорциональна $E^n$.

Разрядно-лавинная модель электрического пробоя твердого полимерного диэлектрика с внешними электродами наиболее полно согласуется со ступенчатым механизмом прорастания древовидных разрядных каналов и основывается на ионизации вещества в результате прохождения электронных лавин и пробоя. Однако количественный физический механизм такого электрического пробоя в твердых полимерных диэлектриках пока отсутствует, поскольку до конца не ясен процесс образования трубчатых локальных каверн в процессе ионизационных лавин. Предполагается, что лавина вызывает повреждения на своем пути пропорционально числу ионизаций.

Далее приводятся экспериментальные данные, полученные при изучении электрического пробоя в радиационно-заряженных силикатных стеклах в отсутствие внешних металлических электродов при их облучении электронами с энергией до 25 МэВ. Эти данные согласуются с моделью ступенчатого механизма прорастания древовидных разрядных каналов в облученных неорганических стеклах при их электрическом пробое. Анализировались полученные осциллограммы свечения электрического пробоя в силикатном оптическом стекле марки ТК-114, облученном электронами с энергией 25 МэВ и флюенсом $3 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$. Инициирование электрического разряда в объеме облученного стекла производилось с помощью светового пробоя от лазерного импульса. Излучение лазера на кристалле АИГ:$Nd^{3+}$ ($\lambda$=1,064 мкм, $\tau_и$=1,5.$10^{-8}$ с, E~$10^{-3}$ Дж) фокусировалось линзой с F=3,5 см в объем облученного электронами стекла. Осциллограмма электрического пробоя ($\tau$~$10^{-7}$ с) промоду-

лирована высокочастотной компонентой. Есть основание предполагать, что источником такой модуляции является ступенчатый (прерывистый) механизм при локальных разрядах в процессе прорастания древовидных электроразрядных каналов в стекле при электрическом пробое. Средняя длительность модуляционного сигнала лежит в интервале $5\text{-}15.10^{-9}$ с. Это соответствует данным, полученным в процессе электрического пробоя твердых полимерных диэлектриков с внешними электродам, где продолжительность микроразрядов при каждом локальном шаге пробоя оценивается 10-100 нс.

Можно предположить, что ступенчатый механизм электрического пробоя радиационно-заряженных диэлектриков является ответственным за высокочастотную электромагнитную эмиссию (f>100 МГц) при генерации импульса электромагнитных помех.

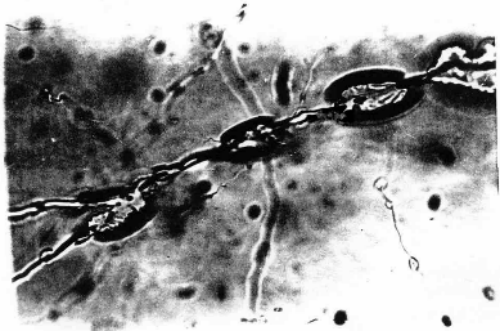


Рис.5 Микрофотография разрядного канала в стекле, облученном электронами с энергией 4 МэВ, после электрического пробоя внедренного заряда. Хорошо виден прерывистый характер пробоя (увеличение в 100 раз).

На микрофотографиях разрядного канала (рис.5,6) после электрического пробоя радиационно-заряженного стекла ТК-114, полученных с помощью оптического микроскопа (увеличение х100), хорошо видны каналы, состоящие из цепочки последовательных локальных трубчатых полостей размером в десятки микрон, нанизанных на трек разрядного канала, что также не противоречит модели ступенчатого электрического пробоя в твердом полимерном диэлектрике.



Рис.6. Микрофотография структуры разрядного канала после пробоя в оптическом стекле, облученном электронами с энергией 2 МэВ (увеличение 10 раз)

**Фрактальный характер фигур Лихтенберга**

Теория фрактальных процессов часто применяется для анализа структуры и свойств объектов, возникающих при протекании неравновесных событий с сильным взаимодействием между его компонентами. Фрактальные системы образуют мир объектов и явлений, которые в отличие от непрерывных систем характеризуются рваной и дробной структурой. При воздействии на твердые диэлектрики заряженных частиц происходит их радиационная электризация, приводящая к разнообразным подобным эффектам. Возникает электрический пробой диэлектрика и, как следствие, в его объеме образуются разрядные структуры в виде фигур Лихтенберга (рис.7).

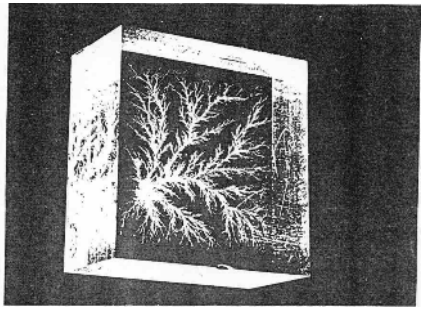


Рис.7. Фигура Лихтенберга в виде объемного фрактала, образовавшаяся после электрического пробоя ПММА, облученного электронами с энергией 4 Мэв, флюенсом $10^{13}$ $см^{-2}$

В разрядных каналах за счет испаренного вещества формируются фрактальные кластерные частицы и многое другое. Эти процессы, как, оказалось, полезно рассматривать с учетом применения концепции фрактальной геометрии в физике. Понимание фрактальных свойств объекта дает возможность более детально описать его, но суть его природы естественно определяют другие физические свойства.

Классический пример использования фрактальной геометрии в этой области является анализ фигур Лихтенберга, образующихся в радиационно-заряженном твердом диэлектрике в процессе электрического пробоя (рис.8). При облучении диэлектриков электронами, протонами с энергией в диапазоне 1-100 МэВ и более наблюдается их объемная радиационная электризация, выражающаяся в аккумулировании заряда и на конечном этапе в образовании фигур Лихтенберга в процессе электрического пробоя, внедренного в облученный диэлектрик отрицательного или положительного заряда, от пучка частиц. Фигуры Лихтенберга рассматривались с помощью интерактивной системы анализа изображений с применением компьютерной технологии.

По этой технологии с помощью подпрограммы уменьшалась толщина отображения разрядных каналов без изменения их длины, а затем компьютерное изображение (рис.8) разрядных структур в диэлектрике покрывалось множеством квадратов со стороной, $\eta$, которая варьировалась от 1 до 128.

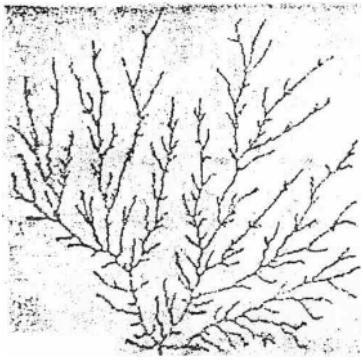


Рис.8. Компьютерное изображение на мониторе фигур Лихтенберга без изменения их длины. Фигуры образовались в облученном электронами полиметилметакрилате после электрического пробоя

Определялось число квадратов $N(\eta)$, необходимых для покрытия изображения разрядной структуры. Полученная зависимость имеет вид: $N(\eta) \sim \eta^{-D}$ .

Фрактальная размерность разрядных структур, D, является угловым коэффициентом графической зависимости $\lg N(\eta) \sim \varphi(\lg\eta)$. Измеренная размерность D~1,6 хорошо укладывается в диапазон значений фрактальной размерности, получаемой при экспериментальном исследовании других фракталов.

Фрактальный кластер – удобный объект для построения численных моделей, позволяющих исследовать влияние условий роста на его форму. Компьютерные модели составили основу представлений об этих объектах (рис.9).

Аналогичная картина формирования микроскопических фрактальных кластеров имеет место при воздействии импульса лазера и возникновения светового пробоя в объеме прозрачных диэлектриков, в состав которых входит углерод и кислород. В зоне светового пробоя за счет диссоциации легко ионизуемых примесей в диэлектрике создается дополнительная концентрация свободных электронов, поглощающих лазерное излучение. В результате возникают условия, приводящие к термохимической неустойчивости среды, связанные с процессом термического разложения основного окисла стекла. Фрактальное состояние вещества реализуется в виде фрактальных кластеров микронных размеров, а также путем возникновения микроскопических образований типа нитей, клубков в миллиметровом интервале.



Рис.9. Компьютерное представление фигур Лихтенберга в диэлектрике, полученное с помощью компьютерного моделирования (5000 операций). Фрактальная размерность полученной структуры D~1,75

Фрактальные нити образуются из неравновесной низкотемпературной плазмы во внешнем электрическом поле. Состояние вещества в виде нитей характеризуется большой пористостью, низкой плотностью порядка 10 г/см и высокой объемной плотностью поверхностной энергии. По своим свойствам фрактальные нити занимают промежуточное положение между газом и конденсированным веществом и представляют новое физическое состояние вещества, которое заманчиво использовать в прикладных задачах. Фрактальные структуры, наблюдаемые в стекле К-8, образующиеся в плазме светового разряда, описываются одной и той же фрактальной размерностью для структур в диапазоне 1-1000 мкм, при размерах элементарных слагаемых агрегатов в несколько нм. Фрактальный кластер, построенный по случайному закону и поэтому выглядевший как неупорядоченная система, все же имеет внутренний порядок. Параметром, характеризующим это состояние, является фрактальная размерность кластера.

Следующий пример использования фрактальной геометрии в рассматриваемой области относится к разработке физической модели объемного электрического пробоя в конденсированных диэлектриках. Предлагаемая модифицированная фрактальная модель электрического пробоя в диэлектриках используется для качественного описания основных закономерностей пробоя. Проведены исследования законов развития и трансформации разрядных структур в объеме диэлектриков при геометрии высоковольтных электродов: острие - плоскость. С помощью этой модели удается описать большую часть возникающих разрядных структур, а также процессы, приводящие к изменению агрегатного состояния диэлектрика, его ионизацию и зависимость разрядных процессов от локальной напряженности электрического поля и характеристик вещества. Фрактальная модель электрического пробоя отображает главные закономерности возникновения фигур Лихтенберга и может быть базовой моделью для создания теории электрического разряда в конденсированных диэлектриках.

. Результаты компьютерных экспериментов, выполненных в рамках фрактальной физической модели электрического пробоя диэлектрика, качественно соответствуют данным оптических исследований предпробойных явлений в конденсированных диэлектриках. Непосредственное сравнение результатов моделирования с экспериментом дает возможность корректировать модель и анализировать влияние различных факторов на макроскопические свойства пробоя. Для получения количественных данных желательно осуществлять компьютерное моделирование пробоя на трехмерной решетке диэлектрика.

При равномерном облучении диэлектрических материалов, напри-

мер пластины полиметилметакрилата (ПММА), за счет ее радиационной зарядки электронами с энергией 1-10 МэВ наблюдается краевой эффект [18]. Этот эффект проявляет себя в отсутствие в зоне шириной около 0,5 см от края пластины следов фигур Лихтенберга, возникающих после электрического пробоя внедренного в материал электронного заряда, если флюенс электронов превышает критическую величину, которая для ПММА составляет ~$10^{13}$см$^{-2}$. Возможно, что одна из причин краевого эффекта связана с повышенной проводимостью приповерхностной краевой зоны в результате наличия остаточных воздействий на структуру материала в процессе его механической обработки. В приповерхностной зоне материала, где отсутствуют фигуры Лихтенберга, по-видимому, формируется область деформаций с высокой плотностью дислокаций и микротрещин, что вероятно отрицательно влияет на возможность накопления в ней внедренного электронного заряда. Краевой эффект по-видимому связан с затуханием процесса образования разрядных каналов в фигуре Лихтенберга в результате стекания во время пробоя основной части внедренного заряда и, как следствие, уменьшения напряженности электрического поля до величины, недостаточной для пробоя диэлектрика на периферии фигуры Лихтенберга.

На рис.10 представлена фотография образца из ПММА, на фронтальной плоскости которого созданы цилиндрические поры.

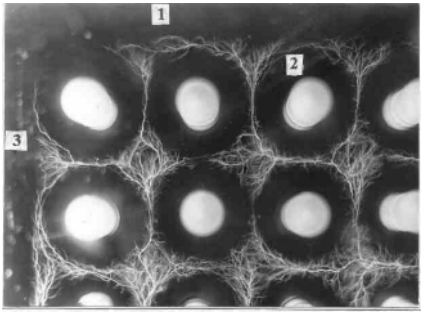



Рис.10. Фотография радиационно-заряженной пластины из полиметилметакрилата с цилиндрическими порами после облучения электронами с энергией 7 МэВ, флюенсом $10^{13}$ см$^{-2}$ и электрического пробоя внедренного в ее объем заряда и образования фигур Лихтенберга. Кольцевые зоны около пор ~0,5 см свободны от электроразрядных каналов фигур Лихтенберга: 1 – пластина; 2 – цилиндрические поры; 3 – следы электрического пробоя

Хорошо видно, что электроразрядные каналы фигуры Лихтенберга отсутствуют как около края пластины ПММА, так и в приповерхностной кольцевой зоне шириной ~0,5 см от края пор. Этот эффект при соответствующем экспериментально подобранном диаметре и шаге расположения пор был использован для создания конфигурации изолятора, предназначенного для работы в условиях электронного облучения и устойчивого к разрушительному воздействию электроразрядных каналов фигур Лихтенберга.

При функционировании КА их диэлектрические материалы подвергаются радиационной электризации. Лабораторные эксперименты указывают на возможность их зарядки и последующего электроразрядного разрушения при флюенсе ионизирующих частиц порядка $10^{13}$ $см^{-2}$, создаваемом электронами с энергией 1-2 МэВ и плотностью тока порядка нескольких $нА/см^2$. Подобные параметры облучения вполне реальны, например, для внутреннего радиационного пояса Земли.

### Инициирование электрического пробоя в облученных диэлектриках

В условиях эксплуатации КА в течение длительного времени возможно применение лазерной технологии для восстановления параметров некоторых элементов оборудования (кремниевых фотопреобразователей, солнечных батарей (СБ), объективов и пр.), располагаемых на внешней поверхности аппаратов и подверженных воздействию корпускулярных излучений радиационных поясов Земли. В частности, метод лазерного термоотжига радиационных дефектов полупроводниковых структур после ионного легирования находит применение в электронной промышленности. Однако, в условиях космического пространства применение этого метода может быть осложнено из-за накопления нескомпенсированного внедренного электрического заряда в оптических материалах и элементах (защитных стеклах СБ, в объективах и пр.). Известно, что при воздействии лазерного излучения на радиационно-заряженные стекла за счет светового пробоя может инициироваться электрический пробой внедренного в материал электрического заряда (рис.11,12) [19].

В экспериментах исследовали стекла различного состава (боросиликатные, боролантановые и фосфатные), в которых хорошо накапливался и сохранялся объемный заряд. Электризация объема стекла проходила при воздействии на него пучка моноэнергетических электронов с энергией 1-25 МэВ.

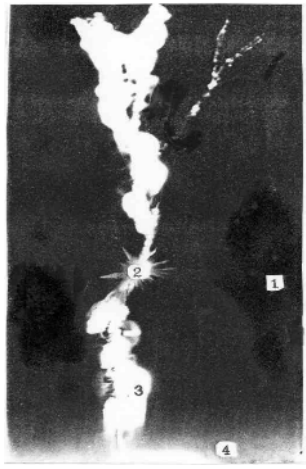



Рис.11. Характер фигуры Лихтенберга, образовавшейся при электрическом пробое стекла при лазерном воздействии: 1 - заряженный образец; 2 - зона светового пробоя; 3 – приповерхностные разрядные каналы от электрического пробоя; 4 - поверхность, через которую образец облучался электронами

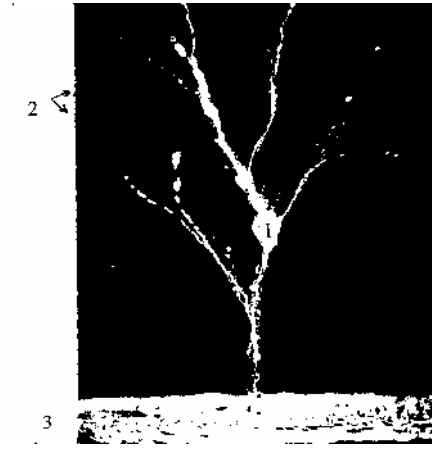



Рис.12. Инициирование электрического разряда в объеме стекла, облученного электронами с энергией 4 МэВ, с помощью светового пробоя: 1 - область светового пробоя; 2 - разрядные каналы; 3 - поверхность образца

Флюенс частиц составлял $10^{12}$-$10^{14}$ $см^{-2}$. Флюенс выбирали примерно в 2 раза меньший, чем необходимо для самопроизвольного пробоя заряженного образца, т.е. напряженность электрического поля, созданного объемным зарядом, была близка к электрической прочности стекла. Для инициирования электрического разряда в облученных электронами диэлектриках использовалось излучение лазера на кристалле АИГ:$Nd^{3+}$ или неодимовом стекле в режиме модулированной добротности ($\tau$=20 нс, $\lambda$=1,06 мкм). Быстрое лазерное инициирование в стекле дает возможность исследовать начальную стадию электрического разряда и получить информацию о механизме его формирования и развития (рис.13).

Световой пробой, вызываемый лазерным излучением, нарушает однородность электрического поля, созданного в объеме диэлектрика внедренным зарядом. Неоднородность поля может быть вызвана возникновением в очаге светового пробоя ударных волн, трещин, термических напряжений, плазмы. Эти явления могут приводить к локальному повышению напряженности поля в зоне светового пробоя и развитию электрического разряда.

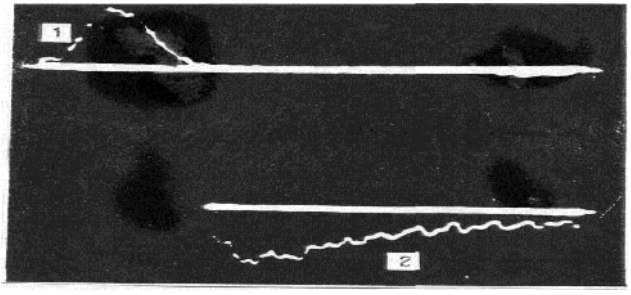



Рис.13. Лазерное инициирование электрического разряда в стекле:
1 – сигнал от светового пробоя; 2 – сигнал от электрического разряда

Как правило, световой пробой в твердом диэлектрике сопровождается ростом трещин из области пробоя. Прорастающая трещина играет роль микроострия, нарушающего однородность электрического поля. Напряженность электрического поля вблизи острия трещины может в десятки и сотни раз превышать среднюю по образцу, что должно существенно облегчать развитие электрического разряда. Одновременно в той же области появляется плазма светового пробоя, которая является источником свободных носителей для развития лавины. Тем самым создаются условия для электрического разряда. Наблюдаемую временную

задержку электрического разряда относительно светового пробоя нужно соотносить со временем формирования проводящего канала между областью локализации заряда и поверхностью образца.

Исходя из модельных представлений о распределении стримера и используя экспериментальные данные о скорости формирования канала на ранней стадии после его инициирования лазерным излучением, когда имеется достаточное количество свободных электронов, подвижность носителей оценена в $10^4$ м$^2$/В.с.

При энергии электронов 2 МэВ объемный заряд локализован практически в плоскости на расстоянии ~0,2 см от поверхности, на которую падал пучок электронов. При энергии электронов 8 МэВ область локализации заряда более размыта. Минимальное расстояние от поверхности образца 0,5-0,6 см.

При поверхностном инициировании основной канал фигуры Лихтенберга выходит в точку инициирования, а при инициировании в объеме основной канал проходит через точку на ближайшую поверхность образца. Свечение оптического и электрического разрядов регистрировалось камерой скоростного фоторегистратора (СФР) или фотоприемником и осциллографом (рис.14).

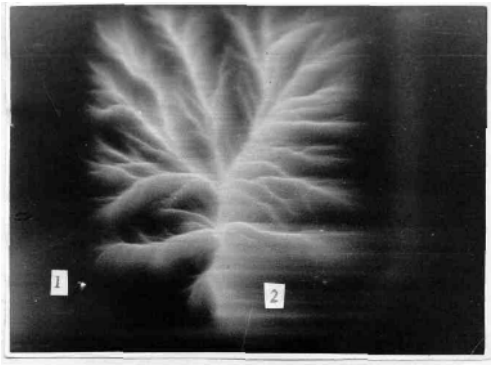



Рис.14. Свечение оптического и электрического разрядов, зарегистрированное камерой скоростного фоторегистратора: 1 – свечение светового разряда, 2 – свечение инициированного электрического разряда в радиационно-заряженном стекле СТК-109

Во всех экспериментах наблюдалась задержка электрического пробоя относительно инициирующего светового. Минимальную величину задержки, составляющую $2\cdot10^{-8}$ с, наблюдали при инициировании с по-

верхности и энергии электронов 2 МэВ. Максимальные задержки до $5 \cdot 10^{-7}$с были зафиксированы при объемном инициировании и энергии электронов 8 МэВ.

При обработке осциллограмм было установлено, что электрический разряд разгорается за $2 \cdot 10^{-8}$с, а затухает в два этапа: на первом интенсивность свечения падает в течение $5 \cdot 10^{-8}$с, а на втором – $10^{-6}$ с. Полное время свечения области электрического пробоя $2 \cdot 10^{-6}$

На основании экспериментальных результатов о задержке разряда с учетом длины разрядного канала можно получить среднюю скорость развития разряда порядка $5 \cdot 10^{5}$ см/с, что согласуется с оценкой, сделанной на основе модельных представлений.

Другая возможность инициирования электрического пробоя радиационно-заряженных диэлектриков достигалась при имитации микрометеорной бомбардировки металлическими частицами микронных размеров с массой порядка $10^{-12}$ г, ускоренных до средней скорости порядка 2-5 км/с [20-21].

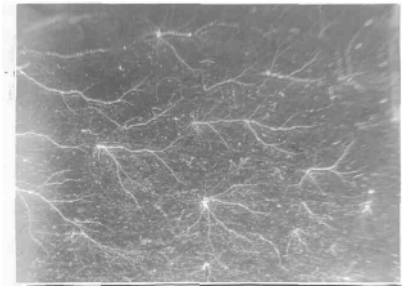


Рис.15. Локальные фигуры Лихтенберга на поверхности стекла, облученного электронами с энергией 2 МэВ, $\Phi=5.10^{12}$ см$^{-2}$, возникшие при бомбардировке его алюминиевыми микрочастицами с $m=10^{-12}$ г и v=2,6 км/с

Для ускорения положительно заряженных микронных частиц использовали установку, основанную на электростатическом принципе ускорения. Образцы, изготовленные из оптического стекла типа «тяжелый крон», предварительно подвергались радиационной электризации путем облучения электронами с фиксированной энергией в интервале 1-8 МэВ при флюенсе частиц, не превышающем $10^{13}$ см$^{-2}$. При этих условиях исключается возникновение самопроизвольного электрического пробоя образцов в процессе облучения.

При бомбардировке радиационно-заряженных стекол ускоренными алюминиевыми частицами микронных размеров, имеющими среднюю скорость 2,6 км/с, визуально наблюдались световые вспышки электрических разрядов, в результате которых формировались локальные фигуры Лихтенберга. На рис.15 показаны локальные фигуры Лихтенберга на поверхности стекла, облученного электронами с энергией 2 МэВ, $Ф=5.10^{12}$ $см^{-2}$, возникшие при бомбардировке его алюминиевыми микрочастицами с $m=10^{-12}$ г и v=2,6 км/с.

Инициирование электрического разряда в радиационно-заряженном стекле в результате высокоскоростного неразрушающего удара может быть связано с несколькими причинами. Известно, что электрическая прочность твердых диэлектриков под действием импульсной механической нагрузки уменьшается. Другой причиной уменьшения электрической прочности может быть образование локальной ударной волны вблизи места удара микронной частицы. При наличии в объеме диэлектрика сильного электрического поля ионизация на фронте ударной волны и генерация тока приводят к формированию лавины и развитию разряда. По оценкам в зоне удара микронной частицы с V=2-4 км/с о мишень импульсное давление лежит в интервале $10^8$-$10^{10}$ Па. При таком давлении у ряда диэлектриков (полиэтилен, фторопласт, стекло) отмечается рост электропроводности. В этих условиях формирование разрядного канала завершается за время порядка 0,5 мкс, что близко к времени существования ударно-сжатой зоны.

Таким образом, в зоне удара ускоренной микронной частицы о поверхность радиационно-заряженного диэлектрика на короткое время возникает локальная область микронных размеров с повышенным давлением, температурой и проводимостью, что может создать условия для инициирования электрического пробоя.

При облучении электронным пучком диэлектриков: ПММА, оптического стекла, когда эффективный пробег электронов меньше толщины облучаемого образца, наблюдается электрический пробой внедренного в диэлектрик электронного заряда, как правило, на ближайшую поверхность к области залегания максимальной плотности объемного заряда, т.е. в зоне максимального значения напряженности электрического поля.

В процессе облучения и пробоя проводилась киносъемка облучаемого образца в поляризованном свете. Облучаемый образец оптического стекла или ПММА помещался между двумя поляроидами. Перед первым поляроидом (поляризатором) размещался источник света, за вторым поляроидом (анализатором) – кинокамера. При скрещенных поляроидах в отсутствие электрического поля в образце свет через систему

поляроидов и образец не проходил (затемненная область фотографии). При возникновении в облучаемом образце за счет накопления внедренного заряда сильного электрического поля, вследствие эффекта Керра происходит поворот плоскости поляризации, и на фотографии наблюдаются светлые области, соответствующие распределению напряженности электрического поля по толщине образца [10]. На рис.16 приведена фотографии в поляризованном свете образца ПММА, облученного электронами с энергией 2,1 МэВ.

Если образец ПММА, в котором уже произошел пробой внедренного заряда на поверхность, через которую осуществлялось облучение, и сформировалась фигура Лихтенберга, вторично облучался с противоположной стороны, то повторный пробой происходил не на ближайшую грань, через которую проводилось повторное облучение, а в зону фигуры Лихтенберга, образовавшуюся при первичном облучении. В последнем случае флюенс электронов, при котором происходит пробой, в несколько раз меньше, чем при первичном пробое.

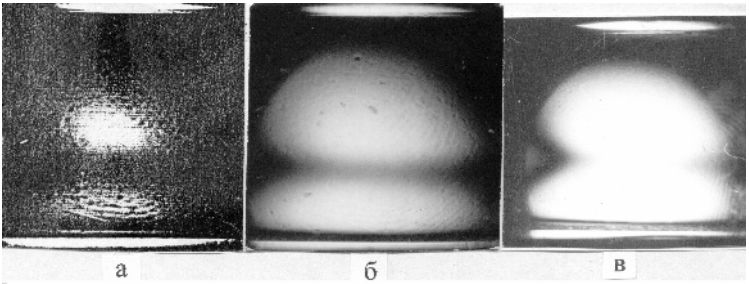



Рис.16. Фотографии в поляризованном свете образца ПММА, облученного электронами с энергией 2,1 МэВ различными флюенсами: а) $Ф=1{,}3.10^{12}$ $см^{-2}$; б)$Ф=3{,}9.10^{12}см^{-2}$; в) $Ф=6{,}5.10^{12}$ $см^{-2}$. Светлые области соответствуют распределению E(x)

Из кинограмм процесса первичного и внутреннего вторичного пробоев образца ПММА толщиной 16 мм при облучении электронами с энергией 1,2 МэВ и 4 МэВ было видно, что первичный пробой, как правило, происходит мгновенно, при этом образуется один разрядный канал и в процессе дальнейшего облучения образовавшаяся разрядная структура не изменяется. Процесс вторичного пробоя не заканчивается после образования одного разрядного канала. По мере дальнейшего облучения постепенно возникают дополнительные, зачастую весьма мно-

гочисленные, разрядные каналы, соединяющие вторичную фигуру Лихтенберга с первичной.

При облучении образцов ПММА электронами с энергией 0,6-2,6 МэВ, $j \sim 10^{11}$ см$^{-2}$с$^{-1}$ пробой образцов происходил при $\Phi \sim 10^{13}$ см$^{-2}$, при облучении оптических стекол $\Phi \sim 10^{12}$-$10^{14}$ см$^{-2}$.

Характер вторичного пробоя можно объяснить изменением структуры образца после первичного пробоя из-за появления невидимых микротрещин, снижающих электрическую прочность образца. Кроме того, на характер вторичного пробоя может оказывать влияние остаточное электрическое поле в образце после первичного пробоя. Электрическое поле может быть связано с поляризацией диэлектрика или с компенсирующим положительным зарядом.

## 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ ПРИ РАЗРЯДЕ В СТЕКЛАХ, ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ

При облучении неорганических стекол протонами с энергией 100 МэВ наблюдается их радиационная электризация с последующим электрическим пробоем внедренного заряда. Электрический пробой за счет концентрации выделенной энергии в разрядном канале вызывает образование фигур Лихтенберга (рис.1) и механическое разрушение облученных стекол.

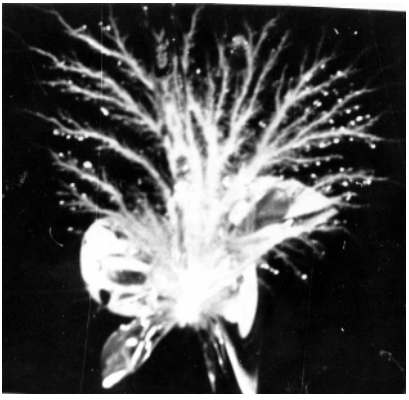


Рис.1. Образование фигуры Лихтенберга при электрическом пробое внедренного заряда из объема стекла, облученного протонами с энергией 100 МэВ

Изучение объектов, подвергшихся разрушению в результате электрического пробоя, позволяет получить информацию о характере процессов, вызвавших разрушение, зависимости процессов от параметров материала, энергетических и временных характеристик разряда и пр. Изучению таких процессов при электронном облучении посвящены многочисленные работы, информация же о разрушении диэлектрических материалов при протонном облучении практически отсутствует. На Рис.1 показана фигура Лихтенберга при электрическом пробое внедренного заряда из объема стекла, облученного протонами с энергией 100 МэВ.

Физический механизм разрушения при электрическом объемном разряде облученных протонами хрупких диэлектриков типа неорганических стекол мало исследован.

Были изучены фрагменты образца оптического стекла большого размера, разрушившегося в результате протонного облучения. Диаметр протонного пучка составлял около 3 см, флюенс $10^{13}$ $см^{-2}$, облучение выведенным на воздух протонным пучком осуществлялось на протонном инжекторе ЛИ-100 ИФВЭ (г. Протвино). Блок стекла подвергался пятикратному облучению в разных областях фронтальной поверхности. Сильный разрушающий эффект при разряде обусловлен высокой энергией пучка протонов (100 МэВ) и значительной площадью облучения (~10 $см^2$).

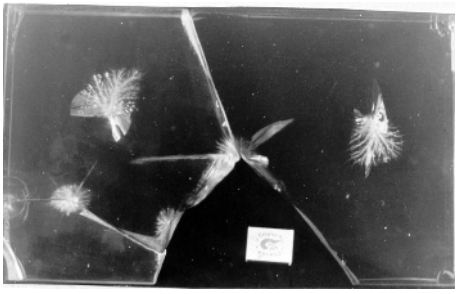


Рис.2. Следы механических разрушений в результате электрических пробоев внедренного в объем стекла электрического заряда после облучения протонами с энергией 100 МэВ

На рис.2,3 показаны фотографии расколотого блока оптического стекла марки БК-108, размером 40х35х8 $см^3$ после электрического про-

боя внедренного на глубину 3,5 см протонного заряда .Четвертое и пятое облучения проводилось по одной из расколовшихся частей блока и новые пробои также вызвали раскалывание этой части стекла.

В процессе облучения протонами с энергией 100 МэВ (рис.2) произошли электрические пробои внедренного протонного заряда, два из которых, образовав фигуру Лихтенберга и разрядный канал в объеме стекла, не привели к расколу образца, третий пробой, в результате облучения в центральную зону вызвал раскол блока на две части.

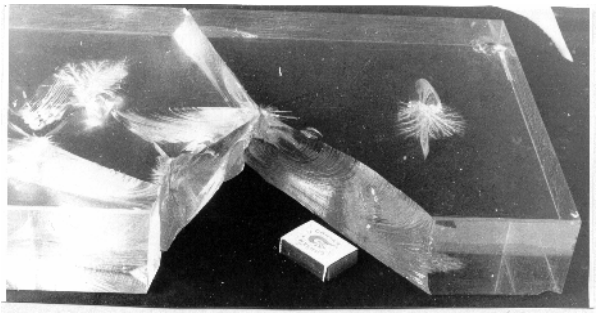


Рис.3. Следы механических разрушений в результате электрических пробоев внедренного в объем стекла протонного заряда после вторичного облучения протонами с энергией 100МэВ

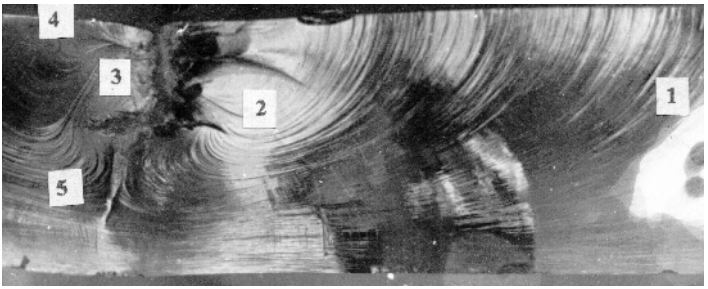



Рис.4. Поперечный разлом стеклянного блока, разрушенного при электрическом пробое внедренного в объем стекла протонного заряда при E=100 МэВ: 1 – блок; 2 – фигуры Лихтенберга в конце пробега протонов R~3 см; 3 - главный разрядный канал в стекле; 4 - пучок протонов с $j \sim 10^{12}$ $см^{-2}.с^{-1}$; 5 - волнистая зона разлома стекла

Зависимость характера разрушения от величины энерговыделения отмечена в ряде работ, где рассмотрено воздействие мощных импульсных пучков электронов наносекундной длительности на диэлектрики, в том числе на неорганические стекла.

Идеально хрупкое разрушение, т.е. без возникновения пластических деформаций вплоть до полного разрушения, можно наблюдать на таких материалах, как кварц и силикатное стекло.

При растрескивании стекла стенки трещины, расположенные одна против другой, заряжаются противоположными зарядами. В головке трещины возникает сильное электрическое поле, в котором зажигается разряд. Подвод новых носителей заряда в канал пробоя происходит в результате внутренней механоэмиссии в стеклах. Процесс образования трещин и процесс формирования разрядных каналов взаимосвязаны.

Если при выбросе электронов с уровней ловушек в зону проводимости освобождающаяся энергия электростатического поля не успевает релаксировать в форму тепловой энергии, то часть ее преобразовывается в энергию трещины.

Известно, что прочность стекла при механическом нагружении определяется поверхностными дефектами. Можно предположить, что при электрическом пробое внедренного в объем диэлектрика заряда, разрушение стекла начинается из объема.

Можно рассматривать несколько моделей хрупкого разрушения стекол при электрическом пробое. По одной из них возникновение в объеме стекла ударных акустических волн в ядерной подсистеме твердого тела происходит в результате термоудара.

Как известно интенсивность и характер разрушения при электрическом пробое хрупкого диэлектрика определяется динамикой механических напряжений, связанных с импульсным давлением в разрядном канале. С другой стороны на характер разрушения влияют также механические напряжения, формируемые в объеме при распространении ударной волны от очага разрушения к периферии. Давление на фронте ударной волны и скорость ее распространения связаны со скоростью выделения электрической энергии в разрядном канале. Максимальная мощность в основном разрядном канале определяется сопротивлением токового шнура, свойствами разрушаемого диэлектрика и параметрами разрядного контура, формируемого в свою очередь областью залегания внедренного заряда и запасенной удельной электростатической энергией.

При одновременном действии механических и электрических нагрузок пондермоторные и механические напряжения складываются, и механическая прочность заряженного диэлектрика становится ниже. Элек-

трическая прочность твердого диэлектрика при механической нагрузке тоже понижается.

Радиационно-заряженный диэлектрик находится в постоянном механическом напряжении, что вызывается неоднородным распределением объемного заряда в объеме облученного материала. Расчеты показывают, что при объемных электрических полях $E \sim 10^7$ В/см внутренние механические напряжения могут достигать 40-450 кг/см$^2$.

Теоретическая прочность стекла составляет $\sim 5.10^4$ кг/см$^2$, однако реальные разрушающие напряжения существенно ниже и определяются характером нагрузки, формой и размерами образца, наличием дефектов на поверхности и в объеме, внутренними напряжениями, температурой образца и пр.

Анализ трещин и поверхности разлома позволяет судить о напряжениях и деформациях тела, о характере процесса распространения трещин, о последовательности всех стадий процесса разрушения. Изучая трещины и разломы, можно установить направление главных напряжений, напряженное состояние при разрушении, кинематику роста трещин и последовательность их образования, значения номинальных разрушающих напряжений, очаг разрушения и т.д.

На поверхности разлома наблюдаются такие характерные следы разрушения: очаг разрушения, который занимает на разломе малую площадь по сравнению с другими зонами и представляет собой основной разрядный канал с фигурой Лихтенберга; волнистая зона, соответствующая быстрому характеру разрушения стекла. Скорость образования трещины на этой стадии может достигать максимальных значений. Волнообразный рельеф покрывает практически всю поверхность разлома, что подтверждает взрывной характер разрушения. Высота волн ~0,5 мм, период ~2-5 мм. При электрическом пробое радиационно-заряженных стекол реализуется одновременно несколько механизмов формирования динамических механических напряжений.

Образовавшиеся при пробое разрядный канал и фигура Лихтенберга являются одновременно и источником ударной волны, создающей разрушающие напряжения в стекле, и дефектами, ослабляющими прочность стекла.

Следует учитывать, что в предварительно напряженном образце стекла в процессе облучения протонами по мере накопления объемного заряда и увеличения внутренней напряженности электрического поля возникали дополнительные механические напряжения.

При облучении оптического стекла марки БК-108 размером 40х35х8 см протонами с энергией 100 МэВ при флюенсе $10^{13}$ см$^{-2}$ возникает электрический пробой внедренного положительного заряда на облучен-

ную поверхность образца после достижения в зоне заряда напряженности электрического поля, превышающей электрическую прочность стекла ($E \sim 1{,}5 \times 10^6$ В/см).

Зону внедренного положительного заряда, образовавшуюся в результате облучения стекла протонами с энергией 100 МэВ на глубине около 3 см в виде слоя толщиной менее 1 мм и диаметром 6 см, соответствующей диаметру протонного пучка в воздухе, можно рассматривать как внутренний виртуальный анод. Виртуальным катодом в этом случае является облученная поверхность стекла. Предпробойная разность потенциалов между анодом и катодом составляет ~5МВ. Напряженность электрического поля в этой системе («анод»-«катод») имеет наибольшую величину на краю зоны расположения положительного внедренного заряда («анода»), откуда по-видимому и берет начало процесс образования разрядного канала. Зона внедренного протонного заряда после пробоя состоит из сети разрядных каналов, образующих фигуру Лихтенберга в виде ветвей электрического дерева, вырастающего из основания разрядного канала, расположенного на краю этого слоя.

Разряд с анода имеет характеристики, свойственные явлению электронной детонации, когда разряд распространяется со сверхзвуковой скоростью. По своим основным характеристикам такой пробой аналогичен электрическому взрыву в объеме стекла. Основные положения теории горения, детонации и взрыва используются в методическом плане при описании процесса электрического пробоя различных диэлектриков.

Физическая теория электрического пробоя внедренного в твердый диэлектрик протонного заряда без металлических электродов еще не создана.

Развитие разряда из зоны внедренного в стекло положительного заряда («анода») начинается с формирования стримера в результате возникновения электронных лавин. Процессу распространения канала способствует сильное электрическое поле, возникающее в головной части канала разряда, а также интенсивная инжекция валентных электронов, которая происходит в условиях ударного сжатия диэлектрика в области фазового перехода (твердый диэлектрик – плотная плазма). Высокая плотность инжекционного тока вызывает интенсивное выделение энергии за фронтом фазового перехода, поддерживающее процесс развития разряда. Все это позволяет классифицировать механизм распространения канала разряда в облученном стекле как электронную детонацию.

Выделяющаяся при развитии лавин и стримера энергия вызывает плавление диэлектрика, и формирование разрядного канала диаметром 200-300 мкм. Характерно, что в канале имеет место резко неоднородное

выделение энергии. Из зоны канала в момент разряда за счет высокого давления (~$10^9$-$10^{10}$ Па) формируется сетка радиальных трещин от оси канала в круговую соосную зону разрушения (рис.5), толщиной 2-3 мм.

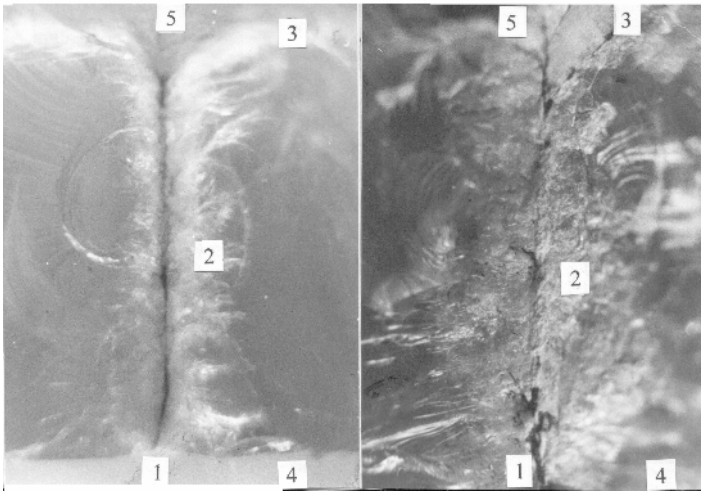



Рис.5. Структура основного разрядного канала в радиационно-заряженном стекле после электрического пробоя (увеличение 2): 1 - выход основного разрядного канала из объема стекла на фронтальную плоскость образца; 2 - цилиндрическая соосная зона, 3 - поперечная проекция зоны фигуры Лихтенберга; 4 - фронтальная плоскость образца, через которую проводилось облучение протонами; 5 - воронкообразная область, по которой заряд при пробое стекает в разрядный канал 1

Сетка радиально ориентированных трещин заканчивается зоной дробления стекла, что характерно для электрического взрыва. При механическом напряжении вблизи предела упругости стекло начинает дробиться трещинами на мелкие блоки. Размер блоков, образующихся при дроблении стекла в импульсе сжатия меньше 100 мкм. Вероятно, дроблению стекла способствует сетка трещин сдвига, инициируемых на поверхности канала, где сконцентрированы трещины и другие потенциальные очаги разрушения. Под действием напряжений сетка трещин прорастает в глубину образца. Таким образом, волна разрушения распространяется путем непрерывного роста зоны дробления в напряженном материале. На рис.5 показана структура основного разрядного канала в радиационно-заряженном стекле после электрического пробоя.

. Расширяющийся канал генерирует волну разрушения, распространяющуюся по объему стекла со скоростью ~1,5 км/с, что вызывает нарушение целостности стекла. Для силикатных стекол предел упругости лежит в интервале 6-9 ГПа. Наличие зоны дробления стекла позволяет считать, что в основном разрядном канале в момент пробоя импульсное давление достигает $5 \cdot 10^9$-$10^{10}$ Па.

В момент прорастания разрядного канала генерируются ударные волны. При ударном сжатии диэлектриков происходит инжекция валентных электронов в сильных электрических полях, и ширина запрещенной зоны снижается в несколько раз. Этот эффект может влиять на процесс образования фигуры Лихтенберга при пробоях из зоны локализации внедренного заряда после формирования основного разрядного канала.

Электрический пробой радиационно-заряженного твердого диэлектрика, облученного протонами с энергией до 100 МэВ, сопровождается выбросом в окружающую среду плазмоида через одну из его граней. При этом разрядный ток в основном канале может достигать сотни ампер, энергия разряда ~1 Дж, а время ~0,1-1 мкс. При электрическом пробое диэлектрика и релаксации плазмоида возникает радиоизлучение в частотном диапазоне 0,1-1000 МГц, создающее в прилегающих проводниках широкий спектр электромагнитных помех (ЭМП), приводящих к сбоям микроэлектроники.

Исследование структуры электроразрядных каналов, образующихся при электрическом пробое радиационно-заряженных стекол и других диэлектриков, позволяет выявить особенности их формирования и оценить их влияние на изменение важнейших характеристик диэлектрических материалов в процессе радиационной электризации с точки зрения энергозатрат. Как известно, энергозатраты на электроразрядное повреждение диэлектриков при их радиационной электризации на два порядка ниже, чем энергозатраты на деградацию, связанную с накоплением обычных структурных радиационных дефектов в их объеме.

Таким образом, при электрическом взрыве радиационно-заряженных твердых диэлектриков, в разрядном канале имеет место кумуляция энергии, где выделяется очень высокая плотность мощности за счет скоростного ввода энергии и относительно малого объема вещества в канале, что позволяет изучать состояние вещества в экстремальных условиях при воздействии концентрированного потока энергии, а также механизм электрического пробоя и электроразрядного разрушения радиационно-заряженных твердых диэлектриков при воздействии интенсивных потоков корпускулярных пучков с энергией 100-200 МэВ.

Таблица 1. Основные параметры кумуляции энергии электрического разряда в канале

| Параметр | Величина |
|---|---|
| Удельная мощность космического корпускулярного излучения, P | $10^{-5}$ Вт/см$^2$ |
| Энергия разряда, W | ~1 Дж |
| Время разряда, $\tau_р$ | $10^{-7}$-$10^{-6}$ с |
| Мощность разряда, $P_р$ | $10^6$-$10^7$ Вт |
| Ток разряда, $I_р$ | 1-100 А |
| Плотность тока, $j_р$ | $10^7$ А/см$^2$ |
| Скорость нарастания тока, dI/dt | $10^8$ А/с |
| Энергия образования канала в стекле | $10^4$ Дж/см$^3$ |
| Объем разрядного канала, $V_к$ | $10^{-5}$ см$^3$ |
| Удельная плотность мощности в РК | $10^{11}$–$10^{12}$ Вт/см$^3$ |
| Электрическая прочность стекла, $E_{ст}$ | 1,5 МВ/см |
| Разность потенциалов в объеме, U | ~5 МВ |
| Температура в канале, $T_к$ | (3-5)$10^3$ К |
| Давление в канале, $P_к$ | $10^9$-$10^{10}$ Па |
| Плотность плазмы в канале, n | $10^{20}$ см$^{-3}$ |
| Частотный диапазон ЭМП | 0,1-$10^3$ МГц |

Основные параметры электрического пробоя, характеризующие кумуляцию энергии в разрядном канале в облученном протонами стеклае ,приведены в табл.1.

Интерес к электроразрядному механизму разрушения твердых диэлектриков под действием пучков ускоренных частиц (протонов, нейтральных атомов водорода) с энергией 100-200 МэВ связан с проблемами возможного применения интенсивных направленных атомарных и ионных пучков в ускорителях заряженных частиц, в радиационной технологии и в космосе.

Скорость релаксации объемного внедренного заряда в радиационно-заряженных стеклах зависит от состава стекла, и вида, энергии и интенсивности пучка заряженных частиц, наличия или отсутствия заземленных контактов на гранях образца. Большое значение имеют и условия

хранения облученных образцов. Релаксация заряда во времени протекает по сложному закону (есть "быстрая" и "медленная" составляющие релаксации) как за счет освобождения с мелких энергетических уровней захвата в запрещенной зоне диэлектрика избыточных носителей заряда (электронов, дырок), так и с помощью собственной проводимости (ионной, электронной, дырочной). Важную роль в этом процессе играют эффективная подвижность носителей и температура, а также эффект поляризации диэлектрика. В радиационно-заряженных диэлектриках имеет место большая неоднородность распределения заряда и напряженности электрического поля в объеме, что сильно влияет на характер рекомбинации внедренного заряда.

Образцы стекол были облучены в январе 1987 года пучком протонов, выведенных из линейного протонного инжектора ЛИ-100, при E=100 МэВ, $I_{ср}$~0,01 мкА/$с^2$ , Ф~$8.10^{12}$-$10^{14}$ $см^{-2}$. Облучение происходило в воздухе при нормальном атмосферном давлении, внешняя поверхность образцов была фактически заземлена за счет проводимости ионизированного воздуха. Диаметр протонного пучка в воздухе в плоскости образца изменялся в пределах 2-6 см, температура стекол в процессе облучения поддерживалась на уровне T~70$^{o}$C. Облученные стекла в течение 10 лет хранились при комнатной температуре. Пробег протонов с энергией 20-100 МэВ в оптических стеклах зависит от удельного веса стекла и составляет примерно 0,2-3,5 см, стрегглинг протонов ~1%. Глубина расположения фигур Лихтенберга, образовавшихся после электрического пробоя стекла, соответствует пробегу протонов.

Инициирование электрического пробоя аккумулированного в стеклах заряда проводилось методом укола грани образца вольфрамовой иглой в центре облученной зоны со стороны, противоположной протонному облучению. В момент укола наблюдался электрический пробой внедренного заряда на иглу. В зоне, в которой концентрировался внедренный протонный заряд, как правило, возникает фигура Лихтенберга. Площадь образовавшейся фигуры Лихтенберга зависит от зоны облучения, флюенса частиц пучка и мощности электрического разряда. В процессе электрического пробоя измерялась величина и знак заряда. Было показано, что знак заряда - положительный, длительность пробоя ~$10^{-6}$ с, j~1-10А, величина освободившегося заряда составляет несколько мкКл.

С течением времени происходит не только уменьшение величины внедренного заряда, но и изменение его распределения и связанного с ним компенсирующего заряда по глубине образца. Фигуры Лихтенберга при пробое возникают в конце пробега протонов в стекле, это свидетельствует о том, что область объемного протонного заряда после облу-

чения заметным образом не изменила своего расположения. Электрическое поле в объеме облучаемого протонами стекла измерялось методом электрострикции. Непосредственно измеряемой величиной является электрический отклик V(t) в мВ, получаемый с образца при подаче на него импульсного электрического поля длительностью импульса $\sim 2.10^{-8}$ с, максимальное значение поля 7 кВ. Из полученных результатов следует, что за время хранения облученных образцов в них сохранился достаточно большой электрический заряд. По имеющимся экспериментальным результатам можно оценить время релаксации заряда в исследуемых стеклах. Если предположить, что релаксация заряда определяется только одним типом ловушек, а это вполне допустимо для больших времен, то для измерения E(t) справедливо следующее выражение: $E_t=E_{t=0}\times\exp(-t/\tau)$, где $\tau$ - постоянная времени релаксации заряда. Если считать, что начальное электрическое поле $E_{t=0}$ составляло $10^6$В/см, то для разных типов исследованных стекол $\tau$ лежит в интервал $5x10^6$-$5x10^7$.

## 5. ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКИХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.

В космических аппаратах широко применяются оптические материалы, оптико-электронные приборы и элементы. Вот далеко не полный перечень элементов, которые, как правило, изготовляются из оптических или кварцевых стекол: иллюминаторы, линзы, призмы, световоды, входные окна фотоэлетронных приборов, световые затворы, модуляторы, твердотельные лазеры, запоминающие устройства и т.д. Оптические элементы изготовляются не только из стекол, но и из других прозрачных и отражающих оптических материалов: лейкосапфира, щелочно-галоидных кристаллов. Оптические элементы могут быть объемными (окна, линзы), волоконными (световоды), пленочными. При воздействии космических ионизирующих излучений [1] происходит деградация оптических материалов.

При воздействии ионизирующих излучений в оптических материалах наряду с радиационными дефектами генерируется электронно-дырочная плазма. При рекомбинации такой плазмы возникает радиолюминесценция, радиационные центры окраски и внедренный заряд. Эти эффекты могут отрицательно сказаться на основных характеристиках оптических материалов [2-4].

Изменение коэффициента спектрального пропускания, $\tau_\lambda$, спектральной оптической плотности, $D_\lambda=-\lg\tau_\lambda$, спектрального поглощения, $\alpha_\lambda$, стекол и других оптических материалов в видимом диапазоне длин волн в основном определяется дозой излучения. Оптическая плотность $D_\lambda$ связана с коэффициентом поглощения $\alpha_\lambda$ выражением: $D_\lambda=\int_0^l\alpha_\lambda(x)dx$.

Для исследования радиационной стойкости стекол и волоконно-оптических кабелей применялись различные источники ионизирующих излучений, в том числе:

1) линейный ускоритель электронов (ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова) с параметрами облучения: энергия – 2 МэВ, плотность тока – ~1 мкА/см$^2$, флюенс - ~$10^{12}$ – $10^{15}$ см$^{-2}$, доза излучения ~$10^3$–$10^6$ Гр;

2) циклотрон120-см (НИИЯФ МГУ); параметры облучения: энергия протонов (р) – 6,3 МэВ, плотность тока - ~0,2-0,1 мкА/см$^2$, флюенс $10^{12}$-$10^{14}$ см$^{-2}$, доза излучения – $10^4$ –$10^6$ Гр;

3) рентгеновская установка РУП-400 (НИИЯФ МГУ), параметры облучения: энергия рентгеновского излучения (Х)–400 кэВ, мощность дозы~0,1Гр/с, доза излучения~$10^3$ Гр;

4) источник γ-излучения на базе $Co^{60}$;

5) линейный протонный инжектор с энергией протонов 30 – 100 МэВ (ИФВЭ).

В качестве имитатора электромагнитного излучения Солнца за пределами атмосферы Земли [5] использовались установки с лампами ДКсР-3000 и ДКсШ-1000, которые широко применяются для имитации электромагнитного излучения Солнца в диапазоне 0,2-0,75 мкм [6].

Для монохроматического облучения светом стекол использовался монохроматор ЗМР-3 с кварцевой оптикой. В процессе оптического обесцвечивания контролировалась энергетическая освещенность образца $I_0$ и определялся интегральный коэффициент пропускания света в интервале 0,4-0,75 мкм в образце $T=I_\phi/I_0$, а также изменение интегральной оптической плотности стекла на длине волны $\lambda$:

$$\Delta D_{\phi\lambda}=-\lg(\tau_{\lambda2}/\tau_{\lambda1}), \qquad (1)$$

где $\tau_{\lambda1}$ – интегральный коэффициент пропускания стекла до начала оптического обесцвечивания;

$\tau_{\lambda2}$ – интегральный коэффициент пропускания образца в процессе и после оптического обесцвечивания.

**Радиационное окрашивание оптических стекол**

Радиационное окрашивание стекла в основном зависит от дозы и мощности дозы ионизирующего излучения и слабо зависит от его вида

[3]. Условия облучения стекол электронами и протонами выбирались с учетом возможности пребывания оптических элементов ИСЗ в радиационном поясе Земли более 10 лет.

Наиболее распространенный метод испытания оптических стекол на радиационную стойкость состоит в измерении спектральных характеристик поглощения или пропускания стекол до и после облучения. Наведенные спектры поглощения стекол можно представить как наложение многочисленных полос поглощения света. Каждую полосу поглощения можно отнести к определенному радиационному центру окраски. Поскольку стекла имеют очень сложную структуру, то не всегда удается обосновать систему дефектов, ответственных за образование тех или иных радиационных центров окраски.

В процессе воздействия ионизирующих излучений ловушки, имеющиеся в материале и ответственные за образование центров окраски, заполняются электронами и дырками, что приводит к росту оптической плотности (рис.1).

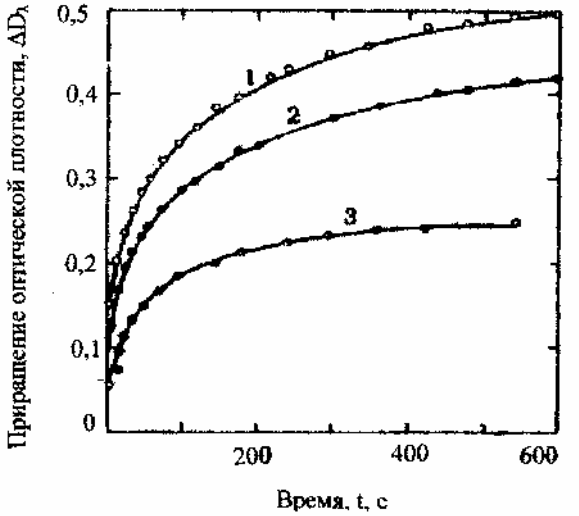



Рис.1. Изменение оптической плотности стекла К-8 от времени облучения протонами с энергией 6,3 МэВ при плотности потока $2.10^{10}$ $см^{-2}с$ для различных длин волн: 1 - 0,45 мкм; 2 – 0,5 мкм; 3 – 0,6 мкм

В зависимости от типа оптического стекла эти ловушки заполняются при дозах $10^3$–$10^6$ Гр. Следующая стадия процесса состоит в медленном росте концентрации центров окраски на вновь образуемых под действи-

ем энергичных корпускулярных излучений радиационных дефектов в материале.

С увеличением мощности дозы излучения равновесный уровень приращения оптической плотности стекол при одной и той же дозе излучения повышается. Однако эта зависимость нивелируется в процессе изотермического отжига центров окраски за короткий промежуток времени (τ~100 с). Поэтому радиационные испытания стекол на относительную радиационную стойкость можно проводить в широком интервале интенсивностей излучения.

На радиационное окрашивание стекол большое влияние оказывают примеси. Оптические стекла без специальных добавок заметно окрашиваются при дозах $10^2$-$10^3$Гр. Окись церия (0,5-1,5%) добавляют в оптические стекла для снижения степени радиационного окрашивания, что эффективно уменьшает наведенное поглощение в видимой части спектра при дозе излучения до $10^6$ Гр. Введение окиси церия в состав стекла перемещает образование центров окраски в ультрафиолетовую область спектра.

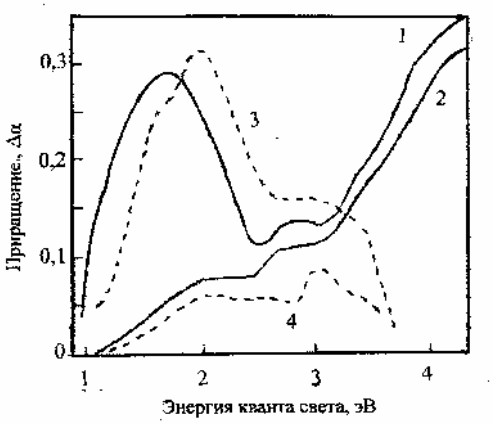



Рис.2. Зависимость приращения коэффициента нестационарного наведенного поглощения, Δ α, от энергии кванта света стекол К8 (1,2) и К108 (3,4) при 295 К Время после окончания импульса электронов t=10 нс (1,3), 10 мкс (2,4)

Для понимания как механизмов взаимодействия излучения с веществом, так и процессов формирования долгоживущих центров окраски представляют интерес данные об изменении оптических свойств материалов при импульсном воздействии ионизирующего излучения (τ<1 с).

Методы оптической спектроскопии позволяют проводить такие измерения. Спектры приращения коэффициента нестационарного наведенного поглощения, Δ α, были получены для стекла кроновой группы К8 и его радиационно-стойкого аналога К108 для временного интервала $10^{-8}$ – 1 с после окончания облучения импульсом высокоэнергичных электронов длительностью 20нс (рис.2) [7]. Стекла К8 и К108 имеют схожий химический состав, за исключением наличия в последнем ионов церия.

С понижением температуры оптического материала концентрация радиационных центров окраски заметно возрастает за счет заполнения электронами и дырками неглубоких энергетических ловушек в запрещенной зоне диэлектрика. Неглубокие ловушки частично опустошаются при повышении температуры до комнатной и выше. При нагреве облученных стекол наблюдается их обесцвечивание, т.е. уменьшение индуцированной оптической плотности [8-10]. Так, например, термоотжиг стекла марки К-8 проводился в режиме изотермического отжига при температурах 343К, 353К, 383К, 413К, 443К (рис.3).

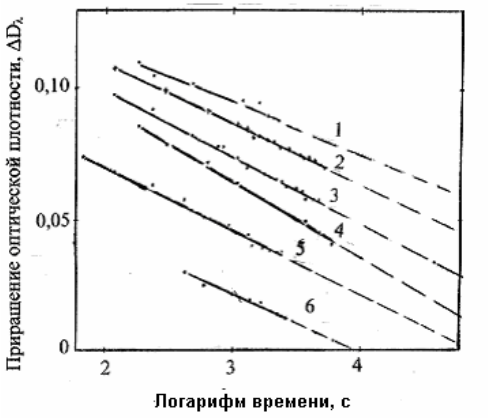



Рис.3. Зависимость изменения спектральной оптической плотности $\Delta D_\lambda$ ($\lambda$=0,5 мкм) оптического стекла марки К-8, облученного протонами с энергией 6,3 МэВ, флюенсом $10^{13}$ $см^{-2}$, Д~$10^4$ Гр от логарифма времени отжига в изотермическом режиме : 1 – Т=343 К; 2 – Т=353 К; 3 – Т=383 К; 4 – Т=393 К; 5 – Т=413 К; 6 – Т=443 К

Зависимости $\Delta D_\lambda$ при изотермическом отжиге центров окраски при комнатной температуре, построенные как функция логарифма времени отжига, линеаризуется на довольно большом интервале изменения логарифма времени (рис.3). Это обстоятельство позволяет предположить, что при отжиге центров окраски в исследуемых стеклах имеет место

«ступенчатый» отжиг, когда при заданной температуре быстро исчезает лишь определенная часть радиационных центров окраски, а остальная часть остается практически стабильной, но при дальнейшем повышении температуры исчезновение радиационных центров окраски продолжается, рис.4 [11].

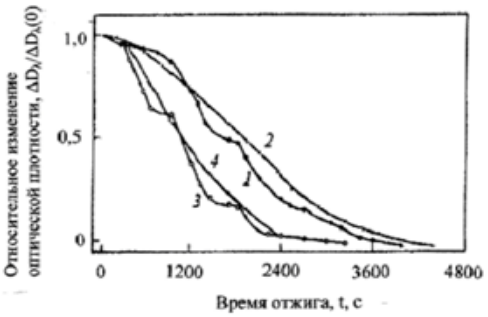



Рис.4. Зависимость относительного изменения спектральной оптической плотности оптических стекол марки «крон» К-8 (1.2) и «флинт» Ф-1 (3.4) от времени отжига при ступенчатом отжиге (приращение температуры $50^0$C через каждые 15 минут, (кривые 1.3) и отжиге при линейном изменении температуры со скоростью 200 $^0$C/час (кривые 2,4). $\Delta\alpha(0)$ – приращение коэффициента поглощения до термического отжига

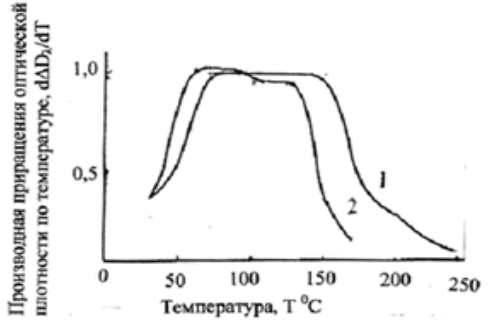



Рис.5. Зависимость производной изменения спектральной оптической плотности по температуре ($d\Delta D_\lambda/dT$) оптических стекол марок К-8 (1) и Ф-1 (2) от температуры отжига

Из экспериментов по изотермическому и изохронному термоотжигу была получена зависимость производной изменения оптической плотности по температуре от температуры отжига (рис.5)

В основе описания кинетики «ступенчатого» отжига лежит идея о существовании радиационных центров окраски, поглощающих монохроматический свет, но с различными энергиями активации. Для “ступенчатого” отжига характерно, что при очередном подъеме температуры через некоторое время наблюдается резкое снижение скорости отжига центров окраски [11]. Кривые, полученные при линейном изменении температуры и в режиме ступенчатого отжига, достаточно хорошо совпадают друг с другом.

Процесс отжига радиационного центра окраски состоит в том, что захваченный электрон или дырка высвобождается из соответствующего энергетического уровня, созданного дефектом в запрещенной зоне, преодолевая энергетический барьер $E_j$ в результате тепловых колебаний. Этот процесс не является единым для всех центров окраски данного вида, а распределен среди N уровней дефектов.

При прогнозировании поведения оптической аппаратуры, находящейся в условиях воздействия космического ионизирующего излучения, необходимо учитывать сильную неравномерность распределения по глубине поглощенной мощности дозы P(x) [12].

Задача заключается в определении приращения оптической плотности стекла $\Delta D_\lambda$ от времени воздействия ионизирующей радиации с неравномерным распределением по глубине мощности поглощенной дозы по формуле [1]:

$$\Delta D_\lambda = \int_{l_0}^{l_k} \Delta\alpha_\lambda[P(x),t]dx, \qquad (2)$$

где $\Delta\alpha_\lambda[P(x),t]$ - зависимость приращения коэффициента поглощения стекла от мощности дозы P и от времени облучения t, $l_0$ и $l_k$ - начальная и конечная глубина интегрирования;

Неравномерность распределения мощности поглощенной дозы КИИ по глубине материала, расположенного на внешней поверхности КА, определяется распределением протонов и электронов радиационных поясов Земли по энергиям, таким образом, что энергетический спектр этих частиц имеет падающий характер.

По формуле (1) были проведены модельные расчеты величины $\Delta D_\lambda$ для различных времен экспозиции t. P(x) для полярной орбиты в зоне внутреннего радиационного пояса, H~3000 км взято из [2]. В результате расчетов при различных значениях параметров $t_1$, $t_2$, $l_0$ получены зависимости: $\Delta D_\lambda = f(t)$ при x=const;

На рис. 6 приведены зависимости приращения оптической плотности от времени полета для стекол типа "флинт" Ф-1 и "крон" К-8. Радиационные условия соответствуют полярной орбите высотой 3000 км.

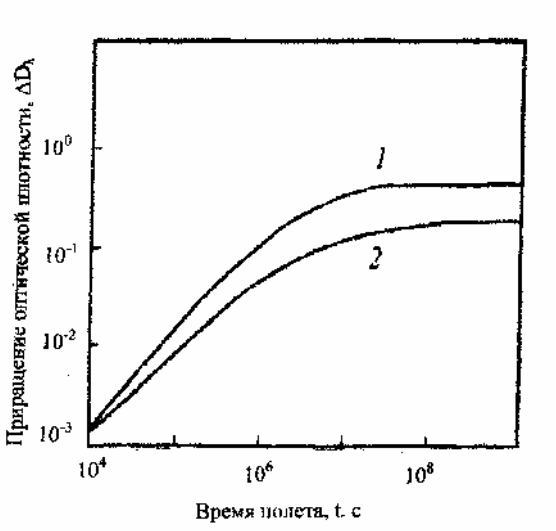



Рис.6. Расчетная зависимости радиационного приращения оптической плотности $\Delta D_\lambda$ стекол марки «крон» К-8 (1) и «флинт» Ф-1 (2) толщиной 1 г/см$^2$ от времени полета по круговой полярной орбите высотой 3000 км

Созданные ионизирующим излучением центры окраски в стеклах могут разрушаться не только при термическом воздействии, но и при поглощении квантов света. Этот процесс называется оптическим обесцвечиванием облученных прозрачных материалов [13].

Получены экспериментальные данные по оптическому обесцвечиванию центров окраски некоторых марок оптических стекол после облучения их на электронном ускорителе с энергией 2 МэВ. Стекла, облученные электронами флюенсом $7.10^{14}$ см$^{-2}$, затем подвергались воздействию излучения ксеноновой лампы типа ДКсШ-1000. Интенсивность электромагнитного излучения Солнца в диапазоне длин волн 0,2-0,75 мкм имитировалась в отношении 10:1. Время облучения стекол лампой ДКсШ-1000 составляло 24 часа, что соответствует 10 суткам воздействия электромагнитного излучения заатмосферного Солнца в указанном диапазоне длин волн.

Процесс оптического обесцвечивания приводит к практически полному восстановлению исходного интегрального коэффициента пропускания, Т, (в пределах 5%) для всех исследованных марок оптических стекол (флинты и кроны). Таким образом, можно сделать вывод о сильном разрушении радиационных центров окраски под действием электромагнитного излучения заатмосферного Солнца в течение 10 суток.

Получена зависимость изменения оптической плотности стекла за счет оптического обесцвечивания от потока энергии электромагнитного излучения Солнца. Изменение пропускания света в испытуемом образце стекла измерялось на той же длине волны света, на которой проводилось оптическое обесцвечивание.

На рис.7 приведена зависимость изменения оптической плотности образцов стекла марки К-8 на длине волны $\lambda$ от логарифма потока световой энергии при различных экспозиционных длинах волн $\lambda$.

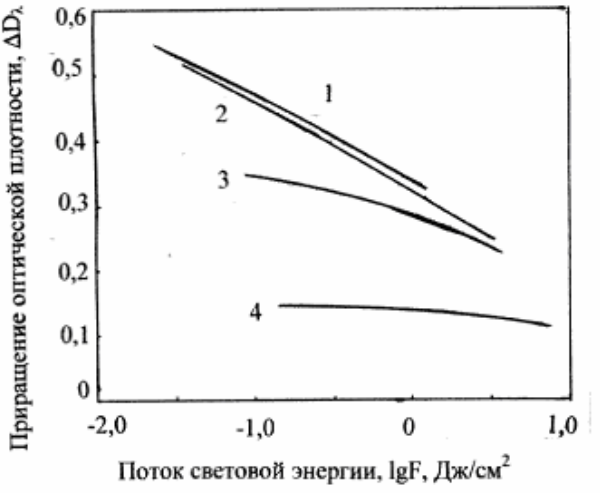



Рис.7. Зависимость изменения спектральной оптической плотности образцов стекла К-8, облученных протонами от логарифма потока световой энергии при различных длинах волн светового облучения: 1 – 0,35 мкм; 2 – 0,40 мкм; 3 – 0,50 мкм; 4 – 0,65 мкм

Полученный результат достаточно уверенно свидетельствует о пороговом характере этого процесса и определяет приблизительное значение пороговой длины волны для стекла марки К-8 как 450 нм.

При облучении некоторых диэлектриков, в частности оптических стекол, электронами с энергией 1-4 МэВ и протонами с энергией 10-100

МэВ, наблюдается эффект внедренного нескомпенсированного электрического заряда. Создаваемое этим зарядом электрическое поле в объеме диэлектрика может расти до тех пор, пока не будет достигнута напряженность электрического поля, соответствующая электрической прочности материала.

Делокализация внедренного в объем стекла заряда происходит за счет собственной и радиационной проводимости диэлектрика. При электрическом пробое внедренного в стекло заряда наблюдается растрескивание стекол [14,15].

**Радиолюминесценция стекол**

Изучение свечения, возникающего в стеклах различных типов под действием ионизирующего излучения, представляет собой большой интерес. Так, при использовании стеклянных линз в разнообразной оптической аппаратуре, установленной на космических объектах, свечение внешней линзы, вызванное космическим ионизирующим излучением, может служить помехой основному световому сигналу. Поэтому большое значение приобретает изучение люминесцентных свойств стекол, установление основных закономерностей выхода свечения в зависимости от их состава, измерение спектров, температурной зависимости свечения и т.д. [3,16].

Параметрами свечения оптических материалов являются яркость и спектральный состав свечения. Получены основные результаты исследований зависимости этих параметров от условий облучения (вида, энергии, интенсивности, длительности), температуры, состава оптических стекол.

Спектры люминесценции под действием заряженных частиц являются непрерывными и представляют распределение в области 380-520 нм с максимумами при длинах волн 410-460 нм.

При измерениях электронной и протонной люминесценции (энергии электронов и протонов сотни кэВ, что соответствует средним энергиям частиц в радиационных поясах Земли) было получено, что для каждой марки стекла яркость свечения линейно зависит от интенсивности падающего ионизирующего излучения:

$$B_{e,,p}=\beta_{e,,p}j_{e,p}E_{e,p}=\beta_{e,p}J_{e,p},$$

где $B_{e,,p}$ – яркость свечения образца при возбуждении электронами или протонами, кд/м$^2$; $J_{e,p}$ – интенсивность излучения, МэВ/см$^2$.с, равная произведению плотности потока падающих частиц $j_{e,p}$, 1/см$^2$.с, на их энергию $E_{e,p}$, МэВ; $\beta_{e,p}$ – удельная яркость свечения, мккд.с/МэВ. При этом интенсивность электронного излучения $J_e$ изменялась в пределах

от $1{,}5.10^4$ до $2.10^7$ МэВ/см$^2$с, а интенсивность протонного излучения $J_p$ – от $10^7$ до $10^{10}$ МэВ/ см$^2$.с.

Выход радиолюминесценции для стекол всех марок при протонном облучении ниже выхода при электронном облучении. Это может быть связано с насыщением и тушением люминесценции вследствие большой плотности возбуждения при облучении протонами малых энергий (сотни кэВ), поскольку ионизационные потери протонов на единице пути намного больше ионизационных потерь электронов той же энергии.

Эксперимент показал, что основными компонентами, определяющими люминесцентную способность стекол, являются окиси кремния $SiO_2$, бария BaO и свинца PbO. Остальные компоненты могут сильно изменяться в количественном соотношении или отсутствовать совсем, но на выходе радиолюминесценции это почти не сказывается.

Все стекла можно разделить на две группы, сходные по оптическим свойствам: первая группа – «кроны», т.е. стекла типов К, ЛК, БК и ТК; вторая группа – «флинты», т.е. стекла типов Ф, ЛФ, КФ, БФ и ТФ.

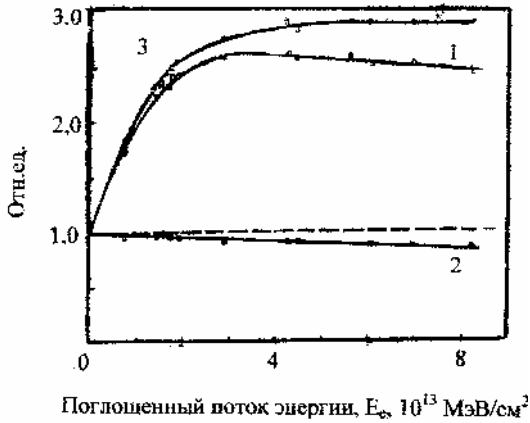



Рис.8. Зависимость изменения люминесцентной способности стекла от поглощенного потока электронного излучения 1– зависимость регистрируемого светового потока, 2– коэффициента пропускания света собственной люминесценции, 3– люминесцентной способности от поглощенного потока энергии электронного излучения для одного из стекол марки кронов, содержащего $CeO_2$

На рис.8 приведена зависимость изменения люминесцентной способности стекла от поглощенного потока электронного излучения. Кри-

вая 1 изображает зависимость регистрируемого светового потока радиолюминесцеции от поглощенного потока электронного излучения $J_e=I_et$ (t – время, прошедшее с начала облучения).

Относительное возрастание выхода люминесценции для стекол первой группы лежит в пределах от 1,2 до 4,7. После прекращения облучения повышенная люминесцентная способность сохраняется у стекол первой группы в течение нескольких месяцев. Эффект разгорания люминесценции отсутствует у стекол второй группы флинтов, что связано с наличием в составе стекол второй группы окиси свинца. Эффект разгорания люминесценции у стекол первой группы ( кроны ) исчезает, если облучение ведется при нагреве стекол до температуры ~420 К. При этом спектр люминесценции для каждого стекла является устойчивой характеристикой, которая не меняется в процессе длительного облучения стекол как первой, так и второй групп.

Зависимость яркости свечения от температуры в интервале от 320 до 120К может быть приближенно аппроксимирована формулой $B_T/B=a-bT$. Где $B_T$ – яркость свечения стекла при температуре Т; В – яркость свечения стекла при комнатной температуре; а и b – параметры, характерные для каждой марки стекла и несколько различающиеся в зависимости от вида облучения.

При высоких температурах яркость свечения падает, это – следствие температурного тушения люминесценции. Однако при этом появляется опасность возникновения термолюминесценции стекла, если оно было предварительно облучено ионизирующей радиацией.

У стекол, имеющих в своем составе хотя бы несколько процентов окиси свинца (стекла флинты) термолюминесценция не возникает, какими бы большими ни были поглощенные дозы электронного и протонного излучения. У стекол, не содержащих окиси свинца (стекла первой группы), наблюдается интенсивная термолюминесценция, зависимость которой от температуры сильно отличается для стекол различных марок, а яркость при скорости нагрева ~0,2 град/с может достигать нескольких десятых мккд/см$^2$.

Главную роль в люминесцентных явлениях играет не только состав стекла, но и характер структурных связей в основной стеклообразующей кремний-кислородной сетке, зависящей от незначительных вариаций технологического процесса варки. Модифицирующие компоненты, по-видимому, лишь тушители радиолюминесценции и влияют только на световой выход. Прямая зависимость люминесцентной способности стекол от процентного содержания $SiO_2$ подтверждает этот вывод.

Приведенные результаты исследований радиолюминесцентных свойств стекол позволяют провести оценку уровня свечения стекол под

действием электронной и протонной компонент радиационного пояса Земли. Расчет показывает, что средняя яркость свечения стекла (кроны) в естественных поясах не превышает 0,06 мккд/см$^2$. При длительных полетах в условиях повышенной радиации эта величина может достигнуть за счет разгорания люминесценции 0,2 мккд/см$^2$. Понижение температуры корпуса корабля может увеличить это значения до 0,4 мккд/см$^2$, а интенсивное высыпание электронов в области полярных сияний – до нескольких мккд/см$^2$.

Импульсные световые помехи в оптико-электронных приборах могут возникать за счет радиолюминесценции оптических элементов при попадании в них тяжелых ядер космических лучей типа ионов железа. Такие световые вспышки связаны с высокой линейной потерей энергии (ЛПЭ) при торможении тяжелых ядер.

**Радиационная стойкость волоконных световодов**

Проблема радиационного окрашивания имеет также большое значение для волоконной оптики, использующейся в космическом оборудовании, т.к. длина волоконных коммуникаций на КА может достигать десятков и сотен метров и эффект радиационного ухудшения прозрачности световода будет резко влиять на качество передаваемой информации [17-24].

Волоконные световоды (ВС) находят применение в бортовой аппаратуре ИСЗ в связи с рядом преимуществ по сравнению со стандартными линиями связи: высокая помехозащищенность к электромагнитным помехам, малый вес и габариты, широкая полоса пропускания и высокая скорость передачи информации, низкое энергопотребление.

Радиационные эффекты, возникающие в волоконной оптике, практически те же, что и в оптических стеклах, а именно рост концентрации радиационных центров окраски, приводящим к дополнительному затуханию передаваемого оптического сигнала, радиолюминесценции, изменению коэффициента преломления и радиационной электризации. Наиболее важное практическое значения имеет образование радиационно-наведенного поглощения в световоде.

В работе показано, что различные типы ионизирующих излучений – электроны (Е~1 МэВ, мощность дозы 25 –2,3.10$^3$ рад.с$^{-1}$), протоны (Е~30 МэВ, мощность дозы 50 – 400 рад.с$^{-1}$) и гамма излучение (источник $^{60}$Co, мощность дозы 10$^{-1}$ – 10 рад.с$^{-1}$) оказывают одинаковое действие на ВС (сердцевина – $SiO_2$, отражающая оболочка – полимер или боросиликатное стекло) в диапазоне доз 10$^2$ – 10$^7$ рад.

Причина возникновения наведенного поглощения (НП) при дозах D<10$^8$ рад, по-видимому, состоит в возникновении радиационных цен-

тров окраски, связанном с захватом носителей заряда на дефекты, существовавшие в стекле до воздействия, ионизирующего излучения.

На рис.9 приведена дозовая зависимость изменения наведенного поглощения (НП) для световодов с оболочкой из силиконовой резины и сердцевиной $SiO_2$ спустя 1 ч после облучения различными дозами гамма излучения.

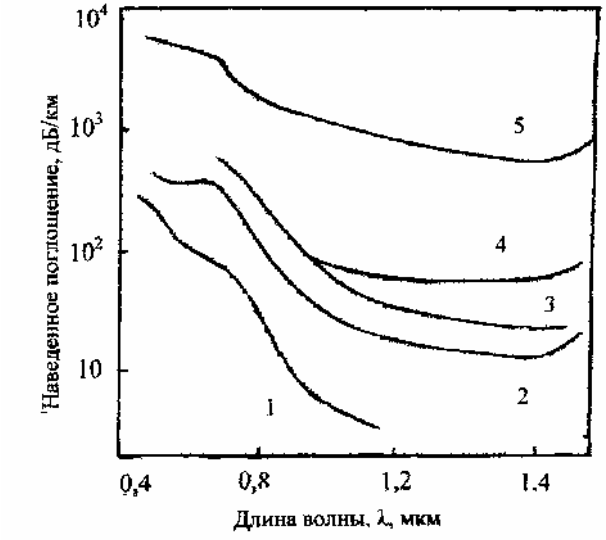



Рис.9. Дозовая зависимость изменения наведенного поглощения в световоде с оболочкой из силиконовой резины и сердцевиной $SiO_2$ спустя 1 час после облучения различными дозами γ-радиации. 1 – $10^2$ Гр; 2 – $10^3$ Гр; 3 –$10^4$Гр; 4 –$2.10^5$Гр; 5 –$10^6$Гр

Механизм наведенного поглощения в ВС при дозах излучения до $10^4$Гр практически не зависит от типа ионизирующего излучения. С понижением температуры эффективность генерации НП резко возрастает, главным образом за счет нестабильных короткоживущих радиационных центров окраски.

На эффективность генерации радиационных центров окраски в кварцевых световодах большое влияние оказывают примеси. Радиационную стойкость кварцевого световода можно повысить путем введения в его состав нескольких процентов окиси церия. Наибольшей радиаци-

онной стойкостью обладают кварцевые световоды с сердцевиной из чистой $SiO_2$ с большим содержанием ОН.

Основные требования для повышения радиационной стойкости кварцевых ВС сводятся к следующему:

– повышение чистоты и оптимизация состава примесей в кварцевом ВС;

– использование оптических сигналов в диапазоне длин волн 0,8-0,9 мкм;

– использование эффектов термоотжига и фотоотжига для разрушения радиационных центров окраски и снижения наведенного поглощения.

Отметим, что стеклообразный кремнезем (v-$SiO_2$) высокой чистоты, являясь основным компонентом световедущей сердцевины современных ВС, занимает также особое положение в физике неупорядоченных твердых тел, сочетая характерные особенности ковалентных соединений и типичных ионных соединений. Подчеркнем, что только с разработкой технологии ВС с малыми потерями удалось получить кварцевые стекла высокой чистоты и в значительной степени освободится от дефектов, связанных с примесями.

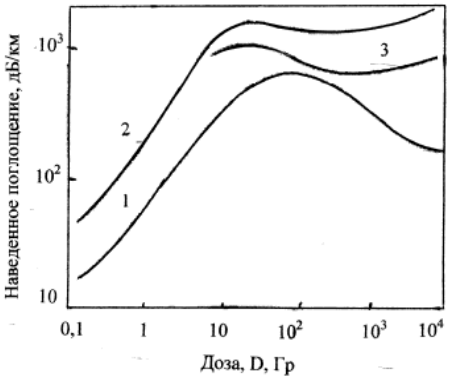



Рис.10. Дозовые зависимости НП на длине волны λ=0,82 мкм ВС с сердцевиной из чистого $SiO_2$ (с большим содержанием ОН-групп): 1– с отражающей оболочкой из силиконовой резины; 2,3– у боросиликатного стекла

Дозовые зависимости НП с высокой концентрацией ОН в сердцевине от дозы излучения представлены на рис.10.

Возникновение люминесцентного свечения при воздействии рентгеновского излучения на ВС с сердцевиной из чистого $SiO_2$ с большим содержанием гидроксильных групп исследовалось в работе [22]. Обнаружены две полосы люминесценции с максимумами на 0,45 и 0,65 мкм, интенсивность которых была пропорциональна мощности доза радиации Д ($P=6.10^2 – 4.10^3$ рад/с). После окончания импульсного облучения на ускорителе электронов люминесцентное свечение исчезает за время ~20 мкс. В [23] отмечается, что легирование сердцевины элементами: Ge, B или P может подавлять люминесценцию.

Наведенное поглощение существенно изменяется в некоторых ВС при воздействии света, проходящего через них как в процессе действия ионизирующего излучения, так и по ее окончании, причем этот эффект становится заметен уже при интенсивности света $\sim 10^{-4}$ Вт.см$^{-2}$.

Рассмотрим подробнее эффект оптического обесцвечивания нестабильных полос НП (подсветка в диапазоне 0,44 – 1,06 мкм не просветляет стабильные полосы НП). В работе в каждом типе кварцевых ВС обнаружено по нескольку фотообесцвечивающих полос НП, обладающих различными временами распада (0,5 мин до 10 суток). Наиболее стабильная полоса НП – 0,8 мкм полностью восстанавливается после выключения подсветки, в то время как другие полосы НП восстанавливаются лишь частично.

Во всех ВС наведенные потери можно разделить на две части: стабильную и нестабильную. Относительный вклад, которых в общую величину НП может существенно меняться в зависимости от состава сердцевины ВС, содержания в ней микропримесей (например, гидроксильных групп), технологии вытягивания ВС, а также для разных длин волн света, проходящего по световоду. Нестабильную часть НП можно сравнительно легко подавлять с помощью подсветки видимого и ближнего ИК диапазонов, а также нагревая ВС до сравнительно невысоких температур (~400 К). Стабильные полосы НП не обесцвечиваются подсветкой видимого и ближнего ИК диапазонов, и их отжиг возможен лишь при достаточно высоких температурах (>400 К). Интенсивность нестабильных полос НП значительно чувствительней к процессу вытягивания волокна (типу нагревателя), чем интенсивность стабильных полос НП.

Минимум стабильных НП достигается при $\lambda$=1,4-1,5 мкм для ВС с сердцевиной либо $SiO_2$, либо $SiO_2$:$GeO_2$. Содержание гидроксильных групп в первом случае существенно влияет на радиационно-оптическую устойчивость ВС, а во втором случае такого влияния не замечено.

Волоконные световоды используются также для дозиметрии низких уровней ионизирующих излучений. Волоконно-оптические кабели (l=25

м) с примесями редкоземельных элементов находят применение в дозиметрии ионизирующих излучений при мощности дозы излучения $P \sim 10^{-6}$ Гр/с при $\lambda = 1300$ нм считывающего лазера [25].

## 6. ЭМИССИОННЫЕ И РАЗРЯДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И В ВАКУУМЕ

Электрический пробой радиационно-заряженного твердого диэлектрика, облученного электронами или протонами с энергией до 100 МэВ, сопровождается выбросом в окружающую среду плазмоида из разрядного канала (рис.1,2).

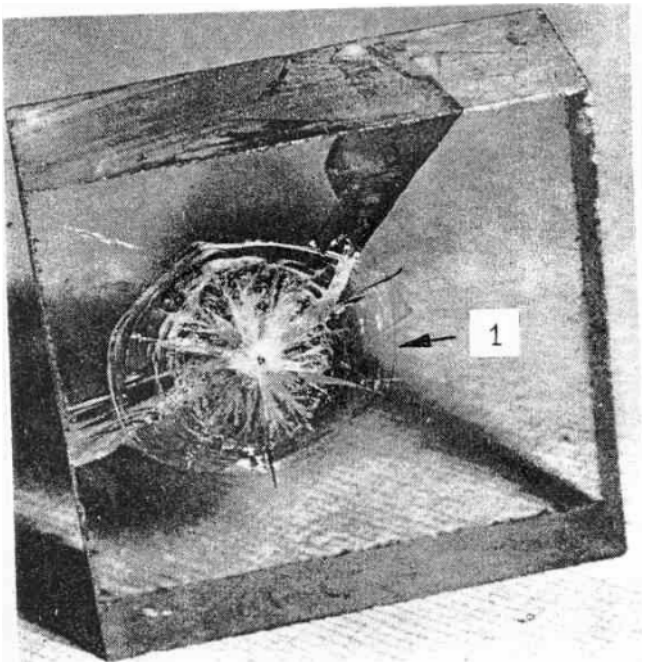



Рис.1. Электрический пробой радиационно-заряженного стекла. 1-выход разрядного канала на поверхность стекла, из которого инжектируется плазмоид в окружающую среду

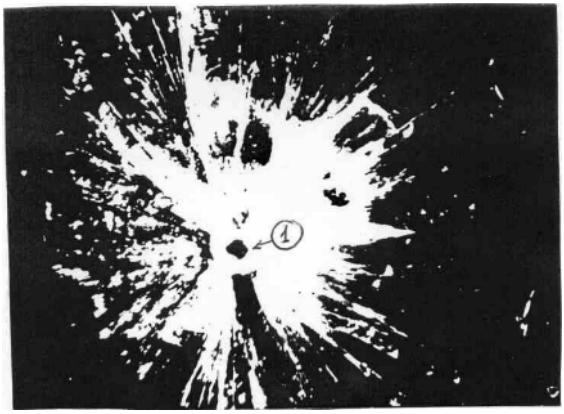



Рис.2. Выход разрядного канала на поверхность стекла, из которого происходит выброс плазмоида (1) в окружающую среду из оптического стекла при электрическом пробое

Разрядный ток в основном канале может достигать сотни ампер, энергия разряда до 1Дж, а время ~0,1-1 мкс, скорость движения стримера в канале составляет $6 \times 10^6$см/с. Длительность импульса разрядного тока обычно измеряется в вакуумной камере при наличии металлических стенок, однако в космосе около ИСЗ стенки отсутствуют, поэтому параметры разрядного тока могут быть отличными от лабораторных. В неорганических диэлектриках, например в стеклах марок БК-108, ТК-120, СТК-112 инжекции плазмоида из разрядного канала сопутствует акустическая и фотонная эмиссии, выброс заряженных макрочастиц размером 1-10 нм за счет диспергации вещества в разрядном канале диэлектрика.

В результате газодинамического сверхзвукового расширения плазмоида при выходе из разрядного канала в неравновесных условиях протекают также процессы кластеризации пара и продуктов деструкции материала в кластеры размером n~1-5000 атомов. Как известно, такие кластеры характеризуются высокой реакционной способностью, имеют большую удельную поверхность, и время жизни до долей секунды. Они являются основой кластерной структуры плазмоида.

**Характеристики плазмоида**

Выброс плазмоида в вакуум из разрядного канала предполагает разделение электрических зарядов (рис.3), что создает условие для образования высокой разности электрических потенциалов, вследствие чего

энергия эмитированных в вакуум электронов или ионов может достигать десятков кэВ.

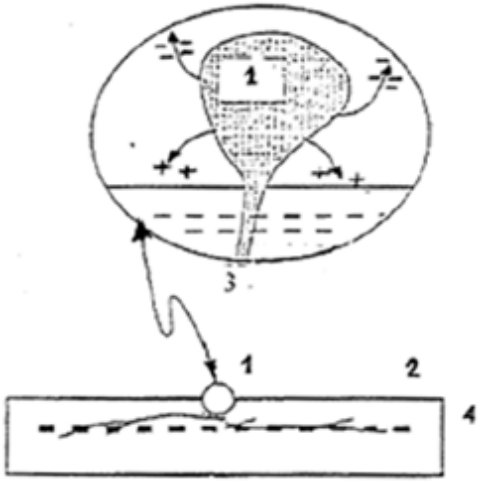



Рис.3. Модель эмиссии плазмоида при электрическом пробое радиационно-заряженного диэлектрика: 1 - плазмоид; 2 - радиационно-заряженный диэлектрик; 3 - разрядный канал; 4-расположение внедренного заряд [7]

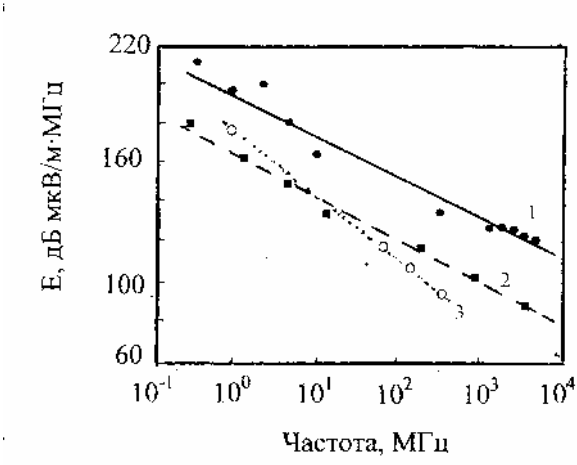



Рис.4. Спектр ЭМП, вызванный электрическими разрядами в радиационно-заряженных образцах майлара: 1 – 1650 см$^2$; 2 – 450 см$^2$; 3 – 5 см$^2$ [8]

При электрическом пробое радиационно-заряженного майлара и релаксации плазмоида возникают электромагнитные помехи (ЭМП) в частотном диапазоне 0,1-1000 МГц (рис.4). В энергию ЭМП преобразуется лишь незначительная доля полной энергии электростатического поля в объеме радиационно-заряженного диэлектрика от внедренного заряда.

Этот вид разряда определяет максимальную эффективность генерации ЭМП при электрическом пробое радиационно-заряженного диэлектрика и связывается с перемещением имитируемых из разрядного канала зарядов в вакууме на расстояния 1-10 м. Как правило, при одиночном электрическом пробое радиационно-заряженного диэлектрика сбрасывается с 20до 90% внедренного в объем диэлектрика заряда.

Разрядный канал после выхода плазмоида длительное время является источником экзоэлектронной эмиссии с интенсивностью $10^2$ -$10^3$ эл/с. Газовыделение из разрядного канала при одиночном пробое достигает $10^{16}$ молекул. Основным источником поступления газа в момент электрического пробоя радиационно-заряженного диэлектрика являются, выброс газа из разрядного канала, механодесорбция при инициировании пробоя, десорбция газа с поверхности за счет ударной волны, сопутствующей электрическому пробою диэлектрика. Основная доля этого газа в вакууме ионизируется потоком электронов, выходящим вслед за стримером из разрядного канала и ускоренным приповерхностным электрическим полем. В случае эмиссии плазмоида в среду, содержащую мелкодисперсный водный аэрозоль (рис.5), из разрядного канала радиационно-заряженного ПММА или других органических диэлектриков, некоторые параметры плазмоида могут быть близки к параметрам искуственной шаровой молнии. Как за счет наличия в его структуре фрактальных полимерных кластеров, так и величины его удельной внутренней энергии [9].

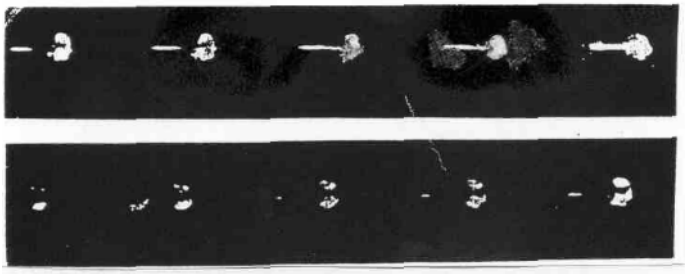


Рис.5. Кинограмма плазмоида при эмиссии из разрядного канала в среду, содержащую мелкодисперсный водный аэрозоль [9]

Взаимодействие плазмоида с металлом носит взрывной характер (рис.6).

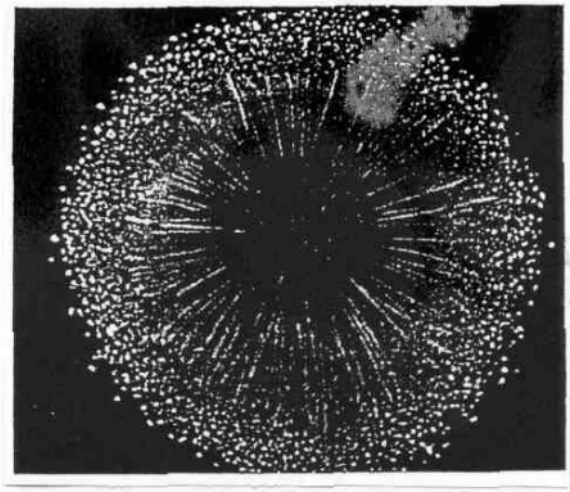


Рис.6. Следы взаимодействия плазмоида со слоем золота [9]

При воздействии импульсного сильноточного пучка электронов со средней энергией 280 кэВ на широко щелевые диэлектрики, например ПММА или $BaF_2$, обнаружена сильная импульсная низкоэнергетическая вторичная эмиссия из разрядного канала диэлектрика [10]. Такая эмиссия инициируется из плазмы разрядного канала диэлектрика, который предварительно формируется в его объеме. Однако природа интенсивной вторичной эмиссии пока до конца не ясна, возможно, она связана с механизмом взрывной эмиссии.

При функционировании ИСЗ в радиационном поясе Земли электрические пробои и эмиссионные процессы в диэлектрических материалах, облученных электронами с энергией выше 2 МэВ при флюенсе выше $10^{11}$ $см^{-2}$, могут быть одной из причин возникновения радиационных аномалий [6,10,11]. Эффективность таких процессов возрастает для систем бортовой криоэлектроники, поскольку эффективность удержания внедренного заряда в диэлектрике при криогенной температуре выше, чем при комнатной. Характер эмиссионных явлений в лабораторных условиях и в космосе на внешней поверхности ИСЗ может быть различным.

**Механизм радиационной электризации на поверхности ИСЗ**

Внешние диэлектрические поверхности космических аппаратов подвергаются воздействию потоков заряженных частиц. На рис.7 приведена схема воздействия корпускулярного и фотонного излучений на поверхность ИСЗ.

Электроны с энергией до 100 кэВ создают на поверхности диэлектриков аккумулированный электрический заряд. Время зарядки ИСЗ в момент магнитной бури во внешнем радиационном поясе Земли составляет доли секунды. Аккумулированный диэлектриком электронный заряд создает высокую напряженность электрического поля, что вызывает поверхностный электрический разряд, который сопровождается генерацией импульсов ЭМП. Электромагнитные помехи вызывают сбои в электронных системах ИСЗ. Энергия, заключенная в импульсе ЭМП, на несколько порядков ниже, чем запасенная энергия электрического поля от аккумулированного заряда в диэлектрике.

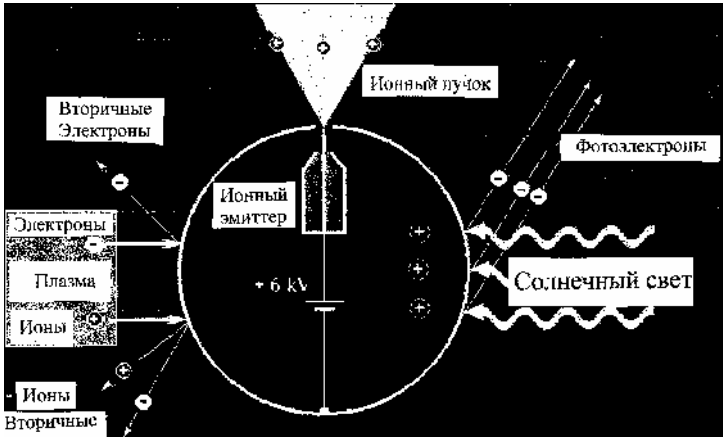



Рис.7. Схема воздействия корпускулярного и фотонного излучений на поверхность ИСЗ

Потенциал поверхности ИСЗ по отношению к окружающей плазме определяется балансом токов, текущих через поверхность, что можно представить в следующем виде:

$$I=I_e-(I_p-I_{\sigma e}+I_{bse}+I_{sp}+I_{\phi}),$$

где $I_e$ – электронный ток плазмы; $I_p$ – протонный ток плазмы; $I_{\sigma e}$ – ток вторичной электронной эмиссии; $I_{bse}$ – ток отраженных от поверхности электронов; $I_{sp}$ – ток вторичной эмиссии электронов под действием протонов; $I_ф$ – ток фотоэлектронной эмиссии.

Для сферического тела в плазме с учетом реальных вторично-эмиссионных свойств материала внешней поверхности ИСЗ потенциал поверхности φ ИСЗ $\varphi \cong -1{,}5(kT_e/e)$. Получены экспериментальные данные об основных характеристиках импульсных ЭМП, возникающих в процессе скользящего электрического разряда по поверхности полиэтилена и других диэлектрических материалов, используемых на внешней поверхности космических аппаратов. Эмиссия зарядов с диэлектрических деталей КА в окружающее пространство сопровождается электромагнитными импульсами [12-14]. Вызывающие импульсы ЭМП разряды характеризуются суммарной величиной переносимого заряда и длительностью разрядного импульса. ЭМП при разряде, связанном с эмиссией заряда с поверхности, имеют наибольший радиус действия.

Исследования характеристик электроразрядных явлений и сопутствующих импульсов ЭМП проводилось на экспериментальной установке для одновременного облучения фрагментов солнечной батареи электронами и УФ-излучением (рис.8). Установка имела вакуумный объем около одного кубического метра при $p \sim 10^{-4}$ Па, электронную пушку с широким моноэнергетическим пучком электронов с энергией в диапазоне 20-50 кэВ, плотностью тока 1-10 нА/см$^2$ площадью пучка 0,35 м$^2$ . Для накопления и обработки информации по амплитудно-временным параметрам импульсных разрядов применяли многоканальный анализатор типа УНО-4096-90.

Измерялись амплитудные спектры импульсов разрядных токов, возникающих в приповерхностных слоях (1-20 мкм) полимерных пленочных материалов, а также их распределение во времени. Уровень импульсов ЭМП регистрировался с помощью двух антенн, расположенных в вакуумной камере. Цель работы - выявить частоту, длительность, форму и амплитуду максимальных импульсов разрядных токов и основных характеристик ЭМП. Форму и длительность импульсов регистрировали с помощью двухканального запоминающего осциллографа С8-14 и осциллографа С1-122А. Частоту следования импульсных сигналов (амплитуда от 0,1 до 10 В) и длительность импульсов измеряли с помощью электронно-счетного частотомера Ч3-63. Счет импульсов за время облучения осуществлялся с помощью установки УС4-1И.

За один разрядный импульс электростатический заряд может собираться с поверхности до 20 см$^2$ радиационно-заряженного диэлектрика. В экспериментах по изучению разрядных токовых импульсов с поверх-

ности полиэтиленовой пленки наблюдались импульсные токи величиной до 10А. Длительность импульса составляла 0,1-0,5 мкс, а напряжение разряда ~6-10 кВ, энергия разряда - до 3-5 мДж.

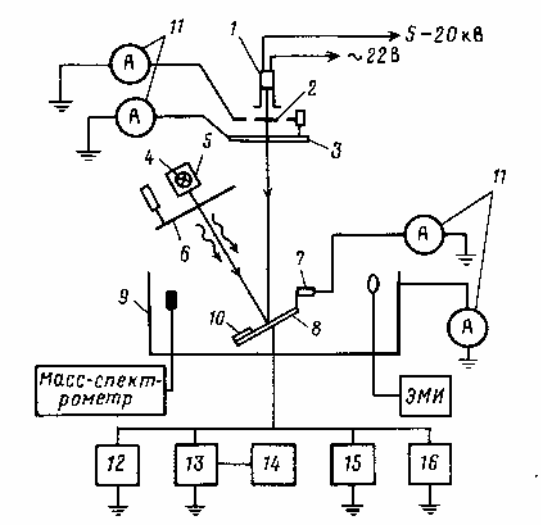



Рис.8. Схема экспериментальной установки для проведения одновременного облучения фрагментов солнечной батареи электронами и УФ-излучением: 1 – электронная пушка; 2 – измерительная сетка для контроля тока пучка электронов; 3 – шторка, перекрывающая поток электронов; 4 – источник УФ-излучения – лампа ДРТ-240; 5 – защитный кожух лампы; 6 – шторка, частично перекрывающая излучение лампы ДРТ-240; 7 – датчики, регистрирующие плотность электронного потока; 8 – солнечная батарея; 9 – изолированная подставка для размещения СБ; 10 – измеритель температуры; 11 – измерители тока пучка электронов; 12 – осциллограф запоминающий; 13 – анализатор; 14 – цифропечатающий прибор; 15 – частотомер электронно-счетный; 16 – пересчетный прибор

В процессе экспериментальных исследований в лабораторных условиях были определены основные эмпирические закономерности характеристик электроразрядных процессов и импульсов ЭМП.

Полный заряд Q, освобожденный в процессе поверхностного разряда радиационно-заряженных полимерных диэлектриков (полиэтилен, майлар и др.), пропорционален площади (S) облучаемого электронами диэлектрика, максимальный ток соответствует $j_{max} \sim S^{1/2}$, $I_p \sim 0{,}1\text{-}10$А, дли-

тельность импульса разряда $\tau \sim S^{1/2}$, $\tau$~0,1-1 мкс, энергия разряда, выделенная на низкоомной нагрузке (R~50 Ом), $W \sim S^{1,5}$, W~0,1-10 мДж.

**Скользящий разряд на поверхности диэлектрика в вакууме**

Инициирование скользящего разряда по внешней поверхности заряженного диэлектрического материала в вакууме на борту космического аппарата может происходить за счет автоэлектронной эмиссии в локальной точке материала, при этом электронная лавина перемещается вдоль поверхности. Предполагается, что в некоторой точке поверхности скользящий разряд переходит в разряд, устремленный в окружающее КА пространство. Модель механизма инициирования скользящего разряда по поверхности диэлектрика, используемого, например, в электронных вакуумных приборах, предполагает наличие автоэлектронной эмиссии из точки катодного тройного соединения (граница раздела металлического катода, изолятора и вакуума).

Дальнейшее развитие разряда определяется распределением лавины вторичных электронов на поверхности заряженного диэлектрика при условии, что коэффициент вторично-электронной эмиссии $\sigma > 1$. На конечном этапе процесс заканчивается прохождением стримера в облаке десорбированного с поверхности газа. В приведенной модели инициирования поверхностного разряда большое значение придается эмиссии в диэлектрик электронов и дырок из катода и анода, что проявляется, например возникновением в предпробойный период электролюминесценции в приповерхностной зоне диэлектрика. В другой модели разряда по поверхности заряженного диэлектрика упор делается на поляризационный механизм развития разряда, связанный с релаксацией решетки диэлектрика, поляризованной за счет внедренного избыточного электронного заряда.

В условиях же функционирования радиационно-заряженных диэлектрических материалов на внешней поверхности КА, когда высоковольтные электроды отсутствуют, а в качестве виртуального катода рассматривается зона внедренного заряда, модель инициирования разряда имеет несколько другой характер и менее отработана. Наиболее сильные помехи, интенсивность которых может иметь высокий уровень в большинстве отсеков КА, генерируются плазменными электронами, выходящими из радиационно-заряженных диэлектрических материалов в окружающее пространство, и перемещающихся на значительные расстояния. Высокочастотный спектр ЭМП от электрических разрядов по поверхности радиационно-заряженных образцов майлара эмпирически описывается как, $E \sim f^{-\gamma}$, где E - напряженность электрического поля, f-частота, а $\gamma$~(1-1,8).

Согласно результатам лабораторных испытаний при разряде в окружающее пространство с поверхности используемых в космической технике диэлектрических материалов (каптон, тефлон) высвобождается от 20 до 90% накопленного заряда. При одиночном спонтанном разряде выделяется около 0,1 мм$^3$ газа при 1 атм. Степень ионизации газа составляет около 1%. Природа газа определяется материалом диэлектрика и степенью его деструкции, а также газом, десорбированным с его поверхности.

В процессе зарядки КА электрический потенциал облучаемого диэлектрика на внешней поверхности аппарата составляет $\varphi \sim (-kT_e)$, где k - константа и $T_e$ - электронная температура плазмы. Критический флюенс электронов с энергией в десятки кэВ, который может создать условия возникновения разряда на внешней поверхности диэлектрика КА, составляет $F=5.10^{11}$ эл/см$^2$.

При возникновении электрического разряда в локальной точке поверхности диэлектрика, когда плотность поверхностного заряда превышает $Q \sim 10^{-7}$ Кл/см$^2$, происходит выброс плазмы и газа в вакуум.

Этот процесс инициирует дальнейший разряд по поверхности диэлектрика в облаке ионизованного газа. Стример скользящего разряда по поверхности диэлектрика распространяется в объеме десорбированного газа и плазмы [14-16].На рис.9 приведена модель развития скользящего электрического разряда по поверхности заряженного диэлектрика.

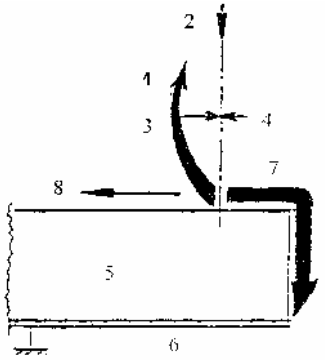



Рис.9. Модель развития скользящего электрического разряда по поверхности заряженного диэлектрика: 1 – выброс плазмы; 2 – фронт разряда; 3 – заряженная зона; 4 – зона разрядки; 5 – диэлектрик; 6 – контакт; 7 – пробой; 8 – распространение разряда [3]

Скользящий электрический разряд по поверхности диэлектрика может спровоцировать вакуумный пробой высоковольтного оборудования, если оно расположено рядом. Знание амплитуды разрядного тока, импульса ЭМП и его формы очень важны, поскольку они определяют эффективность проникновения импульсов ЭМП в цепи космической электроники. Современные микросхемы могут выйти из строя при поглощении энергии ЭМП около 3-5 мкДж. Эффективность защитных электрических фильтров в электронных цепях также зависит от амплитуды и формы импульсов ЭМП.

**Электрический пробой в вакууме**

По мере развития космонавтики непрерывно возрастает количество размещаемого на борту КА научного, технологического, радиотехнического и другого оборудования, значительная часть которого работает при напряжениях от единиц до десятков киловольт. При конструировании бортовых высоковольтных устройств естественно использовать в качестве изолирующей среды космический вакуум, т.е. размещать такие устройства вне термоотсека КА, что дает ощутимую экономию в весе аппаратуры. Кроме того, многие высоковольтные элементы должны располагаться в открытом космосе в соответствии с их функциональным назначением.

Однако в космическом пространстве имеется ряд факторов, которые могут ухудшать условия работы открытого высоковольтного оборудования. К ним в первую очередь относятся: микрометеорные частицы, потоки частиц магнитосферной и ионосферной плазмы, собственная внешняя атмосфера КА, солнечное ультрафиолетовое излучение.

Эти факторы в отдельности и в различных сочетаниях необходимо учитывать при рассмотрении надежности высоковольтного оборудования, функционирующего в условиях открытого космоса.

Наличие у КА достаточно плотной собственной внешней атмосферы увеличивает вероятность возникновения газовых разрядов высоковольтного оборудования, расположенного в открытом космосе.

Различные внешние воздействия на электроды высоковольтных устройств в открытом космосе также играют роль инициирующих факторов. Один из механизмов инициирования пробоя в высоковольтном вакуумном промежутке состоит в бомбардировке поверхности какого-либо электрода твердыми частицами микронных размеров. При высокоскоростном соударении частицы с электродом происходит ее испарение. В облаке пара зажигается газовый разряд, что вызывает образование заряженных частиц обоих знаков, которые ускоряются электрическим полем к противоположным электродам инициируют вторичную эмис-

сию с поверхности электродов. Если процесс становится самоподдерживающимся, происходит электрический пробой.

В космическом пространстве роль инициирующего фактора по отношению к открытым высоковольтным устройствам могут играть микрометеорные частицы и «космический мусор». Из-за высокой скорости микрометеорных частиц в точке удара происходит не только их интенсивное испарение, но и частичная термическая ионизация паров, т.е. образуются сгустки плазмы, что облегчает развитие пробоев. В случае появления на катоде сгустка электронов (эктона) возникает пробой. Для появления эктона требуется энергия ~$10^{-8}$ Дж, время жизни эктона ~$10^{-8}$-$10^{-9}$ с, а плотность тока в эктоне составляет $10^8$ А/см$^2$. Измерения, проведенные на наземных имитационных установках, показали, что при скоростях удара порядка 30 - 40 км/с в образующемся плазменном облаке может содержаться $10^6$–$10^7$ электронно-ионных пар. Были проведены также лабораторные эксперименты по бомбардировке электродов высоковольтных устройств искусственно созданными микрометеорными потоками. Результаты экспериментов убедительно подтвердили возникновение пробоев за счет рассмотренного механизма инициирования. На Рис.10 приведена схема инициирования вакуумного электрического пробоя ударом микрометеорной частицы в результате образования на катоде эктона.




Рис.10. Схема инициирования вакуумного электрического пробоя ударом микрометеорной частицы в результате образования на катоде эктона

Вакуумная изоляция чрезвычайно чувствительна к наличию на электродах различного рода микроскопических дефектов, на которых возможно выделение энергии и образование заряженных частиц с большой локальной плотностью. Общие размеры этих областей могут быть очень малы, например, острые микровыступы на поверхности электродов, имеющие высоту до 10 - 20 мкм и значительно меньшие поперечные размеры. Именно острый выступ на поверхности катода является в сильном электрическом поле центром автоэлектронной эмиссии и источником тока с высокой плотностью. Автоэмиссионный ток, протекающий через вершину выступа, сильно ее разогревает, что может привести к тепловому взрыву вершины выступа, при котором образуется плазменный факел, рождающий на катоде сгусток электронов – эктон, который распространяется в высоковольтный промежуток.

В космическом пространстве микровыступы на поверхности электродов открытых высоковольтных устройств могут образовываться в результате эрозионного воздействия микрометеорных частиц.

Возможным механизмом возникновения пробоя в высоковольтном вакуумном промежутке может быть также взаимный обмен вторично-эмиссионными токами между катодом и анодом.

Возникновение пробоя может быть обусловлено одновременным действием рассмотренных физических механизмов с преобладанием того или иного из них в разных условиях. Величина пробивного напряжения сильно зависит от материала электродов, вида их обработки, степени чистоты поверхности и других факторов. Даже в неизменных условиях многократное измерение величины $U_{пр}$ дает достаточно сильный разброс результатов.

В высокочастотных устройствах на борту КА возникают электрические разряды, не имеющие аналогов при постоянном или импульсном напряжении. Это так называемые вторично-эмиссионные разряды, которые могут развиваться между двумя электродами и даже у поверхности одного электрода, причем эта поверхность может быть и диэлектрической. Развитие вторично-эмиссионных разрядов происходит в результате лавинообразного нарастания потока электронов, движущихся в высокочастотном поле, при условии, что $\sigma >> 1$.

Итак, для развития высокочастотного вторично-эмиссионного разряда необходимо два условия. Первое - равенство времени пролета электронами межэлектродного зазора нечетному числу полупериодов напряжения, или условие резонанса. Второе - величина коэффициента вторичной эмиссии на электродах $\sigma >> 1$. Это условие назовем энергетическим. Данные условия взаимосвязаны, поскольку величина $\sigma$ зависит от энергии электронов, т.е. от их скорости, а скорость электронов, зави-

сящая от амплитуды приложенного напряжения, определяет время пролета межэлектродного расстояния.

Таким образом, факторы, воздействующие на открытые высоковольтные устройства в условиях космического пространства, могут либо непосредственно инициировать возникновение пробоя как, например, при ударах микрометеорных частиц об электроды, либо снижать электрическую прочность устройств за счет влияния на состояние и физико-химические свойства поверхности электродов и изоляторов.

## 7. РАДИАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ ИСЗ

В настоящее время основным источником электрической энергии для КА с длительным сроком службы являются солнечные батареи (СБ) на основе полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Нормальное функционирование ФЭП в космосе в течение продолжительного времени может нарушаться повреждающим воздействием на них потоков заряженных частиц РПЗ и СКЛ [1-4].

Фотоэлектрический преобразователь, применяющийся в солнечной батарее, представляет собой плоский диод, схематически изображенный на рис.1.

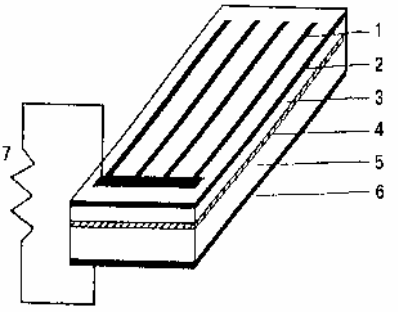



Рис.1. Схематическое изображение полупроводникового ФЭП: 1 - контакт с легированном слоем; 2 - просветляющее покрытие; 3 - легированный слой; 4 - область n-p -перехода; 5 - область базы; 6 - контакт с базовой областью; 7 - сопротивление нагрузки

Он обычно изготавливается из пластины кремния с удельным сопротивлением 0,1-100 Ом·см n-или p-типа проводимости. Толщина пластины колеблется от 100 до 500 мкм. Тонкий (0,1-3 мкм) высоколегированный слой с проводимостью обратного типа формируется на полированной фронтальной поверхности пластины. Солнечный свет попадает в объем прибора сквозь поверхность ФЭП, которая обычно покрывается просветляющей пленкой.

Неосновные носители, рожденные в легированном слое, устремляются к n-p -переходу за счет диффузии и дрейфа в электрическом поле. Носители, образованные светом в базовой области, перемещаются только за счет диффузии. Электронно-дырочные пары разделяются n-p -переходом, и разность потенциалов, возникающая на омических контактах, присоединенных к n- и p- областям ФЭП, обусловливает ток во внешней цепи.

Глубина проникновения солнечного света в ФЭП определяется его спектральным составом, максимум которого приходится, как известно, на $\lambda \approx 0{,}5$ мкм. Поскольку поглощение света с длиной волны $\lambda \leq 1{,}15$ мкм определяется фотоэлектрическим возбуждением носителей, то этот процесс характеризует распределение генерируемых электронно-дырочных пар. Большая часть света поглощается за n-p –переходом в базовой области ФЭП. Сможет ли неосновной носитель преодолеть расстояние от места образования до n-p-перехода, определяется длиной диффузии $L$. В первом приближении величина $L$ определяет активную толщину области, из которой рожденные светом носители собираются n-p-переходом. С длиной диффузии однозначно связано время жизни неосновных носителей $\tau = L^2 / D$, где $D$ - коэффициент диффузии.

Современные кремниевые солнечные ФЭП обеспечивают напряжение холостого хода $U_{xx}$ ~ 0,5-0,6В при плотности тока короткого замыкания $I_{k3}$ ~ 40-45 мА/см. Теоретически коэффициент преобразования кремниевым элементом энергии солнечного излучения в электрическую может достигать 22%, реально КПД ФЭП ~ 10-11 %.

**Радиационное повреждение СБ**

Основной причиной ухудшения характеристик ФЭП под действием космической радиации является уменьшение времени жизни не основных носителей, $\tau$. При облучении ФЭП в первую очередь меняется величина $\tau$ в базовой области. Исходная величина этого параметра обычно превышает несколько микросекунд. В легированном слое время жизни $\tau$, составляющее —$10^{-9}$с, падает лишь при высоких потоках облу-

чения. Снижение $\tau$ обусловлено возрастанием скорости объемной рекомбинации вследствие возникновения радиационных дефектов, имеющих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне.

Вероятность рекомбинации не основных носителей в облученном полупроводнике, равная $1/\tau$ складывается из вероятности рекомбинации через центры, существовавшие до облучения $1/\tau_0$ , и центры, генерированные ионизирующим излучением. Это наблюдается, когда рекомбинация при постоянном уровне инжекции носителей идет независимо через оба канала. Тогда в случае воздействия ионизирующего излучения имеет место соотношение вида $1/\tau = 1/\tau_0 + K'\Phi$, где $\tau_0$ и $\tau$ — время жизни носителей до и после облучения флюенсом Ф; К' - коэффициент повреждения, характеризующий эффективность введения дефектов единичным потоком частиц и вероятность рекомбинации на них.

В экспериментах по облучению ФЭП чаще всего измеряется длина диффузии, поэтому приведенное выражение удобно переписать с учетом, что $\tau=L^2/D$, где D-коэффициент диффузии носителей. $1/L=1/L_0^2+K\Phi$.

Константа $K = K' / D$ также именуется коэффициентом повреждения, который за- висит от таких факторов, как вид и энергия облучения, свойства материала.

В общем случае $K = K_{TD} + K_{op}$, где $K_{TD}$ и $K_{op}$ - коэффициенты повреждения полупроводника соответственно от точечных радиационных дефектов и от более сложных дефектов, так называемых областей разупорядочения.

Исследования показали, что длина диффузии не основных носителей в кремнии n- типа изменяется при облучении быстрее, чем в кремнии p-типа. Следовательно, ФЭП, изготовленные на основе p-кремния (n-p-типа), обладают более высокой радиационной стойкостью, чем ФЭП с базой из n-кремния (p-n -типа). По этой причине в настоящее время все солнечные батареи космического назначения собираются из ФЭП, выполненных из кремния p-типа проводимости.

Энергия электронов, ответственная за основные повреждения n-p -перехода из кремния, лежит в пределах 0,5-4 МэВ. При имитации радиационного воздействия электронной компоненты радиационных поясов на кремниевые n-p- переходы необходимо ориентироваться на этот энергетический диапазон. Из аналогичных данных для протонов следует, что ответственный за максимальные разрушения p-n -переходов энергетический диапазон, лежит в пределах 1-30 МэВ

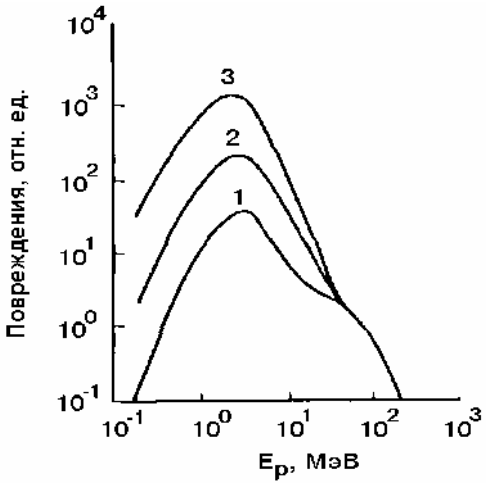



Рис. 2. Относительное повреждение кремниевых ФЭП с учетом космического спектра протонов и экранировки плавленым кварцем: 1 - 1,44 мм; 2 - 0,72 мм; 3 - 0,36 мм

. На рис.2 приведено относительное повреждение кремниевых ФЭП с учетом космического спектра протонов и экранировки плавленым кварцем.

При изучении воздействия корпускулярных излучений сложного состава и спектра в лабораторных условиях иногда бывает полезным ввести сравнительные оценки повреждаемости элементов ИСЗ от различных видов радиации. В табл. 1 приведена эффективность радиационных повреждений кремниевого ФЭП р-типа с $\rho$= 1 Ом·см различными видами корпускулярных излучений.

Другой важный вопрос, с которым приходится иметь дело при имитации воздействия космической радиации на n-p- переходы, - это вопрос о большей плотности потока заряженных частиц на ускорителях по сравнению с плотностью потока в космическом пространстве. Из сравнения данных о работе солнечных ФЭП в условиях облучения естественной космической радиацией и расчетных данных, в основе которых лежат эксперименты по облучению ФЭП в лабораторных условиях, следует хорошее согласие расчета и эксперимента. Это позволяет предположить, что облучение с плотностью частиц потоками на несколько порядков выше, чем естественные потоки, не сказывается на объемных интегральных эффектах в пределах ошибок экспериментов.

Таблица 1. Эффективность радиационных повреждений кремниевого ФЭП р-типа с ρ=1 Ом·см различными видами корпускулярных излучений

| Вид частицы | Энергия E, МэВ | Коэффициент повреждения, K | Относительная эффективность повреждения, $K/K_1$* |
|---|---|---|---|
| Электроны | 0,5 | $6,4 \cdot 10^{-11}$ | 0,3 |
| | 1,0 | $2,0 \cdot 10^{-10}$ | 1 |
| | 2,5 | $10^{-9}$ | 5 |
| | 7,0 | $1,6 \cdot 10^{-9}$ | 8 |
| | 18,0 | $2,5 \cdot 10^{-11}$ | 12,5 |
| Протоны | 0,4 | $2,2 \cdot 10^{-5}$ | $1,1 \cdot 10^{5}$ |
| | 1,0 | $9,0 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{4}$ |
| | 2,0 | $5,2 \cdot 10^{-6}$ | $2,6 \cdot 10^{4}$ |
| | 6,3 | $2,0 \cdot 10^{-6}$ | $10^{4}$ |
| | 19,6 | $10^{-6}$ | $5,0 \cdot 10^{3}$ |
| | 30 | $10^{-6}$ | $5,0 \cdot 10^{3}$ |
| | 65 | $6,5 \cdot 10^{-7}$ | $3,2 \cdot 10^{3}$ |
| | 100 | $4,6 \cdot 10^{-7}$ | $2,3 \cdot 10^{3}$ |
| | 200 | $3,5 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{3}$ |
| Альфа-частицы | 25,4 | $8,0 \cdot 10^{-6}$ | $4,0 \cdot 10^{4}$ |

*$K_1$ - коэффициент повреждения кремния электронами с энергией 1 МэВ.

Опыты по длительному отжигу радиационных дефектов в ФЭП, облученных на ускорителях, проведенные при температуре 0-100°С, свидетельствуют о незначительном восстановлении свойств фотоэлементов (5% мощности). Поэтому оценка поведения в космосе полупроводниковых приборов по измерениям в лабораторных условиях без учета отжига может привести лишь к незначительной ошибке. При воздей-

ствии на ФЭП протонного излучения с энергией 19,6 МэВ, способного создавать дефекты в базовой области, наблюдается изменение фототока во всей спектральной области чувствительности.

Однако вначале снижается чувствительность в длинноволновой области, за которую ответственна база ФЭП. На рис.3 приведено спектральное распределение тока короткого замыкания кремниевых ФЭП, облученных протонами с энергией Е=19,6 МэВ.

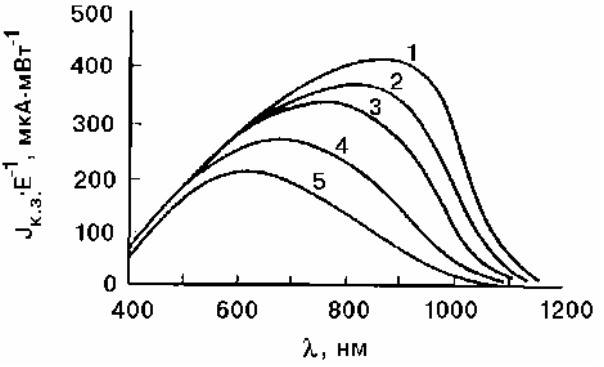



Рис.3. Спектральное распределение тока короткого замыкания кремниевых ФЭП, облученных протонами с энергией Е=19,6 МэВ: 1 - до облучения-: 2 –после облучения флюенсом Ф [портон.м$^2$] : $10^{14}$; 3 - $10^{15}$; 4 - $10^{16}$; 5 - $10^{17}$

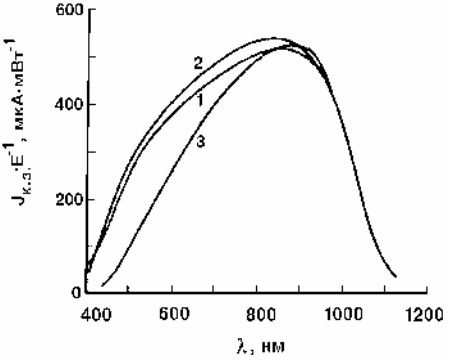



Рис.4. Спектральное распределение тока короткого замыкания кремниевых ФЭП, облученных протонами с энергией Е=0,2МэВ: 1-до облучения; после облучения флюенсом Ф [протон·м$^{-2}$]: 2 - $10^{15}$; 3 - $10^{17}$

На рис.4 показано спектральное распределение тока короткого замыкания кремниевых ФЭП,облученных протонами с энергией Е=0,2 МэВ.

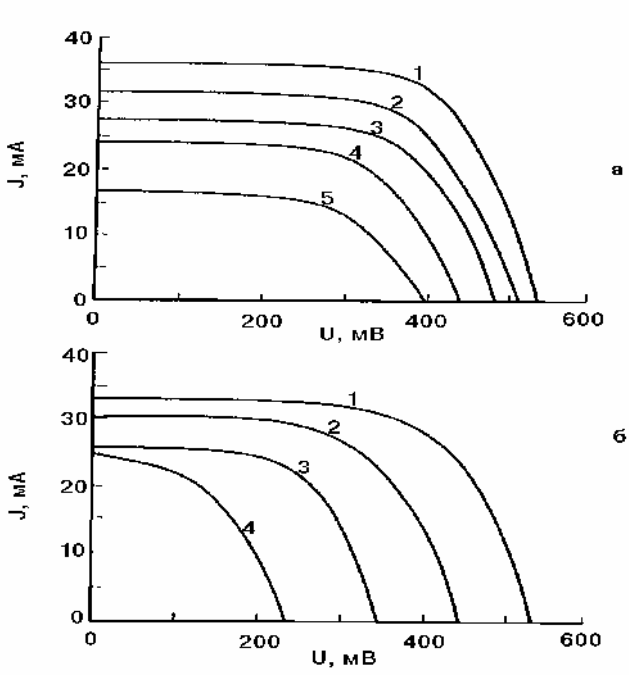



Рис. 5. Нагрузочные вольтамперные характеристики кремниевых ФЭП, облученных протонами с различными энергиями Е [МэВ] (источник освещения - имитатор солнечного заатмосферного света): а-6,3; б-0,2: 1 - до облучения; после облучения флюенсом Ф [протон·м$^{-2}$]: 2 - $10^{14}$; 3 - $10^{15}$; 4 - $10^{16}$; 5 - $10^{17}$

Чувствительность к коротковолновому свету определяется тонким (1—2 мкм) поверхностным легированным слоем, она почти не меняется при малых дозах облучения, так как скорость рекомбинации в этом слое велика уже до облучения из-за большой концентрации дефектов.

Изменения нагрузочных вольтамперных характеристик кремниевых ФЭП различен при облучении протонами с энергией 6,3 МэВ и 0,2 МэВ (рис.5).

**Электроразрядный механизм повреждения СБ**

Механизм электроразрядных процессов под воздействием потоков частиц магнитосферной и ионосферной плазмы в низковольтных и высоковольтных СБ ИСЗ различен. В штатных низковольтных СБ электроразрядные явления на геосинхронных ИСЗ определяются в основном радиационной электризацией внешних диэлектрических элементов СБ (защитные стекла, конструкционные материалы). В момент магнитосферных возмущений эти элементы приобретают избыточный поверхностный заряд электронов, который затем релаксирует в виде разрядных токовых импульсов. Механизм электроразрядных явлений в высоковольтных СБ на низких орбитах около Земли (250-400 км) определяется, в основном, бомбардировкой положительными ионами плазмы поверхностных элементов СБ.

Электроразрядные и другие электрофизические процессы в СБ приводят к нежелательным последствиям. Разрушаются поверхностные материалы, в первую очередь оптические и терморегулирующие покрытия, стекла, снижается ресурс работы фотопреобразователей. Электроразрядная деградация СБ на геостационарных орбитах может быть сравнима с их радиационной деградацией в результате бомбардировки электронами и протонами высоких энергий.

Исследования электроразрядных процессов в СБ, характерных для геостационарных ИСЗ в момент магнитосферных возмущений, проводятся на поверхности диэлектрических конструкционных материалов и фрагментов СБ в экспериментальных вакуумных установках при облучении электронными потоками с $j_e$~1-10 нА/см$^2$ и $E_e$~30-50 кэВ. Вакуум в имитационных установках достигает $p \sim 10^{-5}$ Па, площадь облучаемой поверхности 0,1-0,5 м$^2$. Изучаются амплитудные спектры электромагнитных помех (ЭМП) от поверхностных электрических разрядов, воздействие электроразрядных процессов на вольтамперные характеристики и КПД кремниевых фотопреобразователей. Методами микроскопии и рентгеновской дифракционной топографии установлено, что электрический пробой защитного стекла СБ может двояко воздействовать на кремниевые пластины фотопреобразователя. В первом случае происходит непосредственное воздействие разряда на поверхность фотопреобразователя с разрушением просветляющего покрытия и образованием кратера с повреждением p-n-перехода в локальном участке.

Во втором случае логично предположить воздействие на кремние-

вый фотопреобразователь ударной волны, фронт которой формируется в стеклянном покрытии при его пробое. При этом поверхность кремниевого кристалла не повреждается, однако в объеме кремния формируется область деформаций с высокой плотностью дислокаций. На рис.6 приведены следы электрического пробоя в защитном покровном стекле фрагмента СБ при облучении электронами и кратера в кремниевой пластине ФЭП, созданном при электрическом пробое покровного стекла [ 9 ] .

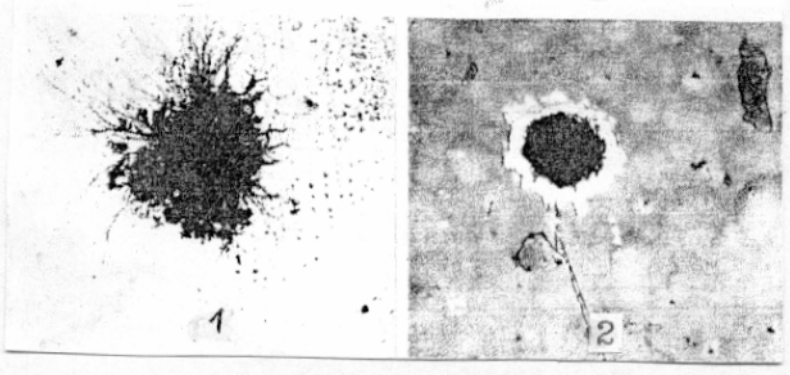



Рис.6. 1– Следы электрического пробоя в защитном покровном стекле фрагмента СБ при электронном облучении; 2– образование кратера в кремниевой пластине фотопреобразователя при воздействии электрического разряда [ 9 ]

Ток разрядного импульса и его длительность на поверхности (S) радиационно-заряженного диэлектрика пропорциональны $S^{1/2}$. Разрядные токи имеют значения до 10 А при $\tau$~1-5 мкс. В момент разряда на поверхности фрагмента СБ наблюдаются также световые вспышки. На рис.7 показана фотография трех световых вспышек, сопровождающих электростатические разряды.

Электростатические разряды на поверхности радиационно-заряженных стеклянных защитных покрытий СБ могут создавать условия для инициирования низковольтного дугового разряда между фрагментами СБ, находящимися под напряжением 20-30кВ. В современной космонавтике наблюдается устойчивая тенденция роста электрической мощности космических СБ на базе полупроводниковых фотопреобразователей. Штатное напряжение электрической сети в современных КА составляет, как правило -28 и 51 В. В связи с возможностью увеличения мощности будущих КА в интервале 10-100 кВт, целесообразно увели-

чение бортового напряжения в пределах 100-300 В. Это требование определяется двумя основными причинами. При низком бортовом напряжении протекают большие токи, поэтому необходимо иметь массивные силовые кабели, при этом возрастает масса КА. Большие токи в электрических цепях увеличивают также омические потери. На рис.7 показана фотография трех световых вспышек, сопровождающих электростатические разряды на поверхности фрагмента солнечной батареи, размещенной в вакуумной камере и облучаемой электронным пучком [9].

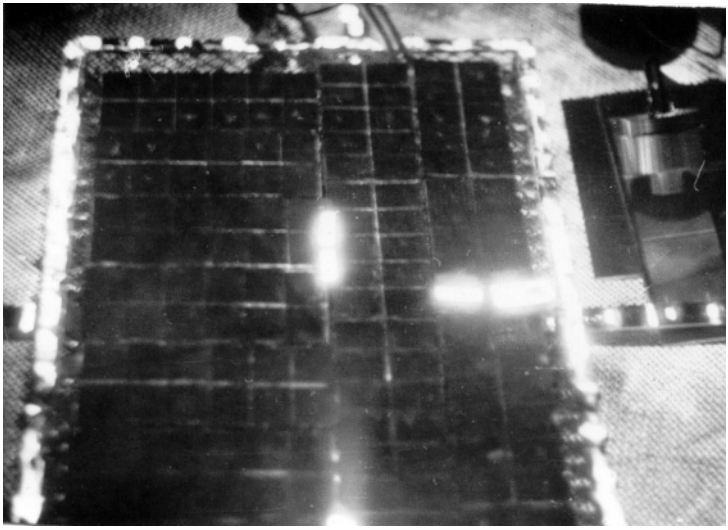


Рис.7. Фотография трех световых вспышек, сопровождающих электростатические разряды на поверхности фрагмента солнечной батареи, размещенной в вакуумной камере и облучаемой электронным пучком [9]

На поверхности анодированных металлов ИСЗ, например, алюминия, имеется покрытие из $Al_2O_3$ толщиной 1-5 мкм. При полете в атмосфере Земли в результате оседания ионов на покрытии возникает электрическое поле с $E \sim 10^6$ В/см, что приводит к электрическому разряду в нем и выбросу сгустка плазмы в вакуум. На рис.8 показан процесс образования разрядной плазмы.

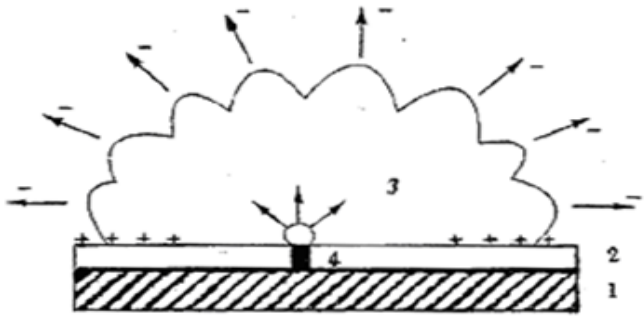



Рис.8. Процесс образования разрядной плазмы: 1 – алюминий; 2 – оксид алюминия; 3 – плазма; 4 – разрядный канал

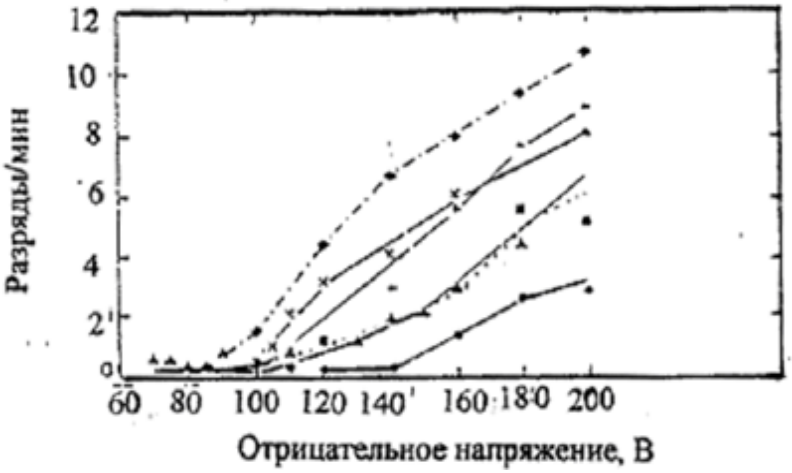



Рис.9. Зависимость интенсивности разрядов в анодированном алюминии в ионосферной плазме от величины отрицательного напряжения

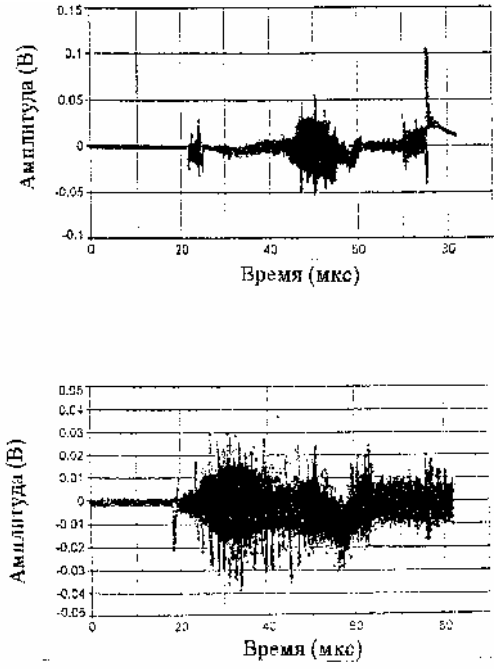



Рис.10. Временная зависимость амплитуды электрической компоненты ЭМП в анодированном алюминии от разряда:
1 – горизонтальная антенна; 2 – вертикальная антенна

С ростом отрицательного напряжения на металлической ферме аппарата интенсивность разрядов на поверхности анодированного алюминия возрастает (рис.9).

Разрядный ток может достигать десятков ампер за τ~5-10 мкс. Возникает импульс ЭМП в интервале частот 0,1- 100 МГц, создающий около ИСЗ электромагнитное загрязнение.

На рис.10 показана временная зависимость амплитуды электрической компоненты ЭМП в процессе разряда в анодированном покрытии.

Одновременно с плазмоидом генерируется световая вспышка и инжектируется поток атомов алюминия. При пробое покрытия инжектируется $\Phi_a \sim 10^{15}$ атомов, диаметр разрядного канала в покрытии достигает 0,2-0,3 мм. Инжектированные атомы могут попасть на элементы оптических устройств, что ухудшит их характеристики. Световая вспышка создает ложные сигналы в оптоэлектронных системах ИСЗ. Скорость выбрасываемого плазмоида составляет около 20 км/с.

На рис.11 приведен частотный спектр ЭМП и предельная чувствительность аппаратуры космического аппарата США «Спейс Шаттл» к воздействию ЭМП.

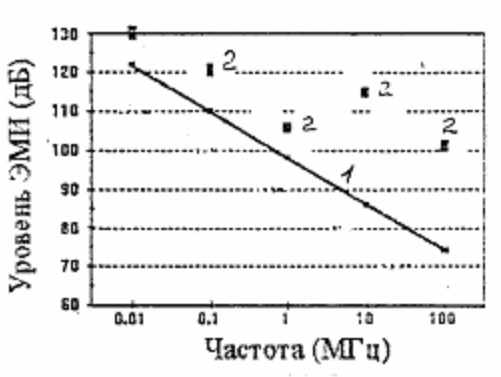



Рис.11. Частотный спектр ЭМП:1 – верхний предел ЭМП для Спейс Шаттла;2 – уровень ЭМП от разрядов на расстоянии 1 м

## 8. РОЛЬ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В РАДИАЦИОННЫХ АНОМАЛИЯХ ИСЗ

Основные радиационные механизмы, ответственные за возникновение аномалий в космическом электронном оборудовании следующие: радиационные одиночные сбои (РОС) микросхем, зарядовые эффекты в объеме диэлектриков внутри аппарата, поверхностная зарядка и разрядные явления диэлектрических материалов на поверхности ИСЗ, дозовые эффекты в элементах микросхем.

В настоящей главе анализируется вклад в радиационные аномалии геостационарных и других ИСЗ электроразрядных явлений в объеме диэлектрических элементов под действием электронов внешнего РПЗ с энергией $E_e$ >1 МэВ [1-14].

Основная опасность радиационной электризации диэлектриков внутри аппарата для земных орбитальных спутников определяется наличием высокой интенсивности электронов с $E_e$>1 МэВ в интервале $1{,}5R_з$ - $4R_з$ для экваториальной плоскости, где $R_з$ – радиус Земли. На рис.1 приведен. усредненный энергетический спектр электронов на геостационарной орбите в период геомагнитного шторма по данным ИСЗ CRRES [1] .

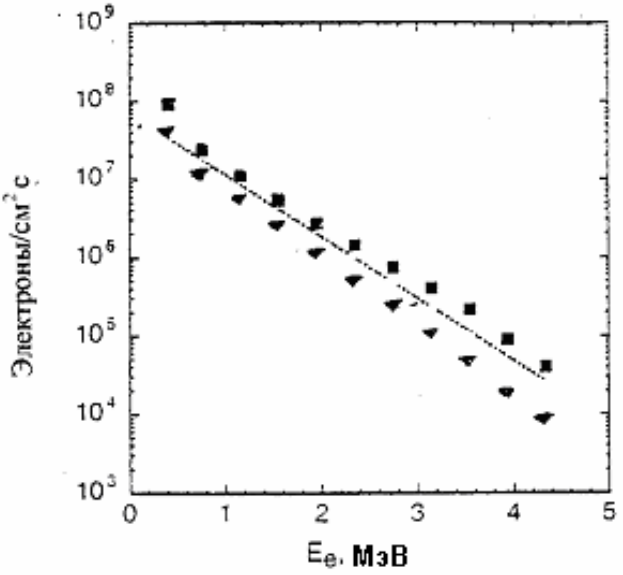



Рис.1. Усредненный энергетический спектр электронов на геостационарной орбите в период геомагнитного шторма по данным ИСЗ CRRES [1] .

Существование потоков электронов с $E_e$>1 МэВ в радиационном поясе Земли известно давно. В период мощного геомагнитного шторма во внешнем радиационном поясе Земли возрастает концентрация электронов в энергетическом интервале 1-10 МэВ. Интенсивность этих потоков во времени нестабильна.

Из проведенных натуральных экспериментов в космосе следует, что вероятность возникновения разрядов при внутренней радиационной электризации твердых диэлектриков электронами с $E_e$>300 кэВ зависит от флюенса бомбардирующих диэлектрик электронов. На рис 2 приведена зависимость вероятности возникновения разряда за день из-за внутренней зарядки диэлектрических материалов ИСЗ от флюенса электронов с $E_e$>300 кэВ [1].

.

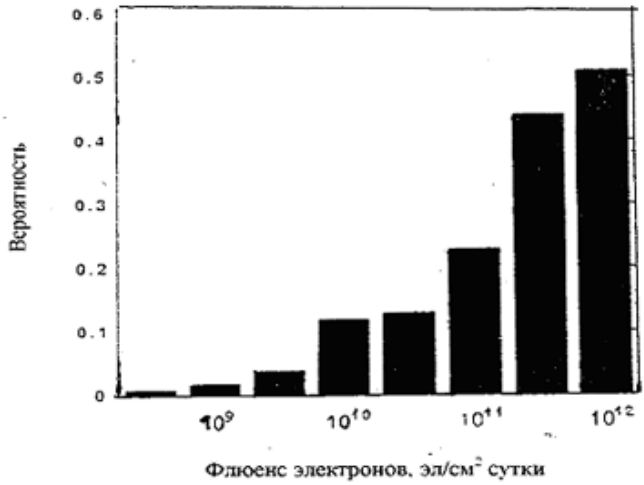



Рис 2. Зависимость вероятности возникновения разряда за день из-за внутренней зарядки диэлектрических материалов ИСЗ от флюенса электронов с $E_e$>300 кэВ [ 1 ]

Изучение генерации электрических разрядов в процессе радиационной электризации различных диэлектрических материалов в условиях космического полета в 1990-1991 гг. было проведено на ИСЗ CRRES США. В течение 132 месяцев полета аппарата было зарегистрировано около 4000 разрядных импульсов. Выяснилось, что внутренняя зарядка диэлектрических материалов непосредственно в электронных блоках аппарата создает реальную опасность для возникновения аномалий космического оборудования выхода из строя оборудования различных геостационарных ИСЗ подтверждают прямую связь между вероятностью появления их на этих аппаратах и возрастанием интенсивности электронных потоков с $E_e$>1 МэВ с последующей зарядкой диэлектрических компонент оборудования внутри аппарата и появлением разрядных импульсов.

Точный прогноз космической погоды в районе геостационарной орбиты позволяет принять оперативные меры по повышению устойчивости ИСЗ к радиационным аномалиям космического оборудования, связанным с внутренней зарядкой.

Имеются два основных механизма, объясняющих возникновение оперативных аномалий, связанных с плазменной обстановкой вокруг ИСЗ и радиационной зарядкой диэлектрических элементов:

- поверхностная радиационная зарядка и импульсная рекомбинация

зарядов;

- объемная зарядка диэлектрических материалов оборудования ИСЗ электронами с энергией выше 1 МэВ, проникающими через стенки гермоотсека и создающими спонтанные разряды в облученных материалах.

Время установления равновесного поверхностного электрического потенциального рельефа например на геостационарном ИСЗ лежит в интервале $10^{-3}$ - 1 с. Время накопления объемного заряда и соответствующих высоких электрических полей (E~1 МВ/см) в объеме диэлектрических материалов ИСЗ с учетом его облучения электронным излучением с энергией выше 1-2 МэВ может составлять несколько дней и более.

Электромагнитные импульсы от облученных диэлектрических материалов и компонент часто фиксировались в космическом оборудовании на многих ИСЗ, функционирующих в зоне радиационных поясов Земли. Такие импульсы создавали, например, радиационные аномалии в оборудовании ряда ИСЗ. Наиболее полно радиационные аномалии из-за электризации диэлектрических материалов изучались на ИСЗ SCATHA, CRRES и др. На ИСЗ CRRES получена надежная временная корреляция между генерацией электроразрядных импульсов в диэлектрических материалах и аномалиями в управлении ИСЗ. Данные, полученные с помощью диэлектрического разрядного монитора, установленного на ИСЗ CRRES, были также полезны для понимания влияния электронов с энергией выше 1 МэВ на вероятность возникновения электрического пробоя.

Радиационная зарядка диэлектрических материалов ИСЗ под действием электронов создает условия для образования сильных электрических полей на поверхности и в объеме материалов и возникновения спонтанных импульсных разрядов. Эти разряды создают широкий спектр электромагнитных помех в электрических цепях и в электронном оборудовании в интервале $10^{-1}$–$10^{3}$ МГц. Одновременно с генерацией ЭМП в вакуум из разрядного канала диэлектрика выбрасывается на большое расстояние сгусток плазмы и газа. При быстрой релаксации высоких электрических полей при электрическом пробое твердых радиационно-заряженных диэлектриков индуцируется световая вспышка и возникают большие разрядные токи до 100 А. Эти процессы приводят к дестабилизации электронного оборудования ИСЗ.

Ряд сопутствующих действующих факторов за счет синергических эффектов могут понизить электрическую прочность радиационно-заряженных диэлектрических материалов, особенно на внешней поверхности ИСЗ. К таким факторам относятся: микрометеорные удары, солнечная радиация, особенно в момент выхода ИСЗ из тени, повыше-

ние концентрации газа и плазмы в собственной атмосфере ИСЗ в момент срабатывания реактивных двигателей при коррекции орбиты.

Разряды, вызывающие ЭМП характеризуются переносимым зарядом и длительностью разрядного импульса. Наиболее эффективно генерируют ЭМП разряды, при которых из диэлектрика в окружающее пространство выбрасывается плазмоид. При таком разряде ЭМП имеют максимальный радиус действия. Наиболее полно изучены следующие источники ЭМП: разряд из объема диэлектрика в окружающее пространство, скользящий разряд вдоль поверхности диэлектрика в высоком вакууме, пробой твердого диэлектрика, электрический разряд в вакууме. В некоторой точке поверхности диэлектрика скользящий разряд может переходить в разряд, направленный в окружающую среду. При разряде в окружающее пространство из радиационно-заряженного диэлектрика высвобождается от 20% до 90% внедренного заряда.

В таблице 1 приведены данные о степени влияния электромагнитных помех на элементы электроники [14].

Таблица 1. Влияние электромагнитных помех на элементы электроники

| Поглощенная энергия, Дж | Возможные повреждения |
|---|---|
| $10^{-9} – 10^{-8}$ | Сбои в работе элементов ЭВМ |
| $10^{-7}$ | Выгорание диодов в микроволновых смесителях |
| $10^{-6}$ | Сбои в работе или выгорание линейных интегральных схем |
| $10^{-5}$ | Сбои в работе и выгорание маломощных транзисторов и интегральных схем на биполярных транзисторах |
| $10^{-4}$ | Повреждения конденсаторов, диодов, транзисторов средней мощности и логических элементов |
| $10^{-3}$ | Повреждения стабилитронов, одно-Операционных триодных тиристоров, полевых транзисторов, мощных транзисторов и тонкопленочных резисторов |

Для систематизации и анализа радиационных аномалий ИСЗ на орбитах существуют специальные службы. Чрезвычайно важно, чтобы

штатное оборудование ИСЗ имело несколько детекторов электронов в энергетическом интервале 0,05; 0,3; 1; 5 МэВ, а также детекторы электромагнитных импульсов, связанных с разрядными явлениями. Как уже отмечалось, экспертная система НАСА предназначена для диагностики аномалий (сбоев) в космическом оборудовании в результате воздействия космической среды, в первую очередь космических корпускулярных излучений. Система позволяет определить вероятную причину аномалий, связанных с зарядовыми и разрядными явлениями как на поверхности ИСЗ, так и внутри КА за счет электризации объемных диэлектрических элементов. Система позволяет также выявить помехи в результате радиационных одиночных сбоев в микросхемах, от дозовых эффектов и явлений от космической плазмы. Такие аномалии зависят от орбиты спутника, радиационной и плазменной обстановки.

Радиационные аномалии в ИСЗ могут возникнуть почти на любой орбите, но имеются орбиты, где вероятность таких событий очень высока. Условно можно рассматривать пять таких типичных орбит ИСЗ: 1– геосинхронную орбиту; 2-элиптическкую орбиту типа «Молния»; 3-круговую орбиту с высотой полета ИСЗ около 10 тыс.км; 4 - полярную орбиту с высотой полета ИСЗ 300-500 км; 5-экваториальную орбиту с высотой полета ИСЗ 36тыс. км.

База данных системы включает информацию об основных узлах спутника, окружающей обстановки для разных орбит, а также характеристики всех предыдущих аномалий. Число аномалий за год на действующих спутниках США достигает несколько сотен. Среди них радиационные составляют чуть ли не половину всех аномалий.

## 9. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОСФЕРНОГО АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Полет космических аппаратов орбитальных космических станций «Мир», «МКС», космического летательного аппарата многоразового использования «Спейс Шаттл» на низких орбитах Земли показал, что скорость эрозии под воздействием частиц атомарного кислорода ионосферы углеводородных полимеров (каптон, полиэтилен), графита и углеродных композитных материалов не совпадает по с эрозией этих же материалов в большинстве плазменных имитационных испытаний. Имеются также различия в морфологии поверхности испытанных материалов [1-4].

Остаточная атмосфера Земли на высотах 300-500 км состоит в основном из атомов кислорода (80%) и молекул $N_2$ (20%), доля ионов кислорода составляет ~0,01%. Основная часть молекул кислорода на этих высотах диссоциирует под воздействием фотонов вакуумного ультрафиолета (ВУФ) солнечной радиации (λ~121,6 нм). На высоте 350-400 км, где расположена орбита «МКС», состав ионосферы сформирован из атомов (O) ~$10^8$ $см^{-3}$,($N_2$) ~$2 \cdot 10^7 см^{-3}$, ($O^+$)~(e)~$10^5$ $см^{-3}$. При скорости «МКС» ~8 км/с кинетическая энергия соударения атомов кислорода (АК) с материалами на фронтальной стороне станции составляет ~5 эВ. Средняя плотность потока ионосферных частиц, взаимодействующих с фронтальной поверхностью космического аппарата будет составлять для атомов кислорода $j_a$~$10^{14}$-$10^{15}$ ат/$см^2 \cdot$с, для ионов кислорода $j_и$~$10^{10}$-$10^{11}$ и/$см^2 \cdot$с. Плотность потока частиц зависит от солнечной активности, высоты и угла наклона орбиты и других факторов.

Помимо частиц ионосферной плазмы на этих высотах большое влияния на полимерные материалы оказывает ультрафиолетовое излучение Солнца. Под воздействием ионосферных частиц и ультрафиолетового излучения Солнца полимерные материалы за счет эрозии теряют свою массу, меняется морфология их поверхности (рис.1) [5].

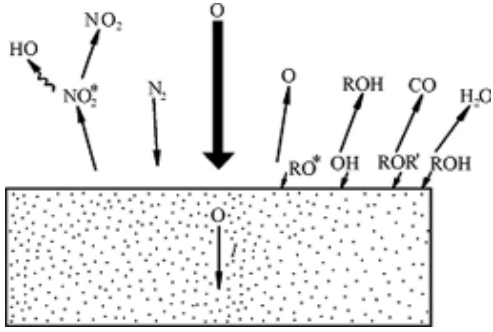



Рис. 1. Схема взаимодействия атомарного кислорода с органическими материалами: 1 – диффузия [5]

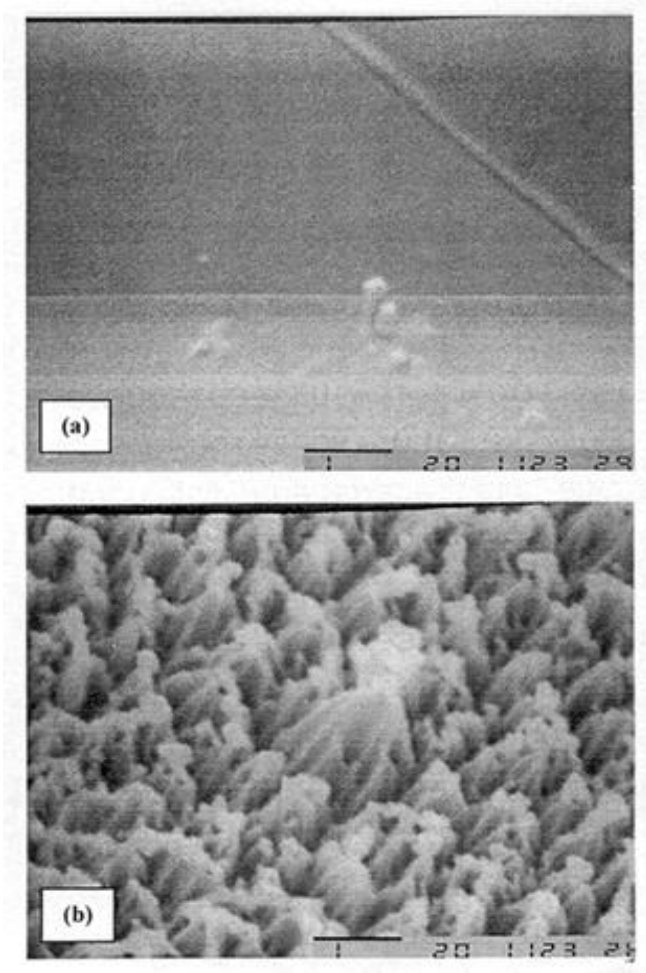



Рис.2. Изображение поверхности каптона HN, полученное с помощью РЭМ, после облучения атомами кислорода, увел.15000. (а)-каптон защищен от атомов кислорода, (б)-каптон облучен атомами кислорода [6]

На рис.2 приведены изображения поверхности каптона HN ,полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ); после воздействия АК, (а)-каптон HN защищен от воздействия атомов кислорода, (б)- после воздействия атомов кислорода [6].

На Рис.3 приведено изображение поверхности полимеров, полученное с помощью РЭМ, после воздействия потока атомов кислорода при наклонном падении. (а)-фтористый этилен пропилен ,экспонированный в космосе на солнечной батареи «Космического телескопа Хаббл». (б)-Полиоксиметилен после воздействия потока ионов кислорода из Холловского плазменного источника с энергией 70 эВ [7].

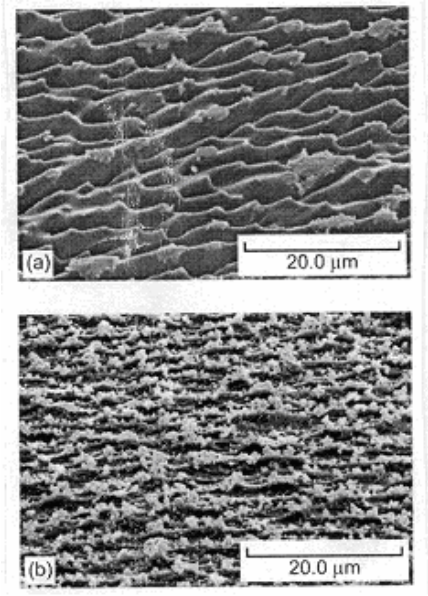



Рис.3. Изображение поверхности, полученное с помощью РЭМ, после воздействия потока атомов кислорода при наклонном падении:
а) фтористый этилен пропилен, экспонированный в космосе на солнечной батарее «Космического телескопа Хаббл», б) полиоксиметилен, после воздействия потока ионов кислорода, из Холловского плазменного источника с энергией 70 эВ [7]

Летучие продукты эрозии полимеров (CO, $CO_2$, $H_2O$, OH) покидают поверхность материалов, засоряя внешнюю атмосферу космического аппарата. Некоторая доля частиц, например $NO_2^*$, NO, OH покидающих поверхность материалов фронтальных конструкций, находится в возбужденном состоянии, создавая приповерхностное свечение [ 38 ]. Ряд металлических материалов в первую очередь Ag, Os, а также графит и углеродные материалы, подвержены сильному окислению и эрозии.

Проблема, рассматриваемая в настоящей главе, имеет более широкий интерес. Так, например, техника травления фоторезистов из полимерных материалов с помощью кислородной плазмы находит широкое применение в технологии изготовления микросхем [8].

При использовании на борту КА высоковольтных солнечных батарей с $U_p$>200В, могут возникать разряды, вызванные ионной бомбардировкой участков солнечной батареи, имеющих высокий отрицательный потенциал по отношению к окружающей ионосферной плазме [9].

Перечень космических материалов, которые наиболее подвержены эрозии при воздействии атомарного кислорода (АК) с энергией ~5эВ, приведены ниже [4,5,10].

1. Композитные материалы с полимерной матрицей, графито-эпоксидные композиты; матрицы из термопластической резины.
2. Материалы твердых смазок: $MoS_2$; мягкие металлы (Ag; Pb; In), полимеры.
3. Терморегулирующие покрытия (ТРП):
металлизированные полимеры: Al-тефлон, Al-каптон
органические краски (белые и черные).
4. Оптические материалы:
металлические покрытия: Ag, Al, Ni, Au, Ta, Ti, Zr
диэлектрические покрытия: $MgF_2$; $CaF_2$.
5. Компоненты космической энергетики: солнечные батареи, каптоновые пленки, серебряные контакты, стеклянные волоконные композиты.

Отражатели: кремний, акрилы, фтористые полимеры, поликарбонаты, Ag,Al.

Защитные покрытия материалов: Ni, $SiO_2$, $TiO_2$, $Al_2O_3$, ZnO, Ni/$SiO_2$, ITO, $In_2O_3$.

**Экспериментальные методы имитационных испытаний**

В НИИЯФ МГУ с 1965г. проводились имитационные исследования воздействия ионосферной кислородной плазмы, создаваемой с помощью емкостного высокочастотного разряда с внешними электродами (f~50МГц), на широкий класс космических материалов (терморегулирующие покрытия, полимерные материалы) [11-14]. Образцы исследуемых материалов размещались на внутренней поверхности кварцевого цилиндра в пристеночной области положительного столба тлеющего емкостного разряда непосредственно в плазме. Образцы подвергались воздействию ионов и атомов кислорода с $E_и$~5-10 эВ при плотности потока ионов $j_и$~$10^{15}$ и/см$^2$с, а также атомами $j_a$~$10^{19}$ ат/см$^2$с при $E_a$~0,04 эВ. По оценкам интенсивность облучения образцов вакуумным ультра-

фиолетовым излучением (ВУФ) (λ~130 нм) от разрядной плазмы в десятки и сотни раз превышает интенсивность ВУФ от солнечного излучения за пределами атмосферы Земли. Давление в кварцевом цилиндре соответствовало ρ~1-10 Па. Степень диссоциации молекул кислорода в установке составляла 1-10%. Флюенс облучения образцов ионами и атомами кислорода составлял $\Phi_и$~$10^{19}$ и/см$^2$ при $E_и$~10 эВ и $\Phi_{ат}$~$10^{21}$ ат/см$^2$ с $E_а$~0,04.

Исследования выявили высокую скорость потери массы органических связующих терморегулирующих покрытий (ТРП), приводящих к обнажению поликристаллов пигментов (ZnO, $TiO_2$, ZrO) и потери их механической прочности в составе ТРП. Отмечалось также возрастание коэффициента поглощения солнечной радиации, $\alpha_s$, белых ТРП с органическими связующими. Цветные и черные эмалевые покрытия заметно отбеливались [11-14].

Описанный выше метод не позволяет полностью воспроизводить условия взаимодействия потоков атомарного кислорода с материалами, располагаемыми на фронтальной стороне космического аппарата в процессе полета на высотах 300-500 км [15]. Основные различия облучения космических материалов ионосферными частицами в космосе Н~350 км (А) и при имитационных испытаниях с помощью высокочастотной плазмы (Б) следующие.

1. Плотность потока атомов (О), энергия:

(А)-j~$10^{15}$ ат/см$^2$·с; Е~5эВ; (Б)-j~$10^{19}$ ат/см$^2$·с; Е~0,04 эВ.

2. Плотность потока молекул ($O_2$), энергия:

(А)-j~$10^{13}$ мол/см$^2$·с; Е~10 эВ; (Б)-$10^{19}$ мол/см$^2$·с; Е~0,04 эВ.

3. Концентрация и энергия заряженных частиц:

(А)-$10^5$–$10^6$ см$^{-3}$; Е~0,1 эВ; (Б)-$10^9$–$10^{12}$ см$^{-3}$; Е=1-10 эВ.

4. Интенсивность фотонов ВУФ, длина волны:

(А)-~4·$10^{11}$ фот/см$^2$·с, λ~121,6 нм; (Б)-$10^{12}$–$10^{14}$фот/см$^2$·с, λ~130 нм.

В то же время проведенные испытания позволили выявить и отбраковать из-за высокой скорости потери массы связующего ряд космических материалов (например, эмалевые ТРП), где в качестве связующих используется акриловая смола, полиметилфенил, силикон. В условиях пребывания в высокочастотной кислородной плазме было выявлено возрастание спектрального коэффициента поглощения, $\alpha_{\lambda,}$ ТРП в интервале λ~200-500 нм.

Следующим этапом развития имитационной техники воздействия потоков частиц ионосферной плазмы на материалы внешней поверхности КА было создание в НИИЯФ МГУ ускорителя кислородной плазмы [4,16]. Материалы облучались потоком кислородной плазмы из магнитоплазмодинамического ускорителя с двойным контрагированием раз-

ряда, где объемный заряд ионов в пучке нейтрализуется зарядом электронов (рис.4,5).

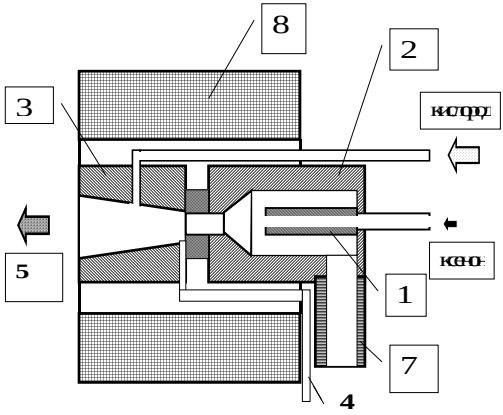



Рис.4. Схема плазменно-пучкового источника: 1-полый катод, 2-ферромагнитный промежуточный электрод, 3-анод, 4-питание защитным газом, 5-пучок кислородной плазмы, 6-питание кислородом, 7-вакуумная откачка, 8-соленоид [16]



Рис.5. Плазменная кислородная струя в вакууме из плазменно-пучкового источника [16].

Энергия ионов регулировалась в пределах 5-30 эВ, при этом плотность потока ионов на образец составляла $j_и$~$10^{15}$-$10^{16}$и/см$^2$·с,– уровень диссоциации молекул кислорода – десятки процентов. Компоненты плазменного пучка: $O^+$; $O_2^+$; O; $O_2$; e.

Небольшая доля атомарных и молекулярных частиц кислорода за счет перезарядки имеет энергию 10-30 эВ, основная часть нейтрального потока частиц кислорода имеет энергию Е~0,04 эВ. В пучке есть также сопутствующее вакуумное ультрафиолетовое излучение . Давление газа у облучаемого образца ~$10^{-2}$ Па. Установка позволяет за счет высокой плотности ионного потока $j_и$ и энергии ионов кислорода $E_и$~30эВ проводить ускоренные испытания.

Одна из современных методик испытания космических материалов к воздействию потоков атомарного кислорода с энергией ~5 эВ основана на использовании лазерного импульсного пробоя в момент инжекции молекулярного кислорода в сверхзвуковое сопло [17-20]. Лазерный импульс нагревает в зоне лазерного пробоя кислород до Т~19000 К. На расстоянии 50 см от выхода сопла была получена плотность потока атомов кислорода $j_a$~$10^{15}$-$10^{16}$ ат/см$^2$·с. Средняя энергия атомов кислорода в пучке соответствует ~5 эВ. Однако в установке имеются недостатки– плотность потока АК в импульсе превышает натурную плотность потока АК в $10^6$ раз, уровень ВУФ намного выше естественного. На рис.6 приведена принципиальная схема лазерной установки, генерирующей пучок атомов кислорода с энергией ~5эВ [21].

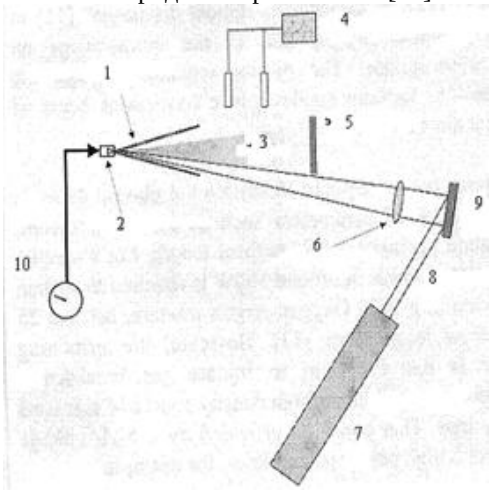



Рис.6. Схема лазерной установки, генерирующей пучок атомов кислорода с энергией ~5 эВ. 1) сопло из меди;2) Лампа, управляющая импульсным потоком кислорода 3) пучок атомов кислорода с энергией 5 эВ; 4) измеритель скорости по времени пролета; 5) держатель образца; 6) фокусирующая линза; 7) импульсный лазер на $CO_2$; 8) лазерный пучок (10,6 мкм); 9) управляемое зеркало 10) кислородный баллон [21].

На Рис.7 показан временной профиль импульсного пучка атомов кислорода, полученный на лазерной установке (рис.6).

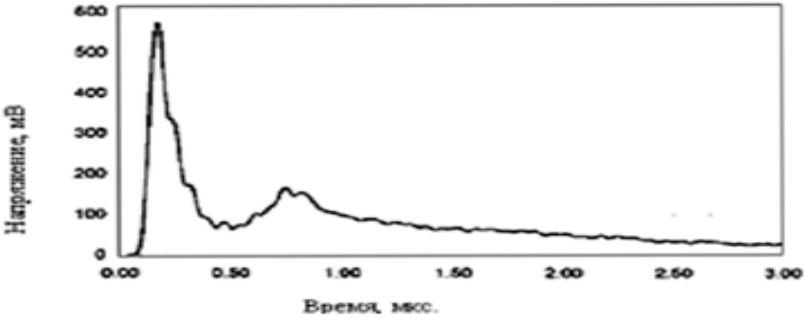



Рис.7. Временной профиль импульсного пучка атомов кислорода, полученный на лазерной установке [21]

На рис.8 приведено энергетическое распределение атомов и молекул кислорода в гипертепловом пучке, полученным на имитационном стенде с помощью лазерного импульсного излучения [22].

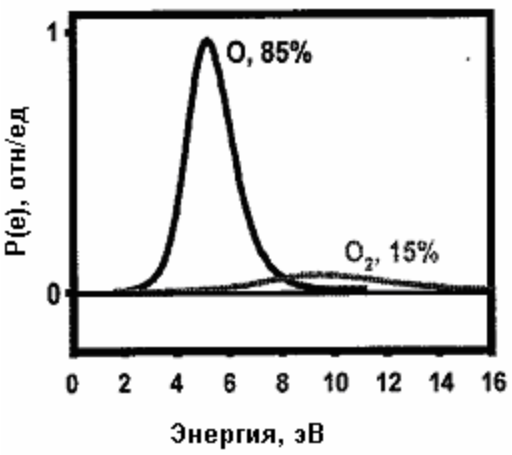



Рис.8.. Энергетическое распределение атомов и молекул кислорода в гипертепловом пучке, полученного с помощью импульсного лазерного излучения [22]

Методика ускоренных испытаний на описанной выше установке (рис.6) или при натурных испытаниях может быть решена с помощью концентратора потока нейтральных атомов с энергией ~5 эВ [41]. В этом устройстве частицы фокусируются за счет зеркального отражения падающих атомов от нескольких специально подобранных пластин (рис.9). Уровень концентрации по плотности потока частиц на ограниченной поверхности испытуемого материала может составлять 2-40. Предел концентрации плотности потока частиц определяется повышением давления газа в фокальной зоне испытуемого материала и скоростью рекомбинации атомов кислорода в молекулы.

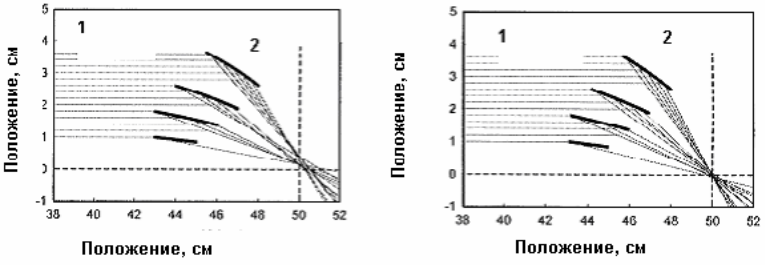



Рис.9. Траектории атомов кислорода, отраженных от пластин концентратора и оптимизированных для наземных испытаний (слева) и для натурных испытаний (Н ~ 400 км) (справа) 1-траектории атомов кислорода; 2-отражающие пластины [41]

При разработке и использовании имитационных плазменных устройств, предназначенных для изучения воздействия АК с энергией ~5 эВ на материалы КА, предъявляются следующие требования к пучкам атомов кислорода и сопутствующим факторам [2,5,14-18], а именно

энергия атомов кислорода должна быть– 5-12 эВ;

плотность потока атомов– $j \sim 10^{15}$-$10^{18}$ ат/см$^2$·с;

флюенс атомов– $\Phi \sim 10^{22}$-$10^{23}$ ат/см$^2$;

состав пучка– O (>90%), $O_2$, $O^+$, $N_2^+$, $O_2^*$;

присутствие ВУФ и УФ с интенсивностью $P_к \geq 70 \mu W/см^2$

термоцикличность материала в пределах: $80°C < T \leq 120°C$.

Возможность измерения основных параметров материалов в вакууме: потери массы - $\Delta m$; $\Delta\alpha_s$ ТРП; коэффициент отражения - $\Delta R$ зеркала; измерение электрического сопротивления проводников(Ag); исследование морфологии поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа или профилографа.

Масс-спектрометрия продуктов эрозии облучаемых материалов (CO; $CO_2$; OH; $C_nH_m$).

Исследование синергического эффекта в процессе одновременного воздействия на материалы: О+ВУФ (λ~130 нм).

Возможность ускоренных испытаний $K_y$~10-100.

Исследование температурной зависимости реакционной эффективности, $R_e$, [$см^3$/ат] для полимерных материалов; $S_{пучка}$≈1-10 $см^2$.

В некоторых используемых имитационных плазменных установках целесообразно понизить концентрацию $O_2$ у поверхности испытуемого материала до уровня, реализуемого на фронтальной поверхности КА при полете на высотах 300-500 км, поскольку во многих установках концентрация $O_2$ у поверхности испытуемого материала превышает натурную в $10^2$ –$10^4$ раз. Иначе это может повлиять на кинетику химических реакций, ответственных за образование летучих фрагментов из структуры материала.

Использование в имитационных экспериментах ионов и атомов кислорода с энергией выше 5 эВ создает условия для появления «ложных» сопутствующих физико-химических явлений, отсутствующих в процессе реального космического полета. Известно, что пороги физического распыления различных материалов лежат в пределах 10-40 эВ и в естественных условиях, где атомы кислорода имеют Е~5 эВ, физическое распыление материалов практически отсутствует при взаимодействии АК с материалами КА. Ряд полимерных материалов, имеют энергии молекулярных связей выше 5 эВ (C=C; C≡C; C=N; C≡N). При использовании имитационных потоков АК с энергией выше 5 эВ эти связи могут быть разорваны, в тоже время в реальных космических условиях эти явления могут отсутствовать.

Использование в имитационных установках пучков ионов кислорода вместо атомов, по-видимому, ужесточает условия испытания полимерных материалов, поскольку реакционная эффективность, Re, ионов кислорода, возможно, превышать эффективность, Re, атомов при равной кинетической энергии [23,24], хотя надежных экспериментальных данных по этому вопросу недостаточно.

**Эрозия полимерных материалов**

В табл.1 приведена реакционная эффективность, Re(E), различных материалов от воздействия АК при экспонировании в условиях околоземного космического пространства [10]. На рис.10 приведен масс-спектр каптона (полиимида), помеченного изотопом $^{13}C$, при воздействии потока кислородной плазмы [25].

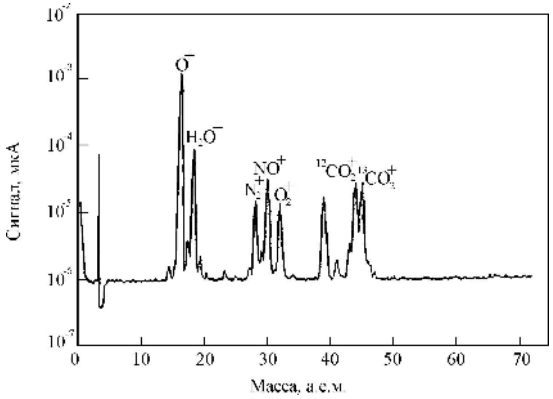



Рис.10. Масс-спектр каптона (полиимида), помеченного изотопом $^{13}C$, при воздействии потока кислородной плазмы окружения [25]

Табл. 1. Реакционная эффективность, Re, различных материалов от воздействия АК при экспонировании в условиях околоземного космического пространства [10]

| Материал | Реакционная эффективность, Re, $*10^{-24}$ [$см^3 \cdot ат^{-1}$] |
|---|---|
| Алюминий | 0.00 |
| $Al_2O_3$ | <0.025 |
| Углерод | 1.2 |
| Алмаз | 0.021 |
| Эпоксид | 1.7 |
| Золото | 0.0 |
| Графитовый эпоксид | 2.6 |
| Каптон | 3.0 |
| Полиэтилен | 3.3 |
| Поли(метилакрил) | 3.4 |
| Поликарбонат | 6.0 |
| Полистирол | 1.7 |
| Полисульфон | 2.4 |
| Силикон | 0.05 |
| Силоксан полиимид (7%Sx) | 0.6 |
| Силоксан полиимид (25%Sx) | 0.3 |
| Поли(винилфлюорид) | 3.2 |
| Политетрафлюорэтилен | 0.03-0.05 |

Реакционная эффективность (Re) для углеводородных полимерных материалов в условиях столкновения с атомами кислорода с энергией ~5 эВ, может быть связана со структурой повторяющегося звена полимера формулой [26, 27]:

$$\gamma=N_T(N_C-N_O),$$

где: $\gamma$ - параметр. $N_T$ – полное число атомов в повторяющемся звене. $N_C$ – число атомов углерода в повторяющемся звене. $N_O$ - число атомов кислорода в повторяющемся звене.

В таблице 2 приведен список полимерных материалов и их химические формулы повторяющихся звеньев и расчетные значения $\gamma$.

Табл.2 Список полимерных материалов и их химические формулы, а также значения $\gamma$ и Re [27]

| Материал | Формула | $\gamma$ | Re ($см^3$/ат)×$10^{-24}$ |
|---|---|---|---|
| Графит | C | 1.0 | 1.2 |
| Полиэфиркетон | $C_{19}H_{12}O_3$ | 2.1 | 2.2 |
| Каптон | $C_{22}H_{10}O_5N_2$ | 2.3 | 3.0 |
| Полиэтилен | $CH_2$-$CH_2$ | 3.0 | 3.2 |
| Майлар | $C_{10}H_8O_4$ | 3.7 | 3.9 |
| Нейлон-6,6 | $C_{12}H_{22}O_2N_2$ | 3.8 | 4.4 |
| Полиметилметакрилат | $C_5H_8O_2$ | 5.0 | 4.8 |
| PVA | $C_4H_6O_2$ | 6.0 | 5.2 |
| PEO | $C_2H_4O$ | 7.0 | 5.7 |
| Поликарбонат | $C_{12}H_{20}O_7$ | 7.8 | 6.5 |
| Делрин | $CH_2O$ | ∞ | 9.5 |

На рис.11 приведена линейная зависимость Re($\gamma$), полученная на установке UTIAS при ускорении пучка атомарного кислорода ($E_a$~2-3 эВ) [27]. Пунктирная зависимость R($\gamma$) построена на базе данных, полученных в условиях космического полета.

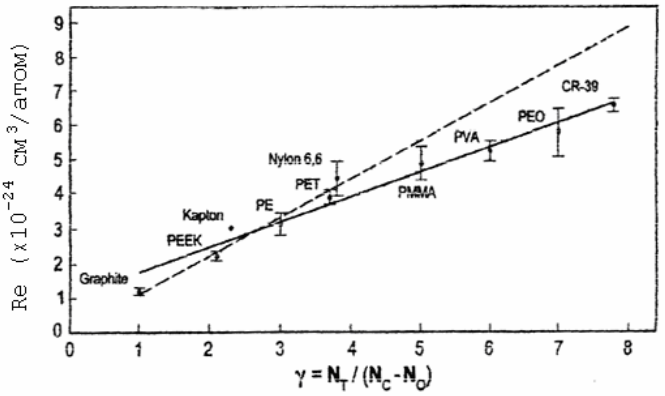



Рис.11. Зависимость реакционной эффективности Re от параметра γ для полимеров, испытанных на воздействие атомарного кислорода на установке UTIAS (сплошная линия), пунктирная линия – отображает зависимость Re(γ), полученную в условиях космического полета [27]

В результате эрозионного воздействия частиц ионосферы Земли на полиимидные пленки изменяются также их оптические спектры пропускания (рис.12). Пленки, были экспонированы на станции «Мир» в течение 28 и 42 месяцев [28].

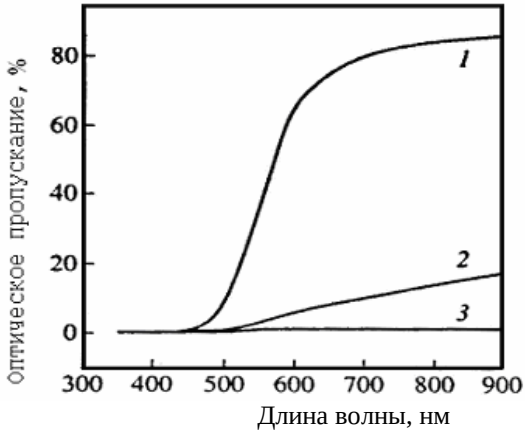



Рис.12. Оптические спектры пропускания полиимидных пленок ПМ-1Э: 1-исходная пленка; 2-пленка после натурной экспозиции на станции «Мир» в течение 28; 2-через 42 месяца [28]

**Защитные покрытия космических материалов от воздействия атомарного кислорода**

Ряд полимерных материалов (каптон, майлар, и др.) широко применяются в КА. Они подвержены эрозии под воздействием атомарного кислорода на низких орбитах КА. Для снижения эрозии поверхность таких материалов покрывают тонкими (~1 мкм) защитными покрытиями как неорганическими ($SiO_2$, $Al_2O_3$, $MgF_2$, $Si_3N_4$), так и полимерными (тефлон, силиконы и др.). Покрытия позволяют снизить потерю массы полимерных материалов в 10-100 раз. На рис.13 показано изображение ПММА, полученное с помощью РЭМ, после воздействия направленного гипертеплового пучка атомов кислорода с энергией ~5эВ. Защищенная часть поверхности полиметилметакрилата (ПММА) находится в верхней части изображения [29].

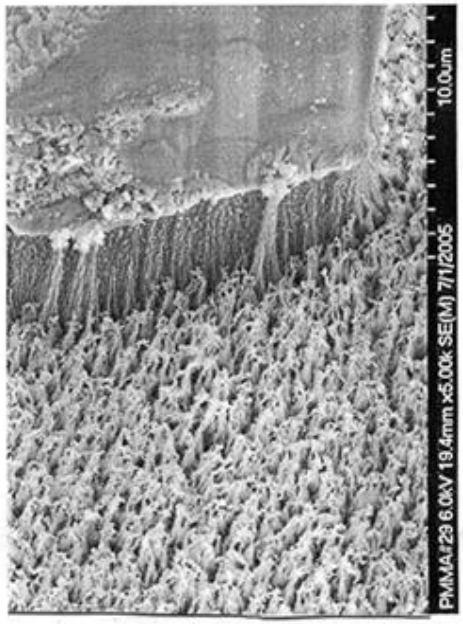



Рис.13. Изображение ПММА, полученное с помощью РЭМ, после воздействия направленного гипертеплового пучка атомов кислорода с энергией ~5эВ. Защищенная часть поверхности ПММА находится в верхней части изображения [29]

Перед нанесением защитных покрытий поверхность материалов иногда подвергается обработке ультрафиолетовым излучением, что активирует ее и способствует более высокой адгезии напыленных слоев покрытия. В процессе термоциклических (-80<T <120°C) испытаний материалов защитные неорганические покрытия за счет различных коэффициентов теплового расширения покрытия и полимера растрескиваются [10].

Полимерные защитные покрытия (тефлон, силиконы) более устойчивы к растрескиванию, чем неорганические. Недостатком неорганических защитных покрытий ($SiO_2$) является наличие в них высокой концентрации (~$10^3$ отв/см$^2$) технологических дефектов (отверстий) размером 1-5 мкм (рис.14). При воздействии на такие защитные покрытия атомарного кислорода происходит диффузия атомов кислорода через дефекты покрытия и вытравливание полимера. Другой подход к защите полимеров от воздействия атомарного кислорода основан на ионной имплантации в полимер ионов $Si^+$, $Al^+$, $B^+$ с энергией 30-100 кэВ при флюенсе Ф~$10^{16}$ ион/см$^2$. Под воздействием атомарного кислорода внедренные ионы на глубине ~0.1 мкм превращаются в окислы $SiO_2$, $Al_2O_3$, что способствует защите более глубоких слоев полимера [30].

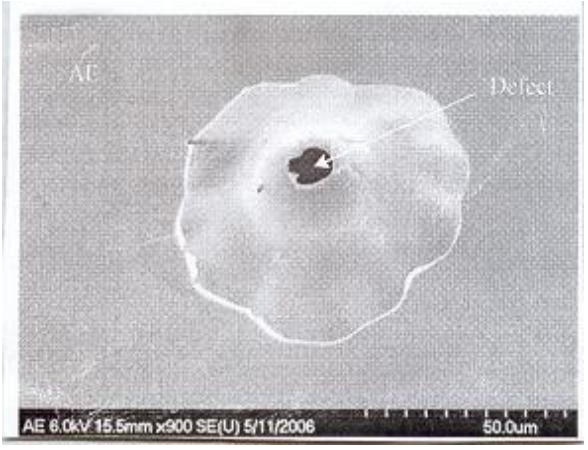



Рис.14. Изображение дефекта в защитном неорганическом покрытии $SiO_x$, полученное с помощью РЭМ [30]

В качестве примера в [31] приведены результаты испытания полиимидных пленок, покрытых защитными слоями из напыленного $SiO_2$ и

кремнийорганического лака. Пленки были испытаны в процессе облучения пучком кислородной плазмы, создаваемой в плазменном ускорителе при эквивалентном флюенсе $\Phi \sim 1{,}5 \cdot 10^{21}$ и/см$^2$ и средней скорости ионов и атомов кислорода ~13 км/с. Летные испытания проведены на станции «Мир» в течение 997 суток в сменных кассетах, возвращаемых после экспозиции в космосе на Землю. Испытание покрытия показали высокую степень защищенности полиимида от атомарного кислорода.

Уровень защиты полимерных материалов демонстрируется также на (рис.15), где приведено сравнение скорости эрозии исходных каптоновых пленок (1) и этой же пленки с защитным слоем $Si(CH_3)_2$ (2) после облучения в плазменном ускорителе [27].

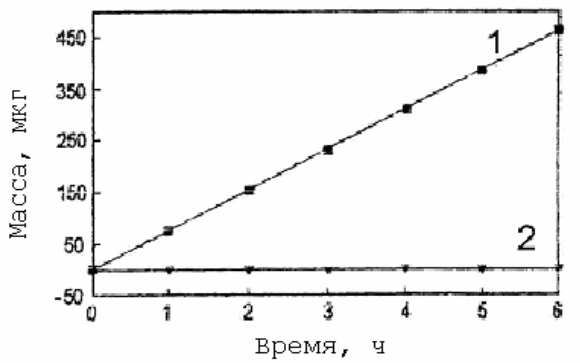



Рис.15. Сравнение скорости эрозии каптона при воздействии атомарного кислорода:
1–исходный каптон, 2-каптон с защитным слоем [31]

В работе [32] изучалась стойкость космического материала: углепластика КМУ-4Л при имитации воздействия потока атомарного кислорода с энергией ~5 эВ при флюенсе $(0{,}4\text{-}3{,}6) \cdot 10^{22}$ см$^{-2}$. В испытаниях использовались углепластик без покрытия и углепластик с защитным терморегулирующим эмалевым покрытием – ЭКОМ-1. Углепластики с защитным покрытием имеют в десятки раз более низкую скорость эрозии под действием атомарного кислорода (менее 0,01мм), чем незащищенные образцы углепластика (0,32мм) (рис.16).

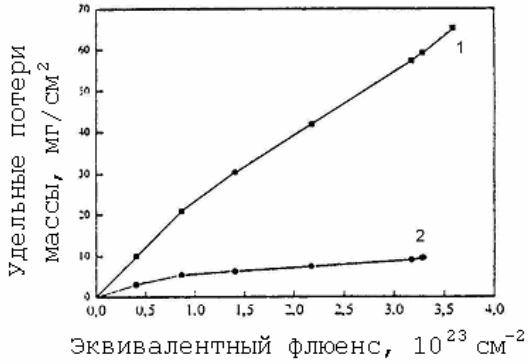



Рис.16. Зависимость удельных потерь массы углепластика КМУ-4Л от эквивалентного флюенса атомарного кислорода. 1 – без покрытия, 2– с покрытием ЭКОМ-1 [32]

**Эрозия металлов и углеродных материалов**

Используемые на внешней поверхности КА металлы (Ag, Al, Ni, Cu, Sn), кроме Au, под воздействием потоков атомарного кислорода на низких орбитах КА (300-500 км) подвергаются эрозии. В некоторых металлах (Al, Sn, Cu) происходит прирост массы, Os теряют массу за счет образования летучих окислов. При больших флюенсах атомов кислорода $\Phi_a \sim 10^{20}$-$10^{21}$ ат/см$^2$ на поверхности Ag возникает оксидная пленка, обладающая высокими внутренними напряжениями, создающими условия для ее отслаивания от поверхности Ag. Этот процесс приводит к потере массы и загрязнению окружающего пространства частицами AgO.

При исследовании воздействия кислородной плазмы с энергией ионов кислорода 10-40 эВ на металлы Cu, Ag, Au, Sn происходит окисление металлов, кроме Au. На поверхности Ag наблюдается эрозия, вызванная отслаиванием и уносом частиц AgO [33].

При воздействие потоков атомарного кислорода с энергией ~5 эВ, флюенс $10^{19}$-$4 \cdot 10^{20}$ атом/см$^2$ отмечалось снижение коэффициента отражения Ag [34]. На рис.17 приведена спектральная зависимость коэффициента отражения Ag до и после воздействия высокочастотной кислородной плазмы ($\Phi \sim 1{,}5 \cdot 10^{19}$ атом/см$^2$).

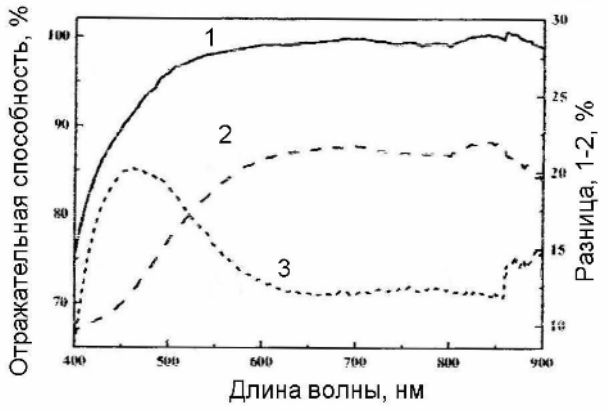



Рис.17. Спектральная зависимость коэффициента отражения образца Ag: 1-до облучения; 2-после облучения высокочастотной кислородной плазмой (Ф~1,5·10$^{19}$ атом/см$^2$); 3-различие в отражении Ag, до и после облучения [34]

В связи с большой перспективой применения углеродных материалов в космических аппаратах необходимо знать их стойкость к воздействию потоков атомарного кислорода, эквивалентных их пребыванию в условии полета на H~350 км. В работе [35] приведены данные о потере массы и изменения морфологии поверхности при имитационных испытаниях с использованием потока атомов кислорода с U~1,8 км/с и E~0,3 эВ при плотности потока j~10$^{20}$ ат/см$^2$·с. Профиль поверхности измерялся с помощью лазерной методики.

Испытывались образцы графита, композитов C/C и Si-C.C. Выявлено, что потеря массы испытываемых образцов пропорционально времени экспозиции и сильно зависит от температуры [35,36]. Сильная зависимость от температуры обусловлена относительно низкой энергией атомов. Известно, что при энергии 5 эВ температурная зависимость эрозии слабая. Температура поверхности образцов была равна T=647,5K и постоянно контролировалась. Длительность облучения составляла 10-50 мин. На рис.18 приведен профиль поверхности графита с ρ=1,8 г/см$^3$ до и после облучения. Плотность потока атомов кислорода была j~10$^{20}$ат/см$^2$с.

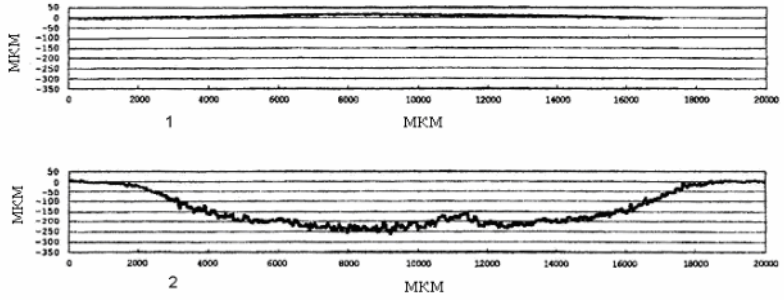



Рис.18. Профиль поверхности графита: 1-исходный профиль поверхности;2-профиль поверхности после бомбардировки атомами кислорода [35]

На рис.19 отображен профиль поверхности С/С композита до и после облучения атомами кислорода, полученный при той же плотности потока.

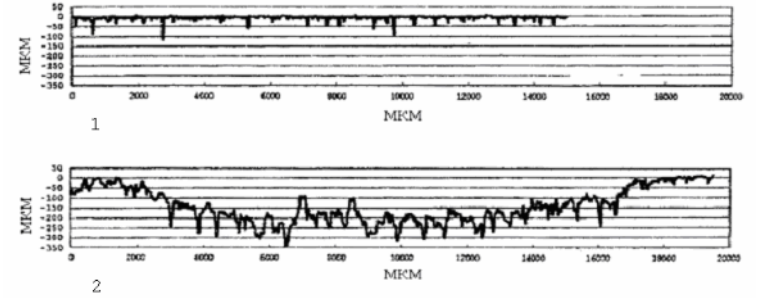



Рис.19. Профиль поверхности композита С/С: 1-исходный профиль поверхности, 2- профиль после облучения атомами кислорода [35]

На рис.20 показан профиль поверхности Si-C.C. – композита до и после облучения атомами кислорода. Плотность потока атомарного кислорода была $j \sim 10^{20}$ ат/см$^2$·с. Было показано, что потеря массы у композита С/С меньше, чем у графита, а также выявлено, что углеродная матрица эродирует глубже, подтверждая, что зерна Si и SiC не защищают саму углеродную матрицу от эрозии. Как видно из последней профилограммы (рис.19), материал эродирует неравномерно. На некоторых участках поверхности эрозия отсутствует, что свидетельствует о влиянии на разрушение не только состава композита, но пространственного распределения его составляющих.

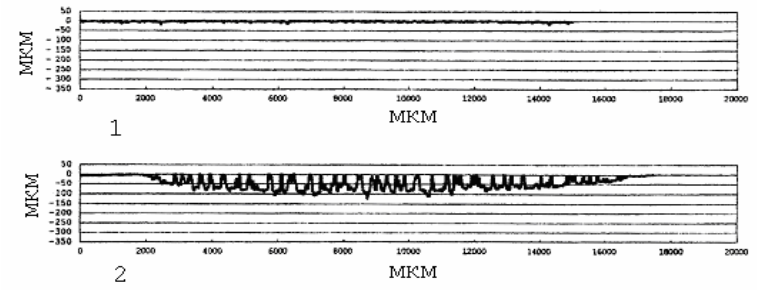



Рис.20. Профиль поверхности композита Si-C.C.: 1-исходный профиль, 2-профиль поверхности после облучения атомами кислорода [35]

Табл.3 Эрозионный выход относительно каптона (Н) для каждого энергетического диапазона при воздействии атомов и ионов кислорода [7]

| Материал | Тепловая энергия атомов от в/ч плазмы $E_a$~0,1эВ | ИСЗ Н~400км $E_a$~4,5эВ | Гипертепловая энергия ионов от Холловского источника $E_u$~70эВ |
|---|---|---|---|
| PI-H | 1 | 1 | 1 |
| PI-HN | 0.90 | 0.937 | 1.03 |
| Black PI | 0.88 | - | 0.90 |
| PG | 0.61 | 0.138 | 0.58 |
| FEP | 0.81 | 0.067 | 1.89 |
| ECTFE | 0.83 | 0.597 | 1.59 |
| CTFE | 1.19 | 0.277 | 2.86 |
| PE | 1.65 | 1.25 | 1.06 |
| PET | 1.09 | 1.00 | 1.30 |
| PPPA | 2.18 | 0.470 | 1.47 |
| PP | 2.99 | 1,23 | 1.40 |
| PSU | 1.49 | 0.980 | 0.98 |
| PTFE | 0.39 | 0.047 | 1.86 |
| PVF | 1.79 | 1.06 | 1.10 |
| PVDF | 0.42 | 0.430 | 1.42 |
| ETFE | 0.74 | 0.320 | 1.08 |

Несмотря на большие усилия по развитию методов имитации воздействия потоков ионосферного атомарного кислорода на космические

материалы и достигнутые успехи [6,7,21,22,29,30,37,39], имеется еще много неопределенностей в этой проблеме. Как показали последние исследования [6,7], наблюдается большое различие в эрозионном выходе по отношению к каптону Н под воздействием пучков ионов и атомов кислорода, полученных во многих имитационных установках, по сравнению с натурными экспериментами (табл.3,4).

Такие различия связываются с несовершенством техники имитационных испытаний (высокий уровень ВУФ радиации, невозможность воспроизводства синергетических эффектов от различных компонент космической среды, широкий температурный интервал испытуемых материалов). Таким образом, достоверный прогноз пригодности полимеров для использования в космических аппаратах, основанный на имитационных экспериментах, требует знания эрозионного выхода относительно картона Н, измеренного в процессе космического полета, а также знания энергетической зависимости эрозионного выхода относительно картона Н и химической структуры полимера. С этой целью рекомендуется использовать в имитационных экспериментах по исследованию полимеров два независимых источника атомарного кислорода: 1-источник на базе высокочастотного плазмотрона с энергией атомов кислорода 0,04 эВ. 2-источник с энергией ионов кислорода 20-70эВ [7].

Табл.4 Эрозионный выход относительно каптона (Н) различных материалов для каждого энергетического диапазона при воздействии атомов и ионов кислорода [7]

| Материал | Тепловая энергия атомов от в/ч плазмы $E_a$~0,1эВ | ИСЗ H~400км $E_a$~4,5эВ | Гипертепловая энергия ионов от Холловского источника $E_u$~70эВ |
|---|---|---|---|
| Средний для нефторированных полимеров и углерода | 2.5<br>+3.3 | 1.1<br>+0.8 | 2.0<br>+2.7 |
| Средний для всех фторированных полимеров | 0.9<br>+0.5 | 0.8<br>+0.4 | 1.9<br>+0.6 |
| Средний для всех полимеров и углерода | 1.9<br>+2.7 | 0.1<br>+0.7 | 1.9<br>+2.3 |

**Синергические эффекты**

Реакционная эффективность,Re, по отношению к каптону для различных полимеров, полученные в большинстве лабораторных имитационных установках, превышают аналогичные данные из полетных экспериментов с высотой орбиты КА 400 км. Одной из наиболее вероятных причин, по-видимому, является наличие в этих установках синергических эффектов, возникающих при одновременном воздействии на испытуемые полимеры атомов или ионов кислорода с энергией 5-70 эВ и ультрафиолетового излучения в интервале длин волн ( $\lambda$~115-400 нм ). Прогноз эрозионного выхода по отношению к каптону каждого типа полимера в течение полета КА на определенной орбите может быть сложной задачей, поскольку каждый тип полимера может по-разному быть чувствителен к синергическим эффектам от сочетания воздействия разных компонент космической среды в первую очередь ( АК и ВУФ ), которые невозможно полностью воспроизвести в имитационных экспериментах.

Механизм эрозии полимеров при воздействии атомов кислорода (АК) с энергией 5 эВ и ВУФ солнечной радиации до конца не ясен, предполагается, что он связан с многоступенчатыми плазмохимическими и фотохимическими реакциями на поверхности облучаемых полимеров. Предполагается, что первый шаг воздействия АК с поверхностью полимера приводит к отрыву атома водорода (Н) и образованию (ОН), при этом поверхность полимера обогащается свободными радикалами. По-видимому, АК рвет также химические связи: С-С в полимере, а далее протекают химические реакции: $O+C \rightarrow CO$; $CO+O \rightarrow CO_2$ . Потеря массы полимера, в основном определяется за счет летучих продуктов эрозии : $CO_2$ ; CO; OH. На эти многоступенчатые эрозионные процессы оказывает заметное влияние интенсивность и спектральный состав ВУФ и УФ. На эффективность синергических процессов при воздействии АК и ВУФ на полимеры могут также оказывать сопутствующие факторы: наличие заряда и электрического поля на поверхности полимера, соотношение между микрокристаллической и аморфной фазами в полимере, термоцикличность и пр.

Выявлено, что для большинства полимеров можно предсказать текстуру (шероховатость) поверхности, возникающую после воздействия потока атомов или ионов кислорода с энергией 5-10 эВ, если известна реакционная эффективность, Re, полимера. Для иллюстрации особенностей механизма возникновения синергических эффектов на рис.21,22 приведены зависимости этих эффектов, связанные с образованием на поверхности шероховатости, обусловленной индивидуальным воздействием АК или ВУФ, а также комплексным воздействием ( АК+ВУФ )

на фторосодержащие полимеры: тефлон (FEP); тефзел ( PTE ); тедлар ( PVF ) .

.На рис.21 приведена зависимость шероховатости поверхности тефлона, измеренная с помощью атомно-силового микроскопа, от воздействия различных излучений [44]

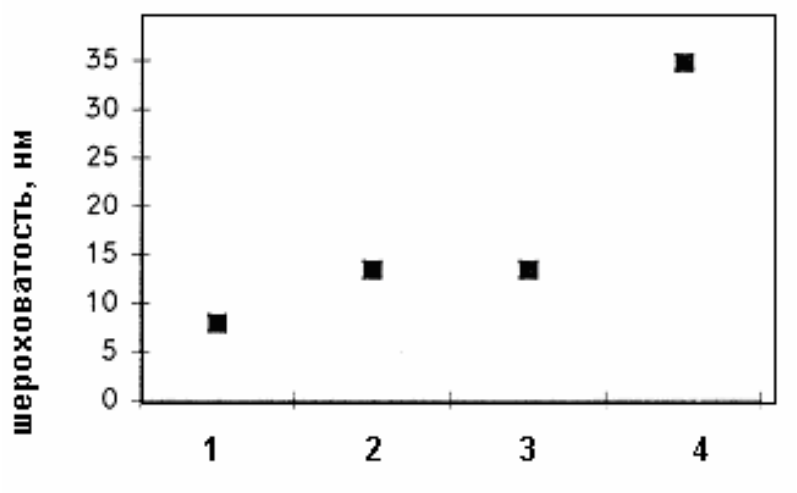



Рис.21. Зависимость шероховатости поверхности тефлона, измеренная с помощью атомно-силового микроскопа, от воздействия различных излучений: 1-исходная; 2-воздействие ВУФ, выраженное в 20 эквивалентных солнечных часах (ЭСЧ); 3- воздействие ионов кислорода с Е=50 эВ, флюенс $5x10^{17}$ $O^+/см^2$; 4-комплексное воздействие ВУФ (20 ЭСЧ) и ионов $O^+$, с Е=50эВ, Ф=$5x10^{17}$ ион/см .

На рис.22 показан синергетический эффект (S),выявленный при комплексном облучении ВУФ (20 ЭСЧ) и ионов $O^+$ с Е=50 эВ ($5x10^{17}$ ион/$см^2$) фторосодержащих полимеров [44 ]

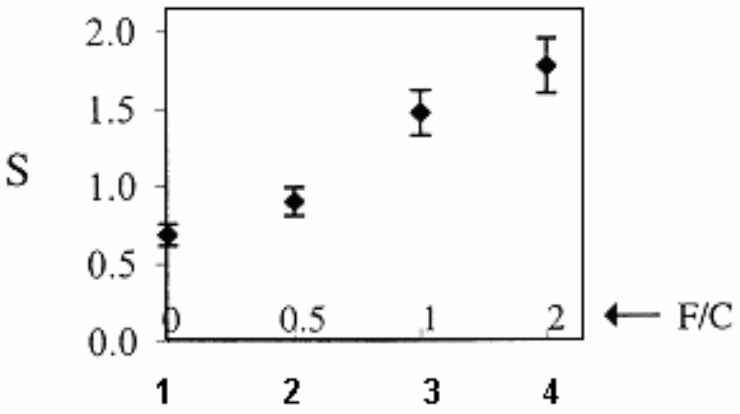



Рис.22. Синергический эффект (S),выявленный при комплексном облучении ВУФ (20 ЭСЧ) и ионов $O^+$ с E=50 эВ ($5x10^{17}$ ион/$см^2$) фторосодержащих полимеров. Полимеры имеют различные соотношения F/C: 1-полиэтилен (PE), F/C=0: 2-тедлар (PVF), F/C=0,5; 3-тефзел (PTE), F/C=1; 4-тефлон (FEP), F/C=2; S-характеризует нормализованный синергический эффект, определенный по шероховатости облученной поверхности полимера [ 44 ]

Приведенные на рис.21,22 данные подтверждают сложный и индивидуальный характер синергетических эффектов, возникающих при имитационных испытаниях полимеров к воздействию (АК) и ВУФ солнечной радиации. Эти эффекты зависят также зависят также от химической структуры полимера..

**Околоповерхностное свечение космического аппарата**

При полетах КА типа «Спейс шаттл» наблюдалось слабое свечение на его фронтальных поверхностях. Свечение над фронтальными частями космических аппаратов создает угрозу возникновения помех для оптических датчиков бортовых систем [38,40]. Свечение, по видимому, должно исходить от возбужденных молекул $N0_2$ и NO,образующихся вблизи фронтальных поверхностей КА (~20 см) (рис.21).

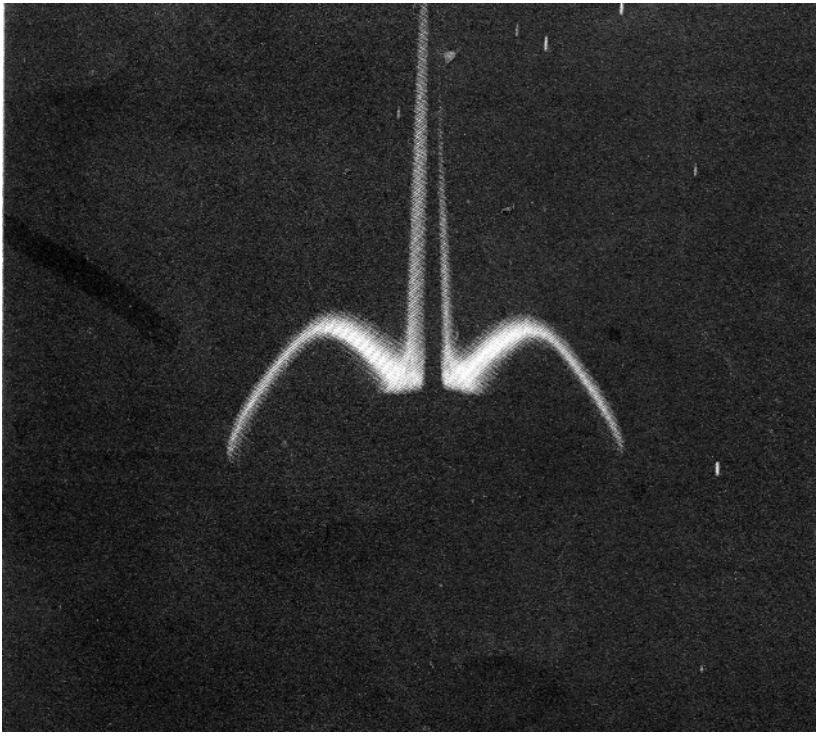


Рис.21. Ореол над хвостовой частью « Спейс шаттла», связанный с взаимодействием набегающего потока ионосферных частиц (O, $N_2$) на его фронтальную поверхность [40]

Атомарный кислород играет важную роль в создании возбужденных молекул. Поверхность КА выполняет, по-видимому, роль катализатора. Наиболее вероятные химические реакции, приводящие к созданию на поверхности аппарата возбужденных молекул двуокиси азота следующие:

$$NO+O^{\alpha} \rightarrow NO_2^{*}$$
$$O+NO^{\alpha} \rightarrow NO_2^{*}$$
$$O+N_2 \rightarrow NO+N$$

где $O^{\alpha}$ и $NO^{\alpha}$ –адсорбированные частицы на поверхности аппарата.

Сначала атомы и молекулы сталкиваются с поверхностью аппарата, адсорбируются на ней. Объединяясь, образуют возбужденные молекулы, которые, покидая поверхность, переходят на более низкий энерге-

тический уровень за время около 70 мс, излучая при этом свечение. Спектр свечения в видимой области (0,4-0,75мкм) состоит из непрерывного излучения с максимумом в оранжевом интервале спектра, распространяясь в ИК-диапазон (1-5мкм). С увеличением высоты орбиты КА от 200 км и выше уровень свечения понижается. С ростом температуры фронтальных поверхностей КА уровень свечения уменьшается. Уровень свечения зависит также от материала.

**Деградация высоковольтных солнечных батарей при воздействии ионосферного кислорода**

Солнечные батареи (СБ) Международной комической станции (МКС) генерируют около 65 кВт электрической мощности при напряжении U~160 В. Передача электрической энергии по силовым кабелям МКС осуществляется при U=120 В. В ближайшие годы будут запущены космические объекты, потребляющие около 1 МВт электрической мощности. Оптимальное напряжение СБ, при такой мощности, составляет 400 В. Высокое напряжение в электрической сети КА необходимо, чтобы снизить вес силовых кабелей и омические потери в них. При функционировании высоковольтных СБ КА в ионосфере (Н~300-500 км) возникают 2 типа взаимодействия, ограничивающих ресурс СБ [9,43].

1-токовые утечки через окружающую ионосферную плазму возникают при соединении ( заземлении) положительного электрода СБ с корпусом КА.

2-возникновение на поверхности КА дуговых электрических разрядов происходит при соединении (заземлении) отрицательного электрода СБ. с корпусом КА, если напряжение СБ выше – 200 В.

Как правило, на КА отрицательный электрод СБ соединяют (заземляют) с фермой КА, при этом металлические элементы КА и СБ имеют отрицательный потенциал относительно окружающей плазмы (-400 В). Высоковольтные СБ при эксплуатации на низкоорбитальных ИСЗ будут подвергаться воздействию положительных ионов ионосферы , что может приводить к различным электроразрядным и электрофизическим процессам . Зависимость интенсивности электрических дуговых разрядов от напряжения СБ приведена на рис.24 [ 42].

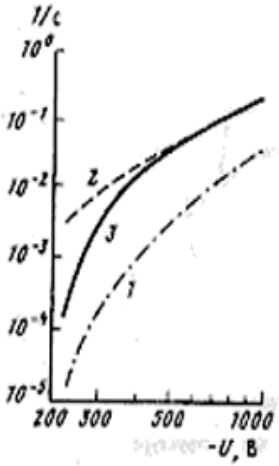



Рис.24. Зависимость интенсивности дуговых разрядов от отрицательного напряжения U на СБ: 1-лабораторный эксперимент; 2,3-полетные данные [43]

Выявлено различие в лабораторных и полетных данных, что, по-видимому, характеризует несовершенство имитационных испытаний, связанное с вторичными эмиссионными явлениями на стенках вакуумной имитационной камеры. Пороговое напряжение разрядов в СБ составляет около - 200 В и зависит от плотности ионосферной плазмы (рис.23), материала электрических контактов (Ag или Cu) и конструкции СБ [43].

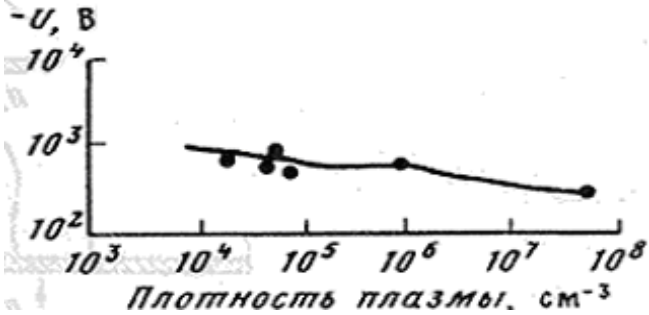



Рис.25. Зависимость порогового напряжения разряда U на СБ от плотности ионосферной плазмы [43]

Электрическим разрядам на поверхности СБ сопутствуют также световые вспышки. Из спектрального анализа светового излучения вспышек следует, что важную роль в развитии разрядов играют пары воды, которые являются одной из основных составляющих собственной внешней атмосферы КА. Интенсивность разрядов в СБ сильно зависит от давления паров в окружающем пространство [43].

## 10. ИМИТАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОМЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ НА КОСМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

При бомбардировке внешней поверхности искусственных спутников земли (ИСЗ) потоками микрометеоров и частиц космического «мусора» важное значение имеют три типа взаимодействия: 1 - проникновение частиц в материал; 2 - выброс из зоны удара облака испаренных нейтральных атомов и осколков; 3 - эмиссия ударной плазмы, которая может представлять потенциальную опасность для последующего возникновения электрического разряда между заряженными элементами поверхности ИСЗ [1].

Анализ состояния солнечных батарей (СБ) космической станции «Мир», космического телескопа Хаббл (США) и других космических аппаратов показал, что слоистые структуры СБ очень чувствительны к потокам космической пыли [2-4]. Удар сверхскоростной микрочастицы с v>5 км/с о твердую мишень вызывает механические и плазменные процессы. На поверхности СБ образуется кратер, выброс плазмы и пара, в слоистой структуре батареи распространяется ударная волна. В некоторых случаях может возникнуть очаг разрушения в виде отверстия.

При имитационных испытаниях СБ и других элементов ИСЗ на удар сверхскоростных микронных частиц (микрометеоров) как правило используется методика ускорения металлических заряженных частиц микронных размеров на электростатических ускорителях [5-13].

### Экспериментальные методики

Этот метод при ускоряющем потенциале на электростатическом ускорителе Ван де Графа U=1,5-2 МВ обеспечивает ускорение частиц с m = $10^{-10}$-$10^{-16}$ г до десятков км/с. Давление и температура в точке удара частицы в мишень может достигать десятков ГПа при T ~ $10^3$ – $10^5$ K [12-15]. Ускорение же диэлектрических микрочастиц до таких скоростей затруднено, т.к. зарядка при контакте с заряженной иглой в источнике микронных частиц ускорителя (рис.1) будет на несколько поряд-

ков ниже, чем зарядка у металлической частицы того же размера и массы. Поэтому скорость ускоряемой диэлектрической частицы будет значительно ниже, чем у металлической, т. к. $v=(2qU/m)^{1/2}$[16]. Поскольку ускоряемые частицы заряжены, то скорость и косвенно массу каждой частицы, а также полное количество их можно определить при помощи соответствующей электронной аппаратуры (рис 1).

Для иллюстрации возможностей методики ускорения заряженных металлических микрочастиц на электростатических ускорителях на рис. 2-4 приведены некоторые их параметры [10,11].На рис.2 приведена зависимость скорости,v, железных частиц от их массы, полученная на электростатическом ускорителе Ван де Графа [10].

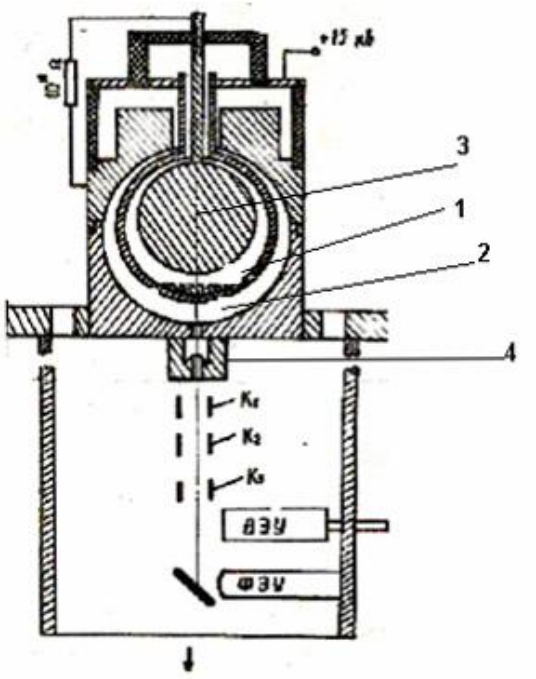



Рис.1. Источник заряженных микронных металлических частиц и аппаратура для определения их скоростей и их регистрации с помощью ФЭУ и ВЭУ:1 – металлический порошок; 2 – игла; 3 – высоковольтный электрод; 4 – «заземленный корпус»; 5 – мишень; $K_1$; $K_2$; $K_3$ –электроды для измерения скорости частиц

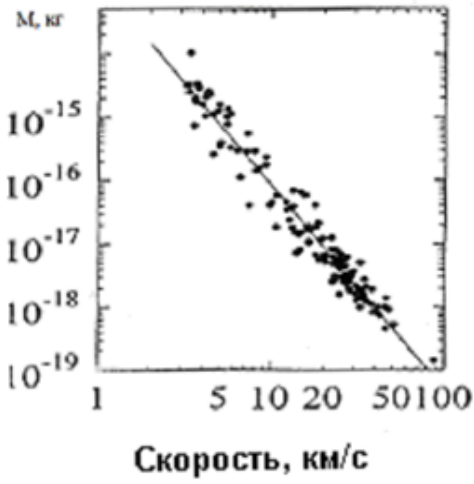



Рис. 2. Зависимость скорости,v, железных частиц от их массы, полученная на электростатическом ускорителе Ван де Графа [10]




Рис.3. Зависимость скорости ускоренных частиц из углерода от их диаметра: 1 – ускорение при U=3МВ, 2 – при U=90КВ [11]

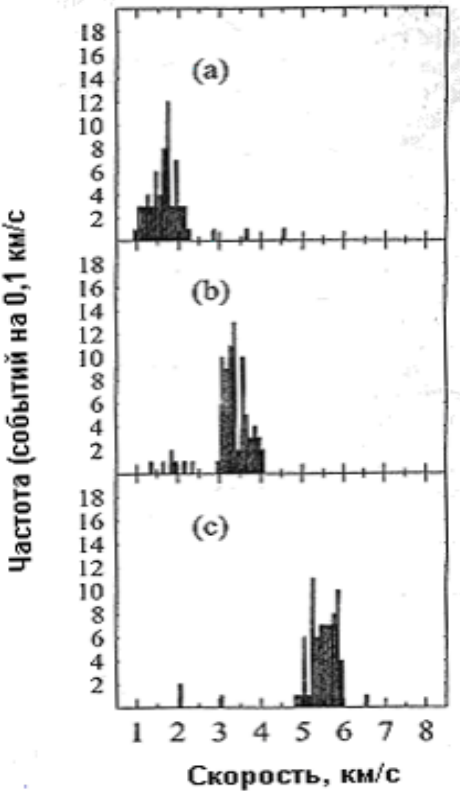



Рис.4. Распределение скоростей ускоренных железных микропылинок, отобранных с помощью специальной аппаратуры: a- 1-2 км/с, b- 3-4 км/с, c- 5-6 км/с [10].

Наибольшая напряженность электрического поля на поверхности ускоряемой частицы в инжекторе $E = E_{кр}$ в случае отрицательного заряда ограничивается автоэлектронной эмиссией ($E \sim 10^9$ в/м), а в случае положительного заряда - автоионной эмиссией ($E_{кр} \sim 10^{10}$ в/м). Интенсивность потока частиц может варьироваться в пределах $1\text{-}10^3$ мин$^{-1}$. Одна загрузка инжектора металлической пылью ~1 см$^3$ обеспечивает его работу в течение нескольких сотен часов [7,8]. Используемые в эксперименте металлические заряженные пылинки имеет размеры 0,1-5 мкм

(смесь Al < 1 мкм и Cr > 1 мкм). При ускоряющем напряжении на инжекторе 10 КВ выбрасываемые из инжектора частицы Al с r ~ 0,1 мкм имеют скорости в пределах до 1-2 км/с, что соответствует заряду отдельной частицы 0,2 - 100 фКл [10]. Скорость заряженных частиц определяется по промежутку времени пролета между двумя кольцеобразными электродами, на которых индуцируются импульсы напряжения. Заряженные частицы при работе с инжектором и при ускорении частиц на ЭГ-8 регистрировались при помощи вторичного электронного умножителя (ВЭУ) или фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) (см. рис.1.) [7,8].

Для имитации воздействия на материалы ИСЗ частиц космического мусора с v ~ 1-10 км/с применяется лазерное метание частиц (рис.5) [17,18].

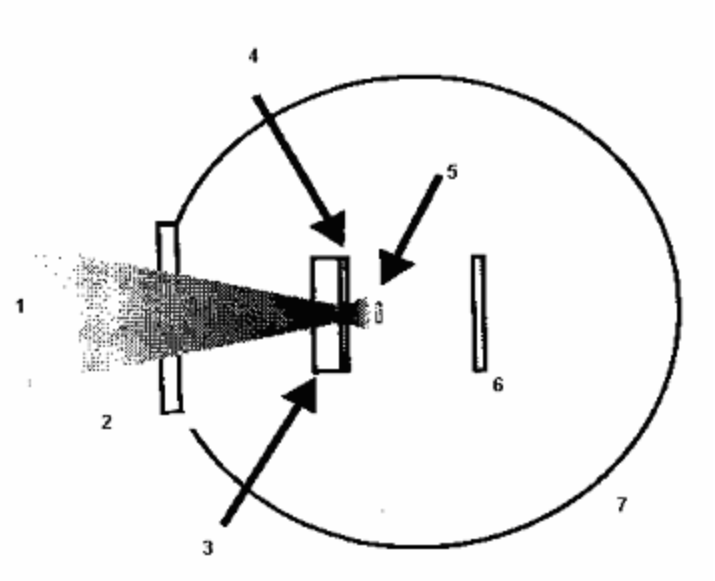



Рис. 5. Схема установки для лазерного метания частиц в вакууме:
1–сфокусированный лазерный луч; 2–входное окно; 3–подложка; 4–покрытие; 5–ускоряемая частица; 6 – образец; 7- вакуумная камера [17]

Лазерное метание в вакууме осуществляется с помощью импульсного неодимового лазера Nd: YAG с энергией 900 мДж при $t_{имп}$ ~ 4-6 нс, длина волны лазерного излучения, λ = 1064 нм, диаметр сфокусированного лазерного пятна на мишени 90 - 350 нм. Алюминиевая мишень

толщиной 5 мкм напылялась на кварцевое стекло толщиной 2 мм. Размер метаемых частиц был 3 – 25 мкм. На рис.6 показаны следы ударов на мишени частицами, ускоренными с помощью лазерного метания; мишень расположена на растоянии 5 см от источника частиц [17].

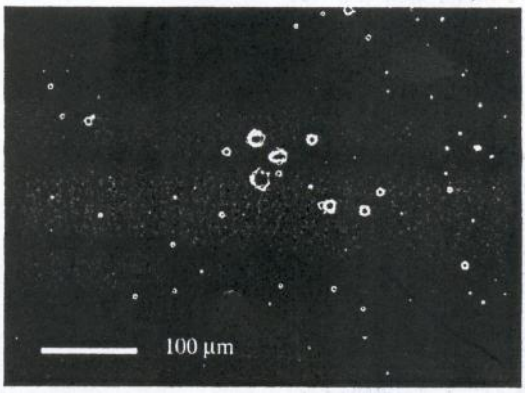



Рис.6. Следы ударов на мишени, ускоренных с помощью лазерного метания частиц из медной фольги; мишень расположена на расстоянии 5 см от источника частиц [17]

На рис.7 приведены типичные следы ударов микронных пластин, ускоренных лазерным метанием, на кварцевом стекле (слева) и медной фольге (справа) [17]

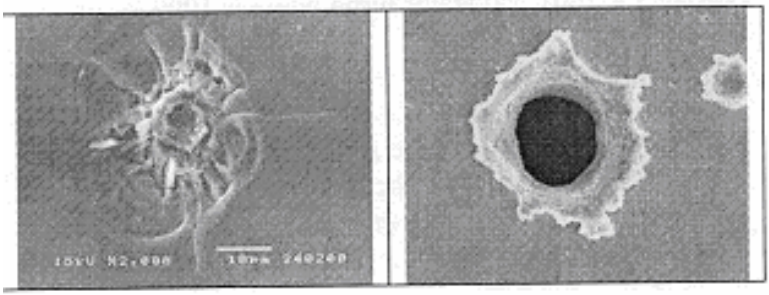


Рис.7. Типичные следы ударов микронных пластин, ускоренных лазерным метанием, на кварцевом стекле (слева) и медной фольге (справа) [17]

Для имитации удара микрометеоров используется также импульсное лазерное излучение.[4]. Однако необходимо учитывать, что лазерное излучение при равной плотности мощности на мишени (~$10^8$ Вт/см$^2$) при □~$10^{-8}$ с создает плазму более эффективно, чем удар ускоренной микрочастицы. В то же время лазерный импульс создает более низкий уровень механических разрушений. Хотя достоверная имитация удара микрометеорной частицы по поверхности СБ с помощью лазерного излучения затруднена, лазерные эксперименты позволяют получать много полезной информации.

**Исследование кратеров**

Исследование морфологии поверхности различных металлов и элементов СБ ИСЗ, находившихся под воздействием ударов микрометеоров и микронных частиц космического «мусора» проводилось, как на возвращаемых из космоса элементах ИСЗ «LDEF» (Long Duration Exposure Facility); космических станций «Мир», «МКС»; космического телескопа «Hubble», так и при воздействии ускоренных микронных частиц в лабораторных условиях [15,19-25]. На рис.8 показан микрометеорный кратер (1,8мм) на СБ Космического телескопа Хаббл [ 2] с зоной выброшенных осколков стекла. Центральное углубление локализовано в кремниевом элементе и окружено валом из клея.

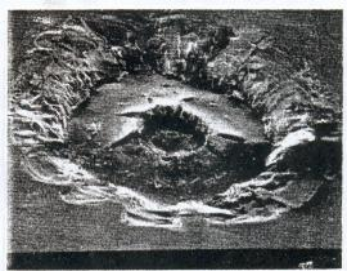


Рис.8. Микрометеорный кратер (1.8 мм) на солнечной батарее космического телескопа Хаббл [2]

На материалах, которые экспонировались на ИСЗ «LDEF» [21] в течение 5,77 лет на орбите высотой 470 км, было изучено 600 кратеров. Исследования показали, что соотношение P/D ~ 0,56-0,6, где P – глубина кратера, D – диаметр.

Зависимость D(v) имеет вид [21]:

$$D = Am^{\alpha}v^{\beta}, \text{ где } \alpha = 1{,}02;\ \beta = 0{,}7.$$

На рис.9 приведена зависимость D/d от скорости ускоренных частиц с диаметром d.

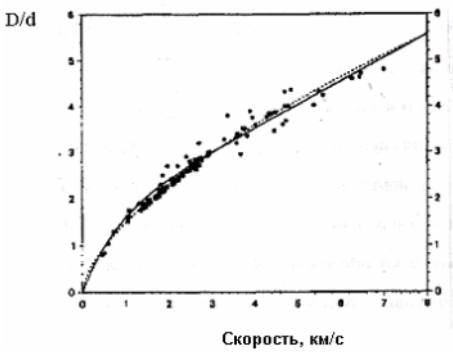



Рис. 9. Зависимость D/d от скорости ускоренных частиц [19]

Непрерывная и прерывистая кривые отражают модельные зависимости. Пунктирная кривая отображает взаимодействие сферических алюминиевых частиц с мишенью из Al.

Приблизительная эмпирическая формула проникновения частиц в материал, выведенная из исследования кратеров на материалах ИСЗ «LDEF», имеет вид [1]:

$$P = Km^{0,352} \rho_t^{1,667} v^{0,875}, \text{ где}$$

P – глубина проникновения частицы в материал, см; m – масса частицы, г; $\rho_t$ – плотность мишени, г/см$^3$; v – скорость, км/с; K – константа материалов.

Микрометеор массой 0,1 г при v = 71 км/с взаимодействует с солнечной батарей с силой эквивалентной удару пули [1]. Микрометеорные частицы с массой $10^6$ атомов имеют кинетическую энергию ~ 1 ГэВ.

В работах, посвященных изучению структуры кратеров на элементах СБ космической станции «Мир» [23-25] выявлены микрократерные поля значительно превышающие размеры основного кратера от удара микрометеора. Это явление, по-видимому, связано с диссипацией энергии ударной волны, возникающей в процессе соударения частицы, с поверхностными неоднородностями и дефектами мишени.

В условиях пребывания спускаемого модуля на поверхности Марса в период пылевой бури воздействующий на аппарат поток марсианской пыли ($SiO_2$~70%; $Al_2O_3$~15-20%) имеет скорость десятки м/с, а масса частиц - в интервале $10^{-3}$ – $10^{-8}$ г и выше [26-28]. Потенциал марсианского модуля, по-видимому, будет формироваться за счет экзоэлектронной

эмиссии различных диэлектрических материалов на его внешней поверхности. Другой аспект этого явления, как показали испытания на имитационном стенде (рис. 1), может быть связан с повышенной адгезией марсианской пыли на поверхности оптических материалов, т.к. ударное воздействие таких частиц сильно активирует бомбардируемую поверхность (рис. 10).



Рис.10. Адгезия микронных частиц на стекле при бомбардировке его частицами со скоростью 10-100 м/с на имитационном стенде [27] ($x10^4$)

В процессе облучения на имитационном стенде ускоренными частицами при v ~ 10-100 м/с коэффициент спектрального пропускания стекла понижается (рис. 11), а коэффициент яркости от адгезионных частиц за счет рассеянного излучения Солнца может повыситься на порядок[27].

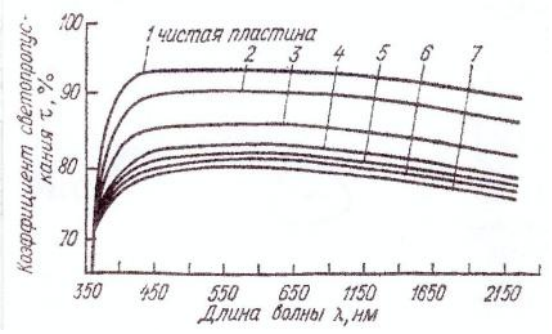



Рис. 11. Изменение коэффициента спектрального пропускания стекла в процессе бомбардировки потоком микрочастиц со скоростью 10-100 м/с. 1 – до облучения; после облучения 2- $Ф=10^{10}$ част/м$^2$; 3-$5\cdot10^{10}$ част/м$^2$; 4-$10^{11}$ част/м$^2$; 1-$1.5\cdot10^{11}$ част/м$^2$; 6-$2\cdot10^{11}$ част/м$^2$; 7-$3.5\cdot10^{11}$ част/м$^2$.

**Ударная плазма**

При ударе частиц космической пыли в материал внешней поверхности ИСЗ на образование плазмы затрачивается ничтожная доля их кинетической энергии. Например, при ударе по алюминиевой мишени частицы из карбида бора диаметром 70 нм, разогнанной на ускорителе до v=94 км/с, в кинетическую энергию ударной плазмы превращается около 2,9% кинетической энергии частицы [1, 29-31]. При ударе по алюминиевой мишени железной частицы с v=9 км/с доля энергии частицы, затрачиваемой в энергию эмитируемой плазмы, составляет лишь 0,1-0,2%.

Основная часть кинетической энергии микрометеоров тратится на образование кратера, испарение и ионизацию вещества мишени и микрометеора. Сгусток плазмы, образующийся в момент удара, может быть источником импульсной электронной и ионной эмиссии, светового и высокочастотного излучений. Это может создавать помехи оптическим датчикам и электронным приборам [1,32].

Из лабораторных экспериментов по взаимодействию ускоренных металлических микрочастиц (микрометеоров) с алюминиевой мишенью была получена эмпирическая формула по выходу импульсной электронной эмиссии [1], $Y_e$:

$$Y_e=10^{-0,88}m^{1,02}(v/5)^{3,48},$$

где m – масса ускоренной микрочастицы, г; v – скорость частицы, км/с.

В интервале скоростей бомбардирующих частиц 15-70 км/с наблюдается, что $Y_e > Y_i$, где: $Y_i$ – выход импульсной ионной эмиссии. Этот факт создает условия для возможности возникновения в момент удара микрометеора кратковременного скачка потенциала в локальной зоне на поверхности радиационно-заряженного диэлектрика внешней поверхности ИСЗ. Этот скачок потенциала не должен превышать 10 В. Выход импульсной, ионной эмиссии, $Y_i$, описывается формулой [1]:

$$Y_i = cm^{\alpha}v^{\beta},$$

где c; α; β – константы; β – имеют значения 3,5 – 4,74; α ~ 1.

Энергия эмитируемых ионов при ударе ускоренных частиц лежит в пределах 5 – 40 эВ [1,31].

На рис. 12 показан масс-спектр семи ионов, зарегистрированных при бомбардировке железной частицей по родиевой мишени. Ионы: $H^+$; $C^+$; $Na^+$; $K^+$ – связаны с загрязнением вакуумной системы; пик с массой 27 - по-видимому, Al [31].

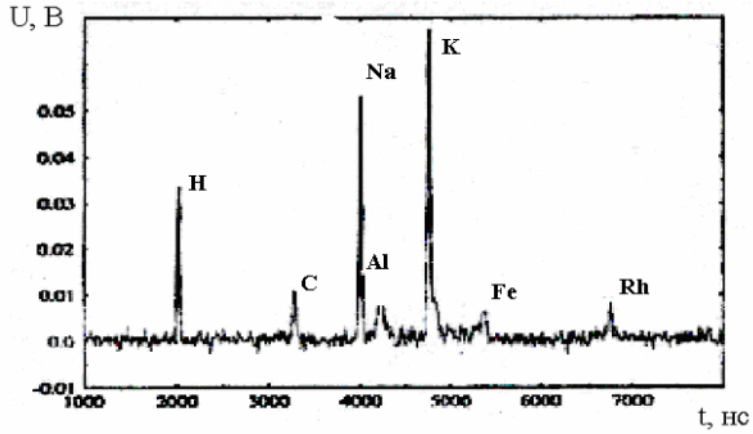



Рис. 12. Масс-спектр семи ионов, зарегистрированных при бомбардировке железной частицей по родиевой мишени. Ионы: $H^+$; $C^+$; $Na^+$; $K^+$ – связаны с загрязнением вакуумной системы; пик с массой 27 – по-видимому, Al [31]

Удар микрометеорита может спровоцировать вакуумный пробой высоковольтного оборудования, размещенного в открытом космосе на внешней поверхности ИСЗ [33-36]. По оценкам при скорости удара микрочастицы с v~3 км/с температура плазмы T~3000 K, а при v~40 км/с более T~10000 K [1].

Если микрометеорный удар возник на фронтальной поверхности солнечной высоковольтной батареи (U>120 В) космического аппарата, например МКС, в зоне расположения солнечных элементов с большой разностью потенциалов возможен импульсный электрический вакуумный пробой за счет распространения электронной лавины в приповерхностном облаке десорбированного с поверхности СБ газа и плазмы. При ударе частицы в СБ в ее слоистой структуре может произойти короткое замыкание, если U>100 В. Этот процесс связан с тем, что в зоне распространения ударной волны в слоистой структуре СБ импульсное давление за счет ударного сжатия может достигать 1-10 ГПа. При таких давлениях у диэлектрических и полупроводниковых материалов резко снижается удельное сопротивление [37-38]. На рис.13 приведена зависимость удельного сопротивления разных полимеров от давления.

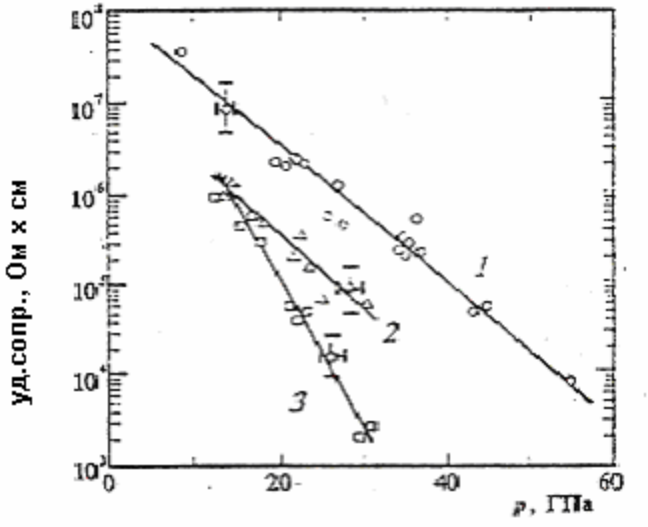



Рис.13. Зависимость удельного сопротивления от давления: 1-ударно-сжатого тефлона;2- в полиэтилене высокого давления; 3- полиэтилен низкого давления [37]

В процессе ударного сжатия диэлектриков и полупроводников ширина их запрещенной зоны уменьшается. Возникает процесс инжекции валентных электронов в сильных электрических полях, что может привести к снижению электрической прочности и, как следствие, - способствовать возникновению электрического пробоя в слоистой приповерхностной зоне СБ.

Например, наличие на борту геостационарных ИСЗ заряженного слоя в диэлектрических поверхностных материалах, образуемого электронами окружающей магнитосферной плазмы с энергией выше 1 МэВ и потоком менее энергичных ионов создает угрозу электрического пробоя внутри такого слоя при микрометеорном ударе, и разрушение этих материалов [1,38,39].

Есть основание предполагать, что телекоммуникационный ИСЗ-OLYMPUS (ESA) в ночь с 11 на 12 августа 1993 г. потерял ориентацию на геостационарной орбите и прекратил свое существование. Возможно, что это произошло в результате возникновения электрического пробоя радиационно-заряженной поверхности ИСЗ при ударе микрометеора в процессе взаимодействия ИСЗ с микрометеорным ливнем Персеид [40]. При механическом пробое микрометеором металлического экрана блока

микроэлектроники ИСЗ с тыльной стороны экрана может возникнуть эмиссия плазмы и облако пара из испаренного вещества экрана и микрометеора. Эти частицы могут воздействовать, например, на микросхему, и вывести ее из строя. Наблюдались случаи микрометеорного электроразрядного повреждения кабелей на поверхности ИСЗ [1].

При исследовании кометы «Галлея» в 1986 г. КА Вега-1 и Вега-2 (СССР) подверглись интенсивному воздействию потоков кометной пыли с $v_{max}$ ~ 78 км/с. Незащищенные СБ этих аппаратов потеряли более 50% электрической мощности. На рис.14 приведена обобщенная модельная зависимость повреждения незащищенных СБ КА Вега-1 и Вега-2 от флюенса кометной пыли, полученные на основании полетных данных [3]

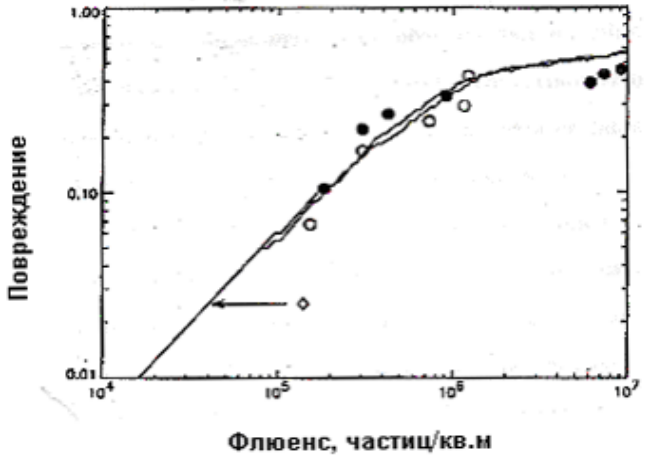



Рис. 14. Повреждения, связанные со снижением тока незащищенных СБ КА: Вега-1 (•); Вега-2 (о) в процессе бомбардировки частицами космической пыли от кометы «Галлея» в 1986 г. в зависимости от флюенса (частиц/м$^2$);. (♦)-КА-Джиотто (Япония) [3]

**Воздействие микрометеорных частиц на хрупкие материалы**

Хрупкие материалы, такие как оптические стекла, широко используются в космической технике (солнечные батареи, оптическое оборудование). В СБ эти материалы применяются в качестве радиационной защиты полупроводниковых фотопреобразователей [41]. На рис. 15 приведены элементы СБ Космического телескопа Хаббл ( HST ).

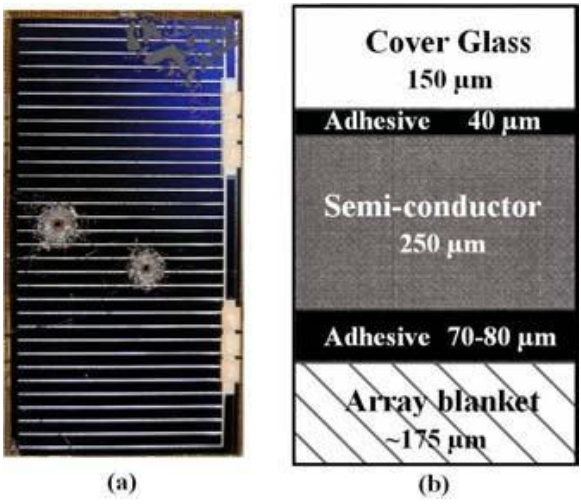



Рис.15 Элементы Космического телескопа Хаббл (HST) (a)-Фронтальная поверхность СБ после обстрела из легкой газовой пушки (MICA); (b) - упрощенное изображение сечения многослойной структуры СБ ; сверху-защитное покровное стекло; внизу-наружная оболочка СБ из композита между ними фотопреобразователь [41]

Площадь СБ космических объектов: «Космический телескоп Хаббл», «Международная космическая станция» (МКС) может достигать более 100 м$^2$. Анализ воздействия микрометеоров и частиц космического мусора на покровные защитные стекла СБ КА: HST, Мир, доставленных на Землю после эксплуатации их в течение 8-10 лет в космосе, позволяют понять механизм взаимодействия высокоскоростных макрочастиц (v~1-72 км/с) со стеклами и другими хрупкими материалами, а также процесс образования стеклянных осколков и инжекции их в окружающую среду.

В зоне удара высокоскоростных частиц о стекло возникает давление более 15 ГПа, стекло превращается в порошок, состоящий из микронных осколков. Объем осколков может в 100-1000 раз превышать объем ударяющей высокоскоростной частицы. На рис.16 приведены снимки, полученные при имитационных испытаниях СБ HST при воздействии высокоскоростных частиц [41

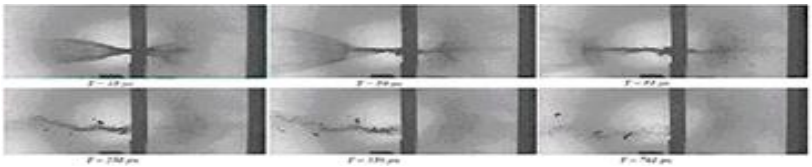


Рис.16. Снимки, высокоскоростной видеокамерой в разные промежутки времени при ударе шарика диаметром 500 мкм, при v ~3000 м/с, в поверхность СБ HST,удар справа [41]

. Ударные явления зафиксированы в разные промежутки времени с помощью высокоскоростной видеокамеры при ударе стального шарика диаметром 500 мкм при v~3000 м/с в поверхность СБ HST.

На рис.17 показан оптический микроскоп, используемый для сканирования солнечной батареи HST, анализа кратеров и повреждений на ее поверхности [42].

На рис. 18 показан кратер, обнаруженный на поверхности СБ HST с обширными периферийными разрушениями стекла . Эти разрушения расположены за пределами отверстия, диаметр которого составляет ~3мм [42].



Рис.17. Оптический микроскоп, для сканирования солнечной батареи HST и анализа кратеров и повреждений ее поверхности. СБ была в космосе в течение 8,25 лет [42]

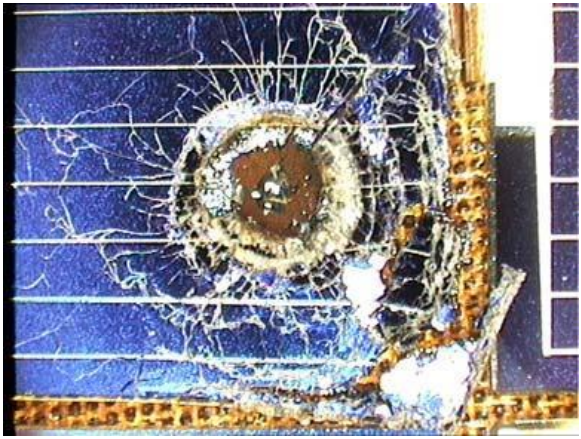


Рис. 18. Обширные периферийные разрушения стекла СБ HST [42]

Проведенные исследования свидетельствует о важности генерации частиц космического мусора, учитывая возрастающую площадь СБ КА. По оценкам [41] в течение 1997-2002гг. полный объем раздробленного стекла, инжектируемого из кратеров СБ HST был равен 1530 мм$^3$.Если предположить, что средний размер осколка ~ 50 мкм, то за время полета КА HST в течение 8,25 года, количество инжектируемых частиц в окружающую космическую среду будет более 20000000. Эти частицы некоторое время ($10^3$-$10^5$с) сопровождают КА в виде пылевого облака в составе собственной внешней атмосферы КА, создавая оптические помехи в астронавигационном оборудовании, из-за переотражения солнечного света. Постепенно диффундируя в окружающую среду эти осколки могут стать заметной составляющей космического мусора на орбите.

## 11. ВОЗДЕЙСТВИЕ СОБСТВЕННОЙ ВНЕШНЕЙ АТМОСФЕРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ИХ МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

При функционировании в околоземном и межпланетном пространстве космические аппараты (КА) создают вокруг себя собственную внешнюю атмосферу (СВА), образующуюся из-за дегазации и сублимации конструкционных материалов, особенно внешних поверхностей, неизбежных утечек газа из гермоотсеков, выхлопных продуктов реактивных двигателей, а также различного рода пылевых частиц. Причем часть

молекул, атомов и пылинок собственной атмосферы КА находится в заряженном состоянии. Характеристики ионно-газо-пылевой атмосферы зависят от активности различных агрегатов КА, работа которых связана с выбросом массы или механическими возмущениями обшивки корабля.

Продукты СВА КА довольно долго сопровождают его в полете, образуя облако газа и частиц, которое рассеивает солнечный свет, что может мешать ориентации корабля, регистрации неярких источников света, а также наблюдениям рассеянного ультрафиолетового излучения Солнца. Крупные пылевые частицы могут рассеивать свет Солнца иметь яркость, сравнимую с яркостью звезд первой величины. Помимо этого ионы, атомы и молекулы СВА , осаждаясь на внешних поверхностях КА, сильно изменяют физические свойства последних. Особенно чувствительны к загрязнениям оптические поверхности (иллюминаторы, внешние линзы телескопов, бленды, терморегулирующие покрытия и др.), электрические устройства, солнечные элементы. СВА КА превратилась в серьезную проблему физики и техники космических полетов [1-4].

**Источники собственной атмосферы и ее распределение вокруг КА.**

Источником собственной атмосферы КА является потеря массы. Так на космическом корабле (КК) «Аполлон» двигатели периодически (через каждую треть часа) выбрасывали 0,2 кг ракетного топлива, а через каждые 12 ч – 17 кг отработанных отходов[1,2]. При продувках расходных магистралей мощных двигателей в вакуум сбрасывалось около 10 кг ракетного топлива за одну секунду.

На частицы СВА КА действуют силы аэрокосмического торможения остаточной атмосферы Земли, давление солнечного ветра, давление света, электростатические и электромагнитные, а также гравитационные силы. В системе координат, связанной с КА, эжектируемая сферическая частица радиуса r может быть охарактеризована двумя компонентами скорости: в направлении против тормозящей силы V и в направлении перпендикулярной ей W (рис. 1)[1,2].

При полете КА на низких орбитах (300-500 км.) доминирует аэродинамическое торможение частиц СВА, а на синхронных ($h=3{,}6x10^4$ км) и межпланетных орбитах важно давление солнечного света и солнечного ветра.




Рис.1. Схематическое изображение собственной внешней атмосферы КА на расстояниях, превышающих размеры КА [1,2]

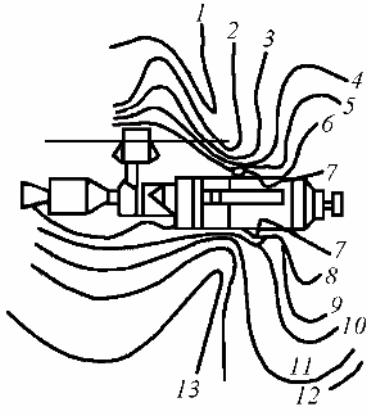



Рис.2. Линии равной плотности, ρ, г /см$^3$ , СВА КК «Скайлэб»:1; 13;-3x10$^{-13}$; 2; 12;-6x10$^{-13}$; 3; 11;-1x10$^{-12}$; 4;- 1,8x10$^{-12}$; 5; 6; 9;- 3x10$^{-12}$; 7;-1x10$^{-11}$; 8;- 6x10$^{-12}$; 10;-1,8x10$^{-12}$; 11;- 1x10$^{-12}$; [1,2]

При начальной скорости выброса частиц с $v_o$ = 7 м/с и радиуса r = 100 мкм характерное время пребывания их в СВА КА на высоте h = 160 км, t ~ 17 с, при h = 320 км, t ~400 с, при h = 3,6x$10^4$км, t ~2x$10^5$ с. Характерные размеры облака частиц СВА могут достигать сотни метров [1,2].

При наличии аэродинамического торможения значительная часть облака выбрасываемых продуктов износа КА будет сопровождать объект на большие расстояния. Однако на распределение плотности СВА непосредственно вблизи КА основное влияние оказывает истечение массы с самого корабля. На рис.2 приведен профиль линий равной плотности собственной атмосферы около космического корабля (КК) «Скайлэб» [1,2].

Плотность частиц СВА КА непостоянна во времени. На рис.3 приведена временная зависимость давления паров воды в СВА КА-Midcourse Space Experiment (MSX). КА MSX запущен на круговую орбиту, угол наклона $99^0$, высота 904км, 24.06.1996г. [5-8].

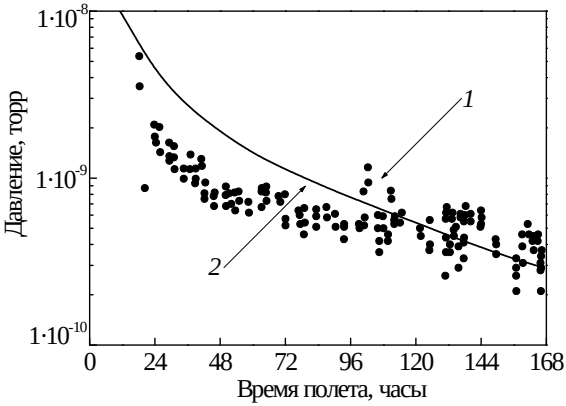



Рис.3 Временная зависимость давления паров воды в СВА около поверхности КА «MSX» в течение первой недели полета, • 1 – регистрация с помощью квадрупольного масс-спектрометра для нейтральных частиц 2 – модель, предсказывающая давление паров воды в процессе обезгаживания КА [5]

На рис.4 приведена временная зависимость давления в различных отсеках космического телескопа Хаббл (Hubble Space Telescope-HST) [9].

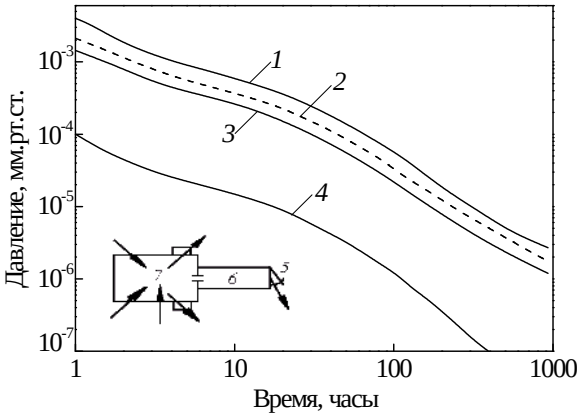



Рис.4. Полное давление в отсеке космического телескопа Хаббл с измерительной аппаратурой телескопа при открытом и закрытом люке: 1- люк открыт в отсеке с измерительной аппаратурой; 2- в районе телескопа, люк закрыт; 3- в отсеке с измерительной аппаратурой, люк открыт;4- в районе телескопа, люк открыт. 5- люк; 6- телескоп; 7- отсек с измерительной аппаратурой [9]

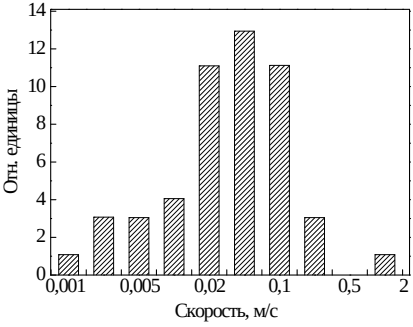



Рис.5. Распределение скоростей микронных частиц размеров относительно КА в течение первого года полета КА «MSX» [6]

На рис.5 и 6 представлено распределение скоростей частиц СВА и их размеров в течение первого года космического полета относительно КА.

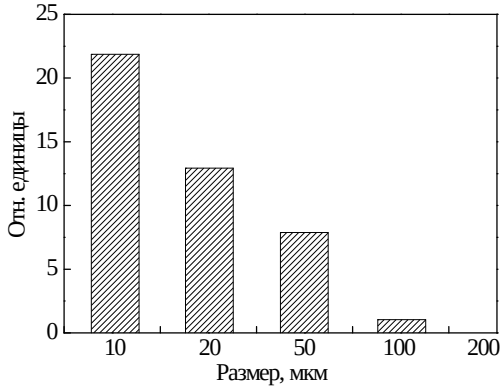



Рис.6. Распределение частиц по размерам около поверхности КА «MSX» [6]

На рис.7 представлена временная зависимость усредненного числа частиц за минуту, попадающих в поле зрения оптического датчика около поверхности КА «MSX» при полете в течение года [6].

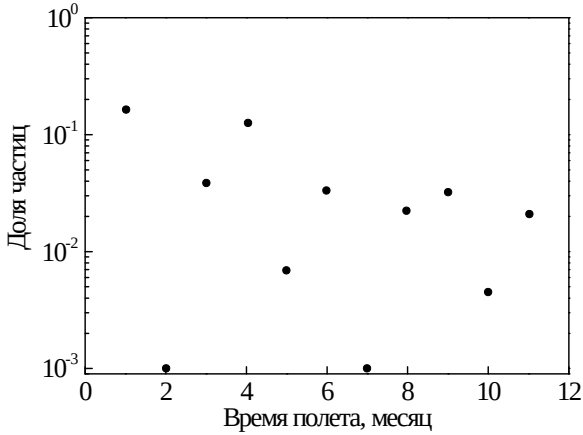



Рис.7. Временная зависимость усредненного числа частиц за минуту, попадающих в поле зрения оптического датчика около поверхности КА «MSX» при полете в течение года [6]

При использовании на борту КА плазменных и ионных ракетных двигателей возникают условия для загрязнения внешних поверхностей соседних устройств, например солнечных батарей, продуктами распыления материалов от струй двигателей. Одновременно эти продукты будут попадать в облако СВА [10-12].

**Методы изучения влияния продуктов СВА на материалы КА**

При космическом полете и при испытании в экспериментальных имитационных камерах на поверхности оборудования КА (зеркальные поверхности, оптические элементы и т.д.) оседают потоки молекул и твердых микрочастиц, выделяющихся из конструкционных материалов, оборудования, которые загрязняют поверхности, изменяют их рабочие характеристики. Образующаяся вокруг КА СВА, имеет состав, резко отличающийся от состава верхней невозмущенной атмосферы Земли.

Состав СВА различен в условиях космического полета и при испытании в имитационной вакуумной камере из-за технологических загрязнений последней. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке влияния воздействия продуктов СВА на работоспособность аппаратуры.

Для качественного и количественного анализа загрязняющих соединений СВА, выделяющихся при дегазации различных космических материалов и других источников, во время проведения испытаний на воздействие эксплуатационных условий, применяются следующие методы [9,13]:

- масс-анализ остаточных газов СВА;
- инфракрасная спектроскопия продуктов СВА;
- измерение ультрафиолетовой отражательной способности эталона;
- регистрация массы загрязняющей пленки с помощью высокочастотного кварцевого резонатора (кварцевые микровесы);
- регистрация флуоресцентного рентгеновского излучения от пленки загрязнений;
-хромато-масс-спектрометрия и термодесорбционная масс-спектрометрия.

При испытании КА на воздействие эксплуатационных условий может оказаться необходимым применение всех перечисленных методов.Особо важно отметить эффективность применения высокочастотного кварцевого резонатора ( кварцевые микровесы), благодаря их высокой чувствительности. Для кварцевых микровесов с основной резонансной частотой кварцевого резонатора; f=16 Мгц, $dm=df/B=2x10^{-7}$ df/кгц [9,13], где dm-приращение массы пленки на поверхности электрода открытого кварцевого резонатора, df-изменение основной резо-

нансной частоты кварцевого резонатора. В-константа, зависящая от типа среза кристаллического кварца. С помощью кварцевых микровесов можно регистрировать приращение массы пленки на электроде резонатора ~$10^{-9}$г/см$^2$.

**Внешнее загрязнение КА**

Модель внешнего загрязнения КА основывается на том, что весь процесс – это простой классический перенос масс в специализированных условиях. Химический анализ загрязняющих осадков на образцах, помещенных на внешних поверхностях КА в открытом космосе, дает возможность определить пути и способы переноса загрязняющих материалов, и механизмы их осаждения.

Из анализа загрязнений, полученных на американском КК «Аполлон» [1,2], следует, что 97% общей массы осадков на иллюминаторах дают четыре основных источников загрязнений: 1) абляционный материал горловины сопла ракетного двигателя; 2) примеси ракетного топлива; 3) отходы жизнедеятельности людей; 4) компоненты слива системы запуска двигателя.

К второстепенным источникам загрязнения относятся поверхностная дегазация, сублимация красок, припоев и различных материалов поверхности КА, утечка атмосферы из гермоотсека что дает 2-3% массы загрязнений. Однако оптические поверхности приборов на таких космических станциях, как «Скайлэб», более чувствительны к незначительным загрязнениям, чем иллюминаторы КК «Джемени» и «Аполлон».

Перенос газообразных загрязнений от источника на внешние поверхности корабля может в значительной мере определяться их фотоионизацией с последующим отклонением ионов электростатическими полями, присутствующими как на всем КА, так и локально на его внешних диэлектрических поверхностях (стекло, керамика и др.)

Оседание газа на поверхностях определяется его давлением и коэффициентом аккомодации данного газа поверхностями КА. Оседание заряженных или поляризованных частиц на проводящие поверхности корабля отличается от их оседания на диэлектрические поверхности (иллюминаторы, линзы, терморегулирующие покрытия) из-за влияния электростатических сил. На рис.8 показано загрязнения металлических электродов кварцевых резонаторов при обезгаживании ИСЗ «OGO-6» в течение полета.

Измерялась скорость загрязнения поверхностей при дегазации, а также скорости их очищения за счет распыления и десорбции от ионосферных частиц в течение шести месяцев пребывания станции на орби-

те с высотой от 400 до 1100 км [1,2].

Загрязнение измерялось высокочастотными кварцевыми резонаторами с алюминиевыми и золотыми электродами [1,2]. Низколетучие компоненты дегазации после 72 ч пребывания станции в космосе составляли основной поток дегазирующих элементов. Скорость оседания загрязнений составляла $10^{-9}$ кг/м$^2$.с, что при молекулярном весе 200 дает плотность потока дегазации около борта КА примерно $3x10^{15}$ частиц/м$^2$.с. Главным источником этих загрязнений были освещаемые Солнцем и попадающие в поле зрения датчиков панели солнечных батарей.

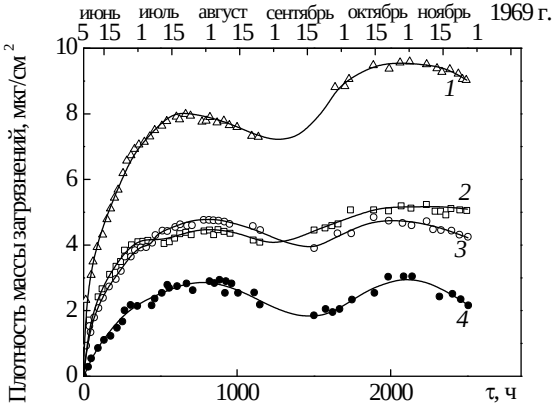



Рис.8. Загрязнение поверхностей металлических электродов кварцевых резонаторов, регистрируемое при обезгаживании ИСЗ «0G0-6» в течение полета для различных условий. 1,2 – поверхности Al и Au, установленные нормально к потоку частиц от КА и верхней атмосферы; 3 – поверхность Au, установленная нормально к потоку частиц от КА и экранированная от частиц верхней атмосферы; 4 – поверхность Al, поставленная под углом 14$^o$ к потоку частиц КА и верхней атмосферы[1,2]

Постоянная времени экспоненциального уменьшения дегазации низколетучих материалов составляет около 1000ч. Максимум величины загрязнения, адсорбированного поверхностями, не защищенными от прямого потока дегазации, достигался после пяти месяцев пребывания станции на орбите и был $10^{-4}$ кг/м$^2$ для алюминиевой поверхности и $5x10^{-5}$ кг/м$^2$ для золота (рис.8). Поверхностные загрязнения очищались десорбцией со скоростью ~ $10^{-12}$ кг/м$^2$.с и распылялись под удара-

ми атомов и ионов верхней атмосферы Земли со скоростью $2x10^{-12}$ кг/м$^2$.с (рис.8)[1,2].

Основным источником загрязнения внешних поверхностей КК «Скайлэб» долгоживущими осадками служила дегазация неметаллических покрытий и продукты выхлопа ракетных двигателей [1,2]. На станции имелось около 195 различных неметаллических материалов, подвергавшихся воздействию вакуума, общей площадью 23200 м$^2$. Скорости их дегазации при температурах 50-125$^o$C, определенные из дополетных испытаний, находились в области $5x10^{-10}$-$1,1x10^{-7}$ кг/м$^2$.с. Эти величины соответствуют скорости почти стационарного состояния, имеющего место после высокой начальной скорости дегазации поверхностно-адсорбированных компонент ($H_2O$, $O_2$ и др.) и диффузии высоколетучих компонент из объема материала.

За 84 дня экспозиции толщина осевших на иллюминаторах КК «Аполлон» загрязнений была 1,7 мкм, а на фольге – 1-1,4 мкм; причем инфракрасный анализ показал, что пленка на иллюминаторах состоит из дегазантов терморегулирующего белого покрытия, которое преобладает среди неметаллических материалов в поле зрения данного иллюминатора. После 120 дней экспозиции уровни осаждения загрязняющих веществ на выбранных поверхностях КК «Скайлэб» превышали $5x10^{-4}$ кг/м$^2$. При этом надо учесть, что на станции специально для уменьшения осаждения загрязнений использовалась система двигателей ориентации и стабилизации, работающая на сжатом газообразном азоте, а высокочастотные кварцевые резонаторы, показывающие в этот раз наибольшее загрязнение, были расположены в тени от станции. Поэтому они не зафиксировали максимум осаждений, который обычно бывает на поверхностях КА, освещаемых Солнцем и оказавшихся в непосредственной близости от двигателей ориентации стыковочного модуля «Аполлон», в поле зрения которых попадают конструкции станции (например, солнечные панели телескопа). Наибольшие загрязнения от продуктов выхлопа ракетных двигателей имело место во время стыковки транспортного КК «Аполлон» с космической станцией «Скайлэб». При этом скорость нарастания осаждений на датчиках космической станции, обращенных в сторону источника загрязнений, т.е. в сторону «Аполлона», оказалась $6,8x10^{-11}$ кг/м$^2$.с. Ракетные двигатели корабля работали на жидком двухкомпонентном топливе – монометилгидразине (ММГ) с окислителем – четырехокисью азота ($N_2O_4$). Деградация белых терморегулирующих покрытий, связанная с увеличением их коэффициента поглощения солнечного излучения, $\alpha_s$, объясняется главным образом взаимодействием ультрафиолетового излучения Солнца со слоем загрязнения , толщина которого была 0,5 мкм за 131 день экспозиции.

Наблюдения астронавтов [1,2] подтвердили, что все облученные Солнцем белые поверхности на внешней стороне КК «Скайлэб» изменяли свой цвет на различные оттенки желтого и коричневого, причем, даже те белые краски которые не деградируют сами по себе под действием солнечного облучения. На поверхностях, не подвергавшихся воздействию солнечного света (заэкранированных), не наблюдалось значительного изменения цвета даже при наличии на них, осевших загрязняющих веществ.

Наряду с нарастанием загрязнений, из-за осаждения на внешних поверхностях КА продуктов собственной атмосферы, одновременно происходит очищение поверхностей за счет десорбциии и распыления от ударов атмосферных частиц, в первую очередь, ионов и атомов кислорода. В процессе плазменного травления материалов под действием кислородной плазмы верхней атмосферы Земли, образуются летучие газообразные продукты. Увеличение температуры внешних поверхностей КА резко ускоряет десорбцию загрязнений, а одновременное воздействие ультрафиолетового излучения Солнца приводит к крекингу углеводородных загрязнений, образуя плотную пленку загрязнений, скорость десорбции которой резко падает. Итак, наряду с оседанием загрязнений на поверхностях КА происходит их естественное очищение. Толщина пленки загрязнений на внешних элементах кораблей находится в динамическом равновесии, что наглядно видно из рис.8.

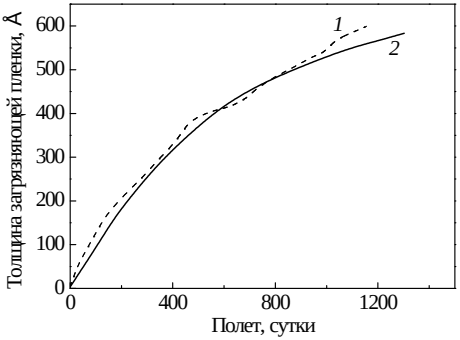



Рис.9. Скорость образования загрязняющих пленок от СВА на чувствительных поверхностях космического телескопа HST; 1 – эксперимент, 2 – аппроксимация [9]

На рис.9 показана временная зависимость изменения толщины загрязняющей пленки на чувствительных поверхностях космического те-

лескопа Хаббл ( HST) [ 9 ] в течение полета.

Увеличение прироста коэффициента поглощения солнечной радиации,αs, кварцевых зеркал в условиях полета на геосинхронной орбите определяется загрязнением их внешней поверхности. Вклад в изменения коэффициента ,$\alpha_{s,}$ от потоков электронов, протонов мал. и его можно не учитывать. На рис.10 приведены временные зависимости,$\alpha_s$ (t), деградации кварцевых зеркал, полученных во время полета различных ИСЗ США [14]. На базе этих экспериментов рекомендована обобщенная зависимость, $\alpha_s$(t),-(1) кварцевых зеркал геосинхронных ИСЗ.

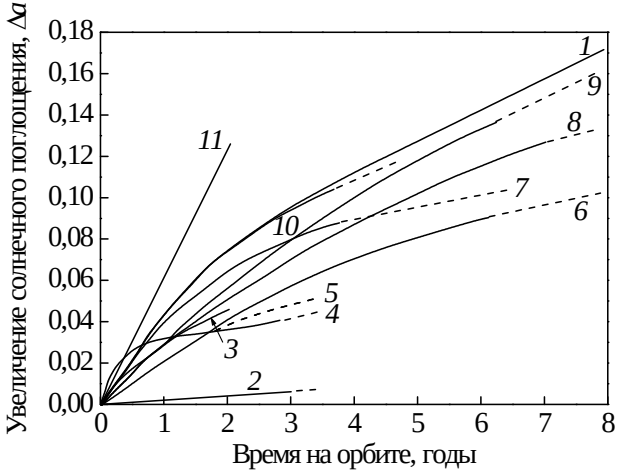



Рис.10. Прогнозируемая временная зависимость деградации кварцевых зеркал, связанная с ростом их коэффициента поглощения, $\alpha_s$, для нескольких геосинхронных ИСЗ.;(1)-рекомендуемая обобщенная зависимость, $\alpha_{s(t),}$ для кварцевых зеркал геосинхронных ИСЗ [14]. Зависимости получены на ИСЗ: 2,4 – SCATHA; 5 – COMSTAR; 6-SAX; 7-FLTSATCOM F-1; 8-INTELSAT IV; 9- INTELSAT IVA; 10 – OTS-2; 11-GPS NAVSTAR [14]

Поверхностное загрязнение 60 образцов различных материалов было исследовано на космической станции «Мир» в течение 997 суток в период 21.09.1993 – 13.06.1996 [15]. Основные результаты эксперимента следующие:

-Скорость оседания загрязнений на образцы разных материалов с помощью высокочастотных кварцевых резонаторов такова:

$0{,}5x10^{-10}$ г/см$^2$.с- в период 31.08.1995 – 08.09.1996; $1x10^{-12}$ г/см$^2$.с- в период 08.09.1995 – 26.12.1995; $0.1x10^{-12}$ г/см$^2$.с- в период 26.12.1995 – 26.12.1996;

-Толщина загрязнений колебалась от 2 нм до 100 мкм, площадь загрязнений от нескольких десятков квадратных см. до сотен квадратных мкм; основной элемент загрязнений – кремний.

На рис.11. приведено спектральное отражение белой эмали ЕР-140.

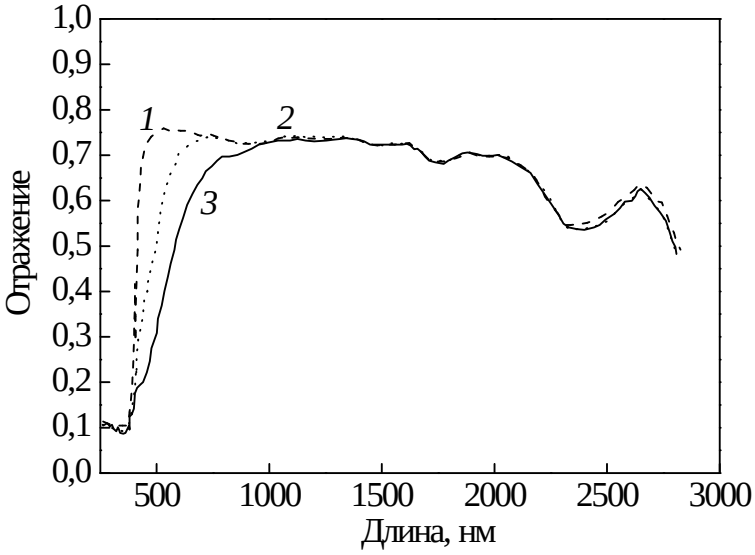



Рис.11 Спектральное отражение белой эмали ЕР-140; 1.-исходное, $\alpha_s$ =0,342; 2-среднее загрязнение- $\alpha_s$= 0,401; 3- значительное загрязнение $\alpha_s$=0,470 [15].

На рис.12 показано изменение оптических свойств поверхности анодированного оксида хрома (dε и dα) в зависимости от толщины пленки загрязнений [16]. Из рис.12 видно, что имеется пороговая толщина (п.т.) ~17 нм, ниже которой изменения оптических свойств материала не регистрируется.

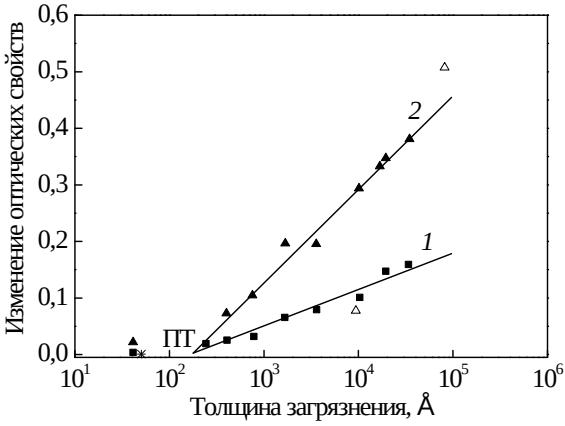



Рис.12. Изменение оптических свойств панелей СБ в зависимости от толщины пленки загрязнений . 1- изменение коэффициента излучения, dε ; 2- изменение коэффициента поглощения , dα - пороговая толщина. [16]

На рис.13 приведено распределение загрязняющих элементов Si и Ti, полученное на фронтальной стороне образца, полученное с помощью метода обратно-рассеянных электронов (BSE) [15].

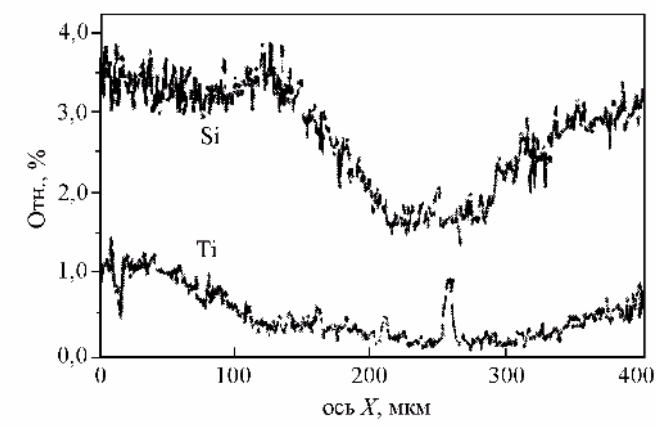



Рис.13. Распределение загрязняющих элементов Si и Ti на фронтальной стороне образца, полученное с помощью метода BSE [15]

**Свечение собственной атмосферы КА**

Нарушения работоспособности оптических приборов КА могут вызываться увеличением светового фона из-за свечения СВА КА при срабатывании реактивных двигателей ориентации и стабилизации, часто работающих на сжатом газе, который, выходя из сопла двигателя, расширяется в вакуум. При этом могут возникать условия, когда часть расширяющегося газа превращается в жидкие капли или кристаллики. Основная доля струи остается в газообразном состоянии и представляет собой конус, плотность газа в котором уменьшается от оси к его периферии и от вершины конуса к его оси.

На молекулы газовой струи ракетного двигателя падает световое излучение Солнца, электроны и протоны солнечного ветра или радиационных поясов Земли. Под воздействием этих излучений молекулы газа в струе возбуждаются, а поскольку плотность газа в струе мала и столкновений почти не происходит, то это возбуждение снимается в основном при переизлучении возбужденных молекул газа в виде света. Причем это переизлученный свет распространяется во все стороны с почти равной интенсивностью. Таким образом, может быть так, что хотя прямой свет Солнца и не попадает на объектив какого-либо прибора (назовем его телескоп), но переизлученный молекулами газовой струи свет может попасть на него. На рис.14 показано рассеяние солнечного света на СВА «Аполлон», а на рис15 изображено рассеяние солнечного света на частицах выхлопных струй двигателей ориентации КК «Аполлон» [1,2].

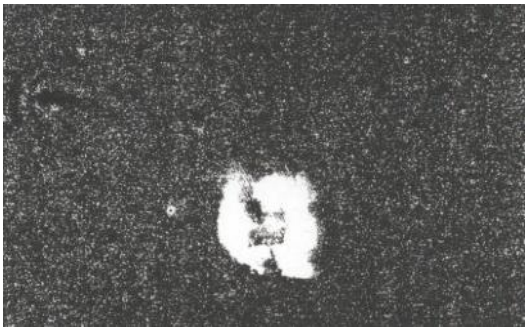


Рис.14. Рассеяние света Солнца на СВА КК «Аполлон» [1,2].

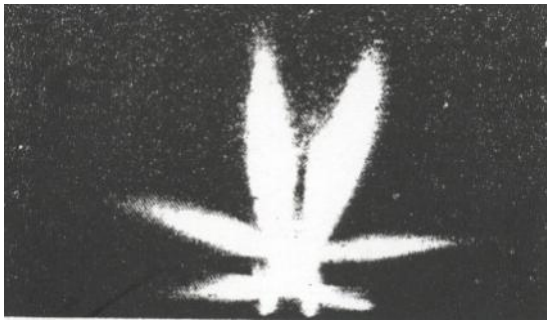


Рис.15. Рассеяние света Солнца на частицах выхлопных струй двигателей ориентации КК «Аполлон» [1,2].

В виде примера приведем оценку свечения струи азота от реактивного двигателя со сжатым газом. Расход газа в двигателе $R = 10^{-2}$ кг/с, ось зрения телескопа и ось газовой струи параллельны; расстояние между соплом и объективом телескопа b = 1 м. Расчет дает [1,17] следующие величины относительной яркости $B/B_o$ свечения струи газообразного азота в спектральном диапазоне 300-600 нм: $8x10^{-16}$ – от молекулярного рассеяния света от струи азота под углом $90^0$; $5x10^{-13}$ – от флуоресценции струи азота; $5x10^{-14}$– от свечения азота под воздействием протонов солнечного ветра; $5x10^{-13}$ от свечения азота под воздействием электронов солнечного ветра. Здесь $B_o$ – средняя яркость солнечного диска. Поэтому общая относительная яркость свечения газообразного азота при выбранных параметрах и его расположении на КА соответствует:$B/B_o = 10^{-12}$ [1, 17]. В работах [1,17] оценено рассеяние света от капель или кристалликов, зарожденных в расширяющейся струе азота. При этом размер всех капель оказывается больше критического, а наиболее вероятный радиус их близок к максимальному.

В этом случае максимальный радиус капель оценивается в $8x10^{-9}$ м и конденсируется примерно 10% общей массы азота, при этом масса капли будет равна $1,7\times10^{-21}$ кг. Средняя относительная яркость рассеянного солнечного света на сконденсировавшихся каплях азота в спектральном интервале 300-600 нм с углом $\theta=90$ составляет: $B/B_o = 4x10^{-12}$. Суммируя относительные яркости молекулярного свечения азота и рассеянного солнечного света от сконденсировавшихся капель, получаем в направлении, перпендикулярном к направлению на Солнце:

$$B/B_o = 5x10^{-12}\ [1, 17].$$

Приведенный пример ясно показывает, что при постановке экспериментов на борту КА по спектральному определению плотности межпланетных или межзвездных элементов необходимо учитывать влияние СВА КА.

## 12. ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК ПРИ РАДИАЦИОННОЙ ЗАРЯДКЕ

Различные изоляционные материалы: композиты, керамики, стеклянные волокна, стекла используются в сверхпроводящей магнитной системе международного управляемого термоядерного реактора (ТЯР) типа ИТЕР и подвергаются воздействию нейтронов, гамма-излучения и электронным потоком. На рис.1 приведена схема термоядерного реактора ИТЕР [1].

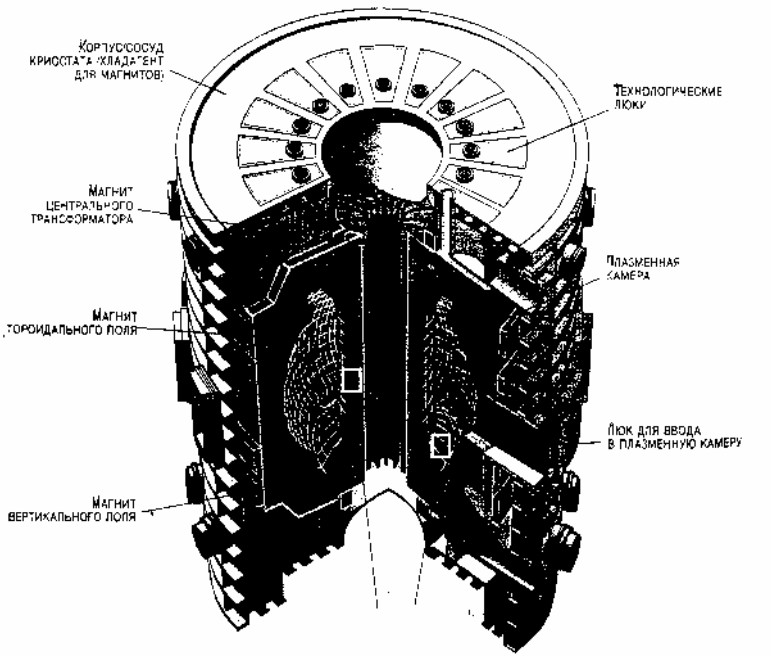



Рис.1. Схема термоядерного реактора ИТЕР [1]

Материалы первой стенки и дивертора ТЯР будут также подвержены воздействию потоков частиц, возникающих при термоядерных реакциях в плазменном шнуре ТЯР при T~100 Млн. К.: T+D=He (3,5 Мэв) +n(14,1МэВ). При взаимодействии нейтронов с материалами ТЯР возникает гамма-излучение, которое может инициировать за счет комптон-электронов внедренный заряд в диэлектриках, используемых в тепловой и электрической изоляции сверхпроводящих магнитов, и таким образом создавать условия для накопления в их объеме высоких электрических полей, приводящих к электрическому пробою. При срыве плазмы возникает электронное излучение с энергией в сотни МэВ. Материалы первой стенки и дивертора подвержены также ионному распылению. На рис.2 приведена фотография элементов первой стенки термоядерной установки JT-60U [2].

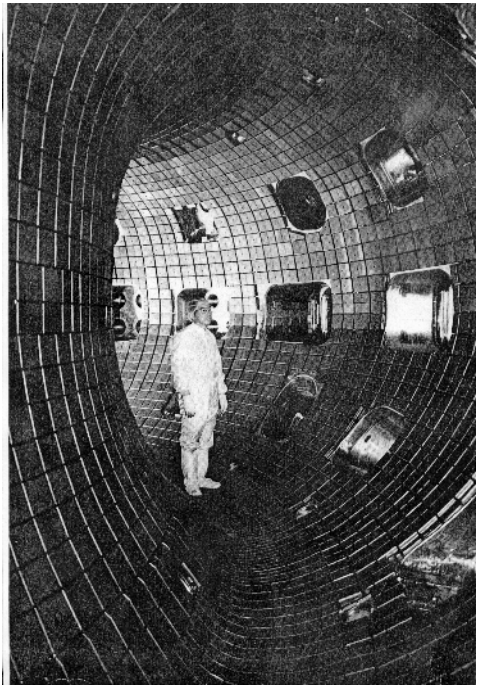


Рис.2. Фотография элементов первой стенки термоядерной установки JT-60U [2]

Проведенные имитационные эксперименты с оптическими стеклами при T=77K показали опасность радиационной электризации в условиях функционирования диэлектрических материалов, используемых в криогенных сверхпроводящих магнитах ТЯР [3,4].

Такие материалы при облучении электронным излучением в интервале энергий 2-8 МэВ при T=77K, при флюенсах, сопоставимых с реальными условиями эксплуатации, подвергаются радиационной электризации. Образовавшийся в объеме облученных материалов внедренный электронный заряд создает в их объеме сильные электрические поля с E~1-2 МВ/см. Электрическая прочность диэлектриков при криогенных температурах повышается по сравнению с комнатной. В процессе последующего отогревания радиационно-заряженных диэлектрических материалов наблюдались многочисленные электрические пробои как на поверхности, так и в объеме при T~200-300 K. На рис.3 показано изменение во времени интенсивности разрядных световых вспышек в процессе отогревания стекла, облученного электронами. На рис.4 показано свечение электрических разрядов при пробое радиационно-заряженного стекла после его облучения электронами и последующего отогревания.

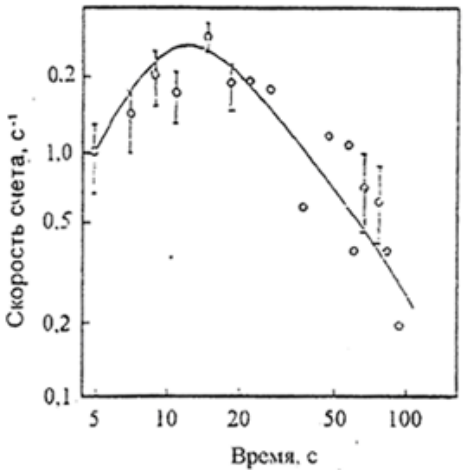



Рис.3. Изменение во времени интенсивности разрядных световых вспышек в процессе отогревания стекла, облученного электронами [2]



Рис.4. Свечение электрических разрядов при пробое радиационно-заряженного стекла после его облучения электронами и последующего отогревания [2]

Эти разрядные явления могут нарушить структуру реальных изоляционных материалов сверхпроводящей магнитной системы ИТЕР в процессе профилактических работ, когда криогенная система реактора отключается с целью устранения радиационных дефектов в медной стабилизирующей шине сверхпроводящей обмотки с помощью термоотжига.

Криогенные жидкости, например, жидкий азот - неотъемлемая часть любой криосистемы ядерно-физических установок. У этих жидкостей хорошие диэлектрические характеристики и они также подвержены радиационной электризации, однако, ее характер отличен от электризации твердых диэлектриков. Распределение радиационного заряда в их объеме в значительной степени связано с переносом его газовыми пузырьками или процессом прилипания термолизованных электронов к молекулам азота.

Наблюдались случаи электроразрядного повреждения защитных стекол, используемых в оптических окнах "горячих" радиохимических лабораторий. Этот процесс был связан с накоплением в их объеме нескомпенсированного электрического заряда при поглощении гамма и электронного излучений от перерабатываемых радиоактивных препаратов.

## ЛИТЕРАТУРА

### 1


1. Акишин А.И. Ионная бомбардировка в вакууме –М.: Госэнергоиздат, 1963,141 с.
2. Акишин А.И., Васильев С.С, Вернов С.Н., Николаев В.С., Теплов И.Б. О некоторых вопросах имитации и моделирования космической радиации в лабораторных условиях. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н. Вернова. - М.: НИИЯФ МГУ, 1964, с.375-409
3. Акишин А.И., Васильев С.С., Вернов С.Н., Николаев В.С., Теплов И.Б.Некоторые вопросы имитации космического корпускулярного излучения. Сб. трудов «Материалы для космических летательных аппаратов» М. ВИАМ.1964,с.9-24.
4. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.С., Вернов С.Н., Николаев В.С., Теплов И.Б. Моделирование радиационного воздействия. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н. Вернова, т.2.- М.: НИИЯФ МГУ 1966, с. 9-65
5. Акишин А.И., Нусинов М.Д., Сухнев В.А. Имитация космических условий при испытании непилотируемых аппаратов. // Вопр. ракетн. техн., М. Мир. 1966, №10, с.11-25, №11, с.15-32.
6. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.С, Вернов С.Н., Николаев В.С., Теплов И.Б. Моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и аппаратуру космических объектов. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н.Вернова, т.2.- М.: НИИЯФ МГУ, 1968, с.3-41
7. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.G., Вернов С.Н., Николаев В.С., Теплов И.Б. Моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и элементы космических аппаратов. Proc. XVII Congr. YAF. North. Publ. Co.1968, с.279-291
8. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Васильев С.С., Кирюхин В.П. Конаныкин Л.В., Черняк Ю.Б.. Ускорение микрочастиц на электростатическом ускорителе ЭГ-8. ПТЭ, 1970, N 6, с. 185-187
9. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.С., Вернов С.Н., Николаев В.С. Имитация и моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и аппаратуру ИСЗ. Модель космического пространства, т. 2, под ред. акад. С.Н. Вернова.- М.: НИИЯФ МГУ, 1971, с. 37 -74
10. Козлов Л.В., Нусинов М.Д., Акишин А.И., Залетаев В.М., Козелкин В.В. Моделирование тепловых режимов космических аппара-

тов и окружающей его среды. Под ред. акад. Г.И. Петрова, Машиностроение, 1971, 377 с.
11. Акишин А.И., Бессонова Т.С., Васильев С.С. Электронная и протонная радиолюминесценция оптических стекол. Журнал прикладной спектроскопии, 1971, т. 15, в. 3, с.471-475
12. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.С., Вернов С.Н., Николаев В.С., Теплов И.Б. Моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и элементы искусственных космических объектов. Модель космического пространства, т. 2. Под ред. акад. С.Н.Вернова.- М.: НИИЯФ МГУ, 1973, с. 11-55
13. Акишин А.И., Вернов С.Н., Назаров В.Г. Моделирование воздействия ионной компоненты космических излучений на кремниевые фотопреобразователи. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н.Вернова, т.2.-М.: НИИЯФ МГУ Изд-во, с.83-108
14. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Вернов СН., Николаев В.С., Теплов И.Б. Моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и элементы искусственных космических объектов,- Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н. Вернова т. 2.- М.: НИИЯФ МГУ, 1976, с. 42-68
15. Акишин А.И., Вернов С.Н.. Григорьева Г.М., Крейнин Л.Б., Назаров В.Г., Физические основы радиационной деградации полупроводниковых фотопреобразователей. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н. Вернова. т.2- М.: НИИЯФ МГУ, 1976, с. 121-159
16. Акишин А.И., Александров А.П., Булгаков Ю.В., Вернов С.Н., Теплов И.Б. Моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и элементы КА. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н. Вернова т. 2.- М.: НИИЯФ МГУ, 1983, с 91- 116
17. Акишин А.И., Вернов С.Н., Григорьева Г.М, Крейнин Л.Б., Назаров В.Г. Влияние космических излучений на полупроводниковые фотопреобразователи. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н.Вернова т. 2, - М.: НИИЯФ МГУ, 1983, с, 513-552
18. Акишин А.И., Новиков Л.С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М.: Знание, Космонавтика, Астрономия, 1983, 373 с.
19. Акишин А.И., Новиков Л.С. Электризация космических аппаратов. М.: Знание, Космонавтика, Астрономия, 1986, 64 с.

20. Акишин А.И., Новиков Л.С. Методы имитации воздействия окружающей среды на материалы космических аппаратов. М.: НИИЯФ МГУ, 1986, 82 с.
21. Акишин А.И., Новиков Л.С.Физические процессы на поверхности искусственных спутников Земли. М.: Изд-во МГУ, 1987. 89 с.
22. Акишин А.И., Теплов И.Б., Цепляев Л.И. Развитие исследований по имитации воздействия космической среды на материалы. Развитие научных исследований по космофизике, ядерной и атомной физике в НИИЯФ МГУ. М.: Моск. ун-та, 1988, с. 49-70
23. Акишин А.И., Новиков Л.С. Имитация радиационных эффектов от воздействия космических излучений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989, 87 с.
24. Акишин А.И., Новиков Л.С. Методика и оборудование имитационных испытаний космических материалов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990, 89 с.
25. Акишин А.И., Теплов И.Б. Имитация воздействия космических излучений на материалы. Физ. и хим. обработки материалов М., 1992, N 3, с. 47-57
26. Акишин А.И. С.Н.Вернов и проблема воздействия космической среды на материалы. В кн. «Воспоминание об академиках Д.В.Скобельцыне и С.Н. Вернове» Изд-во МГУ М: 1995, с.107-111.
27. Акишин А.И., Гецелев И.В., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И. Физические условия в космическом пространстве и их воздействие на космические аппараты. В кн. «50 лет научно-исследовательскому институту ядерной физики им. Д.В.Скобельцына» М.: Изд-во МГУ,1996,с.94-108.
28. Акишин А.И. Развитие космического материаловедения в НИИЯФ МГУ. Препринт №96-1/408, М.: НИИЯФ МГУ, 1996, 42 с.
29. Акишин А.И., Развитие космического материаловедения в НИИЯФ МГУ. В кн. «50 лет научно-исследовательскому институту ядерной физики им. Д.В.Скобельцына. Доклады на заседаниях ученого совета НИИЯФ И ОЯФ физического факультета МГУ в 1995-1997гг». М.: НИИЯФ МГУ, 1997 с.187-233
30. Акишин А.И., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И., Панасюк М.И. Изучение космической радиации. // Российский космос.1997, № 3, 32-34
31. Акишин А.И., С.С.Васильев – ученый, учитель и блестящий инженер. Сб. «Ядерные реакции при низких и средних энергиях. К 90-летию профессора С.С.Васильева (1908-1981). М.: Изд-во Моск. ун-та ,1998 , с.49-55

32. Акишин А.И.- С.Н. Вернов и проблема радиационных сбоев в оборудовании космических аппаратов. В кн. «Сергей Николаевич Вернов – ученый, педагог и популяризатор науки (к 90-летию со дня рождения, 1910-2000 гг.) - М.: НИИЯФ МГУ, 2000, с.21-25.
33. Effects of Space Condition on Materials. A.I. Akishin. (Editor). Nova Science Publishers, Inc. NY.2001. p. 199.
34. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия Т. 16,17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Новикова Л.С., Панасюка. М.И.. М.: Изд-во ЭНЦИТЕХ ,2001.
35. Акишин А.И., Бондаренко Г.Г., Быков Д.В., Василенко О.И., Гришин В.К, Жирихин А.Н., Заболотный В.Т., Иванов Л.И. Ишханов Б.С., Майоров В.С., Новиков Л.С., Симонов В.П., Тихонов А.Н., Шведунов В.И. Физика воздействия концентрированных потоков энергии на материалы. М.: Изд-во УНЦ ДО, 2003, 418с.
36. Акишин А.И. Методы радиационных испытаний космических материалов. Учебное пособие.-М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005, с.143
37. Акишин А.И., Новиков Л.С. Космическое материаловедение. Энциклопедия Московского Университета. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына, М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005, с.55-64

**2**

1. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Васильев С.С., Вернов С.Н., Николаев В.С., Теплов И.Б. Моделирование радиационного воздействия космической среды на элементы космических аппаратов. // Proc. XVII Congr. YAF, North. Holl. Publ. Co, 1968, p.279-291
2. Акишин А.И., Нусинов М.Д., Сухнев В.А. Имитация космических условий при испытании непилотируемых аппаратов. // Вопр. ракетн. техн., М. Мир. 1966, №10, с.11-25, №11, с.15-32
3. N.N.Rykalin, L.N.Bystrov, L.I.Ivanov. Effect of electrons irradiation on mechanical properties of metals. III International Conference of Space Technology. Rome, May 1971, Italy, p.
4. Акишин А.И., Булгаков Ю.В., Вернов С.Н., Волга В.И., Иванов Л.И., Коваленко А.К., Кузнецов В.А., Славгородский И.С., Сторчак М.А., Теплов И.Б., Токарев Г.А., Туманов В.И. Моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и элементы искусственных космических объектов. Модель космоса под ред. С.Н.Вернова, НИИЯФ, 1976, т.II, с.42-68
5. Акишин А.И., Александров А.П., Булгаков Ю.В., Вернов С.Н., Теп-

лов И.Б. Моделирование радиационного воздействия космической среды на материалы и элементы КА. // Модель космоса под ред. С.Н.Вернова, НИИЯФ, 1983, т.II, с.91-116
6. Акишин А.И., Теплов И.Б. Имитация воздействия космических излучений на материалы. // ФХОМ, 1992, №3, с.47-57
7. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия, т.16,17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С.Новикова и М.И.Панасюка. М., ЭНЦИТЕХ, 2000.
8. Effects of Space Conditions on materials. Ed. A.I. Akishin, 2001, Nova Science Publ., N.J., p.199.
9. Алимов А.С., Ермаков Д.И., Ишханов Б.С., Шведунов В.И., Сахаров В.П., Trower W.P. Двухсекционный линейный ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1,2 МэВ, средний ток пучка 50 мА. ПТЭ, №5, (2002), с.114
10. Грибов И.В., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С., Новиков Г.А., Скачков В.С., Собенин И.П., Trower W.P., Шведунов В.И., Шведунов И.В. Импульсный разрезной микротрон на энергию 70 МэВ. // Вестник МГУ, 3, №8, 2002.
11. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Васильев С.С., Кирюхин В.П. Станиславский М.П., Конаныкин Л.В., Чернов Ю.А., Черняк Ю.Б. Ускорение металлических макрочастиц на электростатическом ускорителе (ЭГ-8). // Приборы и техника эксперимента, 1970, №6, с.185-187
12. Акишин А.И., Васильев С.С., Исаев Л.Н. Катодное распыление слюды и плавленного кварца ионами криптона. // Изв. Академии наук, сер. физ., 1962, т.XXVI, вып.11, с.1356-1358
13. Иванов Л.И., Кудрявцев Н.С. Влияние остаточных газов на испарение титана в вакууме.//ФХОМ, 1968, №4, с.166-168
14. Акишин А.И., Байкальцев В.Б., Тютрин Ю.И. Воздействие электронных потоков на защитные покрытия солнечных батарей. // ФХОМ, 1991, №4, с.68-71
15. Акишин А.И., Духновский М.П., Задде В.В., Стребков Д.С., Цепляев Л.И. Использование протонной бомбардировки для получения кремниевой структуры с дефектным слоем.//ФХОМ, 1994, №4-5, с.9-11.
16. Акишин А.И., Григорьева Г.М.. Звягина К.Н., Куликаускас В.С., Цепляев Л.И. О технологии формирования структуры кремний на дефектном слое.// ФХОМ, 1996, №2, с.78-80
17. Акишин А.И., Прокофьев И.П., Тютрин Ю.И., Цепляев Л.И., Черняк Ю.Б. Влияние внедренного электронного заряда на некоторые свойства силикатных стекол. // Изв. ВУЗов, сер. физич., 1974, №11, с.99-104

18. Акишин А.И., Бессонова Т.С., Васильев С.С. Электронная и протонная радиолюминесценция оптических стекол // ЖПС, 1971, т.XV, №3, с.471-475
19. Акишин А.И., Новиков Л.С., Токарев Г.А. Воздействие тяжелых многозарядных ядер на материалы и элементы космического оборудования. // ФХОМ, 1990, №1, с.5-9
20. Акишин А.И. Имитация и природа радиационных сбоев в оборудовании ИСЗ.//ФХОМ, 2000, №3, с.24-31
21. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Савельева Л.И., Тютрин Ю.И. Лазерная имитация одинчных радиационных сбоев в микросхемах. // ФХОМ, 1992, №5, с.53-55
22 Buchner S., McMorrow D., Melinger J., Campbell A.B. Laboratory Test for Single-event Effects // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996, v.43, N2, p.678-685
23 Sexton F.W. Microbeam Studies of Single-event Effects // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1996, v.43, N2, p.687-695
24 Акишин А.И., Иванов Л.И., Цепляев Л.И. Методы радиационных испытаний материалов космической техники.// Переспективные материалы, 2005, №4, с.20-30

3

1. Громов В.В. Электрический заряд в облученных материалах. М.: Энергоиздат,1982, 112с.
2. Акишин А.И., Новиков Л.С. Электризация космических аппаратов. М.: Знание, сер. Космонавтика, астрономия, 1985, N6, 73 с.
3. Боев С.Г., Ушаков В.Д. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагносцирования. М., Энергоиздат, 1991, 238 с.
4. Акишин А.И. Радиационные аномалии, в комическом оборудовании вызванные разрядными явлениями в облученных диэлектриках «Наукоемкие технологии в технике", Энциклопедия. Т.17, Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Ред. Л. С. Новиков, М. И. Панасюк. М.: 2000, с. 5-60
5. Effects of Space Conduction on Materials. A.I.Akishin (Editor). Nova Science Publish. Inc.NY. 2001, 199p.
6. Акишин А.И. Электрический пробой радиационно-заряженных диэлектриков при имитации воздействия космических излучений // Персп. Матер., 2005, №3, с.5-11

7. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Цепляев Л.И. Концентрация энергии при электрическом пробое радиационно-заряженного шара из полиметилакрилата. ФХОМ, 2005, №2, с.32-35.
8. Nikita M, Zahuj M., Write K.A. Kerr Electro-optik Field Mapping Measurements in Electron-beam Irradiated Polymenhilmethacrylate. IEEE Trans. El. Ins., 1988, v.23, p.861-880
9. Akishin A.I., Vitoshkin E.A., Tyutrin Yu.I., discharge in Electron Irradiated Glasses // Radiat. Phys. Chem. 1984, v.3, N3, p.305-306
10. Akishin A.I., Goncharov Yu.S., Novicov L.S., Tyutrin Yu.I., Tsepliaev L.I. Discharge Phenomena in the Irradiated Glasses // Radiat. Phys. Chem. 1984, v.3, N3, p.319-324
11. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Громов В.В., Розно А.Г., Цепляев Л.И. О релаксации внедренного объемного заряда в оптических стеклах, облученных протонами 100 МэВ. ФХОМ, 1998, N6, с.24-27.
12. Акишин А.И. Эмиссионные процессы при электрическом пробое радиационно-заряженных диэлектриков. ФХОМ, 1998, N5, с.27-30.
13. Акишин А.И. Скользящий разряд по поверхности полимерных материалов в вакууме. ФХОМ, 2003, №5, с.28-31.
14. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. Применение фрактальной модели к описанию развития разряда в конденсированных диэлектриках // ЖТФ, 1995, т.65, вып.2, 63-75
15. Dissado L.A. Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory // IEEE Trans. El. Ins., 2002, v.9, N4, p.483-497
16. Noskov N.D., Malinovski A.S., Sack M., Schwab A.I. Self-Consistent Modeling of Electrical Tree Propagation and PD Activity // IEEE Trans. El. Ins., 2000, v.7, N6, p.725-733
17. Tanaka T. Space Charge Injected via Interfaces and Tree Insulations in Polymers // IEEE Trans. El. Ins., 2001, v.8, N5, p.733-743
18. Акишин А.И. Фрактальный характер явлений при электрическом пробое радиационно-заряженных диэлектриков. ФХОМ, 1997, N 3, с.17-21
19. Kudo K. Fractal Analysis of Electrical Trees // IEEE Trans. El. Ins., 1998, v.5, N5, p.713
20. Акишин А.И., Тютрин Ю.И. Электрический пробой радиационно-заряженных стекол определяется ступенчатым механизмом прорастания разрядных каналов // ФХОМ, 2000, №1, с.44-46
21. Акишин А.И., Цепляев Л.И. О краевом эффекте в радиационно-заряженных диэлектрических материалах // ФХОМ, 1997, №1, с.33-35
22. Акишин А.И., Радченко В.В., Тютрин Ю.И., Чижиков В.Е. Механизм инициированного пробоя и разрушения радиационно-

заряженных стекол при лазерном воздействии // ФХОМ, 1989, №1, с.44-50
23. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Васильев С.С., Кирюхин В.П., Конаныкин Л.В., Станиславский М.П., Чернов Ю.А. Ускорение макрочастиц на электростатическом ускорителе // ПТЭ, 1970, №6, с.185
24. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Новиков Л.С., Тютрин Ю.И. Воздействие микрометеорного удара на электрическое разрушение стекол // ФХОМ, 1989, №1, с.50-53

4

1. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Тютрин Ю.И., Цепляев Л.И. Электроразрядное разрушение диэлектриков протонным излучением. ФХОМ, 1994, №3, с. 32-34
2. Akishin A.I., Tsepliaev L.I. Destruction and Discharge Phenomena in the Irradiated Glasses. J. Nucl. Mater. 1996, v.233-236 , p. 1318-1320
3. Акишин А.И. Электроразрядные явления в облученных диэлектриках могут понизить надежность космического и термоядерного оборудования // ФХОМ, 1997, №5, с.37-44
4. Акишин А.И. Электрический пробой радиационно-заряженных диэлектриков при имитации воздействия космических излучений // Перспективные материалы, 2005, №3, с.5-15
5. Солнцев С.С., Морозов Е.М. Разрушение стекла. М. Машиностроение, 1978, 152 с.
6. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Цепляев Л.И. Электрический взрыв в облученном протонами стекле. ФХОМ, 2001, №6, с.46-49
7. Вершинин Ю.Н., Ильичев Д.С., Морозов П.А. Влияние ударного сжатия твердых диэлектриков на процесс инжекции валентных электронов в сильных электрических полях. ЖТФ, 2000, т.70, вып.1, с.85-87
8. Акишин А.И., Витошкин Э.А., Громов В.В., Розно А.Г., Цепляев Л.И. О релаксации внедренного объемного заряда в оптических стеклах, облученных протонами 100 МэВ // ФХОМ, 1998, N6, с.24
9. Акишин А.И.,Цепляев Л.И. Термоотжиг внедренного заряда в облученных стеклах // ФХОМ, 2006, №6 с.90-91

5

1. Акишин А.И., Цепляев Л.И. Радиационно-оптические свойства стекол, применяемых в космосе// ФХОМ, 2006, №2, с.25-30

2. Бреховских С.М., Викторова Ю.Н., Ланда Л.М. Радиационные эффекты в стеклах. М.: Энергоиздат, 1982, 182 с.
3. Акишин А.И., Бессонова Т.С., Васина Л.А. и др. Влияние корпускулярных излучений на оптические материалы. Модель космоса, т.2. М.: Изд. Мгу, 1983, с.553-578
4. Арбузов В.И., Сучков Ф.В. Стабильность радиационной окраски оптических стекол // Оптический журнал, 2001, т.68, №6, с.85-96
5. Кудрявцев М.И., Лопатин Г.Б., Погодин И.Б. Электромагнитное излучение Солнца. Модель космического пространства под ред. акад. Вернова С.Н. Изд. Моск. ун-та, т.1, с.101.
6. Смолкин М.Н. и др. Интегральные и визуальные характеристики ксеноновых ламп ДКсШ-1000 и ДКсР-6000. Опт.-мех. промышл. 1968, №6, с.29
7. Volchek A.O., Lisitsyn V.M., Gusarov A.I., Yakovlev V.Yu., Garbuzov V.I. Transient optical transmission changes induced by pulsed electron radiation in commercial crown silicate glasses // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research, 2003, B 211, p.100-106
8. Гурьев А.П., Забелина И.А. Изотермическая релаксация наведенного поглощения стекол после воздействия ионизирующего излучения // Оптический журнал, 2001, т.68, №6, с.79-84
9. Арбузов В.И., Волчек А.О., Гусаров А.И., Лисицын В.М., Яковлев В.Ю. Радиационно-индуцированное нестационарное поглощение в многокомпонентных силикатных стеклах // Оптический журнал, 2004, т.71, №2, с.58-62.
10. Акишин А.И., Цепляев Л.И. Термический отжиг центров окраски в облученных оптических стеклах. // ФХОМ, 2003, №4, с.95-96.
11. Treadaway M.J., Passenheim B.C., Kitterer B.D., Schal P. Radiation coloration and bleaching of glass. // IEEE Rans. Nucl. Sci., 1976, NS-23, N6, p.1820-1825
12. А.И.Акишин, Л.И.Цепляев. Методика инженерной оценки влияния космического корпускулярного излучения на поглощение оптических стекол. // ФХОМ, 1999, №4, с.21-24
13. Акишин А.И., Цепляев Л.И. Оптическое обесцвечивание радиационно-окрашенных стекол при имитации космических условий // ФХОМ, 2004, № 6, с.30-33
14. Акишин А.И. Радиационные аномалии в космическом оборудовании, вызванные электроразрядными явлениями в облученных диэлектриках. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия т.17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С.Новикова, М.И.Панасюка. М.: 2000, с.5-60

15. Акишин А.И., Бессонова Т.С., Васильев С.С. Электронная и протонная радиолюминесценция оптических стекол // ЖПС, 1971, т.XV, №3, с.471-475
16. Дианов Е.М., Корниенко Л.С., Никитин Е.П., Рыбалтовский А.О., Сулимов В.Б. Чернов П.В. Радиационно-оптические свойства волоконных световодов на основе кварцевого стекла (обзор) // Квантовая электроника,1983,т.10, № 3, с.473-496
17. Borgermans P., Brichard B. Kinetic Models and Spectral Dependencies of the Radiation-Induced Attenuation in Pure Silica Fibers // IEEE Nucl. Sci., 2002, v.49, N3, p.1439-1445
18. Henschel H., Kohn O., Weinand U. A New Radiation Hard Optical Fiber for High-Dose Values // IEEE Tran. Nucl. Sci., 2002, v.49, N3, p.1432-1438
19. Gusarov A., Doyle D., Kinet D., Volcnek A. Testing and qualification of optical glasses for use in a space radiation environment; the advantages and pitfalls of using a parametric approach // Proc. of the 9th Intern. Simp. on Materials in Space Environment, Noordwijk, the Netherlands, 16-20 June 2003, (ESA SP-540, Semp. 2003)
20. Colby E., Lum G., Plettner T., Spencer I. Gamma Radiation Studies on Optical Materials // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2002, v.49, N6, p.2857-2867
21. Henschel H., Kohn O., Lennartz W., Metzger S., Schmidt H. Comparison between fast neutron and gamma irradiation of optical fibers // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1998, v.45, N3, p.1543-1551
22. Tomashuk A., Dianov E., Golant K., Rybaltovskii A. γ-Radiation-Induced Absorption in Pure-Silica-Core Fibers // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1998, v.45, N3, p.1576-1579
23. Van Uffelen M., Yucker Ph., Fenaux Ph. Radiation Resistence of Fiber-optic Components and Predicative Models for Optical Fiber Systems in Nuclear Environments // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998, v.45, N3, p.1558-1565
24. Henschel H., Kohn O., Schmidt H., Kirchhof J., Unger S. Radiation-induced loss of Rare Earth doped fibers // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1998, v.45, N3, p.1552-1557

6

1. Frederickson A.R., Holeman E.G., Mullen E.G. Characteristics of spontaneous electrical discharging of various insulators in space radiation. // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1992, v.39, N6, p.1773-1782

2. Frederickson A.R., Levy L., Enloe C.L. Radiation-induced electrical discharges in complex structures. // IEEE Trans. On Electrical Insul. 1992, v.27, N6, pp.1166-1178
3. Haselton R.C., Churchill R.J., Yadlowski E.J. Measurements of particle emission from discharge sites in teflon irradiated by high energy electron beams. // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1979, v.26, pp.5141-5145
4. Вудс А.Дж., Динас Э.П. Методы расчета воздействия на электронную аппаратуру спутника импульсов электромагнитного излучения, генерируемых искровыми разрядами на деталях из диэлектрических материалов. // Аэрокосмическая техника, 1986, N3, с.146-166
5. Акишин А.И. Эмиссионные процессы при электрическом пробое радиационно-заряженных диэлектриков. // ФХОМ, 1998, N5, с.27-30
6. Акишин А.И. Электрический пробой радиационно-заряженных диэлектриков при имитации воздействия космических излучений // Персп. Материалы 2005, №3, с.5-15
7. Fredrickson A.R. Electric Discharge Pulses in Irradiated Solid Dielectrics //IEEE Trans. Electrical insul., 1983, v. El-18, N3, p.337-349
8. Leung P., Plump G. Characteristics of RF resulting from dielectric discharges. // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1982, v.29, pp.1610-1614
9. Бычков В.Л., Гридин А.Ю., Климов А.И. О природе искусственной шаровой молнии, исследование структуры и физических свойств полимерных плазмоидов в атмосфере // ТВТ, 1994, т.32, с.190-194
10. Олешко В.Н., Штанько В.Ф. Эмиссия плотного электронного пучка из канала электрического пробоя в твердом диэлектрике. // ЖТФ, 1990, т.60, в.2, с.185-186
11. Crow By.J.E., Auer P.L., Allen J.E. The expansion of plasma in to a vacuum. // J. Plasma Physics, 1975, v.14, part 1, pp. 65-76
12. Акишин А.И. Электроразрядный механизм радиационных аномалий ИСЗ // ФХОМ, 2002, №4, с.24
13. Акишин А.И. Скользящий разряд на поверхности полимерных материалов в вакууме // ФХОМ, 2003, №5, с.28-31
14. Акишин А.И., Андреев А.А., Бондаренко А.Б., Ледянкин Д.В., Тютрин Ю.И. Влияние разрядных явлений на состав газовыделения радиационно-заряженных материалов // ФХОМ, 1991, №2, 75-78
15. Vaughn J.A., Carruth M.R. Katz Jr.J, Mandell M.J., Jongeward G.A. Electrical Breakdown Currents on Large Spacecraft in Low Earth Orbit. // J. Spacecraft and Rockets, v.31, N1, 1994,p.54-58
16. Vayner B.V., Doreswamy C.V., Ferguson D.C., Galofaro J.T., Snyder D.B. Arcing on Aluminum Anodized Plates Immersed in Low-Density Plasmas // J. of Spacecraft and Rockets. 1998, v.35, N6, p.805-811
17. Galofaro J.T., Doreswamy C.V., Vayner B.V., Snyder D.B., Ferguson

D.C. Electrical Breakdown of Anodized Coatings in Low-Density Plasmas. // J.Spacecraft and Rockets, 1999, v.36, N4, p.579-585

**7**

1. Акишин А.И., Новиков Л.С. Имитация радиационных эффектов от воздействия космических излучений. М., Изд-во Моск. ун-та, 1989, 87 с.
2. Акишин А.И., Вернов С.Н., ГригорьеваГ.М., Крейнин Л.Б., НазаровВ.Г. Влияние космических излучений на полупроводниковые фотопреобразователи. Модель космического пространства. Под ред. акад.С.Н.Вернова, т.2, М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983, с.513-559
3. 3.Акишин А.И., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г. Воздействие потоков заряженных частиц высокой энергии на материалы и элементы оборудования космических аппаратов. «Новые наукоемкие технологии в технике». Энциклопедия т.17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Ред. Л.С. Новиков, М.И. Панасюк. – М.. ЭНЦИТЕХ. 2000, с.164-205
4. Заявлин В.Р., Жезлов А.В., Летин В.А. Прогнозирование ресурса фотоэлектрических батарей космических аппаратов // Гелиотехника, 2001, №3, с.11-22
5. Акишин А.И., Байкальцев В.Б., Тютрин Ю.И. Воздействие электронных потоков на защитные покрытия солнечных батарей. // ФХОМ, 1991, N4, с.68-70
6. Акишин А.И., Летин В.А., Бордина Н.М. и др. Возникновение дугового разряда между участками солнечной батареи в вакууме. // Гелиотехника, 1990, N1, с. 75-76
7. Stevens N.J., Jones M.R. Environmentally-Induced Discharges on Solar Arrays in Geosynchronous Orbit. // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1993, v.40, N6, pp.1525-1531
8. Акишин А.И. Электроразрядное повреждение солнечных батарей космических аппаратов в магнитосферной и ионосферной плазме. // ФХОМ, 1995, N 2, с. 43-48
9. Акишин А.И., Тютрин Ю.И., Цепляев Л.И. Электроразрядный механизм повреждения солнечных батарей при электронном облучении. // ФХОМ, 1996, N6, с. 20-23
10. Data Analysis and Model Plasma Interactions Experiment. // J. Spacecraft and Rockets. 1996, v.33, N3, p.438-446
11. Soldi J.D., Hastings D.E., Hardy D., Guidice D., Ray K. Flight Data Analysis for the Photovoltaic Array Space Power Plus Diagnostics Experiment. // J. of Spacecraft and Rockets. 1997, v.34, N1, pp.92-103.

12. Kuninaka H. Space Experiment on Plasma Interaction Caused by High-Voltage Photovoltaic Power Generation. // J. of Spacecraft and Rockets. 1995, v.32, N5, p.894-898
13. Ray K.P., Delorey D.E., Guidice D.A., Adamo R.C., Dana D.R., Soldi J.D., Hastings D.E. Arc Rate Measurements Observed by the Photovoltaic Array Space Power Plus Diagnostics (PASP Plus) Experiment. // IEEE Trans. on Nucl. Science. 1997, v.44, N6, p.2195-2200
14. Hastings D.E. A Review of Plasma Interactions with Spacecraft in Low Earth Orbit. // J. of Geophysical Research. 1995, v.100, N A8, pp.14,457-14,483.
15. Акишин А.И. Электроразрядный механизм радиационных аномалий ИСЗ // ФХОМ, 2002, №3, с.28-30

**8**

1. Violet M.D., Fredrickson A.R. Spacecraft Anomalies on the CREES Satellite correlated with the Environment and Insulator Samples // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, v.40, N6, p.1512-1520
2. Wrenn G.L. Conclusive Evidence for Internal Dielectric Charging Anomalies on Geosynchronous Communication Spacecraft // J. of Spacecraft and Rockets. 1995, v.32, N3, p.514-520
3. Stasinopoulos E.G., Brucker G.J., Adolph J.N., Barth J. Radiation-Induced Anomalies in Satellites // J. of Spacecraft and Rockets. 1996, v.33, N6, p.877-882
4. Anderson P.C., Skoons H.S. Spacecraft Charging Anomaly on Low-Altitude Satellite in an Aurora // J. of Spacecraft and Rockets. 1996, v.33, N5, p.944-960
5. Honrubia F.J.L., Hilgers A. Some Correlation Techniques for Environmentally Induced Anomalies Analises // J. of Spacecraft and Rockets. 1997, v.33, N5, p.670-674
6. Акишин А.И. Электроразрядные явления в облученных диэлектриках могут понижать надежность космического и термоядерного оборудования // ФХОМ, 1997, №5, с.37-44
7. Акишин А.И. Радиационные аномалии в космическом оборудовании, вызванные электроразрядными явлениями в облученных диэлектриках. «Новые наукоемкие технологии в технике». Энциклопедия. Т.17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С.Новикова, М.И.Панасюка. – М.: 2000, с.50-60

8. Baker D.N. The Occurrence of Operational Anomalies in Spacecraft and Their Relationship to Space Weather // IEEE Trans. on Plasma Sci., 2000, v.28, N6, p.2007-2016
9. Love D.P., Toomb D.S., Wilkinson D.C., Parkinson J.B. Penetrating Electron Fluctuations Associated with GEO Spacecraft Anomalies // IEEE Trans. on Plasma Sci., 2000, v.28, N6, p.2075-2084
10. Lai S.T. The Mott Transitions as a Cause of Anomalies in Spacecraft // IEEE Trans. on Plasma Sci., 2000, v.28, N6, p.2097-2102
11. Акишин А.И. Имитация и природа радиационных сбоев в оборудовании ИСЗ // ФХОМ, 2000, №3, с.24-31
12. Акишин А.И. Влияние электроразрядных явлений на работоспособность космического оборудования и ядерных установок. Учебное пособие. Изд. Моск. Ун-та 2001, 56 с.
13. Акишин А.И. Электроразрядный механизм радиационных аномалий ИСЗ // ФХОМ, 2002, №3, с.28-30
14. Акишин А.И. Механизм электроразрядных аномалий ИСЗ. Уч.пос.-М.: Изд. Отдел УНЦ ДО,2002,с.143.

**9**

1. Tennyson R.C. Atomic oxygen and effect on materials. The Behavior of Systems in the Space Environment, Eds. Dewitt R.N. et al. Kluwer Acad. Publ., 1993, p. 233-257
2. Акишин А.И., Гужова С.К. Взаимодействие ионосферной плазмы с материалами и оборудованием космических аппаратов // ФХОМ, 1993, №3, с. 40-47
3. Tennyson R.C. Atomic oxygen on polymer materials // Canadian J. of Physics, 1991, v.69, №8/9, p.1190-1208
4. Акишин А.И., Новиков Л.С., Черник В.Н, Воздействие на материалы и элементы оборудование космических аппаратов вакуума, частиц ионосферной плазмы и солнечного ультрафиолетового излучения // Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия. Том 17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. Новикова Л.С., Панасюка М.И., М.: ЗАО НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2000, с.100-138
5. Raja Reddy M. Effect of low earth orbit atomic oxygen on spacecraft materials // J. Mater. Sci, 1995, v.30, p. 281-307
6. Kleiman J.I, Horodetsky S., Sergeyev V., Issoupov V., Ng R. Critinical Review of the Design of Space Environment Simulators: Lessons Learnt // Proc. of the 10th ISMSE & the 8th ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006, p.

7. Banks B.A., Waters D.L., Thorson S.D., deGroh K.K., Snyder A., Miller S. Comparison of Atomic Oxygen Erosion Yields of Materials at Various Energies and Impact Angles // Proc. of the 10th ISMSE & the 8th ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006, p.
8. Hartney M.A., Hess D.W., Soane D.S. Critical Review Oxygen plasma etching for resist stripping and multiplayer lithography // J. Vac. Sci. Texnol. 1989, v.7, № 1, p. 1-13
9. Toyoda K., Okamura T., Hosoda S., Chmo M., Degradation of High – Voltage Solar Array Due to Arcing in Plasma Environment // J. Spacecraft and Rockets, 2005, v.42, N5, p.947-954
10. Packirisamy S., Schwam D., Litt M.H. Atomic oxygen resistant coatings for low earth orbit space structures // I. of Materials Sci. 1995, v.30, p. 308-320
11. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Гужова С.К., Исаев Л.Н., Петухов В.П., Тронов В.В. Взаимодействие ионов малой энергии с поверхностью некоторых диэлектриков // ЖПС, 1970, т. XII, в. 1, с. 13-16
12. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Гужова С.К., Исаев Л.Н., Петухов В.П., Тронов В.В. Взаимодействие ионов малой энергии с поверхностью некоторых диэлектриков // Вест. МГУ сер. физ. астр., 1972, №6, с.634-637.
13. Акишин А.И., Гужова С.К., Соловьев Г.Г., Титов В.К. Об аномалии распыления некоторых полимеров ионами высокочастотной плазмы // ХВЭ 1979, т. 10, №6, с. 494-497
14. Войценя В.С., Гужова С.К., Титов В.И. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. М. Энергоатомиздат, 1991, 223 с.
15. Koontz S.L., Albyn K., Leger L.J. Atomic Oxygen Testing with Thermal Atom Systems: A Critical Evaluation // J. Spacecraft and Rockets, 1991, v.28, №3, p.315-323
16. Акишин А.И., Новиков Л.С., Черник В.Н. Применение ускорителя кислородной плазмы для исследования распыления материалов // Поверхность, 2004, №4, с.52-56
17. Minton T.K., Zhang J., Garton D.J., Seale J.W. Collision-assisted erosion of hydrocarbon polymers in atomic-oxygen environments // High. Perform. Polym., 2000, V.12, p. 27-42
18. Yokota K., Ohmae N., Tagawa M. Effect of Relative Intensity of 5 эВ Atomic Oxygen and 172 mm Vacuum Ultraviolet in Synergism of Polyimide Erosion // High Perform. Polim., 2004, v.16, p. 221-234

19. Minton T.K., Zhang J., Garton D.J., Seale J.W. Collision – assisted erosion of hydrocarbon polymers in atomic-oxygen environments // High Perform. Polym., 2000, v.12, p.27-42
20. Kinoshita H., Tagawa M., Yokota K., Ohmac N. Nonlinear phenomena in the mass loss of polyimide films under hyper thermal atomic oxygen beam exposure // High performance polymers, 2001, v.13, p. 225-234
21. Tighe A.P., van Eesbeek M.R.J., Wenham D. Spacecraft Materials Test Techniques Utilizing High Power Lasers // Proc. of the 10th ISMSE & the 8th ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006, p.
22. Minton D.J., Stockdale D.P., Lee D.-Ch., Yu L. Minton T.K. Probing the Effects of Molecular Structure on the Erosion of Hydrocarbon-Based Polymers by Atomic Oxygen // Proc. of the 10th ISMSE & the 8th ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006, p.
23. Murad E. Spacecraft interaction with atmospherics species in Low Earth Orbit // J. of Spacecraft and Rockets, 1996, v.33, N1, p.131-136
24. Тупиков В.И., Клиншпонт Э.Р., Милинчук В.К. Проблемы стойкости полимерных материалов в условиях космического пространства // ХВЭ, 1996, т.30, №1, с.49-57
25. Koontz S.L., Leger L.J., Visentine J.T., Hunton D.E., Cross J.B., Hakes C.L. EOIM-III Mass Spectrometry and Polymer Chemistry STS-46, July-August 1992 // J. Spacecrafts and Rockets, 1995, V.32, №3, p. 483-495.
26. Iskanderova Z.A., Kleiman J.I., Gudimenko Y.U., Tennyson R.C. Influence of Content and Structure of Hydrocarbon Polymers on Erosion by Atomic Oxygen // J. Spacecraft and Rockets, 1995, v.32, №5, p.878-884
27. Tennyson R.C. Protection of polymeric materials from atomic oxygen // High Performance Polym., 1999, V.11, p. 157-165
28. Милинчук В.К., Клиншпонт Э.Р., Шелухов Н.П., Смирнова Т.Н., Пасевич О.Ф. Деградация полимерных материалов на низких земных орбитах // Хим. высоких энер., 2004, т.38, №1, с.10-15
29. Iskanderova Z.A., Kleiman J.I., Gudimenko Y.U., Tkachenko A., Tennyson R.C., Brown I.G., Monterio O.R. Metal ion implantation and dynamic ion mixing for the protection of high-performance polymers from severe oxidative environment // Nuclear Instr. and Meth. in Phys. Research B, 1999, v.148, p. 1090-1098
30. Snyder A., Banks B.A., Waters D.L. Undercutting Studies of Protected Kapton H Exposed to In-Space and Ground-based Atomic Oxygen // Proc. of the 10th ISMSE & the 8th ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006, p.

31. Черник В.Н., Наумов С.Ф., Демидов С.А., Соколова С.П., Свечник В.И. Исследования полиимидных пленок с защитными покрытиями для космических аппаратов // Перспективные материалы. 2000. №6. с. 32-36
32. Новиков Л.С., Черник В.Н., Бабаевский П.Г., Козлов Н.А., Чалых А.Е., Балашова Е.В., Смирнова Т.Н. Исследование углепластика КМУ-4Л с покрытием ЭКОМ при лабораторной имитации длительного полета в ионосфере // Перспективные материалы. 2001. №5. с. 20-26
33. Акишин А.И., Новиков Л.С., Черник В.Н., Наумов С.Ф., Соколова С.П., Куриленок А.О., Герасимова Т.Н. Эрозия Cu, Ag, Au и Sn в низкоэнергетических потоках кислородной плазмы // Поверхность, 2006, №3, с. 28-31.
34. Guzman J., Grossman E., Mural M., Noter Y., Saar N., Silverman G., Minton T.K., Gorton D.J., Ducal D., Brunsvold A. A Study of Atomic Oxygen Interaction with Protected Silver Surfaces. Proc. of the 9th Jnten. Symp. On Mater. in Space Environment. Noordwijk, The Netherlands, 16-20 June 2003, p.487-492
35. Fujimoto K., Shioya T., Satoh K. Degradation of carbon-bused materials due to impact of high-energy atomic oxygen // Intern. J. of Impact Engin. 2003, v.28, p. 1-11
36. Акишин А.И., Виргилиев Ю.С., Черник В.Н. Эрозионные свойства углеродных материалов различной структуры и состава в потоках кислородной плазмы // Изв. РАН, сер. Физ., т.66, 2002, №4, с.605-606
37. Акишин А.И. Воздействие атомарного кислорода на космические материалы // Перспективные материалы, 2006, №6, с.15-22
38. Karipides D.P., Boyd I.D., Caledonia G.E. Detailed Simulation of Surface Chemistry Leading to Spacecraft Glow // J. Spacecraft and Rockets, 1999, v.36, N4, p.566-572
39. Waters D.L., Banks B.A., Thorson S.D., deGroh K.K., Snyder A. Miller S. Comparison of Atomic Oxygen Erosion Depth and Cone Height of Various Materials at Hyper thermal Energy // Proc. of the $10^{th}$ ISMSE & the $8^{th}$ ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006.
40. Хантон Д.Н. Свечение Шаттла // В мире науки. 1990, №1, с. 56-63
41. Tagawa M., Doi H, Yokota K. Atomic Oxygen Concentration for Materials Exposure Acceleration Tests in Low Earth Orbit // Proc. of the $10^{th}$ ISMSE & the $8^{th}$ ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006,..
42. Kleiman J.I., Horodesky S., Sergeev V., Issopov R.Ng Critinical Review of the Design of Space Environment Simulators: Lessons Learnt

// Proc. of the 10th ISMSE & the 8th ICPMSE, Collioure, France, 19-23 June 2006
43. Акишин А.И. Электроразрядное повреждение солнечных батарей космических аппаратов в магниитосферной и ионосферной плазме // ФХОМ, 1995, №2, с.43-48
44. Grossman E., Noter Y., Lifshitz Y., Oxygen and VUV Irradiation of Polymers: Atomic Force Microscopy (AFM) and Complementary Studies // Proc. of the 7th ISMSE, Toulouse France, 16-20 June (SP-399. August 1997)

**10**

1. Shu T.L., Murad E., MacNeil W.J. Hazards of Hypervelocity Impacts on Spacecraft // J. of Spacecraft and Rockets, v.39, 2002, p.106-114
2. Rival M., Mandevill J.C., Darin C. Hypervelocity Impacts on Solar Arrays: Analysis of Secondary Particles Ejection and Implications to Environment // Proc. of the 7 Int. Simp. on Space Environment. Toulouse, France, 16-20 June 1997
3. Lorenz D.R. Solar Array Degradation by Dust Impacts During Cometary's Encounters // J. Spacecraft and Rockets 1998, v.35, N4, p.579-582
4. Kruger F.R. Hypervelocity Impact Physics-Plasma Discharge Phenomena on Solar Generators. The Behavior of Systems in the Space Environment. Ed. R.N.Dewitt, 1993, p. 273-290
5. Shelton H., Hendricks C.D., Wuerker R.F. Electrostatic Acceleration of Microparticles to Hypervelocity // J. Appl. Phys. 1960, v.31, p.1243-1246
6. Friichtennicht J.F. Two Million Volt Electrostatic Accelerator for Hypervelocity Research // Rev. Sci. Instrum. 1962, v.33, p.309-312
7. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Кирюхин В.П., Черняк Ю.Б. Некоторые вопросы моделирования микрометеорной эрозии. В сб.: Модель околоземного космического пространства. Ред. С.Н.Вернов. М.: НИИЯФ МГУ, 1968, т.2, ч.1, с.178-209
8. Акишин А.И., Блюдов Е.В., Васильев С.С., Кирюхин В.П., Станиславский М.П., Конаныкин Л.В., Чернов Ю.А., Черняк Ю.Б. Ускорение металлических микрочастиц на электростатическом ускорителе (ЭГ-8) // ПТЭ, 1970, №6, с.185-187
9. Бедняков А.А., Гиляров Р.А., Дзагуров А.Б., Криволап В.В., Куликаускас В.С. Инжекция, формирование потока и контроль параметров твердых частиц, ускоряемых на электростатическом генераторе ЭГ-8 // ПТЭ, 1998, №2, с.149-156

10. Burchell M.J., Cole M.J., McDonnell J.A.M., Zarnecki J.C. Hypervelocity Impact Studies Using the 2 MV Van de Graaf Accelerator and Two-Stage Light Gas Gun of the University of Kent at Canterbury // Meas. Sci. Technol., 1999, v.40, p.41-50
11. Hasegawa S., Hamabe Y., Fujiwara A., Yano H., Sasaki S., Ohashi H., Kawamura T., Nogami K.-I., Kobayashi K., Iwai T., Shibata H. Microparticle Acceleration for Hypervelocity Experiments by a 100 KV Electrostatic in Japan // Int. J. Impact Engng, 2001, v.26, p.299-308
12. Kissel J., Krueger F.R. Ion Formation by Impact of Fast Dust Particles and Comparison with Related Techniques // Appl. Phys. A, 1987, v.42, p.69-85
13. Sysoev A.A., Ivanov V.P., Barinova (Komova) T.V., Surkov Yu.A., Vyskochkin V.V. Mass Spectra Formation from Charged Microparticles // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 1997, v.122, p.79-83
14. Burchell M.J., Cole M.J., McDonnell J.A.M. Role of Particle Charge in Impact Ionization by Charged Micropaticles // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 1998, v.143, p.311-318
15. Труханов Е.М., Василенко А.П., Пчеляков А.П., Сильвестров В.В., Лукьянов А.Л., Зворыкин Л.Л., Бержатый В.И., Иванов А.И. Исследование ударных микроструктур на элементах российской космической станции «Мир» // Поверхность, Рентгн., Синхр, и Нейтр. Иссл., 2004, №6, с.84-90
16. Акишин А.И. Плазменные явления при микрометеорной бомбардировке ИСЗ // ФХОМ, 2004, №2, с.35-38
17. Tighe, Gabriel S., Esbeek M.V., Ground Based Simulations of Orbital Using Laser , Driven Flyer Plates // 5th Jntern. Symp. on Material Environment. Arcachon, France 5-9 June, 2000
18. Обухов Л.В., Янушкевич В.А. Метание макрочастиц с помощью гигантских импульсов ОКГ // ЖТФ, 1978, т.48, №12, с.2559-2565
19. Baker R.J. Hypervelocity Crater Penetration Depth and Diameter – a Linear Function of Impact Velocity? // Int. J. Impact Engng., 1995, v.17, p.25-35
20. Bernhard R.P., Christiansen E.L., Hyde J., Crews J.L. Hypervelocity Impact Damage into Space Shuttle Surfaces // Int. J. Impact Engng, 1995, v.17, p.57-68
21. Stanley G.L. Donald E.B., Nichole L., Horz K.F. Morphology of Meteoroid and Debris Impact Craters Formed in Soft Metal Targets on the LDEF Satellite // Int. J. Impact Engng. 1995, v.16, N3, p.405-418
22. McDonnel J.A.M., HVI Phenomena Applications to Space Missions //Inter. J. of Impact Eng. 1999, v.23, p.597-619.

23. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Бедняков С.А., Новиков Л.С. Изменение морфологии поверхности металлов при сверхзвуковых соударениях // ФХОМ, 2001, №1, с.48-51
24. Иванов Л.И., Никитушкина О.Н. Эрозия поверхности образца, экспонировавшегося в открытом космосе, вследствие униполярных дуг // ФХОМ, 2003, №1, с.38-41
25. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Петров А.Н., Новиков Л.С., Коношенко В.П., Соколов В.Г. Структура микрократеров на поверхности металлических образцов, экспонировавшихся в открытом космосе // ФХОМ, 2002, №2, с.21-25
26. Акишин А.И., Докторов Ю.А. Эмиссия заряженных частиц ряда веществ под ударами песчинок // Изв. АН СССР сер.физ., 1962, т.XXVI, в.11, с.1435-1437
27. Акишин А.И., Баранов В.К., Каракулев Д.А., Кирюхин В.П., Терешина Л.П., Тихомиров Г.П. Изменение параметров оптических деталей при имитации марсианской пылевой бури // Оптико-механическая промышленность, 1980, №6, с.10-12
28. Palmer G., Chen Y.K., Papadopoulos P., Tauber M. Reassessment of Effect of Dust Erosion on Heat Shield of Mars Entry Vehicle // J. of Spacecraft and Rockets 2000, v.37, N6, p.747-752
29. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Марьин Б.В., Новиков Л.С. Регистрация канальным электронным умножителем ускоренных металлических частиц // ПТЭ, 1980, №6, с.129-130
30. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Марьин Б.В., Новиков Л.С.Электронная и ионная эмиссия при соударении микронных металлических частиц со скоростями 1-5 км/с с поверхностью твердого тела // ЖТФ, 1981, т.51, в.4, с.823-827
31. Ratcliff S.R., Burchell M.J., Cole M.J. Murphy T.W., Allahdadi F. Experimental Measurements of Hypervelocity Impact Plasma Yield and Energetic // Int. J. Impact Engng. 1997, v.20, p.663-674
32. Foshini L.E. Electromagnetic Interference from Plasmas Generated in Meteoroids Impacts // Europhysics Letters 1998, v.43, N2, 226-229
33. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника – М.: Наука, 2004, 704 с.
34. Levy L., Mandeville J.C., Siguier J.M., Reulet R., Sarrail D. Catani J.R., Gerlach L. Simulation of In-flight ESD Anomalies Triggered by Photoemission, Micrometeoroid Impact and Pressure Pulse. // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1997, v.44, N6, p.2201-2208
35. Акишин А.И., Докторов Ю.А. К вопросу об электрическом пробое в высоком вакууме // ЖТФ, 1964, т.XXXIV, в.2, с.352-353

36. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Новиков В.С., Сливков И.Н. К вопросу инициирования пробоя в вакууме ударами быстролетящих микрочастиц // ЖТФ, 1984, т. 54, с.179-181
37. Вершинин Ю.Н., Ильичев Д.С., Морозов П.А. Влияние ударного сжатия твердых диэлектриков на процесс инжекции в электрических полях // ЖТФ, 2000, т.70, в.1, с.85-87
38. Акишин А.И., Кирюхин В.П., Новиков Л.С., Тютрин Ю.И. Воздействие микрометеорного удара на электрическое разрушение стекол // ФХОМ, 1989, №1, с.50
39. Kassel R.S., Wortmann J.J. Metal-Oxide-Silicon Capacitor Detectors for Measuring Micrometeoroid and Space-Debris Flux // J. of Spacecraft and Rockets 1995, v.32, N4, p.710-718
40. Caswell R.D., McBride N., Taylor A. Olympus End of Life Anomaly – Perseid Meteoroid Impact Event // Int. J. Impact Engng, 1995, v.17, p.139-150
41. Michel Y., Roux N.Le., Durin C., Espinosa C., Moussi A., Chevalier J.M., Barrau J-J. Damages and Matter Ejection during HVI on Brittle Structures: Implications for Space Environment, Proc. of the 10 Int. Symp. on Materials in a Space Enviroment,Collioure,France,19-23 June 2006
42. Mandeville J.C., Moussi A., Siguier J.M. Space Debris: Analysis of Hardware after Exposure to Space. Proc. of the 10 Int. Symp. on Materials in a Space Environment, Collioure, France, 19-23 June 2006

**11**

1. Акишин А.И., Дунаев Н.М., Константинова В.В., Расторгуев В.А., Савченко С.А., Симонов А.Н., Камышков С.А., Конаныкин Л.В., Попов Ю.А., Яшин С.В. Атмосфера, создаваемая космическим аппаратом, и ее влияние на работоспособность бортовой аппаратуры. Модель космического пространства. Под ред. акад. С.Н.Вернова, т.2, М., НИИЯФ МГУ, 1983, с.244-309
2. Акишин А.И., Дунаев Н.М., Константинова В.В. Собственная атмосфера космических аппаратов и ее влияние на бортовые приборы, и технологию в космосе. Космическое материаловедение и технология. М, Наука.1977,с.65-77.
3. Акишин А.И., Новиков Л.С. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М., Знание, 1983/4, 64 с.
4. Акишин А.И., Новиков Л.С., Черник В.Н. Воздействие на материалы и элементы оборудования космических аппаратов вакуума, частиц ионосферной плазмы и солнечного у/ф - излучения. В кн. Новые

наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия под ред. Л.С.Новикова, М.И.Панасюка, М., ЭНЦИТЕХ.: 2000, с.100-138
5. Green B.D., Galica G.E., Munhall P.A., Vy O.M., Lesho J.C., Boies M.T., Benson R.S., Phillips T.E., Silver D.M., Erlandson R.E., Wood B.E., Hall D.F., Mill J.D. Local Environment Surrounding the Midcourse Space Experiment Satellite During Its First Week // J. Spacecraft and Rockets, 1998, v.35, №.2, p.183-190
6. Cary E. Galica, Green B.D., Boies M.T., Vy O.M., Silver D.M., Benson R.S., Erlandson R.M., Wood B.E., Hall D.E. Particle Environment Surrounding the Midcourse Space Experiment Spacecraft // J. Spacecraft and Rockets, 1999, №4, p.561-565
7. Wood B.E., Hall D.F., Lesho J.C., Vy O.M., Dyer J.S., Bertrand W.T. Midcourse Space Experiment Satellite Flight Measurements of Contamination on Quartz Crystal Microbalances // J. Spacecraft and Rockets, 1998, v.35, №4, p.533-538
8. Pippin H.G.., Woll. S.L.B., Loebs V.A., Bohnhoff-Heavacek G. Contamination Effects on the Passive Optical Sample Assembly Experiments // J. Spacecraft and Rockets, 2000, v,37, №.5, p.567-572
9. Акишин А.И., Новиков Л.С. Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов. М., Изд-во Мос.Ун-та, 1990, 89 с.
10. Чиров А.А., Бургасов М.П., Заявлин В.Р., Летин В.А. Влияние струй плазмы электроракетных двигателей на энергетические характеристики солнечных батарей // Космические исследования ,1997, №3, с.331-333
11. Бургасов М.П., Надирадзе А.Б., Чиров А.А. ,Заявлин В.Р., Летин В.А., Ермошкин Ю.М., Эвенов Г.Д. Эффекты взаимодействия струи электроракетных двигателей и солнечных батарей космических аппаратов // Космические исследования,1994,т.32,в 4-5, с.194-201
12. Гаврюшин А.В., Надирадзе А.Б., Егоров В.Г.Влияние ионной бомбардировки на прозрачность защитных стекол солнечных батарей // Перспективные материалы, 2003, №3, с.18-23
13. Акишин А.И., Зазулин В.С., Контроль толщины пленок, получаемых в вакууме, кварцевым резонатором // Приборы и техника эксперимента. 1963, №1, с.152-154
14. Leet S.J., Fogdall L.B., Wilkinson M.C. Thermo-Optical Property Degradation of Irradiated Spacecraft Surfaces.// J. Spacecraft and Rockets, 1995, v.32, №5, p.832-838
15. Scurat V.E., Tansyrev G.D., Beriozkina N.G., Volkov A.V., Jigatch A.N., Leipuksky I.O., Pshenichnikov P.A., Samsonov P.V., Toropov V.P., Demigod S.A., Naumov S.F., Sokolova S.P. Surface Contamination of

Some Materials of the Space Station “MIR” // High Performance Polymers, 2001, v.13, p.337-353
16. Woll S.L.B., Loeb’s V.A., Phelps C.S., Pippin G., Crandall D.G., Kinard W.H, .Study of Long Duration Exposure Facility Contaminated Chromic-Acid-Anodized Surfaces.// J. Spacecraft and Rockets, 2001, v.38, №4, p.569-576
17. Дунаев Н.М., Акишин А.И., Константинова В.В. Рассеяние света средой, создаваемой космическим аппаратом // Космические исследования, 1972, т. X, вып.4, с.580-588
18. Акишин А.И. Воздействие собственной внешней атмосферы космических аппаратов на их материалы и оборудование.// Перспективные материалы, 2007, №2, с.14-21

**12**

1. Behrisch R. Plasma Material Interactions in Fusion Research // Изв. АН. сер. физ., 2004, т.68, №3,с.427-433
2. Акишин А.И. Методы радиационных испытаний космических материалов. Учебное пособие.-М.: Изд-во Мос. Ун-та.2005, 143 с.
3. Akishin A.I., Tyutrin Yu.I., Khorosh A.G. Destruction of Insulators in Superconducting Magnetic Systems for Use in Thermonuclear Reactors Due to Electrostatic Charge under Gamma and Electron Irradiation // J. Nucl. Mater. 1992, v.191-194, p.1372-1373
4. Akishin A.I., Tsepliaev L.I. Destruction and Discharge Phenomena in the Irradiated Glasses// J. Nucl. Mater. 1996, v.233-236, p.1318-1320

..

Методическое и учебное пособие

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ АКИШИН

# КОСМИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Редактор К.И.Стратилатова
Работа поступила в ОНТИ 5.06.2007г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии «КДУ»
Тел./факс(495) 939-40-36E-mail:pess@kdu.ru

209