

МАХОТИН Денис Юрьевич

**ЭФФЕКТЫ НАКОПЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В СТЕКЛООБ-
РАЗНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИ-
ТЫ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях
(авиационная и ракетно-космическая техника, технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2006

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации –
Институте медико-биологических проблем Российской Академии Наук.

Научный руководитель:

Доктор технических наук

Цетлин Владимир Владимирович.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор,
лауреат Государственной премии СССР

Гецелев Игорь Владимирович

Доктор технических наук

Беркович Юлий Александрович

Ведущая организация:

ФГУП «Научно-производственное предприятие "Квант"»

Защита состоится « ____ » _____ 2006 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.111.02 при Государственном научном центре Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем РАН по адресу: 123007, Москва, Хорошевское шоссе, 76а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного центра Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем РАН (ГНЦ РФ – ИМБП РАН).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.111.02,
доктор биологических наук

Назаров Н. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Вопросам взаимодействия ионизирующего излучения с веществом уделяется большое внимание, поскольку связаны они со стойкостью конструкционных материалов и ресурсом работы элементов аппаратуры, предназначенной для эксплуатации в условиях высоких радиационных нагрузок.

Особое место эти вопросы занимают в космической технике. С воздействием заряженных частиц, главным образом электронов, на диэлектрические материалы связаны такие эффекты, как: электризация и разрядные явления между элементами, расположенными на поверхности космических аппаратов; деградация оптических свойств радиационно-защитных покрытий и спад мощности фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей; сбои в работе навигационной и телеметрической аппаратуры, приводящие к нарушению или потере связи с космическим аппаратом. Изучение процессов поверхностной и объемной электризации диэлектриков при облучении заряженными частицами позволяет предвидеть возможные негативные явления во время эксплуатации космического аппарата (КА) в условиях воздействия ионизирующего излучения естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) и межпланетного пространства.

Интерес к исследованиям накопления объемного электрического заряда (ОЗ) диэлектриками обусловлен еще и возможностью применения этого эффекта в космосе для повышения эффективности радиационной защиты элементов КА. Актуальность задачи повышения эффективности радиационной защиты в космосе определяется жесткими требованиями к массе конструкций. Применение диэлектрических материалов, способных накапливать объемный электрический заряд непосредственно во время полета КА, может позволить повысить эффективность защиты, не увеличивая массу покрытий, или даже снизить массу, поскольку эффект дополнительного ослабления потока электронов эквивалентен увеличению толщины защитного слоя.

В результате исследований, проводившихся в последние годы, были синтезированы многокомпонентные боро- и силико-фосфатные стекла, способные при облучении их электронами накапливать сильные электрические поля. В ряде работ (Цетлин В. В. и др., 1993; Цетлин В. В., 1998; и др.) было показано, что накопленный объемный электрический заряд сохраняется в образцах длительное время, измеряемое годами с момента облучения, причем не только на Земле, но и на открытой поверхно-

сти космического аппарата в условиях полета в околоземном космическом пространстве. Авторами этих работ было предложено использовать синтезированные стекла в качестве радиационно-защитных покрытий элементов космических аппаратов (КА), в том числе фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей.

Общее направление настоящего исследования является продолжением перечисленных выше работ и определяется необходимостью разработки современного комплексного теоретико-экспериментального метода диагностики внедренного объемного заряда, позволяющего определять величину напряженности электрического поля ОЗ и прогнозировать влияние поля ОЗ в условиях облучения образцов на околоземных орбитах.

Цель работы: разработка теоретико-экспериментального метода для определения электрических потенциалов в радиационно-заряженных неорганических стеклообразных диэлектриках и прогнозирования возможных эффектов влияния электрического поля объемного заряда на характеристики электронных пучков в различных условиях облучения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач, составляющих экспериментальную и теоретическую части работы. Экспериментальная часть заключается в отработке методики зарядки и последующей диагностики внедренного в образцы ОЗ. Теоретическая часть работы включает в себя создание алгоритма расчета взаимодействия электронов с веществом в присутствии электрического поля ОЗ для расчета величины напряженности создаваемого им электрического поля при помощи моделирования условий эксперимента, а также для прогнозирования возможного эффекта влияния поля ОЗ на поток электронов в околоземном космическом пространстве или на облучательных установках.

Задачи работы:

- Создание установки для радиационного зондирования материалов с внедренным ОЗ на базе сцинтилляционного метода с использованием современных технологий.
- Отработка методики радиационного зондирования образцов неорганических стекол, обладающих способностью накапливать ОЗ в условиях радиационной электризации.
- Проведение экспериментов по облучению образцов неорганических стекол различной толщины на линейном ускорителе электронов.

- Разработка алгоритма расчета взаимодействия электронного излучения с произвольно заданными энергетическим и угловым распределениями с материалами в присутствии неоднородного электрического поля ОЗ.
- Оценка величины образовавшихся полей на основе экспериментальных и теоретических данных.
- Проведение расчета радиационных нагрузок в фотоэлектрическом преобразователе солнечной батареи в условиях полета на различных околоземных орбитах, оценка влияния поля ОЗ на величину поглощенной дозы электронного излучения.

Научная новизна. Разработан метод расчета взаимодействия электронов с веществом в присутствии неоднородного электрического поля.

Предложена методика бета-зондирования ОЗ в массивных образцах диэлектриков. Методика заключается в измерении спектра тормозного излучения за образцом, генерируемого электронами радионуклидного бета-источника $Sr^{90}-Y^{90}$ с последующим определением величины напряженности и глубины залегания слоя ОЗ при помощи расчета спектра тормозного излучения, генерируемого в образце в присутствии электрического поля ОЗ.

На защиту выносятся:

- Алгоритм и программа расчета взаимодействия электронов с веществом в присутствии неоднородного электрического поля.
- Экспериментально-теоретический метод определения величины напряженности электрического поля накопленного ОЗ, как для тонких, так и для массивных образцов.
- Результаты теоретических оценок эффективности радиационно-защитных свойств стеклянных покрытий, способных накапливать ОЗ.

Практическая ценность работы:

- создана спектрометрическая установка для измерения спектров бета- и гамма-излучения;
- разработана экспериментально-теоретическая методика зондирования ОЗ как в тонких, так и в массивных образцах диэлектриков.
- Разработана программа расчета прохождения электронов с энергиями от 0.01 до 5 МэВ в материалах с атомными номерами от 2 до 30, в присутствии неоднородного электрического поля.

- В работе представлены теоретические данные по величине энерговыделения электронного излучения в кремниевом фотоэлектрическом преобразователе солнечной батареи для спектров различных околоземных орбит КА.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включающих: разработку алгоритма и программы расчета взаимодействия электронов с веществом в присутствии неоднородного электрического поля; создание спектрометрического комплекса и выполнение на нем экспериментальной части работы; участие в экспериментах на ускорителе в Малой Ускорительной Лаборатории (МУЛ) МИФИ, а так же анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

Реализация полученных данных.

При помощи разработанного алгоритма взаимодействия электронов с веществом выполнена работа по определению поглощенной дозы в фотоэлектрическом преобразователе солнечной батареи, возвращенной с орбитального комплекса «МИР» после 11-и лет эксплуатации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Школа-конференция молодых ученых «Современные проблемы радиационной физики твердого тела», 25 ноября - 2 декабря 2001 г., Томский политехнический университет, г. Томск, Россия.
2. Всероссийская научная конференция “Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB”, 28-29 мая 2002 г., Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, Москва, Россия.
3. Метод диагностики электрических полей в заряженных защитных покрытиях солнечных батарей. ГНЦ РФ ИМБП РАН, 2002 г.
4. XXXIII международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. 26-28 мая 2003 г., НИИЯФ МГУ, Москва, Россия.
5. Актуальные проблемы российской космонавтики. 29-е академические чтения по космонавтике. МФТИ им. Н. Э. Баумана, 2005 г., Москва, Россия.

Публикации по теме диссертации:

Основные результаты и положения диссертации изложены в 3 статьях в рецензируемых изданиях, 2 сборниках трудов конференций, 3 тезисах конференций.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, основных результатов и выводов и содержит 123 страницы, включает 16 таблиц, 39 рисунков; список литературы включает 81 источник.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснованы актуальность работы, ее цель, решаемые задачи, отражены научная новизна и значимость результатов исследований.

В **первой главе** на основе данных литературы сделан обзор экспериментальных и теоретических методов диагностики и определения величины электрического поля внедренного электрического заряда в диэлектрических материалах.

В ряде работ по изучению эффекта объемной электризации диэлектриков было установлено, что, в целях использования в качестве радиационно-защитных покрытий, неорганические стекла предпочтительнее заряжающихся полимерных материалов благодаря их более высокой теплостойкости и твердости, а также высокой исходной оптической прозрачности. В настоящей работе использовались боро- и силикофосфатные стекла с различными модификаторами, разработанные с целью изучения возможности повышения эффективности радиационной защиты при помощи заряжающихся диэлектрических материалов (Цетлин В. В., 1998).

Накопленный при облучении стекол на ускорителе ОЗ создает электрическое поле, дополнительно ослабляющее поток электронов, падающих на образец. Для оценки эффективности использования этого эффекта на орбитах искусственных спутников Земли необходимо оценить величины электрических полей, реально наблюдающихся в наземных экспериментах. Поскольку на сегодняшний день не существует надежных неразрушающих методов прямого измерения напряженности электрического поля в диэлектрических материалах, для оценки напряженности необходимо использовать экспериментально-теоретическую методику: сначала методом β -зондирования измерять коэффициенты прохождения β -излучения радионуклидного источника $\text{Sr}^{90}-\text{Y}^{90}$ до и после зарядки образцов, затем проводить теоретическое моделирование эксперимента, в ходе которого подбирать значение напряженности электрического поля, приводящее к соответствующему изменению коэффициента прохождения. Результаты оценок напряженности электрического поля ОЗ в этом случае позволяют при помощи расчетов оценить уменьшение поглощенной энергии электронно-

го излучения в фотоэлектрическом преобразователе солнечной батареи для различных спектров электронов, характерных для различных орбит искусственных спутников.

Таким образом, поскольку основной задачей настоящей работы является прогнозирование возможных эффектов влияния электрического поля ОЗ на характеристики электронных пучков в различных условиях облучения, в первую очередь необходимо выбрать и отработать методику зарядки и последующей диагностики внедренного в образцы ОЗ для оценки величины создаваемой им напряженности поля.

Во время облучения образцов на линейном ускорителе для контроля процесса зарядки в предыдущих работах (Цетлин В. В. и др., 1993) осуществлялось измерение мощности поглощенной дозы за образцом с помощью алмазного дозиметра ионизирующего излучения АДИИ-2. Для определения наличия электрического поля ОЗ в образцах после прекращения облучения на ускорителе была выбрана методика бетазондирования, заключающаяся в сравнении коэффициентов прохождения, определяемых как интеграл энергетического спектра прошедших за образец электронов радионуклидного источника $Sr^{90}-Y^{90}$ до и после его зарядки. Для осуществления бетазондирования был выбран сцинтилляционный метод регистрации частиц, обладающий высокой эффективностью к электронам и гамма-квантам и сравнительно низким коэффициентом отражения электронов. Кроме этого, сцинтилляционный метод регистрации достаточно прост в реализации, поскольку не требует азотного охлаждения детекторов. Существенным недостатком является сравнительно низкое энергетическое разрешение, не позволяющее проводить измерения абсолютных активностей изотопов с высокой степенью точности, но вполне достаточное для измерения коэффициентов прохождения электронов.

В настоящей работе использовались те же методы диагностики электрического потенциала. Для измерения спектров прошедших за образец электронов радионуклидного источника $Sr^{90}-Y^{90}$, а также спектров тормозного излучения за массивными образцами, была собрана спектрометрическая установка на базе АЦП, выполненного в виде платы расширения персонального компьютера.

Для определения напряженности электрического поля объемного заряда по результатам бетазондирования образцов (измерению коэффициентов прохождения) необходимым условием является разработка алгоритма расчета взаимодействия электронов с веществом в присутствии электрического поля ОЗ, позволяющего подобрать

значение напряженности электрического поля ОЗ, приводящее к такому же изменению расчетного значения коэффициента прохождения, как и в эксперименте.

Для решения этой задачи был выбран метод статистических испытаний (Монте-Карло). При современном уровне развития вычислительной техники он позволяет решать задачу переноса электронов в сложной трехмерной геометрии без каких-либо приближений, использовавшихся ранее для увеличения скорости расчета.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию эффекта объемной электризации диэлектрических стекол.

Как и в выполненной ранее работе (Цетлин В. В., 1998), зарядка образцов проводилась при помощи облучения на линейном ускорителе электронов в Малой Ускорительной Лаборатории Московского Инженерно-Физического Института (МУЛ МИФИ). Ускоритель позволяет получать импульсные пучки электронов в диапазоне энергий 0.3 – 3 МэВ при длительности импульса 50 мкс. Плотность ток пучка на образце варьировалась в пределах 0.01 – 0.25 мкА/см².

Образцы стекол располагались на расстоянии 35 см от выходного окна ускорителя. На таком расстоянии электроны пучка претерпевают значительное угловое рассеяние в воздухе при потере энергии ~70 кэВ. В результате на образец падал широкий пучок электронов с энергетическим распределением, близким к нормальному. Стабильность тока пучка в процессе облучения непрерывно контролировалась по току электронов, попадающих на металлическое кольцо (рис.1).

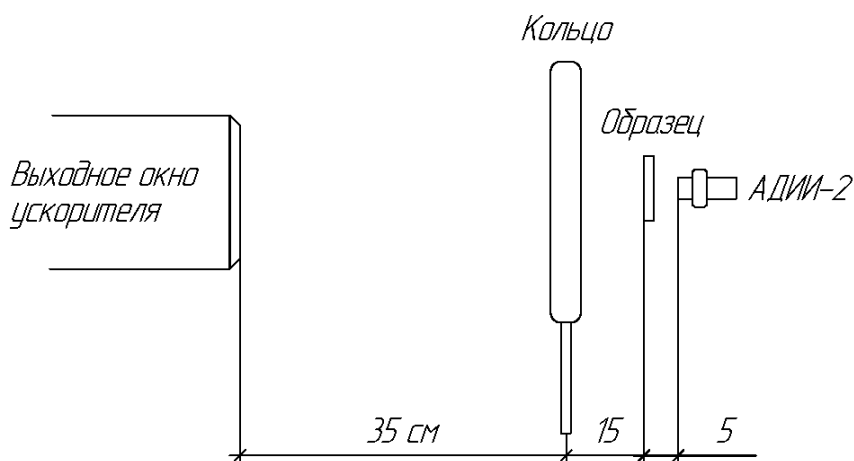


Рисунок 1. Схема облучения образцов на линейном ускорителе.

Толщина образцов выбиралась меньшей, сравнимой или превышающей ионизационный пробег электрона R. В процессе облучения проводились измерения мощности дозы излучения за образцом. Для этих целей с тыльной стороны образца стекла

располагался кристаллический алмазный детектор ионизирующего излучения АДДИИ-2 с высокой чувствительностью к электронному и гамма излучению.

Результаты, полученные в экспериментах на ускорителе, полностью согласуются с работами (Цетлин В. В., 1998), выполненными ранее. Наибольшее относительное снижение мощности дозы происходит при толщине образца порядка $0.75R < d < 0.9R$. В этом случае влияние поля ОЗ может приводить к полному поглощению пучка. Т. е. в результате формирования ОЗ доза излучения за образцом, формировавшаяся изначально в основном пучком прошедших электронов, становится преимущественно сформированной тормозным излучением, что приводит к спаду относительной мощности дозы до нескольких десятых долей первоначальной величины.

Распределение плотности ОЗ внутри материала можно представить по картине расположения разрядных фигур, возникающих спонтанно во время облучения на ускорителе или после него, возникшего в результате ударно-стимулированной разрядки. В плоских образцах стекол разрядные фигуры располагаются в плоскости, параллельной облучаемой поверхности. Толщина слоя разрядной фигуры составляет около 0.01 см и практически не зависит от толщины образца (Цетлин В. В., 1998).

Глубина залегания слоя разрядной фигуры определяется ионизационным пробегом электронов пучка. Если ионизационный пробег не превышает толщины образца, разрядная фигура располагается вблизи конца пробега частиц. Если же ионизационный пробег больше толщины образца, слой разрядной фигуры располагается вблизи половины толщины пластины.

Такое расположение разрядных фигур позволяет предположить, что объемный электрический заряд распределен в образце неравномерно и занимает узкий слой, параллельный облучаемой поверхности. Кроме того, так как измерения электрического поля на поверхностях образца дают значение всего в несколько милливольт (Стародубцев В. А., 1976), можно считать, что электрическое поле ОЗ целиком сосредоточено внутри образца, и потенциал между его поверхностями практически равен нулю.

Решив для приведенных условий уравнение Пуассона, получим зависимость напряженности электрического поля от глубины образца (1). В случае расположения слоя ОЗ в середине образца, напряженность электрического поля в левой и правой частях (относительно слоя ОЗ) одинакова (рис. 2, А). Смещение слоя ОЗ к облучаемой поверхности приводит к уменьшению напряженности поля в правой части образ-

ца (рис. 2, В), смещение слоя от облучаемой поверхности приводит к увеличению напряженности в правой части образца (рис. 2, С).

$$qE(x) = \begin{cases} -qE_0, & 0 < x < d_1; \\ qE_0 \cdot \left[(x - d_1) \cdot \left((d_2 - d_1) \left(1 - \frac{d_1 + d_2}{2d} \right) \right)^{-1} \right], & d_1 \leq x \leq d_2; \\ qE_0 \cdot \left[(d_1 + d_2) \cdot \left(2d \cdot \left(1 - \frac{d_1 + d_2}{2d} \right) \right)^{-1} \right], & d_2 < x < d \end{cases} \quad (1)$$

где q – элементарный заряд, E_0 – заданная напряженность электрического поля ОЗ, E – рассчитанная напряженность, d_1 и d_2 – границы слоя ОЗ, d – толщина образца.

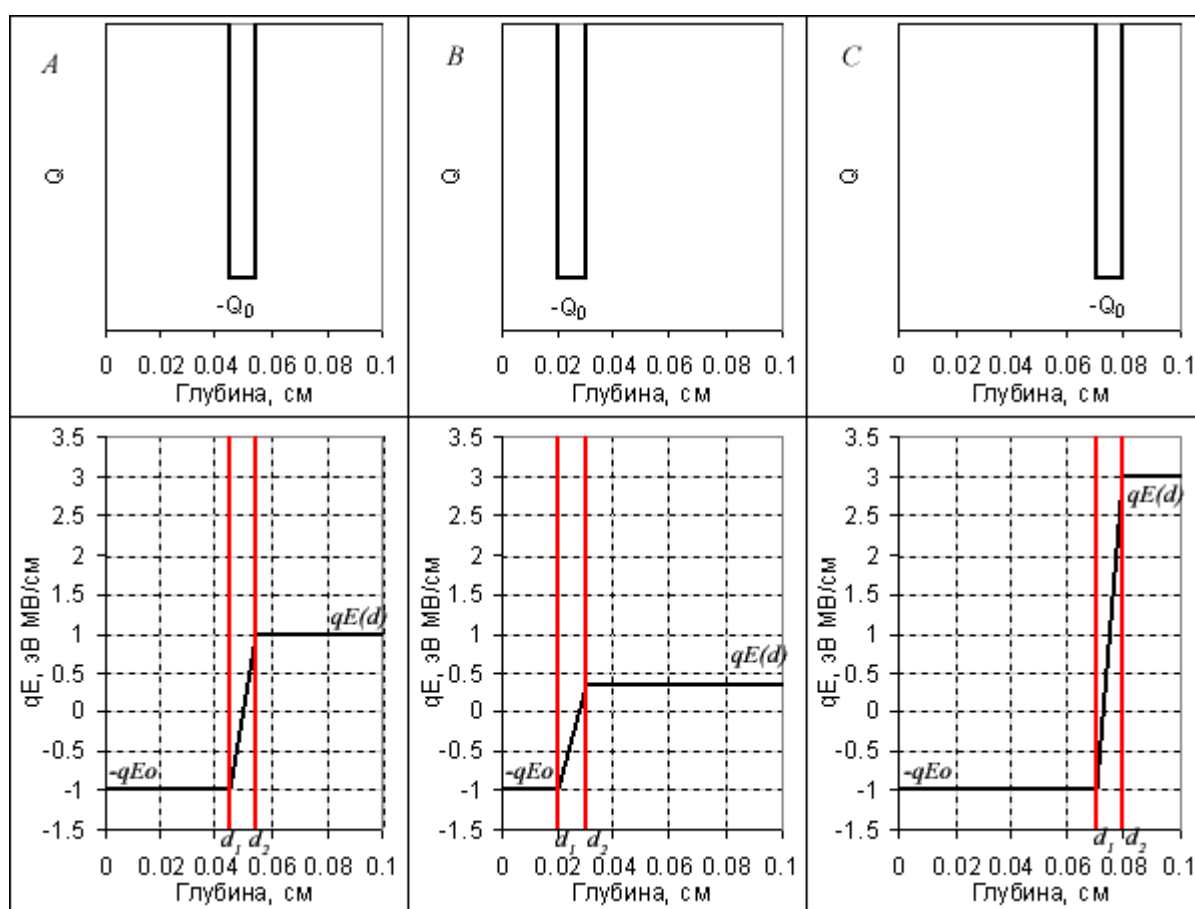


Рисунок 2. Профиль силы, действующей со стороны электрического поля ОЗ на поток электронов, падающий на образец слева, по глубине образца. Толщина образца 0.1 см. А – слой ОЗ расположен в центре, В – слой ОЗ смещен к передней поверхности, С – к тыльной поверхности образца.

Наличие остаточного ОЗ в образцах и степень его влияния на прохождение электронов оценивалась при помощи методики радиационного зондирования электронами радионуклидного источника $Sr^{90}-Y^{90}$. Измерения проводились через несколько часов после прекращения облучения на ускорителе.

За тонкими образцами, не полностью поглощающими электроны источника, измерялись энергетические спектры прошедших электронов. На рис. 3 приведены энергетические спектры электронов за образцом стекла состава 1012. Кривая А соответствует зондированию до зарядки, кривая В – после зарядки. Результаты измерений за заряженными образцами (толщины $\sim 0.5 - 1.5$ мм) по отношению к незаряженным показали снижение коэффициента прохождения на 7–10%.

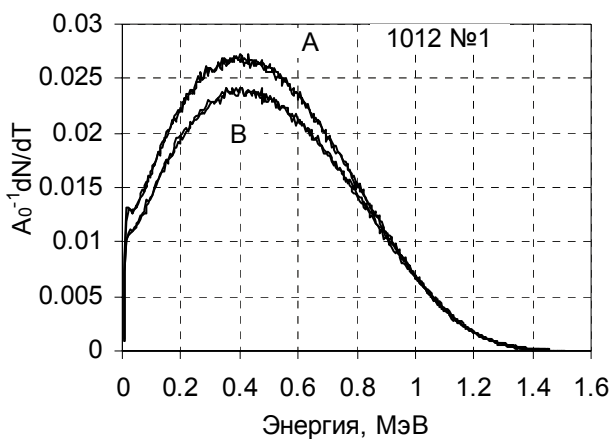


Рисунок 3. Энергетические спектры прошедших электронов до (А) и после (В) зарядки тонкого образца стекла состава 1012.

За массивными образцами, полностью поглощающими электроны источника, измерялись энергетические спектры квантов тормозного излучения. Энергетический спектр тормозного излучения представляет собой сплошной спектр гамма квантов, формирующийся в результате неупругого рассеяния электронов, и пики характеристического излучения, формирующиеся при возбуждении электронов К-оболочек атомов. На рис. 4 представлены измеренные спектры тормозного излучения за одним из образцов стекол до и после его зарядки. Энергия пика характеристического излучения составляет ~ 35 кэВ, что соответствует энергии К-линии La^{57} , оксид которого присутствует в стеклах условных марок Ц.

Кривая А соответствует спектру до зарядки образца на линейном ускорителе. Кривая С соответствует зондированию заряженного образца со стороны облучения, кривая В – с обратной стороны. Все кривые нормированы на площадь спектра А. На графике хорошо видно различие в спектрах незаряженных и заряженных образцов. Различие спектров В и С свидетельствует о залегании слоя ОЗ вблизи поверхности, подвергавшейся облучению на линейном ускорителе. Совпадение кривых В и С свидетельствует о залегании слоя ОЗ вблизи середины образца.

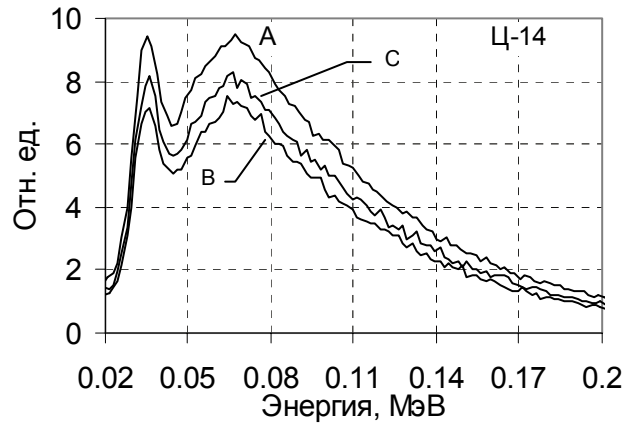


Рисунок 4. Энергетические спектры квантов тормозного излучения до (А) и после (В и С) зарядки массивного образца стекла состава Ц-14.

К уменьшению потока квантов тормозного излучения приводят два фактора. Во-первых, в результате увеличения коэффициента обратного отражения уменьшается количество электронов, дающих вклад в формирование тормозного излучения за образцом. И, во-вторых, при наличии электрического поля ОЗ происходит сокращение глубины проникновения электронов в образец, в результате чего область, в которой генерируется тормозное излучение, смещается ближе к облучаемой поверхности. Таким образом, гамма-квантам приходится преодолеть большее расстояние до детектора, что приводит к увеличению влияния самопоглощения в материале. В результате уменьшается не только сплошной спектр тормозного излучения, но и снижается пик характеристического излучения.

Результаты измерений тормозного излучения за массивными образцами заряженных стекол (толщины более 3 мм) по отношению к незаряженным показали уменьшение потока тормозного излучения вплоть до 25%. Зондирование образцов с передней и тыльной поверхности позволили экспериментально подтвердить неравномерность распределения слоя ОЗ по толщине образца.

В **третьей главе** подробно изложен алгоритм расчета взаимодействия электронов с веществом в присутствии электрического поля.

В качестве дифференциального сечения упругого рассеяния в данном алгоритме используется сечение Резерфорда (2) с поправками на экранирование ядра атомными электронами при помощи параметра экранирования Мольера (3) и на влияние неупругих столкновений налетающей частицы с атомными электронами (Галишев В. С., 1972).

$$\sigma(T, \vartheta) = 2\pi r_0^2 Z(Z+1) \cdot \frac{(T+1)^2}{T^2(T+2)^2} \cdot \frac{1}{(1+2\eta - \cos \vartheta)^2}, \quad (2)$$

где r_0 – классический радиус электрона, Z – атомный номер элемента в таблице Д. И. Менделеева, T – кинетическая энергия электрона, ϑ – телесный угол рассеяния электрона ($0 < \vartheta < \pi$), η – параметр экранирования Мольера.

$$\eta = \frac{1}{4} \left\{ \frac{Z^{1/3}}{0.885 \cdot 137} \right\}^2 \cdot \frac{1.13 + 3.76 \left(\frac{Z}{137} \right)^2 \frac{(T+1)^2}{T(T+2)}}{T(T+2)}. \quad (3)$$

Отношение дифференциального сечения рассеяния к полному сечению (формула (2), проинтегрированная по всем углам) дает плотность вероятности рассеяния частицы с кинетической энергией T на угол ϑ :

$$p(T, \vartheta) \equiv \frac{\sigma(T, \vartheta)}{\sigma_0(T)} = \frac{\eta(1+\eta)}{\pi(1+2\eta - \cos \vartheta)^2}. \quad (4)$$

Массовая тормозная способность электронов, обусловленная столкновениями, учитывающая релятивистские и спиновые эффекты и эффекты обмена за счет неразличимости падающих электронов и электронов мишени имеет вид (Доклад 37 МКРЕ, 1987):

$$\frac{1}{\rho} S_{\text{col}} = \frac{2\pi r_0^2 m_0 c^2}{u} \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[\ln \left(\frac{T^2}{I^2} \right) + \ln \left(1 + \frac{\tau}{2} \right) + (1 - \beta^2) \left(1 + \frac{\tau^2}{8} - (2\tau + 1) \ln 2 \right) - \delta \right] \quad (5)$$

где r_0 – радиус электрона; $m_0 c^2$ – энергия покоя электрона; β – скорость падающей частицы в единицах скорости света; u – атомная единица массы; T – кинетическая энергия электрона; I – средняя энергия возбуждения атомов среды; τ – отношение кинетической энергии электрона к его энергии покоя; δ – поправка на эффект плотности.

Расчет генерации тормозного излучения в данной модели осуществлен с использованием аппроксимирующих выражений для сечений тормозного излучения (Арутюнов В. В. и др, 1971), поскольку такой вид выражений удобен для розыгрыша энергии гамма-кванта прямым выбором случайного числа из равномерного распределения чисел на интервале (0;1).

Траектория электронов рассчитывается в трехмерной геометрии.

Взаимодействие электронов с электрическим полем описано релятивистской теорией поля с использованием следующих допущений:

- на длине свободного пробега процессы взаимодействия электронов с электрическим полем и атомами среды (ионизационные и радиационные потери) рассматриваются как независимые;

- на длине свободного пробега напряженность электрического поля OZ считается постоянной, равной среднему значению на половине длины свободного пробега в проекции на ось Z ;
- время, за которое электрон преодолевает длину свободного пробега, считается независимым от напряженности поля объемного заряда;
- электрическое поле задается функцией от глубины образца (Z координаты), любая плоскость, перпендикулярная оси Z , является эквипотенциальной.

Последнее предположение, сводящее, по сути, решение задачи к полу бесконечной геометрии, позволяет рассчитывать изменение траектории движения электрона в двумерной геометрии, где одна координата является обобщением координат X и Y (6), и вторая является координатой Z . Изменение траектории электрона происходит в плоскости, содержащей отрезок свободного пробега и параллельной оси Z в направлении, противоположном направлению линий напряженности электрического поля.

$$(XY) = \sqrt{X^2 + Y^2} . \quad (6)$$

Изменение состояния электрона в электрическом поле определяется дифференциальными уравнениями:

$$\dot{p}_X = 0, \dot{p}_Y = 0, \dot{p}_Z = qE$$

с решениями:

$$p_X = p_{0X}, p_Y = p_{0Y}, p_Z = p_{0Z} + qEt$$

соответственно, где q – элементарный заряд, p_X, p_Y, p_Z – пространственные составляющие 4-импульса электрона, E – напряженность электрического поля, t – время. Следовательно, выражение для энергии электрона в электрическом поле с учетом (6) примет вид:

$$T = c \cdot \sqrt{m^2 c^2 + p^2} = c \cdot \sqrt{m^2 c^2 + p_{0XY}^2 + (p_{0Z} + qEt)^2} . \quad (7)$$

Координаты точки рассеяния определяются из решения дифференциальных уравнений:

$$\frac{d(XY)}{dt} = \frac{p_{0XY} \cdot c^2}{T}, \quad \frac{dZ}{dt} = \frac{(p_{0Z} + qEt) \cdot c^2}{T};$$

Решение для обобщенных координат (XY) :

$$(XY) = \int_0^t \frac{p_{0XY} \cdot c^2}{T} dt = \frac{p_{0XY} \cdot c}{qE} \cdot \left[\ln \left(qEt + p_{0Z} + \frac{T}{c} \right) - \ln \left(p_{0Z} + \frac{T_0}{c} \right) \right]; \quad (8)$$

Решение для Z-координаты:

$$Z = \int_0^t \frac{(p_{0Z} + qEt) \cdot c^2}{T} dt = \frac{1}{qE} (T - T_0). \quad (9)$$

Так как направление электрона изменилось, необходимо внести поправку в единичный вектор направления движения \vec{e} , который определяется измененным вектором импульса:

$$\vec{e} = \left(\frac{p_{0XY} \cdot \cos \varphi}{p}, \frac{p_{0XY} \cdot \sin \varphi}{p}, \frac{p_Z}{p} \right). \quad (10)$$

Для вычисления времени движения электрона воспользуемся принятыми допущениями. Так как взаимодействие электрона с электрическим полем рассматривается как независимый процесс, можно полагать, что движение электрона между упругими соударениями в отсутствии электрического поля является равномерным прямолинейным. Полагая, кроме того, что время, за которое электрон преодолевает длину свободного пробега, не зависит от величины напряженности электрического поля, вычислим его для случая $E_0=0$:

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{p_0 \cdot c^2}{T_0}; \quad dt = \frac{T_0}{p_0 \cdot c^2} dS; \quad (11)$$

$$t = \int_0^\lambda \frac{T_0}{p_0 \cdot c^2} dS = \frac{T_0}{p_0 \cdot c^2} \lambda$$

Таким образом, изменение энергии электрона при движении в электрическом поле вычисляется по формуле (7) с учетом (11), изменение координат вычисляется по формулам (8–9), изменение направления движения учитывается формулой (10).

В целях верификации программы был выполнен ряд расчетов, позволяющих оценить точность получаемых результатов. Сравнения результатов расчетов с данными по ионизационным пробегам частиц (Доклад 37 МКРЕ, 1987), позволяют сделать вывод о высокой точности учета ионизационных потерь энергии частиц.

Расчеты коэффициента обратного отражения, имеющего большое практическое значение при учете электрического поля и характеризующего точность углового распределения частиц, оценивались в сравнении с данными, рассчитанными по алгоритму (Т. Tabata et al., 1974). Результаты сравнений выбранных параметров для ПММА, боросиликатного стекла, алюминия и железа показали, что коэффициенты обратного отражения имеют расхождения, что объясняется использованием сечения Резерфорда,

занижающего вероятность рассеяния частиц на большие углы. Для боросиликатного стекла и алюминия коэффициенты обратного отражения имеют удовлетворительное (не хуже $\pm 10\%$) схождение в интересующем нас интервале энергий 0.25 – 3 МэВ, что позволяет сделать вывод о возможности применения данного алгоритма расчета в рамках поставленной задачи.

В условиях изотропного падения пучка точность расчета вероятностей рассеяния частиц на большие углы влияет на конечный результат существенно меньше, особенно при расчете пучков широкого энергетического спектра. Результаты сравнения расчетных энергетических спектров прошедших электронов за поглотителями из различных материалов с экспериментальными показали высокую (не хуже $\pm 5\%$) точность расчета. Различия в спектрах для тонких поглотителей объясняется неточностью задания формы падающего спектра, поскольку в расчете используется измеренный спектр источника $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$, отличающийся от реального из-за ограниченной точности бета-спектрометрии. Проблема более точного восстановления падающего спектра в данной работе не поднималась, поскольку толщина стекол, использующихся в качестве защитных покрытий на практике, достаточно велика.

Результаты верификации позволяют сделать вывод о применимости данного алгоритма в диапазоне атомных номеров материалов Z до 15 – 17 и энергии падающих электронов от 0.25 до 3 МэВ в условиях нормального падения на образец моноэнергетического пучка при точности расчета не хуже $\pm 20\%$.

При расчете изотропных пучков широкого энергетического спектра возможно применение данного алгоритма в более широком диапазоне атомных номеров ($Z \sim 30$) и энергий падающих электронов (до 5 – 7 МэВ) при той же точности.

В **четвертой главе** диссертации представлены результаты исследования радиационно-защитных свойств заряжающихся неорганических стекол.

Первая часть главы посвящена теоретическому исследованию влияния поля ОЗ на прохождение моноэнергетических пучков электронов в условиях нормального и изотропного падения на мишень. Результаты исследования подтверждают сделанный ранее (Цетлин В. В., 1998) вывод о том, что наиболее целесообразно применять заряжающиеся защитные покрытия для снижения дозовых нагрузок на объекты в области соотношения толщины покрытия d и ионизационного пробега электронов R – $0.6 \leq d/R < 1$.

Важным результатом теоретического исследования влияния поля ОЗ на прохождение моноэнергетических пучков, изотропно падающих на образец, является определение вида зависимости коэффициента прохождения от напряженности поля ОЗ $K_p(E)$. Эта зависимость близка к линейной в широком диапазоне начальных энергий электронов. Знание вида зависимости $K_p(E)$ позволяет определять величину напряженности поля накопленного ОЗ в образцах, используя данные по относительному изменению коэффициента прохождения, полученные при бета-зондировании образцов до и после их зарядки на линейном ускорителе.

Вторая часть главы посвящена определению напряженности поля ОЗ в тонких образцах по результатам бета-зондирования.

Эффект зарядки наиболее выражен в образцах стекол составов 1008, 1010 и Ц-13, в которых достигается наибольшее различие коэффициентов прохождения до и после зарядки, а также дольше удерживается объемный заряд. Расчеты напряженности поля в среднем по этим образцам дают значение ~ 1.5 МВ/см, что соответствует разности потенциалов между слоем ОЗ и поверхностью образца порядка 80 – 90 кВ. Уменьшение коэффициента прохождения достигает $\sim 12\%$.

Третья часть главы посвящена определению напряженности поля и глубины залегания ОЗ в массивных образцах стекол по результатам измерений спектров тормозного излучения, генерируемого электронами источника $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$.

Глубина залегания слоя ОЗ зависит от соотношения ионизационного пробега электронов пучка ускорителя и толщины образца. Если ионизационный пробег близок к толщине образца или превышает ее, слой ОЗ формируется ближе к середине толщины образца. При уменьшении ионизационного пробега глубина залегания слоя ОЗ смещается в сторону облучаемой поверхности. Оценки напряженности электрического поля достигают 2.2 МВ/см, что соответствует уменьшению интеграла спектра тормозного излучения при зондировании образца с облученной поверхности до 25%.

Установлено, что при прохождении бета-частиц через массивные образцы заряженных стекол присутствие ОЗ вызывает эффект снижения потока тормозного излучения на 10 – 25%. Эффект снижения зависит от глубины расположения слоя ОЗ, что подтверждает идею о неравномерности распределения слоя ОЗ в образце.

На основании сопоставления экспериментальных результатов с модельными расчетами получено, что напряженность электрического поля в образцах достигает 0.5 – 2.2 МВ/см, электрический потенциал составляет 130 – 330 кВ.

Заключительная часть главы посвящена оценкам эффективности радиационно-защитных свойств заряжающихся стеклянных покрытий в околоземном космическом пространстве.

Эффективность использования заряжающихся покрытий оценивалась по относительному уменьшению поглощенной энергии электронного излучения в фотоэлектрическом преобразователе солнечной батареи, упрощенная схема которого представлена на рис. 5. Расчеты поглощенной энергии проводились в предположении о наличии электрического поля ОЗ в стеклянных покрытиях с напряженностью 1, 3, 6 и 10 МВ/см и сравнивались со значениями поглощенной энергии в отсутствие электрического поля.

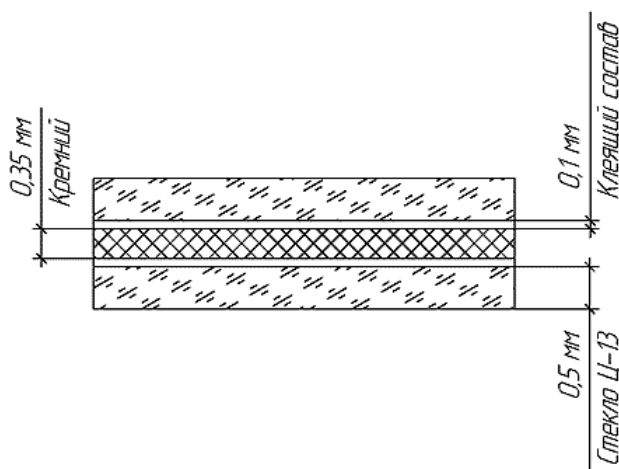


Рисунок 5. Упрощенная схема элемента солнечной батареи, использованная в расчетах.

Для проведения теоретических оценок поглощенной энергии электронного излучения в фотопреобразователе солнечной батареи необходимо знание пространственного и энергетического распределения электронов на околоземных орбитах искусственных спутников. Определение пространственного и энергетического распределения частиц, особенно на малых высотах, является весьма сложной задачей вследствие влияния плотных слоев атмосферы и структуры геомагнитного поля. Поток электронов испытывают различные вариации в зависимости от уровня геомагнитной возмущенности, фазы солнечного цикла и местного времени. Причем вариации потоков электронов различных энергий неодинаковы, что приводит к изменению их энергетического спектра (Гецелев и др., 2001).

В расчетах поглощенной энергии были использованы данные по потокам электронов на различных орбитах искусственных спутников (Гецелев и др., 2001), а также энергетические спектры электронов различной жесткости, полученные из анализа потоков электронов на геостационарной орбите спутника GOES-10 (Space Environment

Center of National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), Boulder, USA, <http://sec.noaa.gov/>). Пространственное распределение электронов принималось изотропным.

Значения потоков электронов на околоземных орбитах при изменении энергии от 50 кэВ до 7 МэВ уменьшаются на 6–7 порядков. Для учета вклада в поглощенную энергию электронов всех энергий, энергетические спектры разбивались на 6 диапазонов, а результаты суммировались с соответствующими весовыми коэффициентами.

Проведенные расчеты показали, что наличие электрического поля ОЗ в стеклянных покрытиях приводит к уменьшению поглощенной энергии за счет дополнительного ослабления потока электронов. Наиболее эффективно ослабляется мягкая часть спектра, для которой уменьшение поглощенной энергии достигает 50–70%. Однако, суммарные изменения оказываются не столь велики и для напряженности поля 3 МВ/см, соответствующей разности потенциалов 0.075 МВ, составляют 10–12%. Наибольший вклад в величину поглощенной энергии приходится на мягкую (до 0.5 – 0.6 МэВ) и среднюю (0.6 – 1.2 МэВ) по жесткости части спектра. Причем, электроны второго диапазона ослабляются гораздо меньше, а при ужесточении спектра их вклад возрастает и становится определяющим.

При напряженности электрического поля ОЗ ~1.5 МВ/см, полученной экспериментально для тонких образцов стекол, наибольший эффект уменьшения поглощенной энергии достигается в области стеклянных покрытий и достигает 30%. В области кремниевого фотоэлектрического преобразователя уменьшение поглощенной энергии в среднем составляет 10% и слабо зависит от жесткости спектра.

В заключении приводится обсуждение полученных результатов.

Существенной особенностью проведенных теоретических оценок является то обстоятельство, что в расчетах поглощенной в фотопреобразователе энергии учитывался вклад электронов, отраженных от тыльного защитного покрытия. В условиях отсутствия электрического поля ОЗ в защитных покрытиях вклад отраженных электронов составляет ~5% для изотропного моноэнергетического пучка с энергией 1 МэВ. В присутствии ОЗ этот вклад возрастает и для напряженности поля 5 МВ/см составляет ~8%. В расчетах поглощенной в фотопреобразователе энергии для электронов широкого энергетического спектра неучет вклада отраженных электронов приводит к значительному занижению абсолютного значения и завышению эффекта влияния поля ОЗ.

Следует отметить, что оценка поглощенной энергии в фотопреобразователе солнечной батареи может быть заниженной, поскольку в данном алгоритме расчета не учитывается генерация вторичных электронов. Поскольку энергии электронов на околоземных орбитах достигают 6–7 МэВ, вклад вторичных частиц может оказаться существенным. С другой стороны, вторичные частицы увеличат поток мягкой части энергетического спектра электронов, что в свою очередь может приводить к занижению оценки эффективности использования радиационно-заряжающихся защитных покрытий. Кроме этого, наличие электрического поля ОЗ приводит к уменьшению поглощенной энергии в стеклянном покрытии до 30%, что может сказываться на уменьшении скорости радиационной деградации стекла.

Для оценки суммарного эффекта при использовании радиационно-заряжающихся стеклянных покрытий необходимо проведение натурных испытаний солнечных батарей на околоземных орбитах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

1. Создана спектрометрическая установка для радиационного зондирования электрических потенциалов в диэлектрических материалах.
2. Спектрометрическая установка включает в себя два сцинтилляционных детектора для измерения спектров бета-частиц (стильбен) и спектров тормозного излучения (NaI). Используется спектрометр, выполненный в виде платы расширения персонального компьютера.
3. Разработана методика радиационного зондирования электрических потенциалов в диэлектрических материалах произвольной толщины.
4. Методика радиационного зондирования включает в себя возможность зондирования как тонких образцов, толщина которых не превышает пробега бета-частиц источника $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$, так и массивных образцов, полностью поглощающих бета-частицы источника, путем измерения спектров тормозного излучения.
5. Разработан алгоритм и программа расчета взаимодействия электронов с веществом учитывающий наличие поля объемного электрического заряда произвольно распределенного по толщине образца, и позволяющий использовать произвольные энергетические и угловые распределения падающих частиц.
6. Разработанный алгоритм позволяет получать угловые и энергетические распределения прошедших и отраженных частиц, трехмерное распределение поглощенных

частиц и поглощенной энергии, а также спектры тормозного излучения за образцом.

7. Проведены эксперименты по зондированию объемного электрического заряда в неорганических стеклах различного состава, облученных на линейном ускорителе электронов.
8. По полученным экспериментальным данным проведены теоретические оценки величины напряженности поля накопленного объемного заряда, а так же расположения слоя объемного заряда в массивных образцах.
9. Проведены расчеты поглощенной дозы электронного излучения в фотоэлектрическом преобразователе солнечной батареи для различных орбит искусственных спутников. Выполнены оценки возможного влияния электрического поля объемного заряда на величину поглощенной в фотоэлектрическом преобразователе энергии.

Выводы.

1. Проведенные исследования тонких образцов стекол показали, что после облучения на ускорителе электронов в них сохраняется объемный электрический заряд с напряженностью поля порядка 1.5 МВ/см при разности потенциалов 80–90 кВ, что приводит к уменьшению коэффициента прохождения на 10–12%.
2. Исследования массивных образцов стекол позволили выявить неравномерность распределения объемного заряда по глубине образца по различию в спектрах тормозного излучения за образцами при зондировании с облученной на ускорителе и обратной сторон.
3. Значения напряженности электрического поля ОЗ в массивных образцах после облучения на ускорителе достигают значения 2.2 МВ/см при разности потенциалов 330 кВ, что приводит к уменьшению интеграла спектра тормозного излучения на 25%.
4. Наибольшая эффективность применения радиационно-заряжающихся стеклянных покрытий достигается при соотношении толщины покрытия d и ионизационного пробега электронов R в области $0.6 \leq d/R < 1$
5. Результаты расчетов поглощенной энергии электронов в фотоэлектрическом преобразователе солнечной батареи показали уменьшение поглощенной энергии на 8–12% при разности потенциалов электрического поля ОЗ ~ 80 кВ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. В. В. Цетлин, Махотин Д. Ю., В. Г. Митрикас, В. И. Редько, В. В. Милявский, Т. К. Павлушкина. Взаимодействие электронных пучков с радиационно-заряжающимися неорганическими стеклами. //Тезисы XV международной конференции «Уравнения состояния вещества», Терскол–2000.
2. V. V. Tsetlin, V. I. Red'ko, V. V. Milyavskiy, V. G. Mitrikas, T. K. Pavlushkina, V. N. Kochkin, D. U. Makhotin. Experimental Investigation of Charged State of Dielectric Radiation-Protective Covers. //Proc. 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronic and Modification of Materials. Tomsk, 24-29 Sept. 2000. Proc. 11th Conf. on Radiation Physics and Chemistry. Vol. 11, p. 104–106.
3. В. В. Цетлин, Т. К. Павлушкина, В. В. Милявский, В. И. Редько, В. Н. Кочкин, Д. Ю. Махотин. Радиоэлектреты – материалы для радиационной защиты. //Тезисы XVI международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество», Эльбрус–2001.
4. Д. Ю. Махотин, В. Н. Кочкин, В. В. Цетлин. Реализация в среде MATLAB алгоритма расчета характеристик электронного излучения при прохождении через слои вещества, содержащие объемный электрический заряд. //Всероссийская научная конференция «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB», 28-29 мая 2002 г., сборник трудов, стр. 61-67, ИПУ РАН, Москва, Россия.
5. В. В. Цетлин, Д. Ю. Махотин, В. Н. Кочкин, В. И. Редько. Эффекты снижения радиационных потерь электронов в диэлектриках с объемным электрическим зарядом. //Тезисы XXXIII конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 26-28 мая 2003 г., НИИЯФ МГУ, Москва, Россия
6. Д. Ю. Махотин, В. В. Цетлин, В. А. Летин. Оценка поглощенной дозы в фотопреобразователях возвращенной панели солнечной батареи станции «МИР». //Ташкент: Гелиотехника, №4, 2004.
7. В. В. Цетлин, Д. Ю. Махотин. Эффекты снижения радиационных и ионизационных потерь электронов при объемной электризации неорганических стекол. //М: Атомная энергия, статья находится в печати.
8. В. В. Цетлин, Т. К. Павлушкина, Д. Ю. Махотин. Повышение радиационно-защитных свойств стеклянных покрытий за счет внедренного электрического заряда. – М: Модель Космоса, статья находится в печати.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.

1. Цетлин В. В., Павлушкина Т. К., Редько В. И. Снижение мощности дозы электронного излучения за слоями заряжающихся диэлектриков. М: АЭ, 1993, том 74, вып. 2, с. 163-165.
2. Цетлин В. В. Диссертация на соискание ученой степени доктора тех. наук. ГНЦ РФ ИМБП РАН, Москва, 1998, 248 с.
3. Стародубцев В. А., Федоров Б. В. Изменение напряженности внешнего электрического поля фосфатных стекол, заряженных потоком электронов. //Изв. вузов СССР, 1976, №9, с. 132-133.
4. Галишев В. С. Вопросы теории многократного рассеяния частиц. М.: Атомиздат, 1972, 120 с.
5. Тормозная способность электронов и позитронов. Доклад 37 МКРЕ. М.: Энергоатомиздат, Пер. с англ., 1987, с. 328.
6. Арутюнов В. В., Баранов В. Ф. Аппроксимация сечений тормозного излучения, генерируемого в легких поглотителях электронами с энергией 0.05–5 МэВ. //МИФИ: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений, сборник статей под редакцией Л. Р. Кимеля, М.: Атомиздат, 1971, вып. 12, с. 171-172.
7. T. Tabata, R. Ito. An Algorithm for the Energy Deposition by Fast Electrons. //Nuclear Science and Engineering 53, 226-239, 1974.
8. Гецелев И. В., Зубарев А. И., Пудовкин О. Л. «Радиационная обстановка на борту космических аппаратов». – М: ЦИПК, 2001 г.