ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»
ЗАО «ТЕСТПРИБОР»
Институт космических исследований РАН

МАТЕРИАЛЫ ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СПОСОБЫ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

[1]Н.А. Василенков, [2]С.С. Грабчиков, [2]Е.А. Грабчикова, [3]В.А. Котцов,
[2]С.Б. Ластовский, [2]Г.С. Римский, [2]А.С. Якушевич

[1]АО «ТЕСТПРИБОР», г. Москва;
[2]ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» г. Минск;
[3]Институт космических исследований РАН, г. Москва

2026 год

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ЭКБ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. АКТИВНЫЕ И ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ

Одна из актуальных задач, стоящих перед разработчиками космической техники, - обеспечение высоких показателей эксплуатационной надежности приборов и аппаратуры в условиях повышенного уровня радиационных воздействий.

Для наступления необратимых изменений в п/п приборах поглощенные дозы радиации должны составлять или превышать $10^5 \div 10^6$ рад, в ИМС – $10^4 \div 10^5$ рад. Данные уровни радиационной стойкости элементной базы не обеспечивают требуемого временного ресурса космических аппаратов (КА) даже при работе в условиях ряда околоземных орбитах, не говоря уже о полетах на другие планеты солнечной системы.

Радиационная защита КА возможна путем использования активных и пассивных систем защиты. Действие первых основано на использовании мощных магнитных полей (сверхпроводящие системы), способных отклонять заряженные частицы. Это очень сложное, массогабаритное и дорогостоящее техническое решение. Действие вторых основано на поглощении и отражении заряженных частиц. В связи с этим ясна актуальность направления, связанного с разработкой новых материалов и технологий для эффективной радиационной защиты.

Цель и задача работы: создание технологий, материалов и элементов локальной радиационной защиты электронной компонентной базы (ЭКБ) для повышения функциональной надежности и временного ресурса эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры КА .





МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

В настоящее время **проблема повышения радиационной стойкости ЭКБ решается несколькими путями**:

– **технологический** (применение специализированных технологических процессов и материалов при изготовлении ИМС (технология кремний на изоляторе, кольцевой затвор и др.);

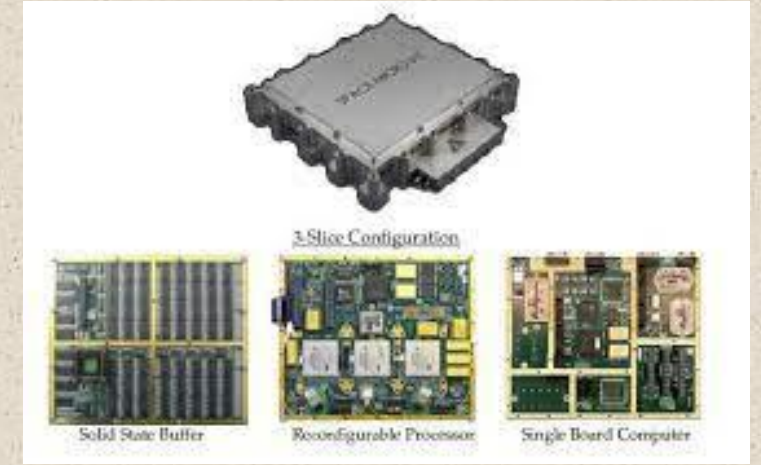
– **конструктивный** – корпуса КА и приборов, специализированные корпуса, методы локальной защиты;

– **схемотехнический** (методы мажоритирования и др.);

– **методика моделирования радиационных дефектов** на стадии проектирования ИМС;

– **комбинированное сочетание методов**.

Одно из перспективных направлений - **создание локальной радиационной защиты (ЛРЗ)** (пластины, герметики, компаунды или краски с высоким уровнем радиационной защиты). **Данный подход** позволяет значительно снизить радиационные нагрузки на электронные компоненты.





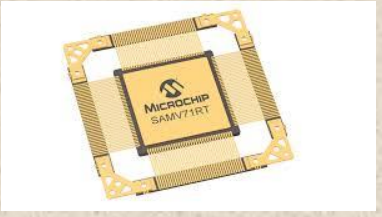




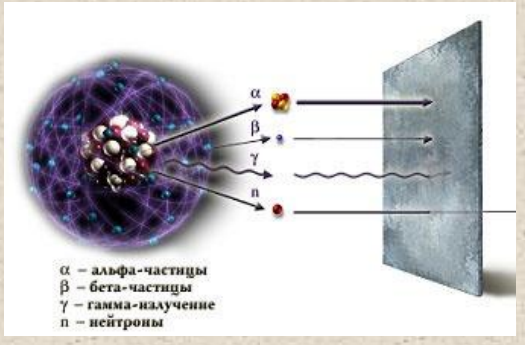
Рисунок 1 – Примеры практического применения метода локальной радиационной защиты

МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

В настоящее время для локальной радиационной защиты ЭКБ и радиоэлектронной аппаратуры в составе космической аппаратуры от воздействия ионизирующего излучения космического пространства предложен ряд материалов и конструктивных решений специализированных корпусов.

Основные материалы, технологии и производители локальной радиационной защиты (ЛРЗ):

- RAD-PAK® (Maxwell Technologies, USA [1]);
- WALOPACK (3D Plus, France) [2,3];
- RAD-COAT (Space Electronics, USA) [4];
- X-Ray (Actel Inc., USA), (близко к RAD-PAK) [5];
- ЛОЗА (Локальная Защита, РФ, близко к RAD-COAT) [6,7]



1.www.maxwell.com/microelectronics/products/technologies/radpak_overview.html.

2. www.3d-plus.com/radiation-assurance.php.

3. The experimental and simulation study of radiation shielding properties of multilayer shielding cases with tantalum carbide extender pigment/ V.S. Anashin, G.A. Protopopov, O.S. Kozyukova, I.A. Lyakhov, V.F. Zinchenko, A.V. Grigorevskiy, R.H. Khasanshin, A.V. Sogoyan/ RADECS 2015.

4. www.spaceelectronics.com.

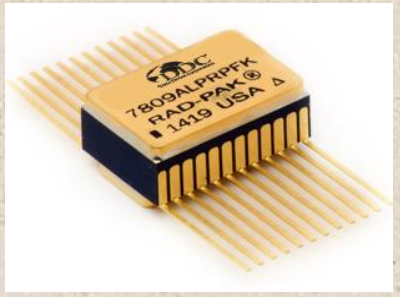
5.www.actel-in.com.

6. Оптимальные составы для локальной защиты бортовой электроники от космической радиации / В.Т. Заболотный, Е.Е. Старостин, А.В. Кочетков // Физика и химия обработки материалов. - 2008, № 5. - С. 15-18.

7. Исследование эффективности использования лакокрасочных и терморегулирующих покрытий для защиты бортовой аппаратуры от воздействия ионизирующих излучений космического пространства/ В.Ф. Зинченко, А.А. Романенко (ФГУП «НИИП»), В.М. Ужегов (ФГУП «ЦНИИмаш»), В.С. Анашин, Г.А. Протопопов, А.В. (ОАО «НИИКП»), Григоревский, Р.Х. Хананшин (ОАО «Композит»), А.В. Сагоян «АО «ЭНПО СПЭЛС»). RADECS 2015.

РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА ПО ТЕХНОЛОГИИ «RAD-PAK»

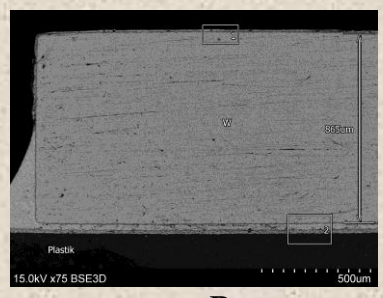
Изделия по технологии RAD-PAK (рис. 2 и 3) обеспечивают уровень стойкости не ниже 100 крад по отношению к эффектам поглощенной дозы в условия КП или в 3÷10 раз снижает уровень воздействия космического излучения на чувствительные элементы ИМС (рис 2 а, б). При этом важно, что эффективность такой защиты существенно зависит от параметров орбиты, сроков эксплуатации и компоновки КА. Защитные элементы экранов производства RAD-PAK® представляют собой пластины из вольфрама толщиной 0,93 мм (рис. 2 в), которые выполняют функцию крышки корпуса и составляют часть основания специализированного корпуса. (Maxwell Technologies, USA).



а



б



в

Рисунок 2 - Общий вид металлокерамических корпусов 7809ALPRPFK (а) и 79LV0408 PRFK-20 (б), изготовленных по технологии RAD-PAK (Maxwell Technologies, USA), шлиф крышки корпуса (в)





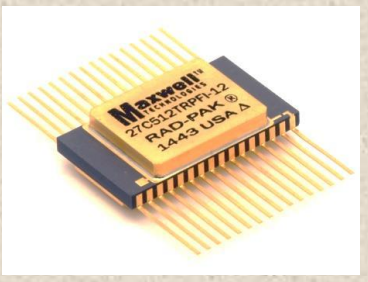


Рисунок 3 - Коммерческая продукции, изготовленная по технологии **«RAD-PAK»**

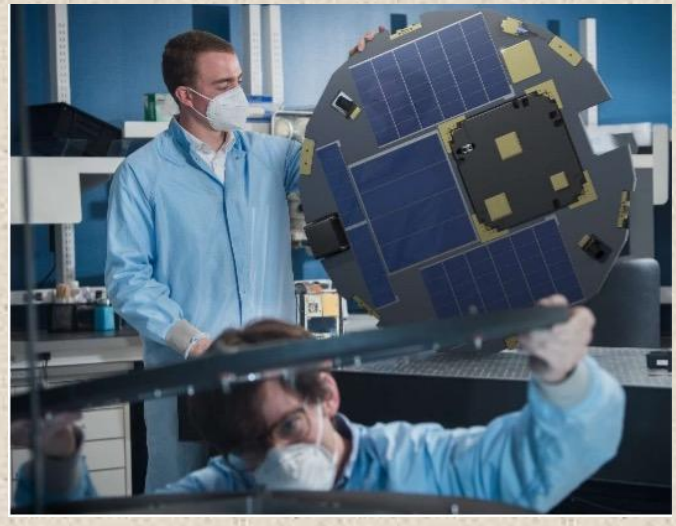
РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЭКБ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Бурно развивается новое направление космического приборостроения, связанное с малыми космическими аппаратами (МКА). В последние 10–15 лет большой практический успех достигнут при использовании одного из вариантов МКА, так называемых стандартов «CubeSat» (рис. 4 а) и «DiskSat» (рис. 4 б).

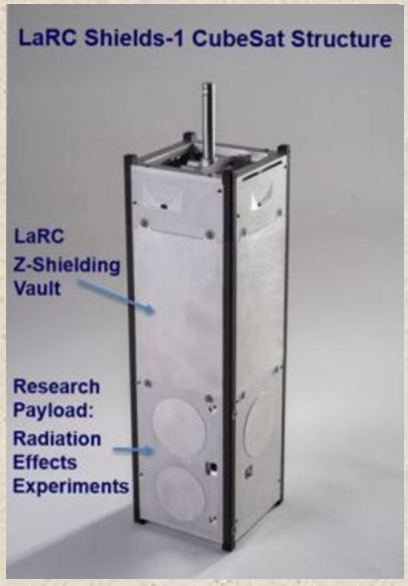
Актуальность направления, связанного с применением радиационной защиты ЭКБ на МКА, подтверждена последними результатами, полученными NASA в рамках миссии ELaNaXIX [https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/structures-materials-and-mechanisms/#6.5]. МКА Shields1 был запущен в декабре 2018 г. и работал на полярной НОО (рис. 4 а). На МКА Shields1 использовали радиационную защиту в виде пластин из материалов Z-типа Al-Ti-Ta (рис. 4 в). Результаты, приведенные в данной работе, свидетельствуют о снижении общей ионизирующей дозы при применении защиты из пластин состава Al-Ti и Al-Ti-Ta, по сравнению со стандартными алюминиевыми конструкциями.



а



б



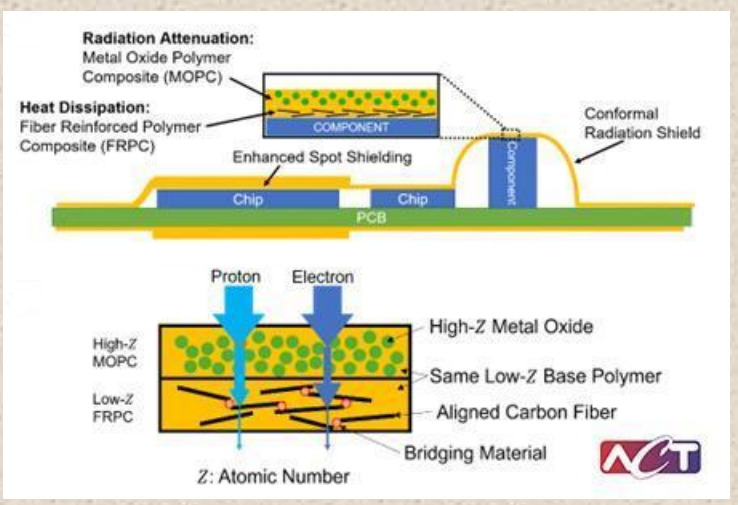
в

Рисунок 4 – Общий вид МКА стандартов «CubSat» Shields-1 миссии ELaNaXIX (а) и «DiskSat» (Aerospace Corporation) (б), а также конструкция радиационной защиты на основе пластин Z-материалов (в).

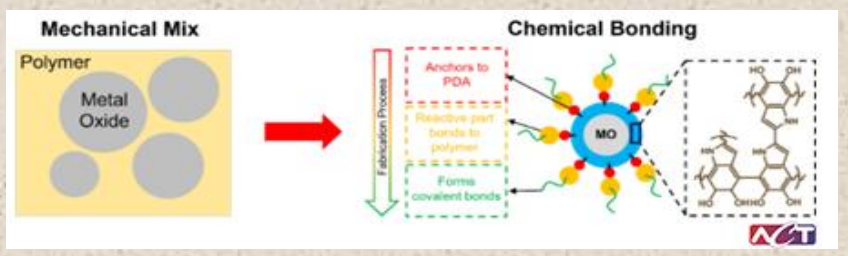
РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЭКБ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Подход, связанный с применением новых материалов радиационной защиты развивается в разработках компании ACT (Advanced Cooling Technologies Inc. USA). Новое направление работ - создание ЛРЗ на основе двухслойных полимерных композитов с применением технологии 3D печати [3D Printable Polymer Composite Radiation Shield - Advanced Cooling Technologies.htm.]. Полученные результаты свидетельствуют о снижении общей ионизирующей дозы при использовании композита, содержащего слои полимеров с включениями оксида гадолиния и волокон графена, по сравнению со стандартными алюминиевыми конструкциями.

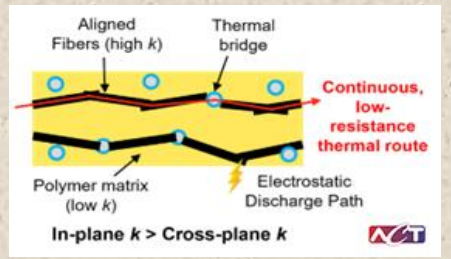
Разработана легкая композитная система, содержащая два согласованных слоя для защиты от радиации и перегрева в рамках одной конструкции (рис. 5): 1 слой полимерного композита (MOPC) содержит оксид GdO с высоким атомным номером для ослабления энергетических электронов и фотонов; 2 слой полимерного композита (FRPC) армирован волокнами графена, обладает высокой теплопроводностью и эффективно распределяет тепло по поверхности платы. Материал может быть нанесен на электронные узлы в соответствии с их формой и обеспечивает точечную защиту компонентов. Полимерная основа сохраняет целостность при термоциклировании, воздействии вакуума и механических нагрузках.



а



б



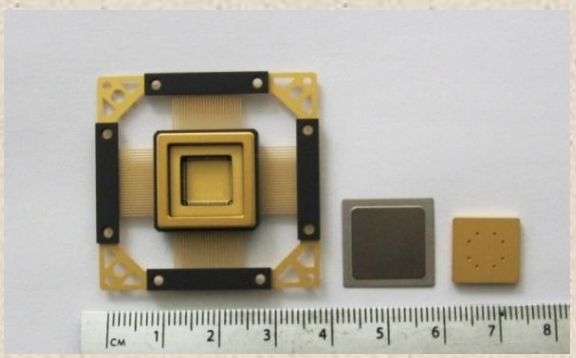
в

Рисунок 5 – Двухслойная структура ЛРЗ на основе полимерных композитов (а), состоящая из функциональных MOPC (б) и FRPC (в) слоев

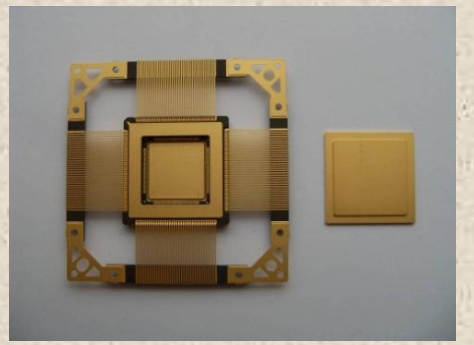
СПОСОБЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЭКБ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ. 1. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ КОРПУСА ДЛЯ ИМС

В рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» задания «Зеркало-2» разработаны и изготовлены специализированные металлокерамические планарные корпуса с интегрированными радиационно-защитными экранами: 100-выводной 4247.100-2 (Рис. 6 а, в) и 144-выводной корпус 4248.144-2 (Рис. 6 б) по ГОСТ Р 54844-2011. Проведен полный цикл испытаний.

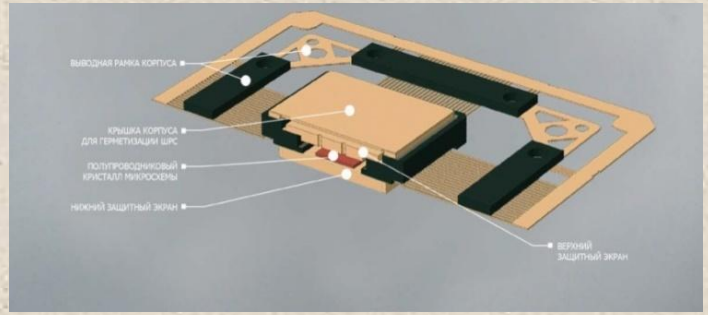
[1. Василенков Н.А., Грабчиков С.С., Максимов А.Ю., Ластовский С.Б. В борьбе с радиацией. Российский космос, Т. 113, №5, 2015г.; 2. Василенков Н.А., Грабчиков С.С., Максимов А.Ю., Ластовский С.Б. Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники. Электроника: наука, технология, бизнес. №4, 2015г.]



а



б



в

Рисунок 6 – Специализированные металлокерамические корпуса с интегрированными радиационно-защитными экранами: 100-выводной (а, в) и 144-выводной корпуса (б).

ИСПЫТАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ КОРПУСОВ ЗАО «ТЕСТПРИБОР»

1. Эксперимент на ускорителе электронов ЭЛВ-8

Исследовались 100-выводные корпуса ЗАО «Тестприбор» с ЛРЗ на основе композитов W-Cu (рис. 6а) и без ЛРЗ. Степень воздействия облучения электронами с энергией E = 2,4 МэВ определялась по сдвигу порогового напряжения ΔU p-канальных МОП-транзисторов (рис. 8) в составе логических КМОП ИМС IN74AC04N, серийно изготавливаемых ОАО «Интеграл». В качестве тестовых структур использовали ИМС собранные на печатной плате и защищенные компаундом (рис. 7). Коэффициенты ослабления (K) определялось из соотношения $K = \Phi_0/\Phi_n$, где Φ_0 – флюенс электронов при котором наступает параметрический отказ p-МОПТ, облучаемого через основание корпуса без экрана, Φ_n – с экраном. Значения Φ_0 и Φ_n находят из зависимостей ΔU от Φ при заданном ΔU (рис. 9).

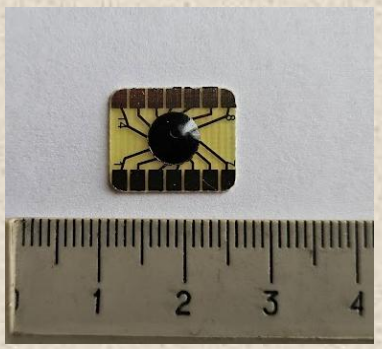


Рисунок 7 -Тестовая микросборка на основе ИМС IN74AC04N.

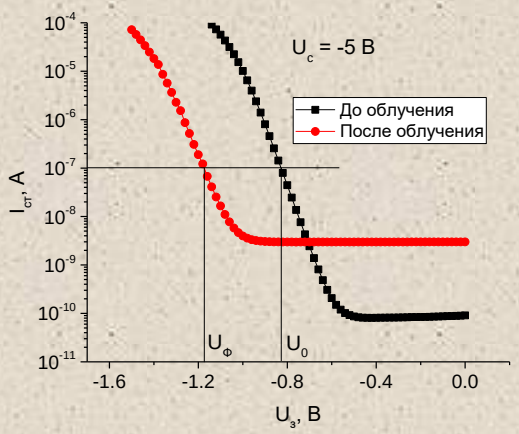


Рисунок 8 - Сток-затворные ВАХ p-МОП-транзистора до и после облучения электронами флюенсом $\Phi = 10^{13}$ см$^{-2}$.

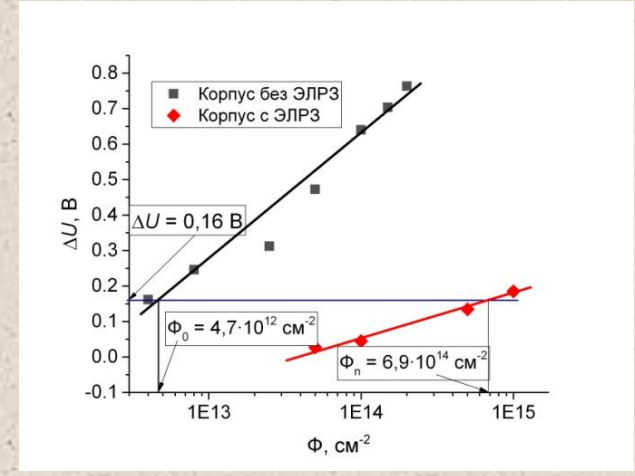


Рисунок 9- Зависимости ΔU (Φ) для корпусов с ЛРЗ и без ЛРЗ. K = 147 отн. ед.

Вывод: специализированный 100- выводной корпус с ЛРЗ ослабляет дозовую нагрузку при воздействии потоков электронов с энергией E = 2,4 МэВ на ИМС в 147 раз по сравнению с корпусом без экрана ЛРЗ.

ИСПЫТАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ КОРПУСОВ ЗАО «ТЕСТПРИБОР»

2. Расчет в программном комплексе Geant4

Рассчитаны поглощенные дозы от потоков электронов D_e и протонов D_p ЕРПЗ кристаллом кремния, помещенным в 100-выводные корпуса, изготовленные с ЛРЗ (рис. 5а) и без ЛРЗ, для следующих условий:

- для электронов - геостационарная орбита (ГСО) на высоте H = 36 000 км с углом наклонения $i = 0^0$ и высокоэллиптическая орбита (ВЭО) с углом наклонения $i = 63^0$ и углом перигея $\omega = 90^0$ на высоте в апогее $H_А$ = 40 000 км и высоте в перигее $H_П$ = 600 км.
- для протонов — средняя круговая орбита (СКО) на высоте H = 4 000 км с углом наклонения $i = 60^0$ и вышеприведенная ВЭО. Коэффициенты ослабления (K) определялось из соотношения $K = D_0/D_{лрз}$, .

Таблица 1 — Результаты расчета поглощённых доз кристаллом кремния в корпусах с защитными экранами ($D_{лрз}$) и без экранов (D_0)

Тип корпуса	**D_e, крад/год**		**D_p, крад/год**	
	ГСО	ВЭО	СКО	ВЭО
МК 4247.100-1 без ЛРЗ	53,94	120,95	300,17	44,59
МК 4247.100-1 с ЛРЗ	0,176	0,471	22,31	2,56

Таблица 2 — Результаты расчета коэффициентов ослабления поглощенных доз корпусом с ЛРЗ при воздействии электронов и протонов

Тип корпуса	**K_e, отн. ед.**		**K_p, отн. ед.**	
	ГСО	ВЭО	СКО	ВЭО
МК 4247.100-1 с ЛРЗ	305,7	256,81	13,5	17,4

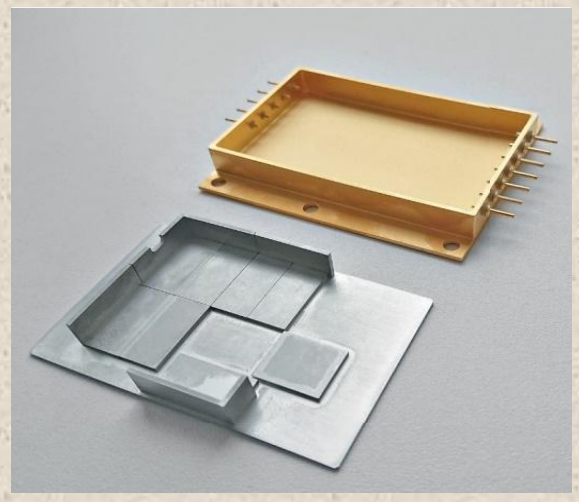
СПОСОБЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЭКБ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ. 2. МНОГОКРИСТАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ – СИСТЕМА В КОРПУСЕ

В ПК Geant4 рассчитана поглощенная доза D_0 электронов в каждой ИМС, расположенной в различных конструкциях корпусов для многокристальных модулей: без экранов ЛРЗ (тип I), с экранами ЛРЗ на основе композита WCu (тип II, рис. 10 а) и с экранами оптимизированной конструкции ЛРЗ (рис. 10 б) (тип III) [1,2]. Конструкция оптимизировалась за счет опускания верхнего слоя композита WCu на минимально допустимое расстояние к ИМС и выбора площади его поверхности, достаточной для минимизации эффекта «бокового подсвета».

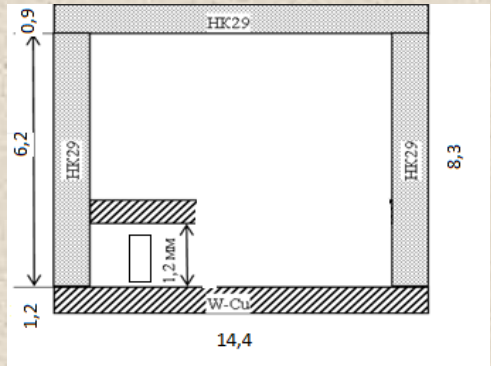
Показано (рис. 11), что на круговой орбите с углом наклонения i=30° высотой H=8000 км увеличение d_m основания и крышки корпусов экранами ЛРЗ до значения 1,67 г/см2 позволяет снизить дозовую нагрузку от электронов в 3,5–3,7 раз при минимуме и в 3,9–4,1 раз – при максимуме солнечной активности, а при оптимизации защиты (тип III) – в 6,8–9,3 раз и 7,6–10,7 раз соответственно.

[1. А.С. Якушевич, Ю.В. Богатырев, С.С. Грабчиков [и др.] Ослабление потоков электронов радиационных поясов Земли защитными экранами на основе композита W-Cu . Современная электроника. 2021. №2. С. 2–5.

2. Василенков Н.А., Грабчиков С.С.,Ластовский С.Б. Римский Г.С. Якушевич А.С. Корпус прибора с радиационной защитой электронных компонентов. Патент по заявке на полезную модель РБ. №u20240201 от 28.03.2025.Заявка №20240201 от 05.09.2024].



а



б

Рисунок 10 – Многокристальный модуль (а) и сечение корпуса с оптимизированным расположением экрана ЛРЗ (б) согласно [2]

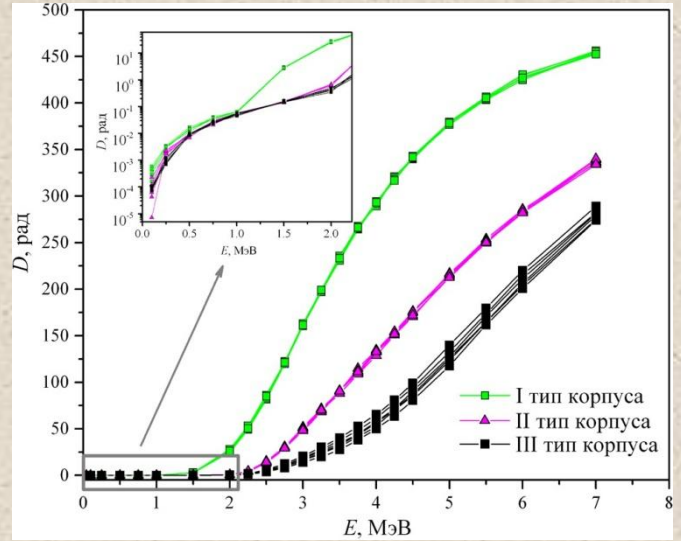
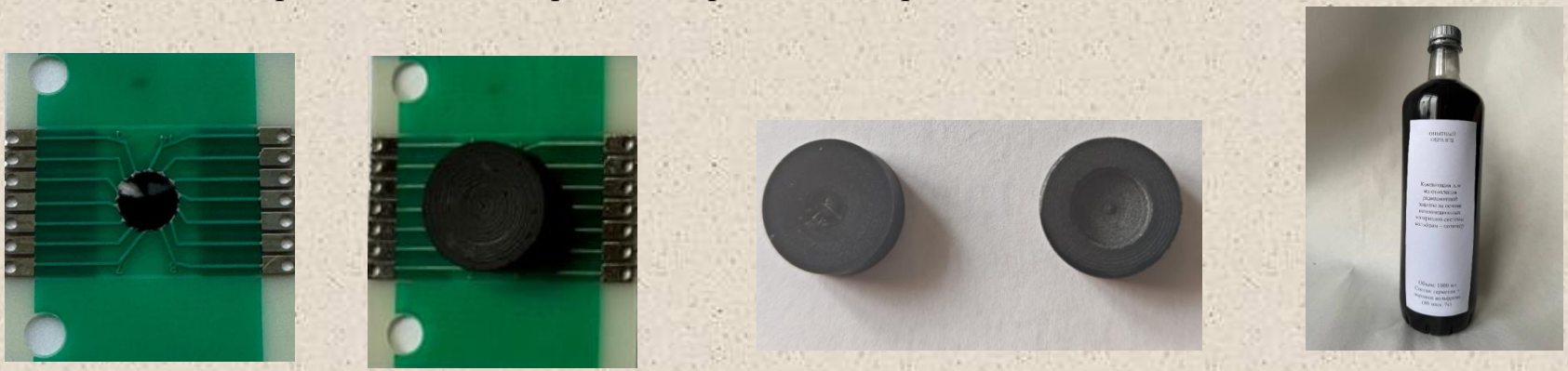


Рисунок 11 – Зависимости поглощенной дозы для ИМС, размещенных в корпусах многокристальных электронных модулей трех типов, при облучении электронами флюенсом Ф=4,1×106 см–2

СПОСОБЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЭКБ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ. 3. КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ СИСТЕМЫ ВОЛЬФРАМ-ПОЛИМЕР

Специалистами наших организаций ведутся работы по разработке и созданию ЛРЗ на основе материалов системы полимер-вольфрам для ЭКБ космической аппаратуры. Для испытаний в качестве тестового образца использовались ИМС типа IN74AC04N, собранные методом бескорпусной сборки на печатных платах (рис. 12 а). Тестовый образец ИМС с экраном ЛРЗ приведен на рисунке 12 б.

Образцы ЛРЗ на основе композиционных материалов вольфрам–полимер с содержанием до 70 вес.% W, полученные методом термической полимеризации, приведены на рис. 12 в, г.



а б в г д

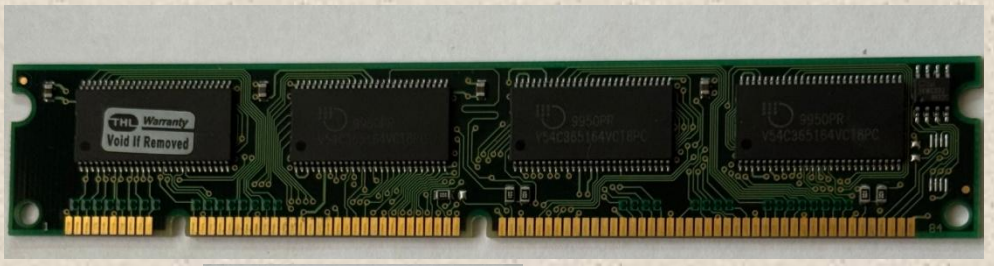
Рисунок 12 – Партия образцов ИМС без (а) и с ЛРЗ (б) на основе композита вольфрам – полимер. Вид экрана ЛРЗ сверху (в) и снизу (г). Общий вид емкости приготовленного компаунда радиационной защиты на основе композиционных материалов системы вольфрам–полимер (емкость 1 л.) (д)

Результат: значения коэффициентов ослабления потока электронов, протонов опытных образцов композита вольфрам– полимер с толщиной стенок 3 мм и содержанием 70 вес.% W составляют:

- эксперимент на ускорителе с энергией электронов 2,4 МэВ – 210 отн. ед.;
- расчет для потока электронов для ГЕО и ВЭО орбит при максимуме солнечной активности – 1090 и 514 отн. ед., соответственно;
- расчет для потока протонов для МЕО и ВЭО орбит при максимуме солнечной активности – 19 и 25 отн. ед., соответственно.

СПОСОБЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЭКБ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

4. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ Z-МАТЕРИАЛОВ



а



б



в

Рисунок 13 – Печатная плата оперативной памяти компьютера (а), конструктивные элементы ЛРЗ (б) и печатная плата с установленными конструктивными элементами ЛРЗ (в)



Рисунок 14 - Пример расположения элементов конструктивной защиты ЛРЗ на основе пластин из Z-материалов (выделено – синий) на печатной плате блока космической аппаратуры

Специалистами наших организаций ведутся работы по подбору расчетными методами и изготовлению экранов ЛРЗ на основе Z-материалов для ЭКБ КА. План работы содержит следующие этапы:

– определение методом математического моделирования оптимальных конфигураций, размеров, состава и месторасположения элементов ЛРЗ, позволяющих обеспечить требуемые уровни радиационной нагрузки;

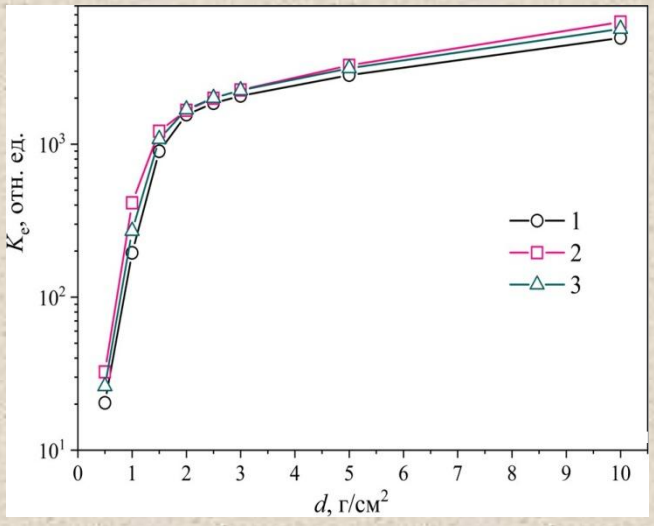
– согласование с разработчиками КА размеров, методов установки и местоположения ЛРЗ;

– выбор и отработка методики установки элементов ЛРЗ на конструкциях КА;

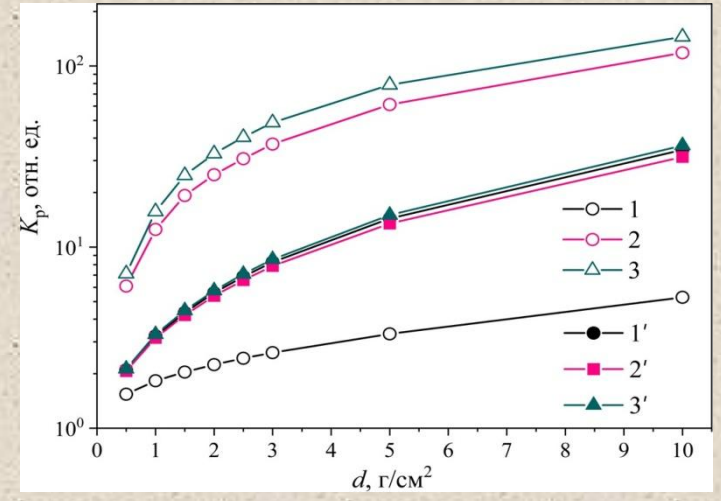
– изготовление партии образцов ЛРЗ на основе системы W-Cu и установка ЛРЗ на блоках КА.

РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНОЙ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ ЭКБ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НА НКО И СКО

В программном комплексе (ПК) Geant4 выполнены расчеты локальных дозовых нагрузок (ЛДН) на кристалл кремния расположенный за экранами ЛРЗ в центре специализированного корпуса (рис. 6 а). На рисунке 15 представлены зависимости коэффициентов ослабления ЛДН от массовой толщины (d_m) ЛРЗ на основе композита $W_{85}Cu_{15}$ при воздействии электронов и протонов ЕРПЗ и протонов СКЛ. Коэффициенты ослабления потоков электронов (K_e) и протонов (K_p) определялись как отношение поглощенной дозы кристаллом кремния в базовом металлическом корпусе к поглощенной дозе в корпусе с ЛРЗ. Расчеты проводились для следующих орбит: низкой круговой (НКО) на высоте H=370 км с углом наклонения i=97^0; средняя круговая (СКО) на высоте H=4000 км с углом наклонения i=60^0; высокоэллиптическая (ВЭО) с углом наклонения i=63^0 и углом перигея ω=90^0 на высоте в апогее H_A=40 000 км и высоте в перигее $H_П$=600 км.



а



б

Рисунок 15 – Зависимости коэффициентов ослабления от массовой толщины ЛРЗ: при воздействии потоков электронов ЕРПЗ (а) и потоков протонов ЕРПЗ и СКЛ (со штрихом) (б), где 1 – НКО; 2 – СКО; 3 – ВЭО

Вывод: значения K_e в 10–1000 раз выше значений K_p на трех орбитах. Минимальные значения K_e фиксируются на НКО, а максимальные – на СКО. Наибольший эффект применения ЛРЗ в отношении протонов ЕРПЗ наблюдается на СКО и ВЭО, где K_p превышает 10 единиц при d_m=1,0 г/см².

ВЫВОДЫ

1. **Разработана технология изготовления дополнительной локальной радиационной защиты для ЭКБ космической аппаратуры.**
2. **На основе опыта применения ЛРЗ для ЭКБ коммерческого назначения предложены следующие способы практической реализации:**

- сборка ИМС в специализированных металлокерамических корпусах;

- сборка ИМС и полупроводниковых изделий в многокристальных электронных модулях (система в корпусе) с элементами ЛРЗ;

- защита электронных компонентов коммерческого назначения экранами ЛРЗ на основе композиционных материалов системы полимер-вольфрам;

- защита электронных компонентов коммерческого назначения экранами ЛРЗ на основе конструктивных элементов Z-материалов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ