

УДК 58.057

**ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МИКРОСХЕМЫ В
ПУЛЬТАХ КОСМОНАВТОВ¹****Шпынкова Виктория Дмитриевна,**студентка 4 курса, кафедры ИУ1 «Система управления летательными аппаратами»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, РФ, г. Москва,
shpynkova.viktoria@mail.ru**Аннотация**

Микросхемы, входящие в состав пультов управления космонавтов, функционируют в условиях открытого космоса, где на них одновременно действуют ионизирующее излучение, глубокий вакуум, экстремальные температуры и многократные термоциклы. Данные факторы инициируют физические процессы на уровне кристалла и корпуса, приводящие к обратимым сбоям, необратимым отказам и деградации параметров. В статье проанализированы механизмы воздействия космических факторов на полупроводниковые приборы, количественные пороги стойкости, а также системные методы защиты: выбор компонентов space grade, экранирование, резервирование и терморегулирование.

Ключевые слова: космическая радиация, SEU, SEL, TMR, space grade, термоциклы, пульт космонавта, радиационная стойкость, вакуум.

**THE IMPACT OF SPACE FACTORS ON MICROCIRCUITS IN
ASTRONAUTS' CONSOLES****Shpynkova Victoria Dmitrievna,**4th year student, Departments of IU1, «Aircraft control system», Bauman Moscow State Technical
University, Russian Federation, Moscow,
shpynkova.viktoria@mail.ru**ABSTRACT**

The microcircuits included in the astronauts' control panels operate in outer space, where they are simultaneously exposed to ionizing radiation, deep vacuum, extreme temperatures and multiple thermal cycles. These factors initiate physical processes at the crystal and housing levels, leading to reversible failures, irreversible failures, and degradation of parameters. The article analyzes the mechanisms of the impact of space factors on semiconductor devices, quantitative

¹ Научный руководитель: Деменев Дмитрий Андреевич, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
РФ, г. Москва, demenev@bmstu.ru

Scientific supervisor: Demenev Dmitry Andreevich, Bauman Moscow State Technical University,
Russian Federation, Moscow, demenev@bmstu.ru

resistance thresholds, as well as system protection methods: selection of space grade components, shielding, redundancy and temperature control.

Keywords: space radiation, SEU, SEL, TMR, space grade, thermal cycles, astronaut's console, radiation resistance, vacuum.

1. Введение

Пульты космонавтов представляют собой сложные многоканальные электронные системы, обеспечивающие управление движением, ориентацией, стыковкой, научной аппаратурой и системами жизнеобеспечения. Отказ любой микросхемы может привести к потере управления, недостоверной индикации или аварии. В отличие от наземной электроники, бортовые микросхемы работают в условиях, которые невозможно полностью воспроизвести на Земле: отсутствие атмосферы, отсутствие конвективного охлаждения, проникающая радиация и циклические перепады температур с амплитудой до 270 °С.

Цель работы – систематизировать физические механизмы воздействия космических факторов на микросхемы в пультах космонавтов и описать инженерные методы обеспечения надёжности.

2. Основные космические факторы

На низкой околоземной орбите (НОО) действуют четыре ключевых фактора:

Ионизирующее излучение (протоны радиационных поясов, электроны, солнечные космические лучи, тяжёлые ионы галактических лучей).

Глубокий вакуум.

Экстремальные температуры: от -150 °С в тени до +120 °С на солнце.

Термоциклы – до 16 циклов «тень–солнце» за сутки.

Каждый из этих факторов по-разному влияет на полупроводниковые структуры и корпуса микросхем.

3. Радиационные эффекты

Воздействие радиации на микросхемы разделяется на два класса: эффекты от накопленной дозы (TID – Total Ionizing Dose) и одиночные события (SEE – Single Event Effects) [1].

3.1. Эффекты от накопленной дозы

При прохождении заряженных частиц через окисел затвора и кремний возникают электронно-дырочные пары. Часть заряда захватывается ловушками в диэлектрике и на границе раздела Si-SiO₂. Накопление заряда приводит к:

Смещению пороговых напряжений полевых транзисторов (иногда на несколько вольт), что нарушает логические уровни.

Появлению паразитных токов утечки между соседними элементами.

Снижению крутизны и быстродействия транзисторов.

Количественные данные:

Коммерческие микросхемы (промышленного класса) сохраняют работоспособность до доз 5–15 крад (кремний).

Микросхемы класса space grade рассчитаны на 100–300 крад.

При превышении TID происходят параметрические отказы, которые невозможно устранить перезагрузкой [2].

3.2. Одиночные события (SEE)

При пролёте одной тяжёлой частицы с высоким ЛПЭ возникает плотный трек ионизации. В зависимости от топологии схемы возникают разные эффекты:

Эффект	Механизм	Последствия
SEU (одиночный сбой)	Переворот бита в ячейке памяти или регистре	Ошибка данных, обратима перезаписью
SET (одиночный импульс)	Паразитный импульс в комбинационной логике	Ложный сигнал, может вызвать ложную команду
SEL (тиристорный эффект)	Активация паразитной р-п-р-п структуры (КЗ питания-земля)	Ток $\geq 1...2$ А, перегрев, физическое разрушение кристалла

Особо опасен SEL – он необратим и требует отключения питания. В пультах космонавтов для защиты от SEL применяют токовые датчики и ограничители.

Пример: для КМОП-микросхем с проектными нормами 180–90 нм порог возникновения SEL может составлять LET $\approx 20...40$ МэВ·см²/мг.

4. Влияние вакуума и температуры

4.1. Вакуумные эффекты

В вакууме отсутствует конвективный теплообмен. Тепло от микросхем отводится только через теплопроводность корпуса и излучение. Это приводит к:

Перегреву кристалла на 20...30 °С выше, чем в наземных условиях при той же рассеиваемой мощности.

Ускорению термомиграции и диффузии металлизации.

Холодной сварке – слипанию чистых металлических контактов без нагрева (особенно опасно для разъёмов и перемычек) [3].

4.2. Термоциклы

На орбите за один виток (≈ 90 мин) аппарат дважды пересекает границу тени:

Солнечная сторона: +120 °С (прямой нагрев).

Тень Земли: -150 °С.

Проблемы:

Различные коэффициенты теплового расширения (Si – 2,6 ppm/K, Cu – 16,5 ppm/K, эпоксидные компаунды – 20...40 ppm/K).

Возникают термомеханические напряжения, разрушающие пайку (особенно BGA-шарики и выводы).

В кристалле образуются микротрещины, снижающие наработку на отказ.

За 1 год эксплуатации на НОО аппарат испытывает ≈ 5840 термоциклов.

5. Методы защиты

Современная практика проектирования космической электроники использует комплексную иерархическую защиту.

5.1. Компонентный уровень (space grade)

Микросхемы класса space grade изготавливаются на специальных линиях с использованием керамических корпусов, золотых проводников и герметизации.

Обязательная аттестация на TID ≥ 100 крад и устойчивость к SEL.

5.2. Экранирование

Локальное экранирование танталом, вольфрамом или алюминием толщиной 1...3 мм снижает дозу на критичные микросхемы в 2–5 раз.

Эффективно против электронов и мягкого рентгена, но малоэффективно против высокоэнергичных протонов [4].

5.3. Схемотехническое резервирование

TMR (Triple Modular Redundancy) – три идентичных канала и мажоритарный элемент. Маскирует любые SEU в одном канале.

ECC (Error Correction Codes) – в памяти (SRAM, DRAM, FRAM) добавляются проверочные биты, позволяющие исправлять однобитовые ошибки.

Сторожевые таймеры (watchdog) – при зависании программы автоматически перезагружают микроконтроллер.

5.4. Терморегулирование

Нагреватели и тепловые трубы поддерживают температуру корпуса микросхем в диапазоне $-30...+70$ °С, снижая частоту термоциклов и исключая холодную сварку.

6. Заключение

Основными космическими факторами, разрушающими микросхемы в пультах космонавтов, являются: радиация (TID, SEU, SEL), глубокий вакуум и циклические перепады температуры $-150...+120$ °С.

Эффекты от накопленной дозы вызывают деградацию параметров и необратимые отказы; одиночные события приводят к сбоям и разрушению кристалла.

Надёжность электроники в космосе достигается не одним методом, а их комбинацией: space grade компоненты, локальное экранирование, TMR, ECC, сторожевые таймеры и активное терморегулирование.

Применение описанных методов позволяет обеспечить безотказную работу пультов космонавтов в течение всего срока активного существования (7–15 лет на НОО).

Список литературы:

1. Таперо К.И., Диденко С.И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники. Радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учебное пособие. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2013. – 349 с. – ISBN 978-5-87623-661-6. (дата обращения: 20.02.2026).
2. Миронов А.А., Хлебников В.И. Анализ корпусов для радиационно-устойчивых интегральных микросхем // Политехнический молодежный журнал. – 2025. – № 3 (98). – DOI: 10.18698/2541-8009 – URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1053.html> (дата обращения: 21.02.2026).
3. Нусинов М.Д. Космический вакуум и надёжность космической техники. – М.: Знание, 1986. – 64 с. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 6). (дата обращения: 25.02.2026).
4. Ребеко А.Г. Защита людей и космических аппаратов в космосе // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – № 5. – DOI: 10.18698/2308-6033-2016-05-1496. (дата обращения: 01.03.2026).

References:

1. Tapero K.I., Didenko S.I. Fundamentals of Radiation Hardness of Electronic Products. Radiation Effects in Electronic Products: A Tutorial. Moscow: MISiS Publishing House, 2013, 349 p. ISBN 978-5-87623-661-6. (Accessed: 20.02.2026).
2. Mironov A.A., Khlebnikov V.I. Analysis of Radiation-Resistant Integrated Circuit Packages // Polytechnic Youth Journal. 2025, No. 3 (98). DOI: 10.18698/2541-8009; URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1053.html> (Accessed: 21.02.2026).

3. Nusinov M.D. Space vacuum and reliability of space technology. - Moscow: Znanie, 1986. - 64 p. - (New in life, science, technology. Series "Cosmonautics, Astronomy"; No. 6). (Accessed: 25.02.2026).
4. Rebeko A.G. Protection of people and spacecraft in space // Engineering journal: science and innovation. - 2016. - No. 5. - DOI: 10.18698/2308-6033-2016-05-1496. (Accessed: 01.03.2026).