



УДК 52 (15)

МРНТИ 29.05.45

Тип статьи: научная статья

<https://doi.org/10.32523/26-6836-2026-154-1-64-83>

Анализ отказов бортовых комплексов управления космических аппаратов в условиях воздействия факторов космического пространства

А.С. Ошманова^{1*}, В.Ф. Грищенко²

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

(E-mail: aizhan.oshmanova@icloud.com, grischenko.v@ionos.kz)

Аннотация. Во время эксплуатации космических аппаратов (КА) различного назначения возникают отказы в бортовой электронной аппаратуре, приводящие к развитию нештатных ситуаций, а иногда и к потере спутников. Как правило, отказы возникают в бортовом комплексе управления (БКУ) КА. Многие исследователи считают, что отказы возникают в результате ионизирующего излучения в околоземном космическом пространстве (ОКП). Поэтому чрезвычайно важным и необходимым является оценка работы БКУ КА в условиях комплексного воздействия факторов околоземного космического пространства (ОКП).

Представлены ориентированные графы БКУ, характеризующие распространение ошибок, и описывается взаимосвязь вершин и рёбер. На основе вероятностных характеристик функциональных модулей разработана методика идентификации направления распространения ошибок, которые определяют наибольшую структурную уязвимость системы.

Показано, что отказы БКУ определяются архитектурой системы, а не случайными флуктуациями параметров модели. Разработанный параметр направления отказов позволяет установить уязвимость функциональных узлов, оказывающих влияние на работу системы управления в условиях комплексного воздействия факторов космического пространства. Полученные результаты используются при проектировании БКУ космических аппаратов с целью повышения их устойчивости к комплексному воздействию факторов космического пространства и условиям эксплуатации.

Ключевые слова: бортовой комплекс управления, радиационно-индуцированная ошибка, ориентированный граф, отказ, космический аппарат.

Поступила 18.02.2026. После доработки 4.03.2026. Принята к печати 4.03.2026.

Доступно онлайн 30.03.2026.

*автор для корреспонденции

Введение

Известно, что во время функционирования КА различного назначения возникают отказы в бортовой электронной аппаратуре, которые могут приводить к развитию нештатных ситуаций, иногда и к потере КА в целом [1–3]. Повышение надежности космических систем, в основном, выполняется путем совершенствования технологий изготовления систем космической техники в наземных условиях. Более того, в наземных моделирующих условиях и наземных предполетных испытаниях отсутствуют системы, позволяющие учитывать комплексное воздействие факторов космического пространства. Поэтому чрезвычайно актуальным является поиск новых методов и подходов для повышения надежности бортовых электронных систем и увеличения срока активного существования (САС) бортовых комплексов в реальных условиях.

Объектом данного исследования является БКУ КА различного назначения. Предметом исследования является определение уязвимости узлов и элементов БКУ к внешним воздействиям.

Целью данной работы является оценка отказов бортовой электронной аппаратуры с учётом радиационно-индуцированных SEL и электростатических разрядов (ЭСР) с использованием ориентированных графов структур.

Задачи исследования. Основной задачей является разработка математической модели для поиска уязвимости БКУ КА различного назначения. Использование теории графов в анализе отказов – это мощный инструмент математического моделирования.

Методология работы направлена на поиск параметров отказоустойчивости бортовых систем с использованием ориентированных графов, которые можно использовать для анализа работы БКУ в режиме on-line для принятия управленческих решений.

Физические механизмы радиационно-индуцированных отказов

Известно, что во время эксплуатации в условиях комплексного воздействия факторов космического пространства в бортовой электронной аппаратуре космических аппаратов различного назначения (КА) возникают сбои и отказы в модулях памяти. Следует отметить, что сбои (мягкие ошибки) восстанавливаются через некоторое время, а отказы (катастрофические) не восстанавливаются и могут приводить к развитию нештатных ситуаций, а иногда и к потере спутников. Кроме того, КА во время эксплуатации постоянно бомбардируется электронами и ионами плазмы, а также подвергается УФ-излучению. Из-за этого различные участки КА (антенны, солнечные панели, экранно-вакуумная изоляция) заряжаются и могут провоцировать так называемые электростатические разряды (ЭСР).

Тяжелые ядра космических лучей (КЛ) могут вызывать не только «мягкие» сбои в памяти (переворот бита), но и провоцировать короткие замыкания и разряды по шинам питания. Этот класс явлений называется *SEL (Single Event Latch-up)* — одиночное защелкивание.

Современные исследования [4] подтверждают, что электростатические разряды способны вызывать специфические много битовые ошибки (MBU) из-за инъекции заряда в области шин питания. ЭСР — это мощный электромагнитный импульс (ЭМИ), который наводит скачки напряжения непосредственно на шинах данных и питания. ЭСР

может вызвать ложные команды записи в память или необратимый пробой изоляции между дорожками на печатной плате. Статистика показывает, что более 50% всех аномалий в работе спутников связаны с электризацией.

В условиях космического пространства электронные компоненты подвергаются воздействию ионизирующего излучения, которое может приводить к возникновению радиационно-индуцированных ошибок. Наиболее распространённые нарушения вызываются взаимодействием заряженных частиц с чувствительными элементами микросхем [5,6].

Ошибки приводят не только к локальным сбоям отдельных функциональных блоков, но и к распространению отказов по системе вследствие логических, информационных и управляющих связей между компонентами [7]. В связи с этим, традиционные методы оценки надёжности, основанные на анализе отдельных элементов или предположении независимости отказов, оказываются недостаточными для выявления наиболее уязвимых структурных фрагментов системы [8].

Радиационное воздействие околоземного космического пространства включает галактические космические лучи, солнечные космические лучи и частицы радиационных поясов Земли [1,2]. Тяжелые заряженные частицы, воздействуя на элементы модулей памяти, вызывают локальную ионизацию, что может приводить к изменению логического состояния запоминающих элементов и регистров [5,9].

В последние годы всё большее внимание уделяется методам структурного анализа, позволяющим учитывать топологию системы и взаимосвязи между её компонентами [8–10]. Одним из перспективных подходов является графовое моделирование, при котором архитектура бортовой вычислительной системы представляется в виде ориентированного графа, а распространение отказов интерпретируется как направления этого графа [11].

Ошибки возникают в результате накопления заряда в чувствительных областях полупроводниковых структур, превышающего порог переключения логического элемента [5,12]. Вероятность возникновения ошибок зависит от интенсивности и энергетического спектра потока частиц, а также от конструктивных и технологических особенностей электронной компонентной базы [13].

С физической точки зрения ошибки рассматриваются как случайный процесс, интенсивность которых определяется факторами космического пространства и характеристиками защищённости космической системы [3,14]. При этом отказ одного функционального блока может приводить к искажению данных или управляющих сигналов, распространяющихся по системе и вызывающих вторичные отказы в других элементах [6].

Анализ отказов бортовой вычислительной системы учитывает не только вероятность возникновения ошибок в отдельных компонентах, но и структуру взаимосвязей между ними, определяющую возможные направления распространения отказов. Разработанная графовая модель позволяет формализовать архитектуру системы и исследовать её уязвимость с точки зрения физически обусловленных отказов [8,15].

Методология

Гипотеза исследования.

Физико-математическая модель направления распространения отказов бортовых систем управления с использованием ориентированных графов, которая используется для анализа работы БКУ космических аппаратов (КА) в режиме on-line и принятия управленческих решений.

В качестве основного метода используется исследование распространения отказов структуры бортового комплекса управления. Данный метод основан на физико-математическом представлении системы в виде ориентированного графа, где вершины описывают элементы бортовой аппаратуры, а рёбра отображают связи между ними.

Такое представление позволяет исследовать топологию системы и определить взаимное влияние её элементов. Анализ направлений распространения отказов по графовой модели дает возможность выявить уязвимые узлы системы, а также оценить влияние отдельных элементов на общую работоспособность БКУ. Кроме того, физико-математическая графовая модель обеспечивает наглядную визуализацию структуры системы и взаимодействия её компонентов.

Анализ отказов бортовых систем управления космических аппаратов выполнен с использованием ориентированных графов, позволяющих формализовать структуру системы и направление распространения отказов между её элементами. Применение графовой модели даёт возможность исследовать работу бортового комплекса управления (БКУ) и выявлять элементы, оказывающие наибольшее влияние на устойчивость функционирования системы. Такой подход может быть использован для оценки состояния системы и принятия управленческих решений при анализе её работоспособности.

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе был выполнен анализ структурной схемы бортового комплекса управления космического аппарата «Монитор-Э», что позволило определить основные элементы системы и их функциональные связи.

На втором этапе на основе полученной структурной информации были построены ориентированные графы, в которых вершины соответствуют элементам БКУ, включая вычислительные модули, блоки памяти, интерфейсные контроллеры и подсистемы управления. Ориентированные рёбра графа отражают направление информационных и функциональных связей между элементами системы.

На следующем этапе выполнен структурный анализ построенной графовой модели, позволяющий определить возможные маршруты распространения отказов и выявить элементы, оказывающие существенное влияние на функционирование БКУ.

Метод исследования. Использование статистических данных отказов для оценки отказоустойчивости системы и определение основных показателей её функционирования.

На основе полученных данных рассчитаны следующие характеристики:

- вероятность безотказной работы системы;
- среднее время наработки на отказ;

- вероятность отказа отдельных элементов системы;
- наиболее значимые маршруты распространения отказов в структуре БКУ.

Полученные результаты позволяют определить элементы системы, отказ которых может привести к возникновению нештатных ситуаций или снижению эффективности функционирования бортового комплекса управления.

Графовое представление архитектуры бортового комплекса управления.

Для анализа ошибок бортового комплекса управления (БКУ) с учётом радиационно-индуцированных отказов архитектура системы представляется в виде ориентированного графа

$$G=(V,E) \quad (1)$$

где $V=\{v_i\}$ – множество вершин, соответствующих функциональным модулям БКУ, а $E=\{e_{ij}\}$ – множество ориентированных рёбер, описывающих потоки данных, сигналов управления и функциональные зависимости между модулями.

Каждая вершина графа соответствует логически или функционально выделяемому элементу БКУ, такому как вычислительный модуль, память, интерфейсный контроллер или подсистема управления. Ориентированные рёбра отражают направленность передачи информации и управляющих воздействий, что позволяет моделировать асимметричное распространение отказов в системе [8,9].

Радиационно-индуцированный отказ, возникающий в одном из функциональных модулей БКУ, может распространяться по системе вдоль ориентированных рёбер графа, приводя к нарушению функционирования последующих элементов. Пути в ориентированном графе естественным образом интерпретируются как возможные траектории распространения отказов, обусловленных физическими механизмами одиночных радиационных событий [3,6].

Для количественной оценки направления распространения отказов в ориентированном графе используется вероятностная модель, основанная на характеристиках функциональных модулей и их связей.

Особый интерес представляет параметр распространения отказов – путь с минимальным значением надёжности, определяющий наибольшую структурную уязвимость БКУ [9,11]. Выявление такого направления позволяет установить связь между физическими параметрами радиационной среды и архитектурными особенностями БКУ, а также определить элементы, наиболее чувствительные к радиационно-индуцированным сбоям.

Использование графового представления обеспечивает формализацию топологии БКУ, наглядность анализа и создаёт основу для дальнейшего исследования устойчивости при изменении параметров радиационной обстановки, что будет рассмотрено в последующих разделах.

Построение ориентированного графа для оценки отказов БКУ

Для количественного анализа направления распространения отказов БКУ используется ориентированный граф, введённый в предыдущем разделе, формула (1). В рамках рассматриваемого подхода отказ БКУ интерпретируется как результат распространения радиационно-индуцированных нарушений по функциональным и управляющим связям между элементами системы.

Каждой вершине $v_i \in V$, соответствующей функциональному модулю БКУ, сопоставляется вероятность безотказной работы p_i , определяемая интенсивностью радиационного воздействия и характеристиками электронной компонентной базы. Аналогично каждому ориентированному ребру $e_{ij} \in E$, описывающему связь между модулями v_i и v_j , может быть поставлена в соответствие вероятность корректной передачи информации p_{ij} .

В предположении независимости отказов элементов, надёжность отдельного пути распространения отказов

$$P_k = \{v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_m}\} \quad (2)$$

пределяется как произведение вероятностей безотказной работы всех вершин и рёбер, входящих в данный путь:

$$R(P_k) = \prod_{v_i \in P_k} p_i \prod_{e_{ij} \in P_k} p_{ij} \quad (3)$$

С физической точки зрения данная величина характеризует вероятность сохранения корректного функционирования соответствующей последовательности модулей БКУ при воздействии радиационной среды. Малые значения $R(P_k)$ указывают на повышенную уязвимость системы к радиационно-индуцированным сбоям.

В рамках предлагаемого подхода вводится понятие направления распространения отказов, определяемого как направление с минимальной надёжностью:

$$P_{crit} = \arg \min_{P_k \in \mathcal{P}} R(P_k), \quad (4)$$

где \mathcal{P} — множество всех допустимых ориентированных путей в графе БКУ.

Формула (4) используется для выявления направления распространения отказа, соответствующего минимальному значению надёжности среди возможных маршрутов.

Под направлением распространения отказов в работе понимается ориентированный маршрут в графе системы.

Выявление направлений распространения отказов позволяет установить структурные элементы БКУ, наиболее подверженные влиянию радиационно-индуцированных отказов, и связать их с физическими параметрами радиационной среды. В отличие от классических методов оценки надёжности, основанных на анализе отдельных компонентов, предложенный графовый подход учитывает топологию системы и механизмы распространения отказов.

Полученная формулировка создаёт основу для дальнейшего анализа надёжности БКУ при изменении параметров радиационного воздействия, что позволяет оценить робастность архитектуры БКУ в различных условиях функционирования.

Построение графовой модели бортового комплекса управления

В соответствии с предложенной формализацией для анализа безотказности БКУ была построена графовая модель, отражающая основные функциональные и управляющие связи между ключевыми модулями системы. Модель носит обобщённый характер, что позволяет рассматривать её как типовую архитектуру БКУ. В качестве примера рассматривается графовая модель КА «Монитор-Э». На рисунке 1 представлена структурная схема БКУ КА «Монитор-Э» [16].

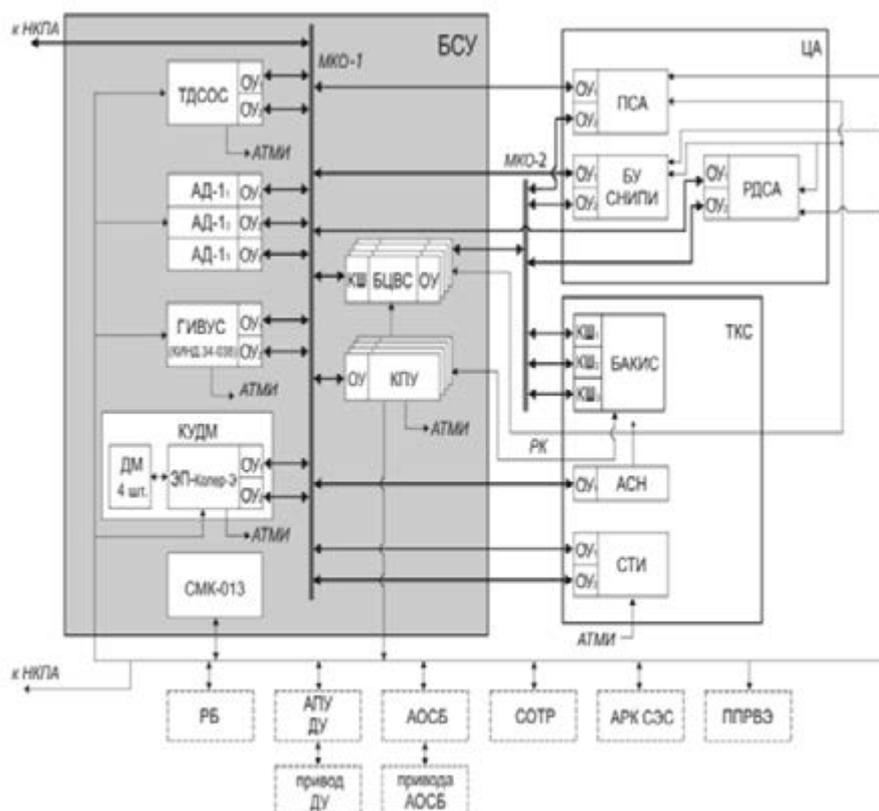


Рисунок 1. Структурная схема БКУ КА «Монитор-Э»

Структурная схема БКУ космического аппарата «Монитор-Э» представляет собой совокупность функциональных подсистем, обеспечивающих управление движением аппарата, сбор и обработку информации, взаимодействие с целевой аппаратурой и обмен данными с наземным комплексом управления.

Центральным элементом структуры является БКУ, осуществляющий координацию работы измерительных, исполнительных и информационных подсистем. В состав БКУ входят датчики ориентации и движения, включая астронавигационные и инерциальные средства (ТДСОС, АД-11, АД-12, АД-13, ГИВУС), а также вспомогательные устройства контроля и измерений (СМК-013). На рисунке 2 представлен ориентированный граф БКУ КА «Монитор-Э».

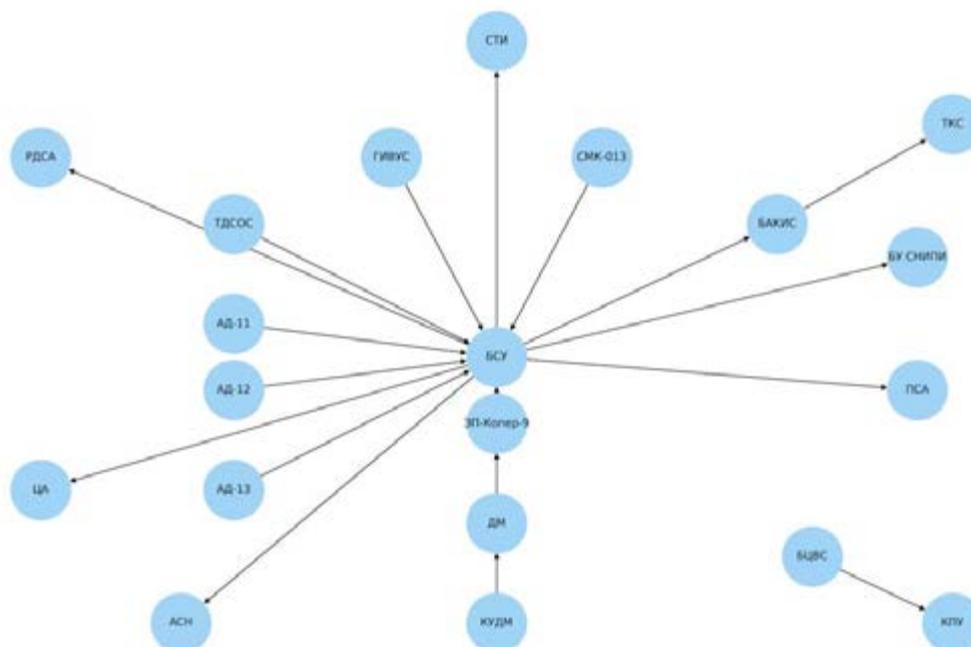


Рисунок 2. Ориентированная структурная схема бортовой системы управления космического аппарата «Монитор-Э»

Для формирования и реализации управляющих воздействий в структуре предусмотрен исполнительный контур, включающий командно-управляющий двигатель (КУДМ), двигатель-маховик (ДМ) и электронный преобразователь (ЭП «Копер-9»), обеспечивающие стабилизацию и ориентацию космического аппарата.

Вычислительный контур управления представлен бортовой цифровой вычислительной системой (БЦВС) и командно-программным устройством (КПУ), которые обеспечивают обработку информации, выполнение алгоритмов управления и формирование команд для исполнительных и информационных подсистем.

Взаимодействие с внешними системами реализуется через подсистемы целевой аппаратуры (ЦА), систему телеметрических измерений (СТИ), аппаратуру связи с наземным комплексом (БАКИС-ТКС), а также вспомогательные навигационные и сервисные подсистемы (АСН, ПСА, РДСА, БУ СНИПИ).

Для формализации структуры бортовой системы управления и последующего анализа распространения отказов структурная схема БСУ была представлена в виде ориентированного графа.

Вершины графа соответствуют функциональным блокам и подсистемам БСУ, а ориентированные рёбра отражают направления передачи управляющих воздействий, информационных и командных сигналов между ними. Направление рёбер выбиралось в соответствии с логикой функционирования системы и архитектурой взаимодействия подсистем.

Центральная вершина графа соответствует БСУ, от которой исходят рёбра к подсистемам целевой аппаратуры, телеметрии и связи, а также к вычислительному

и исполнительному контурам управления. Такое представление позволяет наглядно отразить иерархию системы и выявить узлы, через которые проходят основные потоки управления и информации.

Построенный ориентированный граф используется в дальнейшем для анализа отказов бортовой системы управления космического аппарата «Монитор-Э».

Множество вершин ориентированного графа $G=(V,E)$ формируется на основе функциональной декомпозиции БКУ и включает следующие элементы:

- v_1 – вычислительный модуль (центральный процессор БКУ);
- v_2 – подсистема памяти (оперативная и энергонезависимая память);
- v_3 – интерфейсный модуль обмена данными;
- v_4 – подсистема управления и принятия решений.

Ориентированные рёбра графа $e_{ij} \in E$ описывают направленные потоки данных и управляющих сигналов между модулями БКУ. Наличие ребра e_{ij} означает, что отказ или искажение данных в модуле v_i может привести к нарушению функционирования модуля v_j . На рисунке 3 показано графовое представление архитектуры БКУ, используемое для анализа распространения радиационно-индуцированных отказов.

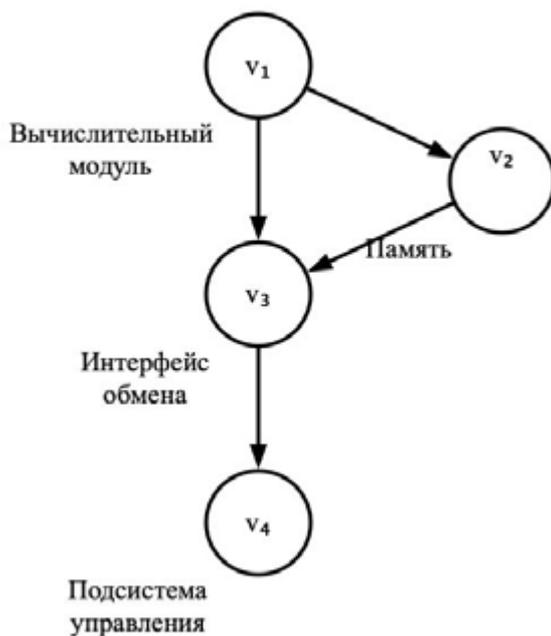


Рисунок 3. Ориентированный граф архитектуры бортового комплекса управления

Графовая модель отражает потенциальные пути распространения радиационно-индуцированных отказов, обусловленные архитектурой БКУ и логикой взаимодействия его компонентов. Каждой вершине v_i сопоставляется вероятность безотказной работы p_i , зависящая от чувствительности соответствующего модуля к одиночным радиационным событиям и параметров радиационной среды. Аналогично каждому ребру e_{ij} сопоставляется вероятность корректной передачи данных p_{ij} , учитывающая возможные искажения информации при распространении отказов.

Значения вероятностей p_i и p_{ij} в настоящей работе рассматриваются как параметрические величины и используются для сравнительного анализа путей распространения отказов, а не для точного прогноза абсолютной надёжности бортового комплекса управления.

На основе заданной графовой модели бортового комплекса управления и вероятностных характеристик его элементов проводится анализ всех допустимых ориентированных путей распространения отказов в графе системы. Для каждого пути рассчитывается значение направления распространения отказов в соответствии с вероятностной моделью, введённой в разделе 4.

Критерием минимальной надёжности БКУ, определяющим наибольшую структурную уязвимость системы, является направление распространения отказов в графе БКУ. Проведённые расчёты показали, что направление определяется последовательностью вершин

$$v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow v_4, \quad (5)$$

что указывает на ключевую роль соответствующих функциональных модулей в формировании надёжности системы.

Графическое представление ориентированного графа БКУ с выделением направления распространения отказов приведено на рисунке 4. Выделение направления позволяет наглядно продемонстрировать архитектурно обусловленные уязвимости системы и определить функциональные модули, оказывающие наибольшее влияние на общую надёжность БКУ.

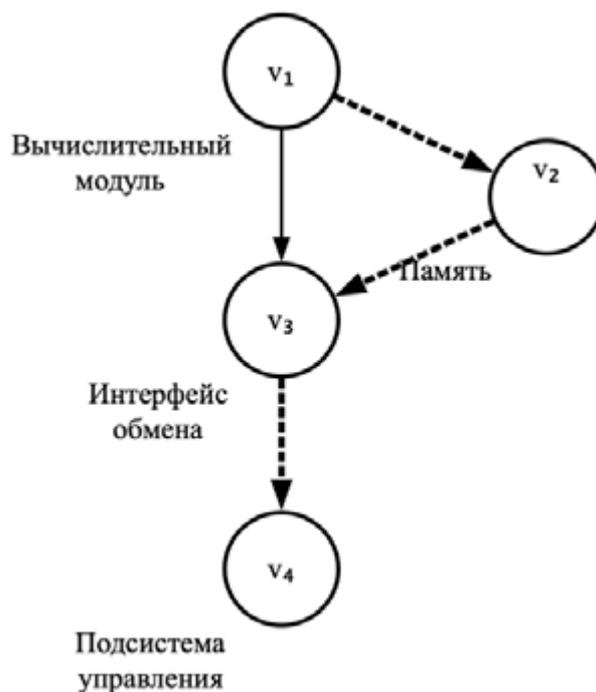


Рисунок 4. Ориентированный граф бортового комплекса управления с выделенным направлением распространения отказов

На рисунках 1 и 2 представлена детальная структурная схема БКУ (датчики АД-11, АД-12, ГИВУС, КУДМ, ЭП «Копер-9» и др.), тогда как на рисунке 3 система представлена в виде графа из четырех вершин.

Агрегация элементов в вершины графа выполнялась по функционально-логическому принципу, а именно:

- в одну вершину объединялись элементы, реализующие единую функцию и имеющие тесные внутренние связи;
- внутренние взаимодействия внутри такого блока существенно более интенсивны, чем внешние связи с другими блоками;
- для задачи анализа распространения отказов определяющими являются именно межблочные связи, а не внутренняя микроструктура.

Таким образом, каждая вершина графа соответствует функционально завершённой подсистеме системного уровня, внутри которого отказ распространяется значительно быстрее, чем между подсистемами.

Цель построения графа на рисунке 3 заключалась в анализе межфункционального распространения отказов, а не в исследовании отдельных элементов. Поэтому использована укрупненная модель.

Чтобы исключить потерю значимых связей, при агрегации соблюдались следующие критерии:

1. сохранялись все информационные и энергетические связи между функциональными блоками;
2. не объединялись элементы, между которыми возможны независимые сценарии отказов;
3. проверено, что удаление внутренних связей не изменяет путей распространения отказов между блоками.

Локальные уязвимости внутри агрегированных вершин действительно могут существовать; однако они относятся к другому уровню декомпозиции и анализируются в рамках детальной схемы (рис. 1, 2). В настоящей работе исследуется системный уровень, поэтому выбранная степень агрегирования соответствует цели исследования.

Проведённый анализ показал, что отказы, как правило, возникают в вычислительном модуле и подсистеме памяти, что согласуется с физической природой ошибок, наиболее часто проявляющихся в элементах с высокой плотностью хранения информации. Полученный результат подчёркивает ключевую роль архитектурных решений в формировании устойчивости БКУ к воздействию космической радиационной среды.

Анализ графовой модели параметра распространения отказов БКУ

Для оценки безотказности предложенного графового подхода был проведён анализ направления распространения отказов бортового комплекса управления (БКУ) при изменении интенсивности радиационного воздействия. В рамках данного анализа рассматривались вариации вероятностей безотказной работы вершин и рёбер графа, отражающие изменение интенсивности радиационного воздействия.

Параметры p_i и p_{ij} , сопоставленные элементам графовой модели БКУ, варьировались в заданных диапазонах, соответствующих умеренным изменениям радиационной

обстановки, характерным для различных орбитальных условий и фаз солнечной активности [1–3]. При этом структура графа и топология функциональных связей между модулями БКУ оставались неизменными.

Результаты анализа показали, что при умеренных вариациях параметров радиационной среды направление распространения отказов сохраняет свою структуру, а изменения отдельных путей не приводят к смене доминирующего уязвимого маршрута. Это свидетельствует о том, что направление распространения ошибок определяется преимущественно архитектурными особенностями БКУ, а не случайными флуктуациями параметров модели.

С физической точки зрения данный результат указывает на то, что ключевые уязвимости БКУ формируются на уровне структурной организации системы и связей между функциональными модулями. Даже при изменении интенсивности радиационного воздействия наиболее чувствительные элементы БКУ продолжают играть определяющую роль в механизмах распространения отказов.

Выявление направления распространения отказов позволяет установить функциональные модули БКУ, требующие повышенного уровня защиты или резервирования. В отличие от классических методов анализа надёжности, ориентированных на отдельные элементы, графовый подход обеспечивает системный взгляд на проблему и позволяет учитывать механизмы каскадного распространения отказов, обусловленные структурой БКУ.

Анализ полученных результатов

Полученные результаты показали, что в современных микросхемах возникают отказы, функционально влияющие на работу космических систем. Например, в КМОП-структурах транзисторы расположены очень плотно. Между ними существуют паразитные (нежелательные) структуры, которые ведут себя как обычные тиристоры. Если есть защита, питание временно снимается, но данные в памяти при этом теряются.

Отмечаются и другие опасные эффекты «по шине». Помимо защелкивания, существуют и другие сценарии, когда частица бьет по силовым цепям:

SEB (Single Event Burnout) – Одинокое выгорание, характерно для мощных полевых транзисторов (MOSFET). Частица вызывает локальный пробой, и через транзистор проходит лавинообразный ток, разрушающий структуру.

SEGR (Single Event GateRupture) – Одиноким пробоем затвора: Частица пробивает тонкий слой диэлектрика в транзисторе, что приводит к необратимому замыканию управляющей цепи на канал.

Даже при использовании в составе бортовой аппаратуры КА модулей памяти категории Space или Military, в условиях космического полета при комплексном воздействии факторов космического пространства указанные отказы были зарегистрированы на реальных космических аппаратах.

Для обеспечения функционирования бортовой аппаратуры КА принимаются следующие меры.

Таблица 1. Методы снижения радиационно-индуцированных отказов бортовой аппаратуры КА

Метод	Описание
Радиационно-стойкая база (Rad-Hard)	Использование технологии «кремний на изоляторе» (SOI), где транзисторы изолированы друг от друга слоем диоксида кремния, что исключает эффект защелкивания.
LOD (Latch-up Detection)	Специальные схемы мониторинга тока. Как только ток по шине превышает порог, защита мгновенно отключает питание модуля на миллисекунды.
Троирование (TMR)	Резервирование блоков памяти, при котором при отказе одного из них система продолжает работать по мажоритарному принципу (2 из 3).

Детальный механизм отказов в реальных условиях является предметом отдельных исследований, результаты которых будут представлены в дальнейших публикациях.

Полученные результаты создают основу для дальнейшего исследования направления ошибок при изменении параметров радиационной обстановки, а также для разработки рекомендаций по повышению безотказности архитектуры БКУ.

Сравнительный анализ метода Дерево отказов и метода графов для оценки отказов БКУ.

Известно, что классические методы (FTA – Fault Tree Analysis, RBD – Reliability Block Diagrams) являются стандартом. Однако, FTA и схемы целостности статичны. Они плохо учитывают перекрестные связи и каскадные эффекты (когда отказ в одной шине питания из-за ТЗЧ вызывает сбой в логике соседа, что не предусмотрено прямой иерархией «дерева»). В то время как графовый подход позволяет выявлять «циклы» и «узлы деградации», которые в дереве отказов представлены как независимые ветви.

Основное отличие заключается в том, что традиционные методы (FTA, RBD) базируются на дедуктивной логике «сверху вниз» и ориентированы на независимые цепочки отказов. Однако для бортовой аппаратуры, подверженной воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и электростатических разрядов (ЭСР), критическим является возникновение неявных топологических связей.

В частности, предложенный графовый метод позволил выявить:

- Эффект «защелкивания» (SEL) в смежных цепях: Классическое дерево отказов рассматривает модули памяти и контроллер питания как отдельные блоки. Графовая модель, учитывающая физическую близость и общие шины питания, выявила уязвимость к групповому отказу при прохождении одной частицы с высоким LET.

- Каскадные сбои при ЭСР, в отличие от схем функциональной целостности, граф топологии позволил идентифицировать «узкие места» в разводке шин, где электростатический разряд на корпусе наводит помехи сразу на несколько информационных каналов.

Таким образом, эффективность методики подтверждается выявлением направления распространения отказов, которые в классических Деревьях отказов считались маловероятными из-за предположения о независимости событий» [17–18].

Для иллюстрации превосходства графового метода был проведен сравнительный анализ критического узла бортового управляющего комплекса КА «Монитор–Э».

Классический подход (FTA), рассматривал основной и дублирующий массивы памяти как независимые элементы. Вероятность их одновременного отказа оценивалась как пренебрежимо малая (10^{-9}), так как дерево отказов не учитывало пространственные и электрофизические связи между ними.

Предложенный графовый подход, позволил идентифицировать направления распространения отказов (узел графа с высокой степенью центральности), соответствующие общей шине питания и топологически близким областям кристалла. Моделирование показало, что при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) возникает риск одиночного события (SEL), приводящего к каскадному отказу обоих каналов памяти одновременно.

Таблица 2. Сравнительный анализ классического (FTA) и предложенного графового подходов на примере анализа отказов КА «Монитор–Э»

№ п/п	Характеристика	Классический метод (Деревья отказов / FTA)	Предложенный графовый метод (Топологический граф)
1	Объект анализа	Иерархическая логика функций	Физико-логическая структура соединений
2	Учет взаимосвязей	Только прямые функциональные зависимости	Прямые, перекрестные и паразитные связи
3	Учет взаимосвязей	Только прямые функциональные зависимости	Прямые, перекрестные и паразитные связи
4	Оценка резервирования	Считает каналы независимыми (вероятности перемножаются)	Выявляет общие точки отказа в топологии
5	Чувствительность к ТЗЧ/ЭСР	Рассматривается как случайный сбой одного узла	Моделирует «разряд по шине» и его влияние на соседние узлы графа
6	Выявленная уязвимость для «Монитор–Э»	Не выявлена (высокая расчетная надежность дублированных систем)	Обнаружена: риск одновременного блокирования каналов памяти при SEL в узле шинного формирователя
7	Количественный показатели	Вероятность отказа: $P \approx 10^{-8}$ (ложный отказ)	Коэффициент уязвимости узла: $V > 0.75$ (указывает на критическую связь)

Как видно из Таблицы 2, классический анализ по методу FTA дает избыточно оптимистичный прогноз надежности для КА «Монитор-Э», так как не учитывает физическую природу распространения электростатического разряда и ионизационных эффектов по общим шинам. В то время как предложенный графовый метод позволяет количественно оценить «связанность» отказов.

В частности, использование центральности узлов графа позволило выявить, что компоненты, считавшиеся независимыми в FTA, фактически имеют общую «критическую дистанцию» по цепям питания. Это объясняет наблюдаемые на практике аномалии в работе бортовой аппаратуры, которые не предсказывались традиционными расчетами при проектировании.

1. Что пропустил классический метод FTA: Расчет по методу дерева отказов для «Монитор-Э» мог показать высокую надежность, так как вероятность одновременного выхода из строя основного и резервного блоков памяти крайне мала (произведение вероятностей: $P1 \times P2$). В FTA они выглядят как параллельные независимые ветви.

2. Что выявил графовый подход: Графовая модель учитывает физическую трассировку шин питания на плате. При прохождении тяжелого ядра (ТЗЧ) в области шинного формирователя возникает эффект SEL (защелкивания). Поскольку графовая модель связывает узлы не только функционально, но и по «линиям питания», она обнаруживает, что один ионный трек может вызвать короткое замыкание общей шины, питающую и основную, и резервный чип памяти.

Таким образом, графовый метод выявил уязвимость общей причины, которую классический расчет квалифицировал как безопасную из-за допущения о независимости отказов резервированных цепей.

Предложенный графовый подход демонстрирует устойчивость к вариациям характеристик радиационной среды и может рассматриваться как параметр надежности для выявления архитектурно обусловленных уязвимостей БКУ. Полученные результаты подтверждают применимость метода для анализа отказов бортовых комплексов управления в широком диапазоне условий функционирования и создают основу для разработки рекомендаций по повышению радиационной стойкости систем управления космических аппаратов.

Заключение

Предложен графовый подход к анализу отказов БКУ космического аппарата с учётом радиационно-индуцированных ошибок. Ориентированные рёбра графа $e_{ij} \in E$ описывают направленные потоки ошибок и управляющих сигналов между модулями БКУ. Наличие ребра e_{ij} означает, что отказ или искажение данных в модуле v_i может привести к нарушению функционирования модуля v_j .

Сформулировано понятие направления распространения отказов, определяемого как путь с минимальной надёжностью в графе БКУ. Показано, что выявление такого направления позволяет установить уязвимость системы, не выявляемую на этапе проектирования отдельных компонентов. Анализ движения потоков отказов позволяет

выявить уязвимые узлы, подверженные воздействию внешней среды, визуализировать направления работоспособности системы.

Архитектура БКУ формализована в виде ориентированного графа, позволяющего учитывать функциональные и управляющие связи между модулями системы и моделировать механизмы распространения отказов. Показано, что отказы определяются архитектурой БКУ, а не случайными флуктуациями параметров модели. Это подчёркивает важность архитектурных решений при проектировании бортовых комплексов управления, функционирующих в условиях космического излучения.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе и проектировании БКУ космических аппаратов с целью повышения их устойчивости к комплексному воздействию факторов космического пространства и условиям эксплуатации.

Финансирование.

Данная работа финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR31714741 «Фундаментальное исследование солнечно-земных связей и их влияния на околоземное космическое пространство и технологическую инфраструктуру»).

Вклад авторов.

Ошманова А.С. – проведение исследования, выполнение расчётов и формального анализа, интерпретация полученных результатов, подготовка и написание текста рукописи.

Грищенко В.В. – концептуализация исследования, разработка методологии, научное руководство работой, критический анализ и валидация результатов, подготовка первоначального проекта рукописи, рецензирование и редактирование текста.

Ошманова А.С. и **Грищенко В.В.** – участие в обсуждении результатов исследования, утверждение окончательного варианта статьи для публикации и согласие нести ответственность за все аспекты работы, включая достоверность представленных данных.

Конфликт интересов соавторов отсутствует.

Список литературы

1. M.A. Xapsos, G.P. Summers, J.L. Barth, Probability model for worst-case solar proton event fluences, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 46, No. 6, p. 1481–1485 (1999). <https://doi.org/10.1109/23.819111>.
2. G.C. Messenger, M.S. Ash, The Effects of Radiation on Electronic Systems, Van Nostrand Reinhold, New York (1997).
3. P.E. Dodd, L.W. Massengill, Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, No. 3, p. 583–602 (2003). <https://doi.org/10.1109/TNS.2003.813129>.
4. X. Cao, Y. Liu, H. Wang et al., Comparative study on the soft errors induced by single-event effects and space electrostatic discharge, Electronics, Vol. 10, No. 7, Article 802 (2021). <https://doi.org/10.3390/electronics10070802>.
5. R.C. Baumann, Soft errors in advanced semiconductor devices — Part I: The three radiation

sources, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol. 1, No. 1, p. 17–22 (2001). <https://doi.org/10.1109/7298.946456>.

6. P. Shivakumar, M. Kistler, S. Keckler, D. Burger, L. Alvisi, Modeling the effect of technology trends on the soft error rate of combinational logic, Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks, p. 389–398 (2002). <https://doi.org/10.1109/DSN.2002.1028924>.

7. A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, C. Landwehr, Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing, IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol. 1, No. 1, p. 11–33 (2004). <https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2>.

8. M. Modarres, M. Kaminskiy, V. Krivtsov, Reliability Engineering and Risk Analysis, CRC Press, Boca Raton (2016).

9. R. Diestel, Graph Theory, 5th ed., Springer, Berlin (2017).

10. Y. Kermarrec, J. Leduc, Reliability modeling of complex systems using directed graphs, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94, No. 2, p. 359–367 (2009).

11. E. Zio, Reliability engineering: Old problems and new challenges, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94, p. 125–141 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.06.002>.

12. G. Levitin, The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization, Springer, London (2005).

13. A.H. Johnston, Radiation effects in advanced microelectronics technologies, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 45, No. 3, p. 1339–1354 (1998). <https://doi.org/10.1109/23.685206>.

14. D.M. Fleetwood, Total ionizing dose effects in MOS and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 60, No. 3, p. 1706–1730 (2013). <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2259260>.

15. E.L. Petersen, Single-Event Effects in Aerospace, Wiley, Chichester (2011).

16. А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко и др., Бортовые системы управления космическими аппаратами, учебное пособие, под ред. А.С. Сырова, МАИ-ПРИНТ, Москва, 304 с. (2010).

17. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications, NASA/SP-2022-6122, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC (2022).

18. https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/Fault%20Tree%20Handbook_NASA.pdf

19. J. Zhu, X. Yang, L. Wang et al., Graph-based reliability analysis for complex spacecraft electronic systems, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 234, Article 108567 (2022).

А.С. Ошманова^{1*}, В.Ф. Грищенко²

¹әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

²Ионосфера институты, Алматы, Қазақстан

(E-mail: aizhan.oshmanova@icloud.com, grischenko.v@ionos.kz)

Ғарыш кеңістігі факторларының әсері жағдайында ғарыш аппараттарының борттық басқару кешендерінің істен шығуын талдау

Аңдатпа. Әртүрлі мақсаттағы ғарыш аппараттарын (ҒА) пайдалану барысында борттық электрондық аппаратурада істен шығулар пайда болуы мүмкін. Мұндай жағдайлар штаттан тыс

режимдердің дамуына, кейбір жағдайларда тіпті спутниктердің толық жоғалуына алып келеді. Әдетте мұндай ақаулар ғарыш аппаратының борттық басқару кешенінде (ББК) туындайды. Көптеген зерттеушілер бұл ақаулардың негізгі себептерінің бірі ретінде Жер маңындағы ғарыш кеңістігіндегі (ЖМҒК) иондаушы сәулеленудің әсерін көрсетеді. Сондықтан Жер маңындағы ғарыш кеңістігі факторларының кешенді әсері жағдайында ғарыш аппаратының борттық басқару кешенінің жұмысын бағалау аса маңызды міндет болып табылады.

Жұмыста қателердің таралуын сипаттайтын ББК-нің бағытталған графтары ұсынылған, сондай-ақ графтың төбелері мен қабырғалары арасындағы өзара байланыстар сипатталған. Функционалдық модульдердің ықтималдықтық сипаттамалары негізінде жүйенің құрылымдық тұрғыдан ең осал элементтерін анықтайтын қателердің таралу бағытын сәйкестендіру әдістемесі әзірленді.

Зерттеу нәтижелері ББК-дегі ақаулардың модель параметрлерінің кездейсоқ флуктуацияларымен емес, жүйе архитектурасымен анықталатынын көрсетті. Ұсынылған ақаулардың таралу бағыты параметрі ғарыш кеңістігі факторларының кешенді әсері жағдайында басқару жүйесінің жұмысына ықпал ететін функционалдық түйіндердің осалдық деңгейін анықтауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер ғарыш аппараттарының борттық басқару кешендерін жобалау кезінде оларды ғарыш кеңістігі факторларының кешенді әсеріне және пайдалану жағдайларына төзімділігін арттыру мақсатында қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: борттық басқару кешені, радиациямен индукцияланған қате, бағытталған граф, істен шығу, ғарыш аппараты.

A.S. Oshmanova^{1*}, V.F. Grishchenko²

¹ *Kazakh National University. al-Farabi, Almaty, Kazakhstan*

² *Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan*

(E-mail: aizhan.oshmanova@icloud.com, grischenko.v@ionos.kz)

Failure Analysis of Spacecraft Onboard Control Complexes under the Influence of Space Environment Factors

Abstract. During the operation of spacecraft designed for various missions, failures may occur in onboard electronic equipment, which can lead to off-nominal situations and, in some cases, even to the loss of satellites. As a rule, such failures arise in the spacecraft's onboard control complex (OCC). Many researchers associate these failures with the effects of ionizing radiation in the near-Earth space environment (NESE). Therefore, evaluating the performance of spacecraft onboard control complexes under the combined influence of near-Earth space environmental factors is an important and necessary task.

Directed graphs of the onboard control complex are presented to describe the propagation of errors, and the relationships between graph vertices and edges are analyzed. Based on the probabilistic characteristics of functional modules, a methodology has been developed to identify the direction of error propagation that determines the highest structural vulnerability of the system.

The results show that failures of the onboard control complex are determined primarily by the system architecture rather than by random fluctuations of model parameters. The proposed parameter

describing the direction of failure propagation makes it possible to identify vulnerable functional nodes affecting the operation of the control system under the combined influence of space environment factors. The obtained results can be applied in the design of spacecraft onboard control complexes in order to improve their resilience to the combined effects of space environment factors and operational conditions.

Keywords: onboard control system, radiation-induced error, directed graph, failure, spacecraft.

References

1. M.A. Xapsos, G.P. Summers, J.L. Barth, Probability model for worst-case solar proton event fluences, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 46, No. 6, p. 1481–1485 (1999). <https://doi.org/10.1109/23.819111>.
2. G.C. Messenger, M.S. Ash, *The Effects of Radiation on Electronic Systems*, Van Nostrand Reinhold, New York (1997).
3. P.E. Dodd, L.W. Massengill, Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 50, No. 3, p. 583–602 (2003). <https://doi.org/10.1109/TNS.2003.813129>.
4. X. Cao, Y. Liu, H. Wang et al., Comparative study on the soft errors induced by single-event effects and space electrostatic discharge, *Electronics*, Vol. 10, No. 7, Article 802 (2021). <https://doi.org/10.3390/electronics10070802>.
5. R.C. Baumann, Soft errors in advanced semiconductor devices — Part I: The three radiation sources, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 1, No. 1, p. 17–22 (2001). <https://doi.org/10.1109/7298.946456>.
6. P. Shivakumar, M. Kistler, S. Keckler, D. Burger, L. Alvisi, Modeling the effect of technology trends on the soft error rate of combinational logic, *Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks*, p. 389–398 (2002). <https://doi.org/10.1109/DSN.2002.1028924>.
7. A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, C. Landwehr, Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, Vol. 1, No. 1, p. 11–33 (2004). <https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2>.
8. M. Modarres, M. Kaminskiy, V. Krivtsov, *Reliability Engineering and Risk Analysis*, CRC Press, Boca Raton (2016).
9. R. Diestel, *Graph Theory*, 5th ed., Springer, Berlin (2017).
10. Y. Kermarrec, J. Leduc, Reliability modeling of complex systems using directed graphs, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94, No. 2, p. 359–367 (2009).
11. E. Zio, Reliability engineering: Old problems and new challenges, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94, p. 125–141 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.06.002>.
12. G. Levitin, *The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization*, Springer, London (2005).
13. A.H. Johnston, Radiation effects in advanced microelectronics technologies, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 45, No. 3, p. 1339–1354 (1998). <https://doi.org/10.1109/23.685206>.
14. D.M. Fleetwood, Total ionizing dose effects in MOS and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 60, No. 3, p. 1706–1730 (2013). <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2259260>.
15. E.L. Petersen, *Single-Event Effects in Aerospace*, Wiley, Chichester (2011).

16. A.G. Brovkin, B.G. Burdygov, S.V. Gordiyko et al., Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami [Onboard control systems of spacecraft], training manual [uchebnoe posobie], edited by A.S. Syrova, MAI-PRINT, Moskva, 304 p. (2010). [in Russian]
17. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications, NASA/SP-2022-6122, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC (2022).
18. https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/Fault%20Tree%20Handbook_NASA.pdf
19. J. Zhu, X. Yang, L. Wang et al., Graph-based reliability analysis for complex spacecraft electronic systems, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 234, Article 108567 (2022).

Сведения об авторах:

Ошманова А.С. – автор для корреспонденции, докторант PhD, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 72, 050040, Алматы, Казахстан.

Грищенко В.Ф. – к. ф.-м. н., доцент, Институт ионосферы, ул. Ионосфера, 117, Алматы, 050020, Казахстан.

Oshmanova A.S. – the corresponding author, Doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave. 72, 050040, Almaty, Kazakhstan.

Grichshenko V.F. – Supervisor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Institute of Ionosphere, Ionosfera St. 117, Almaty, 050020, Kazakhstan

Ошманова А.С. – хат-хабар авторы, докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, әл-Фараби көшесі 72, 050040, Алматы қаласы, Қазақстан.

Грищенко В.Ф. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Ионосфера институты, Ионосфера көшесі 117, Алматы, 050020, Қазақстан



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).