

УДК: 629.78: 539.12.04

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-116-125

Для цитирования: Максимов И. А., Кочура С. Г., Авдюшкин С. А. Основные положения методологии обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию радиационных эффектов космического пространства // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 116–125. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-116-125.

For citation: Maksimov I. A., Kochura S. G., Avdyushkin S. A. [The main provisions of the methodology for ensuring the resistance of the onboard equipment of spacecraft to the effects of the radiation effects of outer space]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 116–125. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-116-125.

Основные положения методологии обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию радиационных эффектов космического пространства

И. А. Максимов, С. Г. Кочура, С. А. Авдюшкин

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: avdyushkin@iss-reshetnev.ru

В настоящей работе рассмотрены проблемные вопросы обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП), существенно ограничивающего срок активного существования космического аппарата. В работе описывается методология обеспечения радиационной стойкости, разработанная специалистами АО «ИСС». Результатом проделанной работы является обеспечение гарантированного выполнения целевой функции космическими аппаратами (КА) с длительными сроками активного существования (САС) 15 и более лет.

Среди комплекса факторов космического пространства (ФКП), воздействующих на КА, ионизирующее излучение космического пространства является основным фактором, ограничивающим САС. Воздействие энергетических частиц ИИ КП вызывает деградацию электронной компонентной базы (ЭКБ), которая приводит к сбоям и отказам бортовой аппаратуры (БА) и деградации ее функциональных поверхностей. Обеспечение радиационной стойкости КА является сложной комплексной задачей, одним из этапов которой является определение радиационной стойкости компонентов, комплектующих бортовую аппаратуру. В результате накопленного опыта по проведению радиационных испытаний и анализа их результатов специалистами АО «ИСС» была разработана методология, позволяющая гарантированно обеспечить радиационную стойкость КА в условиях сжатых сроков производства и оптимизированных затрат.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, дозовые эффекты, ионизирующее излучение, космический аппарат, космическое пространство, радиационная стойкость, электронная компонентная база.

The main provisions of the methodology for ensuring the resistance of the onboard equipment of spacecraft to the effects of the radiation effects of outer space

I. A. Maksimov, S. G. Kochura, S. A. Avdyushkin

Joint-stock company “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: avdyushkin@iss-reshetnev.ru

In this paper, the problematic issues of ensuring the resistance of the onboard equipment of spacecraft to the effects of ionizing radiation from outer space, which significantly limits the period of active existence of the spacecraft, are considered. The paper describes the methodology for ensuring radiation resistance, developed by the specialists of JSC "ISS". The result of the work done is to ensure the guaranteed performance of the target function by spacecraft with long period of active lifetime of 15 or more years.

Among the complex of outer space factors affecting the spacecraft, ionizing radiation of outer space is the main factor limiting the period of active existence. Exposure to energetic particles of ionizing radiation from outer space causes degradation of the electronic component base, which leads to failures and malfunctions of on-board equipment and degradation of its functional surfaces. Ensuring the radiation resistance of a spacecraft (SC) is a complex task, one of the stages of which is to determine the radiation resistance of components that complete the on-board equipment. As a result of accumulated experience in conducting radiation tests and analysis of the results, specialists of JSC "ISS" developed a methodology that allows to guarantee the radiation resistance of the spacecraft under conditions of tight production deadlines and optimized costs.

Keywords: on-board equipment, total dose effects, ionizing radiation, spacecraft, space, radiation hardness, EEE-parts.

Введение

В процессе натурной эксплуатации космический аппарат подвергается воздействию широкого диапазона факторов космического пространства, основными из которых являются радиационные эффекты. Обеспечение радиационной стойкости космического аппарата (КА) является сложной комплексной задачей, которая решается как на этапе разработки КА, так и за пределами этапов разработки – при проведении натуральных экспериментов и исследований космического пространства.

Воздействие радиационных эффектов на КА

Работы по исследованию влияния радиационных эффектов на КА в мире и нашей стране проводятся уже несколько десятилетий. За это время с момента открытия радиационных поясов Земли достаточно подробно изучены физические радиационные условия орбитального функционирования КА, разработаны основные методологические принципы защиты бортовой аппаратуры (БА) КА от радиации [1].

С учетом того, что каждый КА содержит порядка 100–200 тыс. электронных компонентов, очевидно, что к электронной компонентной базе космического применения предъявляются исключительно высокие требования как по ее надежности, так и радиационной стойкости. В связи с этим совершенствование методологии обеспечения БА КА высоконадежной ЭКБ требуемого уровня радиационной стойкости имеет первостепенное значение для дальнейшего развития космической отрасли.

В АО «ИСС» в результате многолетнего сотрудничества с ведущими отечественными НИИ и вузами получен существенный задел в области исследования уровней и механизмов воздействия факторов космического пространства (ФКП) и обеспечения стойкости БА и КА к их воздействию.

Воздействие энергетических частиц на КА приводит к деградации его функциональных поверхностей и нарушению режимов функционирования активной ЭКБ, на основе которой выполнена БА КА. Ионизационная реакция различных типов ЭКБ отличается широким разнообразием, при этом отказы большинства ЭКБ происходят вследствие эффектов ионизации и структурных повреждений материалов, а также выделения тепла [2].

В ряде ЭКБ возникновение отказов под действием протонного и электронного облучений обусловлено деградацией характеристик за счет появления объемных радиационных эффектов. Структурные повреждения (образование радиационных дефектов внутри кристаллической решетки) оказывают влияние на электрофизические характеристики материалов: снижают концентрацию, время жизни и подвижность носителей заряда.

Поверхностные ионизационные эффекты связаны, в основном, с накоплением зарядов в слоях подзатворных и пассивирующих диэлектриков, а также с изменениями характеристик границ раздела. Данные эффекты, в основном, определяют отказы современной ЭКБ при воздействии космической радиации.

Наряду с внутренними процессами в кристаллах ЭКБ при радиационных воздействиях имеют место сопутствующие внешние эффекты – электрические воздействия на выводы, утечки между выводами и др. В частности, появление на выводах ЭКБ импульсов напряжения и тока происходит в результате электростатических разрядов диэлектрических материалов из-за их радиационной зарядки при воздействии электронов и протонов космического пространства.

Высокоорбитальные КА связи, навигации и геодезии, созданные в АО «ИСС», функционируют на нескольких типах орбит, пересекающих практически все области околоземного космического пространства (рис. 1).

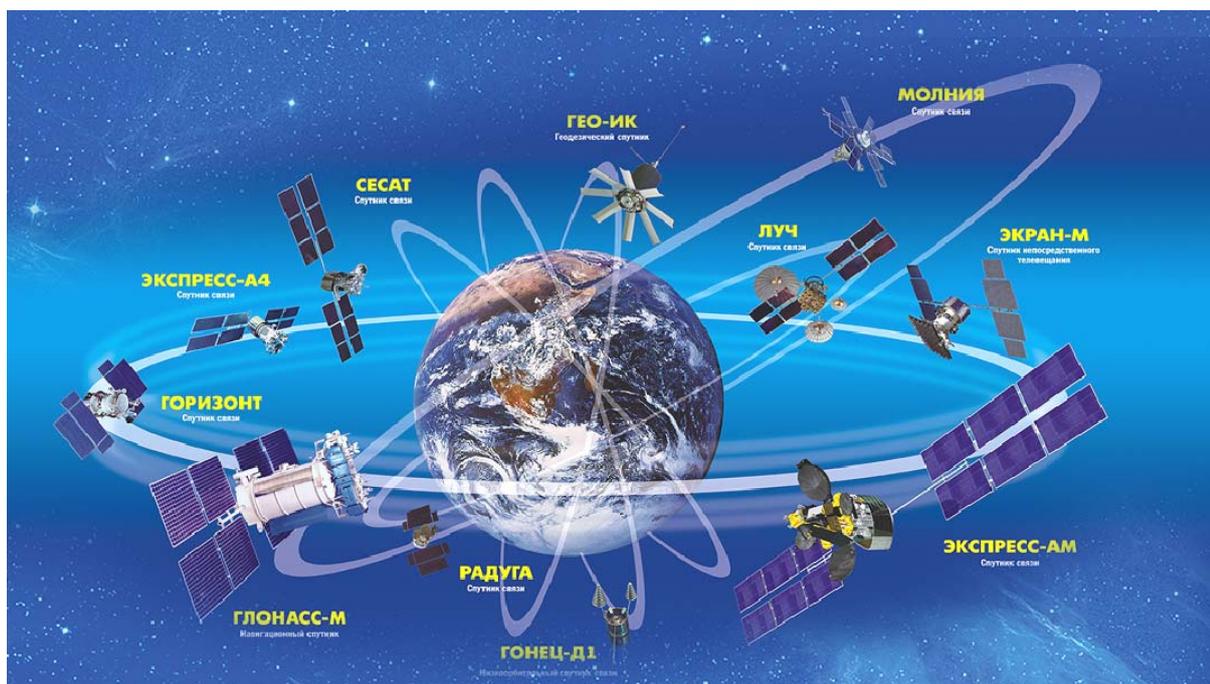


Рис. 1. Орбиты, на которых функционируют КА разработки АО «ИСС»

Fig. 1. Orbits on which spacecraft operate, developed by JSC ISS

Натурные эксперименты по исследованию факторов космического пространства

В АО «ИСС» имеется существенный опыт мониторинга параметров космической среды [3–5], проведены десятки натурных экспериментов на борту КА, результатом чего является уточнение физики и механизмов воздействия космической среды на КА, разработка и отработка методов и средств защиты, применение которых позволяет обеспечить длительный срок активного существования разрабатываемых КА (до 15 лет). В таблице приведены основные этапы развития системы мониторинга космической среды в АО «ИСС».

Полученные в процессе натурных экспериментов, проведённых в том числе и на борту КА, разработанных в АО «ИСС», данные о параметрах энергетических спектров потоков заряженных частиц и зависимости поглощенной дозы от толщины конструктивной защиты для каждой эксплуатируемой орбиты и спектра излучения конкретного вида задаются в табличной форме в виде зависимости поглощенной дозы от величины защиты [6].

Используя полученные зависимости при разработке БА, с учетом защиты, обеспечиваемой конструкцией КА и БА, по ранее разработанной методологии производится расчет величины суммарной поглощенной дозы для критической ЭКБ, входящей в состав БА.

**Основные этапы развития системы мониторинга космической среды на КА
разработки АО «ИСС»**

Орбита	Даты эксперимента	Регистрируемые параметры космической среды	Основные результаты исследований
Круговая 1000 км	1968–1971 гг.	Потоки электронов и протонов	Уточнена модель радиационных поясов Земли, получены данные о планетарном распределении СКЛ
ВЭО	1968–1975 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощённая доза	
ГСО	1978–1990 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощённая доза, электрические поля, внешняя помеховая обстановка	Подтверждена гипотеза о влиянии на КА факторов электризации
ГСО	1983–2003 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощённая доза, электрические поля, внешняя помеховая обстановка	Исследованы процессы формирования магнитосферной плазмы, влияние солнечной активности на уровень радиационного воздействия
Круговая, 20 000 км	1983–2016 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощённая доза, электрические поля, разности потенциалов, внешняя помеховая обстановка	Проведено уточнение модели радиационных поясов земли
ВЭО	2001–2003 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощённая доза, помеховая обстановка	Проведены работы по уточнению модели космического пространства
ГСО	с 2017 г.	Поглощённая доза, помеховая обстановка, давление СВА внутри приборного отсека	Проводится уточнение модели радиационных поясов Земли, исследование параметров СВА и электризации
Круговая, 20 000 км	с 2017 г.	Потоки электронов и протонов, поглощённая доза, электрические поля, внешняя помеховая обстановка, давление СВА	Проводится уточнение модели радиационных поясов Земли, исследование параметров СВА и электризации

Далее на основе сравнительного анализа результатов расчета с данными о радиационной стойкости ЭКБ, полученных экспериментальным путем, с учетом требуемого коэффициента запаса, делается заключение о радиационной стойкости БА.

Данные по радиационной стойкости ЭКБ отечественного производства должны приводиться в технических условиях (ТУ) на каждый конкретный типонаминал заводом-изготовителем ЭКБ на основании результатов экспериментальных исследований на моделирующих установках (ускорители электронов, протонов, источник гамма-излучения) в виде его группы стойкости. Однако, как показал опрос заводов-изготовителей ЭКБ, испытаниям на воздействие дозы ЭКБ подвергаются в подавляющем большинстве только один раз перед их запуском в серийное производство, что не соответствует современным требованиям о необходимости периодического подтверждения заявленного уровня стойкости, предъявляемым в контрактах при создании современных КА.

На основании вышеизложенного очевидно, что для решения проблемы обеспечения стойкости КА к воздействию радиационных дозовых эффектов в настоящее время в отечественной космической отрасли особое внимание следует уделить определению и подтверждению фактической радиационной стойкости применяемой элементной базы, что достигается в результате проведения периодических радиационных испытаний ЭКБ [7].

Создание и внедрение методологии гарантии радиационной стойкости элементной базы, используемой для комплектации КА разработки АО «ИСС»

До 2000-х гг. основой для проведения расчетных оценок радиационной стойкости являлись технические условия (ТУ) на ЭКБ. В типовых ТУ приводятся уровни радиационной стойкости в виде предельных значений радиационной стойкости, при которых значения критериальных параметров находятся в пределах нормы. При этом для абсолютного большинства ЭКБ указанные данные были получены в ходе приемочных испытаний при сдаче ЭКБ в серию и с тех пор не подвергались периодическим испытаниям на соответствие указанным в ТУ уровням радиационной стойкости.

В рамках работ по одному из международных проектов по созданию КА АО «ИСС» направило запросы в адрес 24-х заводов-изготовителей (ЗИ) по поводу периодичности испытаний выпускаемых ЭКБ на дозовые эффекты. Только от шести ЗИ пришли ответы о наличии протоколов испытаний ЭКБ. Остальные ЗИ ответили, что испытания не проводились с момента сдачи ЭКБ в серию.

В то же время для ЭКБ иностранного производства (ЭКБ ИП) уровня качества «space», предназначенной к применению именно в условиях воздействия космической радиационной среды, испытания на определение фактического уровня радиационной стойкости (дозовые эффекты) проводятся на выборке из каждой партии.

Проведение испытаний на дозовые эффекты всех партий активной ЭКБ процедура достаточно дорогостоящая и связана с большими временными затратами. Поэтому ведущие мировые производители космической техники разрабатывают некие компромиссные подходы в вопросе гарантирования радиационной стойкости бортовой аппаратуры. Таким образом, с целью минимизации финансовых затрат на проведение радиационных испытаний каждой летной партии ЭКБ на дозовые эффекты было необходимо проведение комплекса работ, связанных с обоснованием и введением в действие периодичности проведения испытаний применяемых ЭКБ.

В результате выполнения данных работ в АО «ИСС» в 2010 г. был выпущен и согласован в установленном порядке документ, регламентирующий периодичность проведения радиационных испытаний ЭКБ, количество выборки для испытаний и интенсивность облучения, – «Методика проведения испытаний по подтверждению требований стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов разработки АО «ИСС» к воздействию дозовых эффектов ионизирующих излучений космического пространства», устанавливающий условия, порядок и периодичность проведения испытаний на дозовые эффекты.

Основные положения данной концепции сводятся к следующему: учитывая, что существует непостоянство стойкости к суммарной дозе от партии к партии [8; 9], все активные элементы, в процессе производства которых не проводится контроль радиационной стойкости, должны быть подвержены радиационным приемочным испытаниям партии согласно определенной периодичности.

Периодичность испытаний может быть увеличена по результатам испытаний конкретных типов ЭКБ определенного производителя, что допускалось при одновременном выполнении следующих условий:

- неизменной технологии изготовления;
- подтверждении уровня стойкости, гарантированного ТУ для количества последовательно испытанных партий не менее трех.

При формировании системы периодичности испытаний ЭКБ на дозовые эффекты был максимально учтен опыт работ в рамках ранее выполненных проектов. В соответствии с контрактными требованиями по данным проектам для подтверждения радиационной стойкости БА и КА в целом впервые в кооперации АО «ИСС» производился сплошной контроль радиационной стойкости.

С этой целью на первом этапе были организованы радиационные испытания 180 типонималов ЭКБ отечественного производства на дозовые эффекты.

Результаты первого этапа испытаний подтвердили целесообразность реализуемого подхода – из 180 типоминималов ЭКБ отечественного производства, подвергнутым испытаниям на гамма-установке, у 42 типов ЭКБ было зарегистрировано отклонение контролируемых критериальных параметров за нормы ТУ при наборе дозы, ниже заявленной в ТУ на данные ЭКБ [10]. Своевременное определение фактической радиационной стойкости ЭКБ позволило провести необходимую доработку БА и тем самым обеспечить требуемую радиационную стойкость создаваемого КА, а соответственно и требуемый САС КА.

Полученные результаты позволили начать создание базы экспериментальных данных по радиационной стойкости ЭКБ, которая используется при работе по последующим проектам с ее постоянным обновлением и пополнением.

Таким образом, в кооперации АО «ИСС» к 2010 г. была разработана и внедрена эффективная система подтверждения радиационной стойкости, применяемой в составе автоматических космических аппаратов элементной базы, основанная на периодичном проведении радиационных дозовых испытаний выборок из партий ЭКБ, предназначенных для комплектации БА изготавливаемых КА.

Основные положения «Методики проведения испытаний по подтверждению требований стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов разработки АО «ИСС» к воздействию дозовых эффектов ионизирующих излучений космического пространства» были введены в очередную редакцию ОСТ134-1034-2012 «АППАРАТУРА, ПРИБОРЫ, УСТРОЙСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам» [11].

В 2017 г. была разработана и внедрена для применения «Типовая методика проведения ускоренных испытаний изделий электронной техники на стойкость к воздействию длительного низкоинтенсивного ионизирующего излучения космического пространства по дозовым эффектам на испытательном гамма-комплексе типа «Радиян». Данная методика полностью соответствует требованиям отраслевого стандарта и определяет порядок проведения испытаний ЭКБ, выполненной по биполярной технологии, потенциально чувствительной к низкоинтенсивному излучению, и использования гамма-излучения низкой интенсивности 0,01 рад/с.

Создание экспериментальной базы для радиационной стойкости элементной базы, используемой для комплектации КА разработки АО «ИСС»

Параллельно с разработкой и внедрением методологических основ системы подтверждения радиационной стойкости применяемой в составе автоматических космических аппаратов элементной базы, в кооперации АО «ИСС» были развернуты работы по созданию необходимой экспериментальной испытательной базы.

В 2001 г. совместным решением АО «ИСС», АО «НПЦ «Полюс» и Томского политехнического университета было принято «Решение по вопросу организации работ по определению радиационной стойкости ЭКБ на базе НИИ Интроскопии Томского политехнического университета и АО «НПЦ «Полюс»».

В данном Решении отмечалось, что НИИ ИН ТПУ располагает испытательным стендом на основе линейного ускорителя ЭЛУ-4..., а НПЦ «Полюс» располагает комплексом аттестованного оборудования для контроля и измерения параметров ЭКБ.

В 2006 г. было разработано «Решение о проведении работ по внедрению системы гарантии радиационной стойкости элементной базы».

Для последующего осуществления элементов системы гарантии радиационной стойкости электронных компонентов и проведения испытаний лётных партий ЭКБ на дозовые эффекты в г. Томске на основе НИИ Интроскопии ТПУ и АО «НПЦ «Полюс» была создана интегрированная испытательная инфраструктура, включающая набор моделирующих радиационных установок, испытательной и контрольно-измерительной аппаратуры, которая обеспечивает отбраков-

ку потенциально-ненадежных компонентов и оценку радиационной стойкости закупленных партий электронных компонентов, изготовленных по различным технологиям, в сроки, определяемые заданной длительностью разработки бортовой аппаратуры КА (рис. 2).

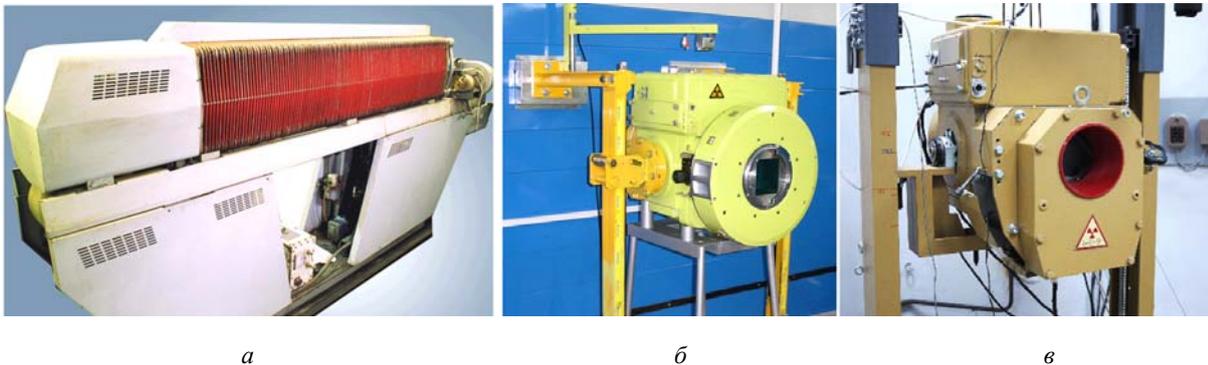


Рис. 2. Линейный ускоритель электронов ЭЛУ-4 (а), гамма-излучатель «Рокус-АМТ» испытательного комплекса «Радиян» (б), гамма-излучатель «Рокус-АМТФ» испытательного комплекса «Радиян-2» (в)

Fig. 2. Linear electron accelerator ELU-4 (a), gamma-emitter «Rokus-AMT» of test complex «Radian» (b), gamma-emitter «Rokus-AMTF» of test complex «Radian-2» (c)

В состав разработанной испытательной инфраструктуры входят:

- линейный ускоритель электронов, обеспечивающий мощность дозы излучения в диапазоне 10–300 рад/с;
- гамма-комплекс «Радиян» на основе гамма-излучателя «Рокус-АМТ», обеспечивающий проведение выборочных испытаний ЭКБ на полную дозу ионизирующего излучения в диапазоне мощности дозы 4–0,001 рад/с [12];
- гамма-комплекс «Радиян-2» с набором фильтров-поглотителей на основе гамма-излучателя «Рокус-АМТФ», обеспечивающий проведение выборочных испытаний ЭК на полную дозу ионизирующего излучения в двух диапазонах мощности дозы: 0,1–0,0001 рад/с и 0,005–0,0005 рад/с.

Установки оснащены рельсовой, дистанционно-управляемой системой для изменения мощности дозы в процессе облучения, без приостановки испытаний, неравномерность поглощенной дозы по выборке ЭКБ на гамма-комплексах не превышает 10 %.

В процессе облучения ЭКБ, находящаяся на испытательных платах в активном электрическом режиме, располагается в (Pb-Al) контейнерах, которые обеспечивают фотопоглощение низкоэнергетической компоненты излучения и равновесный спектр электронов, близкий к спектру электронов в кремнии при облучении его высокоэнергетическими гамма-квантами.

Результаты внедрения методологии гарантии радиационной стойкости элементной базы, используемой для комплектации КА разработки АО «ИСС»

По разработанной методологии были проведены входной контроль, диагностика и контрольные радиационные испытания более 1800 лётных партий ЭКБ, более чем 570 типоминималов, изготовленных по разным технологиям. Обнаружено несколько десятков потенциально-ненадежных электронных компонентов разного уровня сложности, изготовленных по различной технологии. Для 199 типоминималов (35 %) зафиксированы отказы до достижения уровня стойкости, гарантированного изготовителем.

Было установлено, что ЭКБ биполярной технологии при низкоинтенсивном облучении более часто, хотя и не всегда, демонстрируют меньшую радиационную стойкость, чем та, которую определили при испытаниях на высокой интенсивности облучения [13]. Кроме того, установлено влияние мощности дозы на характер отжига при повышенной температуре после облу-

чения одной и той же дозой и близких дозовых изменениях критериального параметра ЭКБ, что необходимо учитывать при экстраполяции результатов на натурные условия космического пространства.

Таким образом, решение проблемы обеспечения надежного длительного функционирования бортовой аппаратуры КА в отношении отказов, обусловленных дозовыми эффектами низкоинтенсивного ионизирующего излучения, потребовало создания новой испытательной инфраструктуры, а также аппаратурного и методического обеспечения применительно к электронным компонентам различного уровня интеграции.

Заключение

В настоящее время созданная интегрированная испытательная инфраструктура, включающая описанные моделирующие радиационные установки, испытательную и контрольно-измерительную аппаратуру, позволяет в требуемые сжатые сроки провести выявление потенциально ненадежных компонентов и оценивать радиационную стойкость партий электронных компонентов предприятий-поставщиков.

На основе результатов проведенных испытаний лётных партий ЭКБ сформирована уникальная база электронных данных, позволившая увеличить интервалы проведения испытаний потенциально надежных ЭКБ (в настоящее время 40 типонаименований) а, следовательно, и сократить объемы требуемых испытаний.

Созданная испытательная инфраструктура и периодические радиационные испытания электронных компонентов лётных партий на дозовые эффекты стали обязательной составной частью системы обеспечения радиационной стойкости БА КА разработки кооперации предприятий АО «ИСС» [14].

Библиографические ссылки

1. Новиков Л. С. Современное состояние и перспективы исследований взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой // Модель Космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование КА. М. : КДУ, 2007. 1144 с.
2. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
3. Контроль радиационной обстановки на высокоапогейных космических аппаратах / С. В. Балашов, В. В. Иванов, Л. И. Макашов и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 95–101.
4. Создание системы мониторинга внешних воздействующих факторов, возникающих в результате функционирования КА / И. А. Максимов, Ю. М. Прокопьев, В. В. Хартов и др. // Материалы 4 междунар. аэрокосмич. конгресса, 18–23 августа 2003, Москва. 1 с.
5. Тестоведов Н. А., Кочура С. Г., Максимов И. А. Исследование механизмов и уровней воздействия космической среды на космический аппарат // Вестник СибГАУ. 2016. № 6. С. 77–90.
6. ОСТ134-1044-2007. Методы расчета радиационных условий на борту космических аппаратов и установления требований по стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию заряженных частиц космического пространства естественного происхождения. М. : ЦНИИ Машиностроения, 2016. 256 с.
7. Максимов И. А. Проблемы обеспечения надежного функционирования современных космических аппаратов в условиях дестабилизирующего воздействия факторов космического пространства и факторов техногенного характера // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4(30). С. 100–102.
8. Флуктуации в уровне радиационной стойкости различных партий источника опорного напряжения ОСМ Н142ЕН19 / С. А. Авдюшкин, И. А. Максимов, В. В. Иванов и др. // Вопросы

атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2014. № 3. С. 22–24.

9. Максимов Ю. В., Зыков В. М. Оценка разброса стойкости электронных компонентов к дозовым эффектам от партии к партии и внутри партии на гамма-комплексе «Радан» // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2014. № 1. С. 69–71.

10. Испытания электронных компонентов из лётных партий к дозовым эффектам для гарантии стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов / В. М. Зыков, Ю. В. Максимов, И. А. Максимов и др. // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 4. С. 881–890.

11. OST134-1034-2012. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. М. : ЦНИИ Машиностроения, 2022. 58 с.

12. Формирование и метрологическая аттестация дозного поля гамма-комплекса «РАДИАН» по требованиям стандарта 22900 / Ю. В. Максимов, В. М. Зыков, М. И. Окунцов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2014. № 1. С. 72–75.

13. Эффект ELDRS в электронной компонентной базе отечественного производства и методы его обнаружения / Т. Н. Каськов, П. В. Рубанов, М. И. Окунцов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013. № 3. С. 14–17.

14. Обеспечение и подтверждение радиационной стойкости электрорадиоизделий на космических аппаратах разработки АО «ИСС» / В. М. Зыков, С. Г. Кочура, И. А. Максимов, А. В. Пацков // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований. Химки : Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина, 2015. С. 330–334.

References

1. Novikov L. S. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy issledovaniy vzaimodeystviya kosmicheskikh apparatov s okruzhayushchey sredoy. Model' Kosmosa, vos'moe izdanie. Tom 2. Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie KA* [Current state and prospects of research into the interaction of spacecraft with the environment, Introduction, Model of the Cosmos, eighth edition. Vol. 2. The impact of the space environment on materials and equipment of the spacecraft]. Moscow, 2007.

2. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiacionnye jeffekty v kremnievykh integral'nykh shemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya]. Moscow, BINOM Laboratoriya znaniy Publ., 2012, 304 p. (In Russ.).

3. Balashov S. V., Ivanov V. V., Makashov L. I. et al. [Monitoring of the radiation situation on high-altitude spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*. 2003, No. 1(30), P. 95–101 (In Russ.).

4. Maksimov I. A., Prokop'ev Yu. M., Khartov V. V. [Creation of a monitoring system for external influencing factors arising from the operation of the spacecraft]. *Materialy Chetvertogo mezhdunarodnogo aerokosmicheskogo kongressa*. Moscow, 2003, P. 1. (In Russ.).

5. Testoyedov N. A., Kochura S. G., Maksimov I. A. [Study of the mechanisms and levels of the impact of the space environment on the spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2016, No. 6, P. 77–90 (In Russ.).

6. OST134-1044-2007. *Methods for calculating radiation conditions on board spacecraft and establishing requirements for the resistance of electronic equipment of spacecraft to the effects of charged particles of outer space of natural origin* [OST134-1044-2007. Methods for calculating radiation conditions on board spacecraft and establishing requirements for the resistance of electronic equipment of spacecraft to the effects of charged particles of outer space of natural origin]. Moscow, TsNII Mashinostroeniya Publ., 2016, 256 p.

7. Maksimov I. A. [Problems of ensuring the reliable functioning of modern spacecraft in conditions of the destabilizing effect of space factors and man-made factors]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4(30), P. 100–102 (In Russ.).
8. Avdyushkin S. A., Maksimov I. A., Ivanov V. V. et al. [Fluctuations in the level of radiation resistance of various batches of the reference voltage source OSM N142EN19]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyu apparaturu*. 2014, No. 3, P. 22–24 (In Russ.).
9. Maksimov Yu. V., Zykov V. M. [Evaluation of the spread of resistance of electronic components to dose effects from part to part and within part on the gamma-complex Radian]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyu apparaturu*. 2014, No. 1, P. 69–71 (In Russ.).
10. Zykov V. M., Maksimov Yu. V., Maksimov I. A. et al. [Testing of electronic components from flight-batches to dose effects to ensure the stability of the onboard equipment of spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 4, P. 881–890 (In Russ.).
11. OST134-1034-2012. *Metody ispytaniy i ochenki stojkosti bortovoj radioelektronnoj apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu jelektronnogo i protonnogo izluchenij kosmicheskogo prostranstva po dozovym jeffektam* [OST134-1034-2012. Methods of testing and evaluation of the resistance of on-board electronic equipment of spacecraft to the effects of electronic and pleasant radiation of outer space]. Moscow, TsNII Mashinostroenia, 2022, 58 p.
12. Maksimov Yu. V., Zykov V. M., Okuntsov M. I. et al. [Formation and metrological certification of the dose-field of the Radian gamma-complex according to the requirements of the 22900 standard]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyu apparaturu*. 2014, No 1, P. 72–75 (In Russ.).
13. Kas'kov T. N., Rubanov P. V., Okuntsov M. I. et al. [ELDRS effect in the electronic component base of domestic production and methods]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyu apparaturu*. 2013, No. 3, P. 14–17 (In Russ.).
14. Zykov V. M., Kochura S. G., Maksimov I. A., Patskov A. V. [Ensuring and confirming the radiation resistance of electronic components on spacecraft developed by JSC ISS]. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy*. Himki, Nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie im. S. A. Lavochkina Publ., 2015, P. 330–334 (In Russ.).

© Максимов И. А., Кочура С. Г., Авдюшкин С. А., 2023

Максимов Игорь Александрович – доктор технических наук, начальник отдела; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.

Кочура Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора по электрическому проектированию и системам управления КА; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru.

Авдюшкин Сергей Александрович – начальник группы; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: avdyushkin@iss-reshetnev.ru.

Maximov Igor Aleksandrovich – Dr. Sc., head of department; Joint-stock company “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: mia@iss-reshetnev.ru.

Kochura Sergey Grigor'evich – Cand. Sc., deputy general designer; Joint-stock company “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru.

Avdyushkin Sergey Aleksandrovich – head of the group; Joint-stock company “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: avdyushkin@iss-reshetnev.ru.
