

Результаты радиационных испытаний высокоточного звёздного датчика нового поколения и его комплектующих

Р. В. Бессонов, А. А. Кобелева, С. А. Прохорова,
П. С. Сметанин, А. А. Форш, Я. Д. Эльяшев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: akobeleva@iki.rssi.ru

Звёздные датчики — это оптико-электронные устройства, предназначенные для определения ориентации в условиях космического пространства. Один из факторов, воздействующих на аппаратуру в космосе, — ионизирующее излучение космического пространства (ИИКП). Под ИИКП понимаются электроны, протоны и тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) естественных радиационных поясов Земли, солнечных и галактических космических лучей. ИИКП могут приводить к деградации характеристик аппаратуры, в частности к радиационному окрашиванию стёкол объектива, а также сбоям или отказам. С целью обеспечения радиационной стойкости высокоточного звёздного датчика нового поколения были проведены исследования и анализ стойкости электронной компонентной базы (ЭКБ), оптических элементов (объектива) и термоэлектрического модуля охлаждения. Чувствительная ЭКБ прошла испытания на стойкость к воздействию моделирующих установок гамма-излучения, потока протонов и ТЗЧ. В инициативном порядке проведены испытания модуля вторичного источника питания и функционального макета на стойкость к гамма-излучению. На основании проведённых исследований и испытаний выработан ряд мер парирования одиночных радиационных эффектов сбоев и отказов. Исследование показало, что требования по стойкости выполнены с запасом.

Ключевые слова: звёздный датчик, радиационная стойкость, поглощённая доза, одиночные радиационные эффекты

Одобрена к печати: 23.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-127-137

Введение

Высокоточный звёздный датчик нового поколения представляет собой оптико-электронное устройство, выполненное в виде моноблока и предназначенное для формирования информации об угловом положении приборной системы координат, связанной с посадочным местом, относительно инерциальной геоцентрической системы координат текущей эпохи. Иначе говоря, он предназначен для определения ориентации космического аппарата (КА). Методика определения ориентации основана на получении и обработке изображения звёздного неба. Информация об ориентации передаётся в управляющую вычислительную систему КА по резервированному магистральному последовательному интерфейсу. Электропитание прибора осуществляется от бортовой сети 27 В.

Ввиду того, что звёздные датчики устанавливаются на внешней поверхности космического аппарата, остро встаёт вопрос об обеспечении радиационной стойкости. Воздействие ионизирующих излучений космического пространства может приводить к деградации прибора в результате ионизации и эффектов смещения от протонов и электронов, а также к сбоям и/или отказам за счёт воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетичных протонов (ВЭП). Виды излучений и уровни воздействий определяются исходя из рабочей орбиты и срока активного существования космического аппарата, а также учитывают массовую защиту. Работы по обеспечению радиационной стойкости и сбое- и отказоустойчивости включают в себя:

- выбор радиационно-стойких электронных компонентных баз (ЭКБ) и материалов;
- конструктивную (массовую) защиту электрорадиоизделий (ЭРИ);
- выбор безопасных электрических режимов работы ЭРИ;
- программно-алгоритмические и схемотехнические меры парирования сбоев и отказов.

Выбор радиационно-стойкой ЭКБ подразумевает как анализ имеющейся информации по стойкости, так и проведение определительных или сертификационных испытаний.

В следующих разделах приведены функциональная схема и состав высокоточного звёздного датчика нового поколения, требования по радиационной стойкости, определение объёма испытаний, сводные данные по результатам испытаний и выработанные меры парирования радиационных эффектов.

Функциональная схема высокоточного звёздного датчика нового поколения

Звёздные датчики, как правило, состоят из следующих основных блоков: оптического узла; фотоприёмного устройства (ФПУ); блока приёма и обработки данных; вторичного источника питания. Функциональная схема высокоточного звёздного датчика нового поколения представлена на рис. 1.

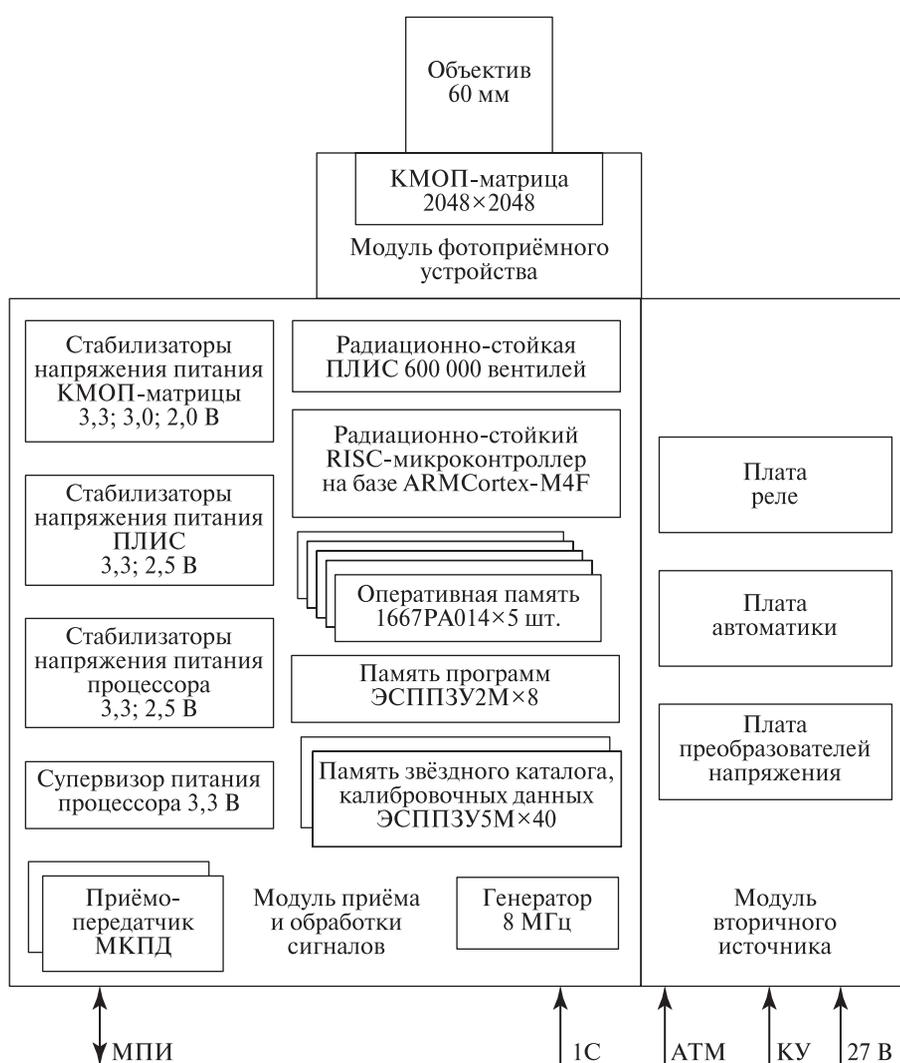


Рис. 1. Функциональная схема высокоточного звёздного датчика нового поколения

Оптический узел включает в себя объектив, бленду и фокусирующее кольцо, на рис. 1 он представлен в виде объектива. В высокоточном звёздном датчике применяется объектив ОЗК-60/1,4-К с фокусным расстоянием 60 мм. Потенциально дозовые воздействия могут приводить к радиационному окрашиванию стёкол, поэтому три первые линзы объектива, на

которые приходится наибольшая доза излучения, изготовлены из стекла серии 100, обладающего радиационно-оптической устойчивостью: ТК121, ТФ108, БФ113.

Оптический сигнал через оптический узел поступает в модуль ФПУ. В основе ФПУ высокоточного звёздного датчика нового поколения лежит КМОП-матрица (комплементарная структура «металл – оксид – полупроводник», *англ.* CMOS, complementary metal – oxide – semiconductor), основные характеристики которой приведены ниже.

Основные характеристики КМОП-матрицы

Размер чувствительной области	2048×2048 пиксель
Размер пикселя	5,5×5,5 мкм
Зарядовая вместимость	13 500 электрон
Темновой ток DC	125 электрон/с
Темновой шум	13 электрон
Структурный шум до облучения FPN	14* электрон
Неравномерность чувствительности DSNU	40* электрон

* Приведённое к электронам значение характеристики по карте данных Datasheet (*англ.* data sheet) (до облучения).

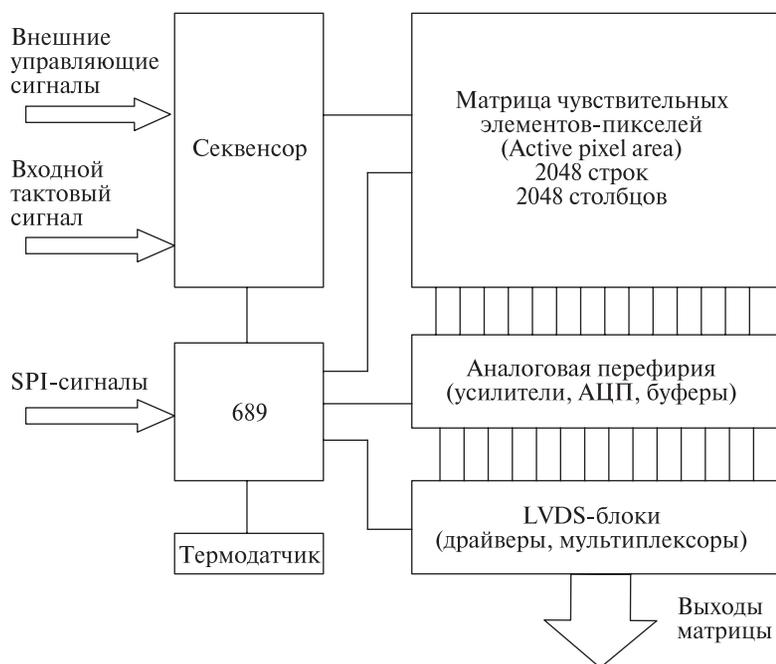


Рис. 2. Блок-схема КМОП-матрицы

В состав КМОП-матрицы входят чувствительная область (*англ.* active pixel area) и периферия, предназначенная для предобработки сигнала. Блок-схема КМОП-матрицы приведена на рис. 2. Внутренний секвенсор генерирует необходимые сигналы для приёма изображения. Полезный сигнал накапливается пикселем с глобальным затвором, а затем считывается последовательно строка за строкой. К выходному сигналу с пикселя можно применить аналоговое усиление, после чего значения пикселей передаются в АЦП (аналого-цифровой преобразователь) столбца, в котором осуществляется аналого-цифровое преобразование. Затем цифровые сигналы считываются по нескольким LVDS-каналам (*англ.* low-voltage differential signaling). Для программирования КМОП-матрицы предусмотрены пользовательские регистры, которые управляются по SPI-интерфейсу (*англ.* Serial Peripheral Interface).

КМОП-матрица не сертифицирована изготовителем по радиационной стойкости, однако прошла ряд исследований в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) совместно

с испытательным центром АО «Экспериментальное научно-производственное объединение «Специализированные электронные системы» (ЭНПО СПЭЛС) и широко применяется зарубежными фирмами, такими как Sodern Ariane Group.

Управление ФПУ осуществляется посредством модуля приёма и обработки сигнала. Изображение с КМОП-матрицы поступает в радиационно-устойчивую перепрограммируемую ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) на 600 000 вентилей, выполненную по флэш-технологии, после чего здесь же осуществляется первичная обработка. Затем изображение поступает в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и радиационно-стойкий RISC-микроконтроллер (*англ.* Reduced Instruction Set Compute, компьютер с сокращённым набором команд), выполненный по КНИ-технологии (кремний на изоляторе), в котором осуществляется локализация звёздopodobных объектов и распознавание по каталогу, хранящемуся в энергонезависимой перепрограммируемой радиационно-стойкой памяти. Этот же RISC-микроконтроллер отвечает за информационный обмен с бортом КА по мультиплексному каналу передачи данных. RISC-микроконтроллер не имеет в технических условиях сведений по стойкости к воздействию ТЗЧ и ВЭП, однако это модификация радиационно-стойкого сбое- и отказоустойчивого микроконтроллера предыдущего поколения с однократно программируемым постоянным запоминающим устройством (ПЗУ). Отличие заключается в памяти программ (сравнение блок-схем представлено на *рис. 3*). В микроконтроллере 1986VE81T в качестве памяти программ используется ОЗУ.

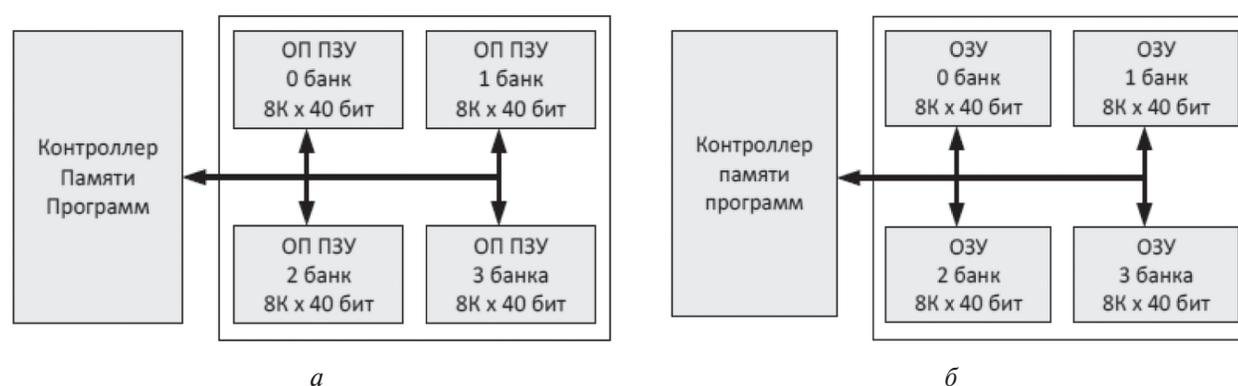


Рис. 3. Блок-схема памяти программ RISC-микроконтроллера: а — первого поколения; б — новая модификация

Вторичный источник питания отвечает за преобразование напряжения питания прибора 27 В в напряжение, необходимое для работы основных ЭРИ ФПУ и модуля приёма и обработки сигналов, а также за фильтрацию входного напряжения и аналоговую телеметрию.

Радиационные условия и виды испытаний

Оценка радиационной стойкости высокоточного звёздного датчика нового поколения проводилась для условий непрерывного функционирования на низкой круговой орбите. Следует отметить, что звёздные датчики относятся к группе аппаратуры, устанавливаемой на внешней поверхности КА с использованием средств защиты в виде экранно-вакуумной термоизоляции, поэтому радиационная нагрузка на внешние части прибора может быть существенной.

Ионизирующее излучение космического пространства может приводить к дозовым и одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) в чувствительных ЭКБ (Чумаков, 2015). Требования по стойкости к ионизационным дозовым эффектам задаются в виде зависимости поглощённой дозы от толщины защиты (*рис. 4*, см. с. 131). Соответственно, стойкость прибора обеспечивается за счёт выбора радиационно-стойкой ЭКБ и обеспечения необходимой толщины защиты с учётом требований по массе и габаритам.

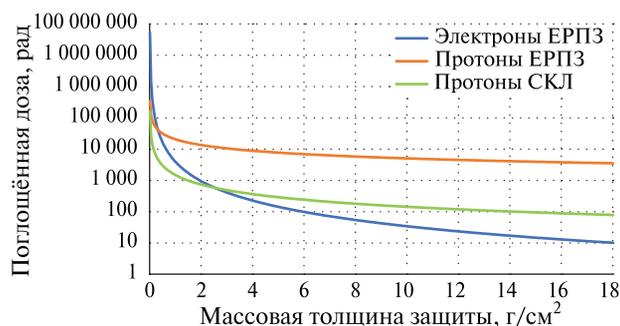


Рис. 4. Зависимость поглощённой дозы от массовой толщины защиты

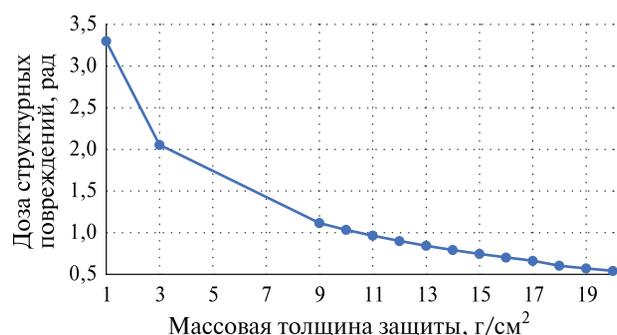


Рис. 5. Зависимость дозы структурных повреждений от массовой толщины защиты

Основной вклад в структурные повреждения ЭКБ вносят протоны и другие тяжёлые частицы космического пространства. Требования по стойкости к дозовым структурным эффектам задаются в виде зависимости дозы структурных повреждений от массовой толщины защиты и представлены на рис. 5.

Одиночные эффекты могут быть вызваны попаданием в чувствительную область ВЭП или ТЗЧ солнечных космических лучей и галактических космических лучей. Одиночные радиационные эффекты делятся на эффекты сбоев и отказов. Звёздные датчики нового поколения должны быть сбое- и отказоустойчивыми при воздействии ТЗЧ и ВЭП со спектрами, определёнными по руководящему документу РД 134-0139. С целью обеспечения сбое- и отказоустойчивости требуется проведение испытаний на стойкость к ТЗЧ и ВЭП ЭКБ, не имеющих соответствующих данных в документах на поставку (англ. datasheet, технические условия).

Таблица 1. Перечень изделий, требующих проведения радиационных испытаний

Наименование	Вид воздействия (тип эффекта)			
	Гамма-излучение (ионизационные эффекты)	Нейтроны (структурные эффекты)	ТЗЧ (одиночные эффекты сбоев и отказов)	ВЭП (структурные и одиночные эффекты)
КМОП-фотосенсор	+		+	+
RISC-микроконтроллер	Проведение испытаний не требуется, коэффициент запаса больше 3			Нечувствителен
Приёмопередатчик				Нечувствительны
Стабилизаторы напряжения	Испытания в составе ВИП			Нечувствителен
Регулятор напряжения				Нечувствительна
Операционный усилитель				Нечувствительны
Микросхема 6 «HE»				Нечувствительны
МОП-транзисторы	+			Не проводилось
ВИП				
Функциональный макет				

Примечание: ВИП — вторичный источник питания.

Для высокоточного звёздного датчика нового поколения был проведён предварительный расчёт радиационной стойкости и анализ соответствия ЭКБ требованиям по радиационной стойкости, сбое- и отказоустойчивости. В результате расчёта радиационной стойкости был определён перечень изделий на испытания, представленный в табл. 1.

Результаты испытаний электрорадиоизделий

Воздействие ТЗЧ и ВЭП может приводить к возникновению ОРЭ сбоев и отказов, таких как (Калашников, Уланова, 2015):

- одиночные тиристорные эффекты (ТЭ), приводящие к резкому увеличению тока в цепи питания (встречаются в ЭРИ, выполненных по КМОП-технологии);
- одиночные микродозовые эффекты, приводящие к катастрофическому отказу элемента из-за сильной локальной деградации;
- одиночные сбои (ОС), которые проявляются как инверсия логического состояния в элементах памяти и регистровых структурах;
- одиночные эффекты переходной ионизационной реакции, которые проявляются как кратковременный импульс на выходе интегральной схемы;
- одиночные эффекты функционального прерывания (ОФП), которые становятся следствием одиночного сбоя, приводящего к нарушению хода выполнения программы;
- «прокол» диэлектрика (характерен для flash-памяти).

Сводные результаты по испытаниям ЭРИ на стойкость к воздействию ТЗЧ по эффектам отказов приведены в *табл. 2*, по эффектам сбоев — в *табл. 3*.

Таблица 2. Результаты испытаний ЭРИ на стойкость к ТЗЧ по эффектам отказов

Объект испытаний	Эффект отказа	Пороговое значение ЛПЭ, МэВ·см ² ·мг ⁻¹	Сечение насыщения, см ²	Вероятность безотказной работы	Меры парирования
КМОП-фотосенсор	ТЭ	38	4·10 ⁻²	0,999998	Схема защиты
Процессор	ТЭ, КО	≥60	—	1	—
Приёмопередатчик		≥65			
Линейные стабилизаторы напряжения		≥61,6			
Импульсный стабилизатор напряжения		>90			
Импульсный понижающий регулятор		>68,14			
Операционный усилитель		61			
N-канальный полевой транзистор	Выгорание, пробой, КО	>65,6			
P-канальный ДМОП-транзистор	Выгорание, пробой, КО	>65,6			

Примечание: ДМОП-транзистор — полевой транзистор со структурой типа «металл–оксид–полупроводник», изготовленный по технологии двойной диффузии (*англ.* DMOS, diffused metal – oxide – semiconductor).

Как видно из *табл. 1–3*, наиболее полные испытания прошла КМОП-матрица. Ниже приведены выводы по результатам этих испытаний (Белинская и др., 2018; Кобелева и др., 2020):

- стойкость к поглощённой дозе составляет не менее 18 крад;
- для обеспечения стойкости к дозе структурных повреждений необходимо применение программных и аппаратных мер защиты, таких как отбраковка дефектных пикселей и введение охлаждения;
- стойкость к дозе структурных повреждений составляет не менее 18 рад (при охлаждении до 0 °С);

- в результате воздействия ТЗЧ с ЛПЭ не менее $38 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}$ в КМОП-матрице по каналам питания +2 и +3,3 В наблюдаются резкие скачки тока потребления (ТЭ) на десятки и сотни миллиампер соответственно. В таком режиме КМОП-матрица сохраняет работоспособность в течение не менее 5 мин. По результатам этих испытаний разработана схема контроля тока потребления матрицы и сброса питания при превышении заданного порога тока;
- при облучении протонами и ТЗЧ с ЛПЭ $1 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{мг}^{-1}$ в регистрах КМОП-матрицы наблюдаются ОС, которые могут приводить к ОФП. Для парирования этого эффекта осуществляется циклическая перезапись регистров. В режиме ориентации полный цикл перезаписи регистров выполняется за 11 с, в режиме ожидания все регистры обновляются за 1 с.

Таблица 3. Результаты испытаний ЭРИ на стойкость к ТЗЧ по эффектам сбоев

Объект испытаний	Эффект сбоя	Пороговое значение ЛПЭ, $\text{МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$	Сечение насыщения, см^2	Частота сбоев, с^{-1}	Меры парирования
КМОП-фотосенсор	ОФП	1	$3,1\cdot 10^{-4}$	$2,06\cdot 10^{-4}$	В режиме ориентации полный цикл перезаписи регистров выполняется за 11 с, в режиме ожидания все регистры обновляются за 1 с
1986BE81T	ОС _{РСН} ОС _{РАМД} ОФП	1	$8,5\cdot 10^{-8}$ $5,1\cdot 10^{-9}$ $1,1\cdot 10^{-4}$	$3,175\cdot 10^{-4}$	Коды восстановления, перезапуск питания
1526ЛН2ЭП	ОС	60			—

Примечание: ЛПЭ — линейная передача энергии (англ. LET — Linear energy transfer).

Результаты испытаний вторичного источника питания

Испытания вторичного источника питания проводились в нормальных климатических условиях до уровня поглощённой дозы 35 крад с использованием изотопной установки «Гамма-Панорама МИФИ» с облучателем на основе изотопа Cs^{137} при интенсивности воздействия 0,1 ед/с. Во время испытаний контролировались входной ток и входные напряжения +5 и +3,3 В.

Зависимости контролируемых параметров от уровня воздействия приведены на рис. 6–8 (см. с. 134).

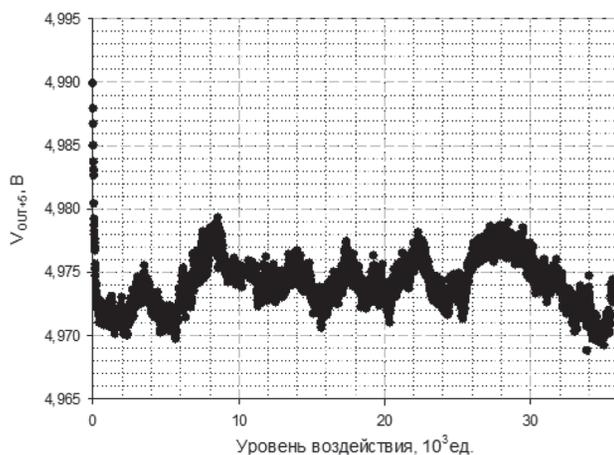


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения по каналу +5 В платы преобразователей от уровня воздействия

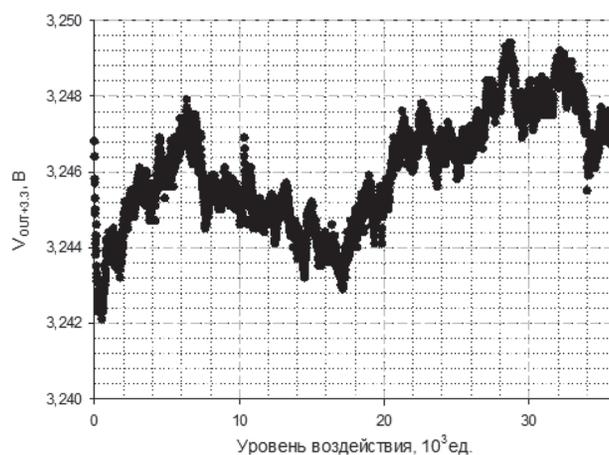


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения по каналу +3,3 В платы преобразователей от уровня воздействия

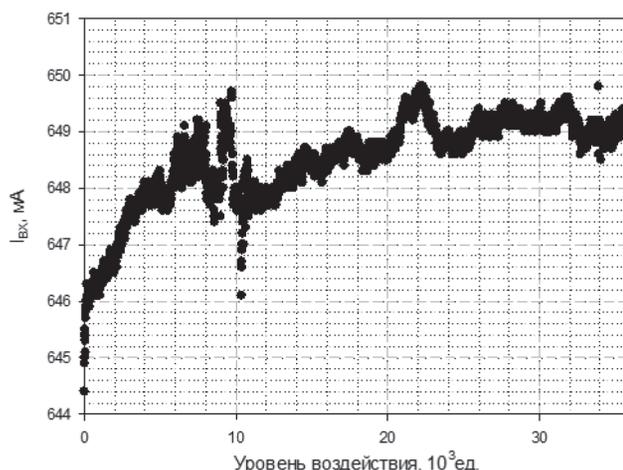


Рис. 8. Зависимость входного тока платы преобразователей от уровня воздействия

На графиках видно, что выходное напряжение +5 В практически не меняется с внесением поглощённой дозы, в то время как выходное напряжение +3,3 В и входной ток имеют тенденцию к росту. Однако ни один из параметров не выходит за допустимую норму, что говорит о соответствии вторичного источника питания требованиям по радиационной стойкости.

Результаты испытаний функционального макета

Испытания функционального макета проводились с целью подтверждения радиационной стойкости прибора по поглощённой дозе в штатном режиме функционирования. Уровень воздействия выбирался на основе расчёта локальных поглощённых доз для низкой круговой орбиты за срок активной службы. Максимальное расчётное значение поглощённой дозы на ЭКБ функционального макета составило 8,26 крад. График набора дозы представлен на рис. 9.

В процессе облучения нарушений информационного обмена функционального макета с контрольно-испытательной аппаратурой не наблюдалось. Критерием работоспособности было определение ориентации на контрольной ступени (при остановке облучения); кроме того, контролировалось количество зафиксированных и распознанных объектов. Графики зависимости количества локализованных и распознанных объектов приведены на рис. 10 (см. с. 135).

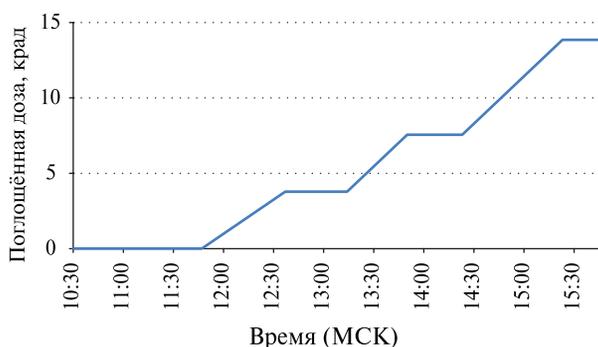


Рис. 9. График набора поглощённой дозы

Как показывает график, представленный на рис. 10, при уровне поглощённой дозы 13,85 крад количество зафиксированных и распознанных объектов снизилось. Причиной потери объектов стало снижение их интегральной яркости (рис. 11, см. с. 136).

Из рис. 11 видно, что интегральная яркость локализованных объектов в среднем упала на 87 % (или в 7,4 раза) относительно измерений, проведённых до облучения. Во время испытаний было сделано предположение о снижении пропускной способности оптических элементов, таких как: объектив ОЗК-60/1,4, технологическое защитное стекло и объектив имитатора звёздного неба (ИЗН). Кроме того, в ИЗН используется не радиационно-стойкий светодиод, яркость которого могла снизиться при воздействии гамма-излучения. Визуальный осмотр объектива и защитного стекла показал затемнение одной или нескольких нижних линз объектива

ОЗК-60/1,4 (рис. 12, см. с. 136) и самого защитного стекла. Сравнение пропускания облучённого объектива с объективом ОЗК-60/1,4К, чьи линзы аналогичны исследуемому образцу, показало уменьшение пропускания в 1,5 раза. Сравнение облучённого и необлучённого стекла показало уменьшение пропускания в 1,3 раза. Наибольший вклад в снижение интегральной яркости локализованных объектов внёс ИЗН.

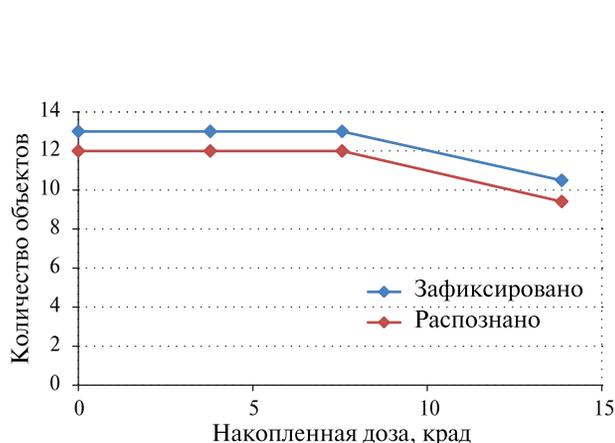


Рис. 10. Зависимость количества зафиксированных и распознанных объектов от поглощённой дозы

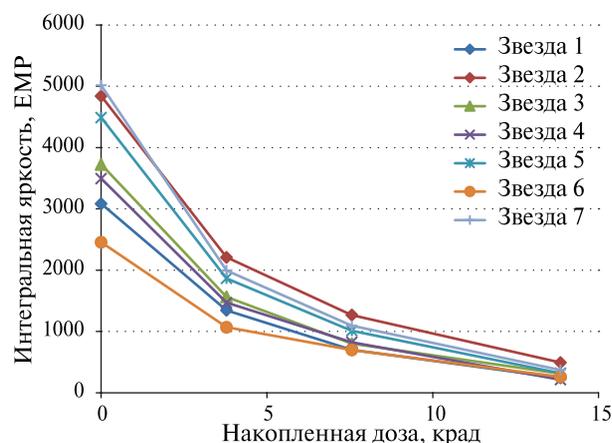


Рис. 11. Зависимость интегральной яркости локализованных объектов (ЕМР — единицы младшего разряда АЦП) от поглощённой дозы

Таблица 4. Расчётные уровни дозы, поглощённой объективом за время эксплуатации

Номер оптического элемента	Марка стекла	Толщина слоя, мм	Пробег протонов 6,3 МэВ, мм	Доза, рад
1	ТК121	0,1	0,3154	$2,76 \cdot 10^5$
		0,2		$9,38 \cdot 10^4$
		0,3		$3,07 \cdot 10^4$
		0,4		$1,21 \cdot 10^4$
		1,0		$8,35 \cdot 10^3$
				$6,10 \cdot 10^3$
				$5,37 \cdot 10^3$
				$4,75 \cdot 10^3$
4,34 · 10 ³				
2	ТФ108	4,0	0,3110	$4,10 \cdot 10^3$
3	БФ113	10,0	0,3240	$3,19 \cdot 10^3$
4	ЛК3	3,5	0,3896	$3,33 \cdot 10^3$
5	ТФ7	3,0	0,2846	
6	ТК21	10,0	0,3154	$2,54 \cdot 10^3$
7		8,0		
8	СТК21	7,0	0,3420	$2,03 \cdot 10^3$
9	К8	6,0	0,3872	$2,28 \cdot 10^3$

Из табл. 4 видно, что расчётное значение дозы, поглощённой нижней линзой, на порядок меньше, чем уровень облучения при испытаниях.

Таким образом, функциональный макет успешно прошёл испытания на стойкость к воздействию ионизирующих излучений по поглощённой дозе. Подтверждённый уровень стойкости прибора и комплектующей его ЭКБ ОП составляет 13 850 рад, что соответствует сроку активного существования 11 лет 9 мес на низкой круговой орбите.



Рис. 12. Затмение объектива после облучения до уровня поглощённой дозы 13,85 крад

Заключение

Комплексные испытания на стойкость к воздействию ТЗЧ позволили определить чувствительные элементы и выработать программно-аппаратные методы повышения сбое- и отказоустойчивости.

Функциональный макет и модуль вторичного источника питания успешно прошли испытания на стойкость к воздействию ионизирующих излучений по поглощённой дозе. Подтверждён уровень стойкости комплектующих 13 850 рад, что соответствует сроку активного существования на низкой круговой орбите 11 лет 9 мес.

Литература

1. *Белинская Е. В., Кобелева А. А., Сметанин П. С., Эльяшев Я. Д., Черняк М. Е.* Сравнение эффектов структурных повреждений в матрицах КМОП и ПЗС, применяемых в звёздных датчиках, на примере СМV4000 и ФППЗ «Лев-4» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 119–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.
2. *Калашиников О. А., Уланова А. В.* Радиационные эффекты в цифровых микросхемах. Доминирующие радиационные эффекты в элементах ИС // Радиационная стойкость изделий ЭКБ: науч. изд. / под ред. А. И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С. 315–360.
3. *Кобелева А. А., Воронков С. В., Прохорова С. А.* Влияние радиации на ключевые параметры матричных фотоприёмных устройств // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 80–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-80-88.
4. *Чумаков А. И.* Доминирующие радиационные эффекты в элементах ИС // Радиационная стойкость изделий ЭКБ: науч. изд. / под ред. А. И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С. 64–92.

Results of radiation tests of a new generation high-precision star sensor and its components

**R. V. Bessonov, A. A. Kobeleva, S. A. Prokhorova,
P. S. Smetanin, A. A. Forsh, Ya. D. Elyashev**

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: akobeleva@iki.rssi.ru*

Star sensors are optoelectronic devices intended for use in outer space. One of the factors affecting equipment in space is ionizing radiation from outer space (IROS). IROS refers to electrons, protons and heavy charged particles (HCP) of the natural radiation belts of the Earth, solar and galactic cosmic rays. IROS can lead to degradation of the equipment characteristics, in particular to radiation coloration of the lens glasses, as well as to malfunctions or failures. In order to ensure the radiation resistance of a new generation high-precision stellar sensor, research and analysis of the resistance of the electronic component base (ECB), optical elements (lens) and thermoelectric cooling module were

carried out. The sensitive ECB has been tested for resistance to the effects of simulating installations of gamma radiation, proton flux and HCP. On an initiative basis, the secondary power supply module and functional model were tested for resistance to gamma radiation. Based on the studies and tests carried out, a number of measures have been developed to counter the single radiation effects of failures and failures. The study showed that the durability requirements were met with a margin.

Keywords: star tracker, radiation resistance, absorbed dose, single radiation effects

Accepted: 23.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-127-137

References

1. Belinskaya E. V., Kobeleva A. A., Smetanin P. S., Elyashev Ya. D., Chernyak M. E., Comparison of the structural damage effects in CMOS and CCD used in star trackers by the example of CMV4000 and LEV-4 CCD, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 119–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.
2. Kalashnikov O. A., Ulanova A. V., Radiation effects in digital microcircuits. Dominant radiation effects in IC elements, In: *Radiation Resistance of ECB Products*, A. I. Chumakov (ed.), Moscow: NIYaU MIFI, 2015, pp. 315–360 (in Russian).
3. Kobeleva A. A., Voronkov S. V., Prokhorova S. A., The effect of radiation on key parameters of matrix photodetector devices, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 80–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-80-88.
4. Chumakov A. I., Dominant radiation effects in IC elements, In: *Radiation Resistance of ECB Products*, A. I. Chumakov (ed.), Moscow: NIYaU MIFI, 2015, pp. 64–92 (in Russian).