

## Воздействие радиации космического пространства на функционирование приборов БОКЗ при их длительной эксплуатации

Р. В. Бессонов, А. А. Кобелева, А. Н. Куркина, А. К. Малков, А. А. Форш

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: besson777@gmail.com*

Работа посвящена обзору событий, вызванных влиянием радиационных факторов космического пространства на приборы звёздной ориентации семейства БОКЗ. Данные приборы получили широкое распространение и на текущий момент имеют общий налёт более 2,8 млн ч в космосе. Столь продолжительная наработка, естественно, сопровождалась событиями и эффектами, вызванными влиянием космической радиации. В статье описываются эффекты, которые могут происходить в приборах БОКЗ при их работе в космосе. Показано, что основное влияние космической радиации при длительной эксплуатации приборов в космосе вызвано структурными повреждениями в ПЗС приборов. Для околоземных космических аппаратов структурные эффекты возникают в основном вследствие воздействия протонов, захваченных радиационными поясами Земли, и поэтому доза структурных повреждений очень сильно зависит от орбиты спутника. В статье описываются результаты анализа данных с девяти космических аппаратов, расположенных на различных орбитах. Кроме того, приводятся результаты радиационных испытаний ПЗС- и КМОП-матриц на воздействие ионизирующего облучения, а также тяжёлых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов. В статье приводятся методы минимизации влияния радиации на фоточувствительные матрицы приборов БОКЗ.

**Ключевые слова:** прибор звёздной ориентации, радиационная стойкость, эффекты космического пространства

Одобрена к печати: 04.10.2019  
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-85-96

### Введение

За последние годы приборы звёздной ориентации семейства БОКЗ (Блок определения координат звёзд) разработки Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) получили широкое распространение. На текущем этапе развития эти приборы используются практически всеми отечественными разработчиками космических аппаратов (КА). В общей сложности начиная с 1999 г. в космос было выведено 115 приборов БОКЗ в различных модификациях (*рис. 1*, см. с. 86). Приборами этой марки оснащены более 60 КА, 16 из которых в настоящий момент находятся в полёте. Общая наработка приборов БОКЗ в космосе превысила 2,8 млн ч.

За последние годы подходы к эксплуатации этих приборов существенно изменились. Во-первых, разработчики КА получили высокоскоростные цифровые радиолинии, и в наземные пункты приёма начала поступать подробная телеметрическая информация о работе приборов. В настоящий момент объём накопленных ИКИ РАН телеметрических данных с КА измеряется десятками гигабайт.

Во-вторых, разработчики КА в большей степени стали полагаться на звёздные датчики для управления ориентацией изделий. В большинстве случаев приборы используются в непрерывном режиме работы. Это означает, что около 40 приборов БОКЗ, работающих в настоящий момент на различных КА, за год выполняют несколько миллиардов тактов измерений ориентации. Кроме того, более остро встали вопросы точности наведения КА на объект наблюдения и геопривязки данных ДЗЗ, в решении которых звёздные датчики принимают непосредственное участие.



Рис. 1. Модификации приборов звёздной ориентации семейства БОКЗ

В совокупности это привело к тому, что даже единичные случаи «отскока» в измерениях, неопределения ориентации приборами, сбои в работе и тем более деградация характеристик стали предметом наблюдения и исследования.

Ещё один фактор, который изменил подход разработчиков к построению данных приборов, вызван тем, что современные задачи требуют расположения КА на тяжёлых в радиационном отношении орбитах: либо находящихся рядом с радиационными поясами Земли, либо пересекающих их на каждом витке. Одновременно с этим выросли требования к срокам активного существования КА. Это, естественно, привело к возникновению ряда эффектов и событий, которых следовало ожидать.

Однако изменение параметров приборов после их трёхлетней эксплуатации на этих орбитах было неожиданностью для разработчиков устройств, имеющих положительную длительную лётную историю на других КА. Уверенности придавал опыт 18-летней эксплуатации приборов БОКЗ на Международной космической станции (МКС) и 15-летняя наработка на геостационарном спутнике связи «Ямал-200». Приборы на этих КА функционируют по настоящее время и имеют меньшую деградацию, чем их аналоги, работающие на орбитах вблизи радиационных поясов Земли в течение всего нескольких лет.

### Влияние космической радиации на элементную базу приборов

Элементная база, применяемая для построения приборов БОКЗ, выбрана с учётом высоких требований к надёжности и радиационной стойкости, а партии используемых при этом лётных приборов микросхем подвергаются дополнительной проверке, в том числе радиационным испытаниям на воздействие тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ), высокоэнергетичных протонов и ионизационной дозы. Главную задачу разработчикам приборов БОКЗ выполнить удалось: применяемая элементная база не имеет катастрофических отказов, вызванных воздействием космической радиации.

При этом в процессе лётной эксплуатации наблюдаются сбои, вызванные изменением данных в микросхемах памяти, искажением исполняемого кода процессора или программ-

ного автомата ПЛИС (Программируемая логическая интегральная схема, *англ.* programmable logic device — PLD) под воздействием заряженных частиц космического пространства. Такие события могут приводить к зависаниям или некорректной работе прибора. Данные эффекты исправляются перезапуском прибора по питанию. Частота возникновения таких сбоев на практике космических полётов варьируется от одного события в несколько недель до одного события в несколько месяцев при условии непрерывной работы прибора. Принципиально, что в течение длительной наземной отработки этих приборов подобные эффекты не наблюдаются. В следующих поколениях приборов для повышения сбоеустойчивости к космическому излучению используется более радиационно-стойкая элементная база и применяются программные методы исправления ошибок с помощью избыточного кодирования Хемминга.

Однако наибольшие трудности возникают с обеспечением радиационной стойкости фоточувствительных матриц, которые в ещё большей степени подвержены воздействию космического излучения. Ситуацию усугубляет отсутствие радиационно-стойких фоточувствительных матриц, выпускаемых отечественной промышленностью. Как показывает практика длительных космических полётов на радиационно-тяжёлых орбитах, основное влияние на приборы звёздной ориентации БОКЗ оказывают структурные повреждения в ПЗС-матрицах (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device, вызванные воздействием протонов радиационных поясов Земли.

Модификации приборов БОКЗ, получившие наибольшую наработку в космическом пространстве, основаны на отечественных ПЗС-матрицах серии «Лев» и «Сфера» производства Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «ЭЛАР». Данные ПЗС-матрицы разработаны по заказу ИКИ РАН для применения в приборах звёздной ориентации серии БОКЗ. Они обладают герметичным корпусом со встроенным термоэлектрическим модулем охлаждения — элементом Пельтье. ИКИ РАН имеет 40-летнюю историю развития и применения ПЗС-матриц данного производителя, а приборы серии «Лев» и «Сфера» хорошо изучены и подтвердили свою надёжность в целом ряде космических миссий. Следующие поколения приборов БОКЗ основаны на КМОП-матрицах (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник, *англ.* CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor), позволяющих достичь существенно более высоких технических показателей по сравнению с приборами на ПЗС-матрицах.

Технология производства фоточувствительных ячеек ПЗС- и КМОП-матриц основана на применении чистого монокристаллического кремния, имеющего строгую кристаллическую решётку и свободную от дислокаций. Протонное излучение при взаимодействии с кремниевой подложкой фоточувствительных ячеек матриц нарушает положение атомов в кристаллической решётке кремния, образуя дислокации, которые проявляют себя в виде дефектных «горячих» пикселей на изображении или других эффектов. При множественных воздействиях, около  $10^{10}$ – $10^{12}$  частиц/см<sup>2</sup>, которые имеют место при реальной эксплуатации в космосе, такое воздействие приводит к многократному росту структурного шума на изображениях. Природа данного шума тепловая, а его уровень зависит от времени экспозиции и температуры кристалла. Принципиально, что данному эффекту подвержены все фоточувствительные матрицы, что подтверждается литературой, радиационными испытаниями и множеством космических миссий (Котов, 1999; Sirianni et al., 2006; Xue et al., 2017).

### **Обзор результатов испытаний ПЗС- и КМОП-матриц на воздействие радиации**

В Акционерном обществе «Экспериментальное научно-производственное объединение Специализированные электронные системы» по заказу ИКИ РАН была проведена серия испытаний ПЗС-матриц «Лев-4» и КМОП-матриц, применяемых в приборах серии БОКЗ, на стойкость к ионизационным и структурным дозовым эффектам, а также воздействию ТЗЧ по одиночным радиационным эффектам (Аванесов и др., 2003, 2004; Белинская и др., 2018; Кобелева и др., 2017).

Ионизационные дозовые эффекты исследовались как на радиоизотопе Кобальт-60, так и на ускорителе электронов, работающем в режиме тормозного излучения. В результате показано, что ионизационные эффекты приводят к росту среднего уровня и случайного шума темнового сигнала. При этом КМОП-матрица показала существенно более высокую стойкость к ионизационным дозовым эффектам по сравнению с ПЗС-матрицей. С учётом норм испытаний КМОП-матрица была сертифицирована как изделие с уровнем стойкости по поглощённой дозе 50 крад, при этом в испытанных образцах не наблюдалось ощутимых изменений до уровня воздействия 120–140 крад.

Исследования на влияние структурных повреждений проводились как на протонном ускорителе, так и на искусственном источнике нейтронов. Воздействие нейтронов вызывает в основном структурные повреждения, тогда как облучение протонами дополнительно приносит значительную ионизацию. Испытания на источнике нейтронов проводились на выключенных ПЗС- и КМОП-матрицах, что принципиально, так как структурные повреждения накапливаются даже в выключенном приборе и холодное резервирование звёздных датчиков на борту КА не позволяет избавиться от этого эффекта.

При воздействии протонов наблюдалось значительное усиление структурного шума ионизационной дозой. Ионизационный отжиг со временем существенно снижал вклад структурного шума, доводя его до уровня, накопленного в выключенном приборе. Этот факт означает, что при оценке уровня структурного шума в фоточувствительных матрицах при проведении радиационных расчётов необходимо учитывать обе дозовые составляющие: как структурные повреждения, так и ионизацию.

В ходе испытаний было показано, что наряду с появлением «горячих» пикселей, в которых может быть изменён как уровень темнового сигнала (dark signal nonuniformity — DSNU), так и крутизна преобразования «свет — сигнал» (photo response non-uniformity — PRNU), структурные повреждения приводят к появлению так называемых RTS-пикселей (Random Telegraph Signal), в которых может присутствовать несколько стабильных уровней чёрного. Эти уровни темнового сигнала в RTS-пикселях могут изменяться произвольным образом.

Исследование на воздействие ТЗЧ проводилось при воздействии ионов аргона (Ar), криптона (Kr) и ксенона (Xe) с линейной передачей энергии (ЛПЭ) ионов соответственно 5,5; 18; 45 и 64 МэВ·см<sup>2</sup>·мг<sup>-1</sup>. Для построения кривой зависимости сечения эффекта от ЛПЭ-частиц, а также сканирования кристалла матрицы с целью выявления чувствительных к радиации структур использовалась со сфокусированным излучением V лазерная установка. В результате испытаний было выявлено, что ТЗЧ также вносят структурные повреждения как в ПЗС-, так и в КМОП-матрицу.

В дополнение к этому в КМОП-матрице были обнаружены области, в которых возникает тиристорный эффект. Расчёт частоты тиристорного эффекта показал крайне низкую вероятность возникновения события в реальных космических полётах: раз в несколько тысяч лет. Несмотря на низкую расчётную вероятность события, были проведены испытания на удержание КМОП-матрицы в состоянии тиристорного эффекта, а в приборе, основанном на такой матрице, реализована электронная защита, отключающая её питание при возрастании тока потребления выше определённого уровня. Это в совокупности подтвердило возможность безотказного использования КМОП-матрицы в составе прибора.

Кроме того, в КМОП-матрице наблюдались сбои в цифровых регистрах и в работе цифрового автомата матрицы под воздействием ТЗЧ и протонов. Было установлено, что работа КМОП-матрицы восстанавливается при перезаписи значений регистров в требуемые значения. Поэтому в приборах, основанных на КМОП-матрице, реализована программная защита, осуществляющая считывание её регистров, сравнение их с эталонными значениями и перезапись при обнаружении события. Следует сказать, что факты возникновения таких сбоев и их успешного парирования уже наблюдались при лётной эксплуатации приборов: за 8 мес непрерывной работы было зафиксировано два события.

Также стоит отметить, что в ПЗС-матрицах «Лев» и «Сфера» тиристорных эффектов и сбоев в работе не наблюдается.

## Влияние структурных повреждений в ПЗС- и КМОП-матрицах на работу звёздных датчиков

Как уже было сказано, основное влияние на работу приборов БОКЗ оказывает значительно возросший структурный шум на фоточувствительной матрице, вызванный структурными повреждениями и ионизацией.

В приборах звёздной ориентации традиционно реализуют два режима работы: режим начального определения ориентации (в зарубежной литературе — *lost in space mode*) и режим слежения за звёздами (*tracking*). В режиме начального определения ориентации приборы обрабатывают полный кадр с фоточувствительной матрицы, выделяя на нём звездоподобные образования и решая задачу распознавания локализованных объектов в бортовом звёздном каталоге, охватывающем всю небесную сферу. В режиме слежения за звёздами в обработку поступает не полный кадр, а только фрагменты изображения, расположенные в местах прогнозируемых положений звёзд.

Классическое функционирование звёздных датчиков на КА предполагает решение задачи начального определения ориентации за интервал времени от единиц до десятков секунд с дальнейшим переходом в режим слежения, в котором прибор функционирует основную часть времени в течение орбитального витка. Один или несколько раз за орбитальный виток возможна потеря ориентации прибором вследствие засветки его поля зрения Солнцем или Землёй. После чего прибор по команде от системы управления опять переходит в режим начального определения ориентации.

Рост структурного шума и появление большого количества дефектных пикселей вследствие воздействия радиации приводит к трудностям в решении задачи начального определения ориентации. При работе с современными фоточувствительными матрицами, содержащими несколько миллионов пикселей, в результате радиационного воздействия образуется от единиц до сотен тысяч пикселей, яркость которых преодолевает порог отсечки. Многие из этих пикселей объединяются в группы, образуя объекты, изображения которых в ряде случаев могут быть приняты за звезду. Накопление дозы структурных повреждений и появление со временем всё большего количества ложных объектов, а также рост их яркости приводит к снижению вероятности решения прибором задачи начальной ориентации на всё больших участках орбиты. Таким образом, деградация фоточувствительных матриц под воздействием космической радиации является существенным фактором, ограничивающим срок активного функционирования прибора.

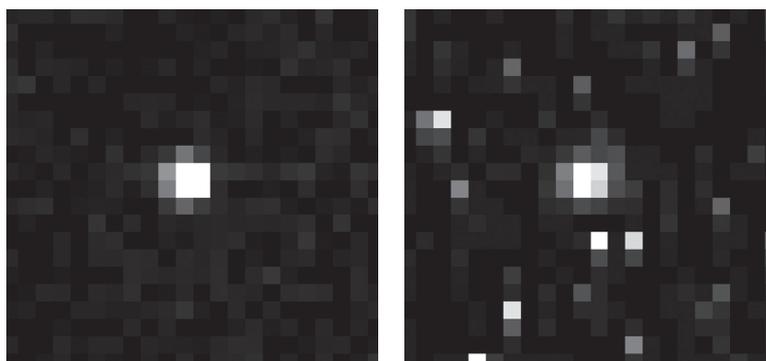


Рис. 2. Изображение звезды, построенное на ПЗС-матрице до облучения (слева) и после него (справа) (из-за появления дефектов, примыкающих к изображению звезды, энергетический центр смещается)

При работе в режиме слежения за звёздами помехозащищённость прибора к появлению дефектных объектов намного выше, чем в режиме начальной ориентации. В режиме слежения в обработку поступает менее 1 % от всего кадра, поэтому вероятность попадания в обрабатываемые фрагменты изображения ложных объектов пропорционально ниже. Однако

в режиме слежения от звёздного датчика требуется максимальная точность измерений ориентации. Наличие высокого уровня структурного шума и «горячих» пикселей приводит к смещению энергетических центров изображений звёзд и снижению точности измерений ориентации прибором (рис. 2).

### Сравнение телеметрических данных с КА, результатов расчётов и радиационных испытаний

При существующем уровне развития радиолиний передачи данных на современных КА на объём данных, передаваемых с приборов звёздной ориентации, накладываются существенные ограничения. Приборы звёздной ориентации генерируют значительный информационный поток. Если говорить про современные приборы БОКЗ, то они обеспечивают считывание с КМОП-матрицы со скоростью около 200 Мбит видеоданных в секунду. Естественно, не может быть и речи о передаче на Землю всей видеoinформации с нескольких непрерывно работающих приборов. В лучшем случае с прибора обеспечивается съём телеметрических данных, содержащих результаты обработки целевой информации. При этом следует заметить, что в перспективных приборах разработки США внедряются дополнительные технологические интерфейсы, которые позволяют передавать весь видеопоток в наземные приёмные пункты, что, конечно, предоставляет широкий спектр возможностей для разработчиков в усовершенствовании аппаратуры.

На рис. 3 показаны наиболее яркие локализованные объекты на двух кадрах, полученных с прибора БОКЗ, установленного на КА с орбитой около 920 км, после его четырёхлетней эксплуатации в космосе. Данные кадры получены с интервалом в один час и содержат как звёзды (показаны жёлтым), так и объекты, образованные дефектными пикселями (показаны синим). На рис. 3 видно, что на втором кадре имеется ряд дефектных объектов, которых не было на первом кадре. Появление данных объектов объясняется наличием RTS-пикселей, а также флуктуациями шума на кадре.

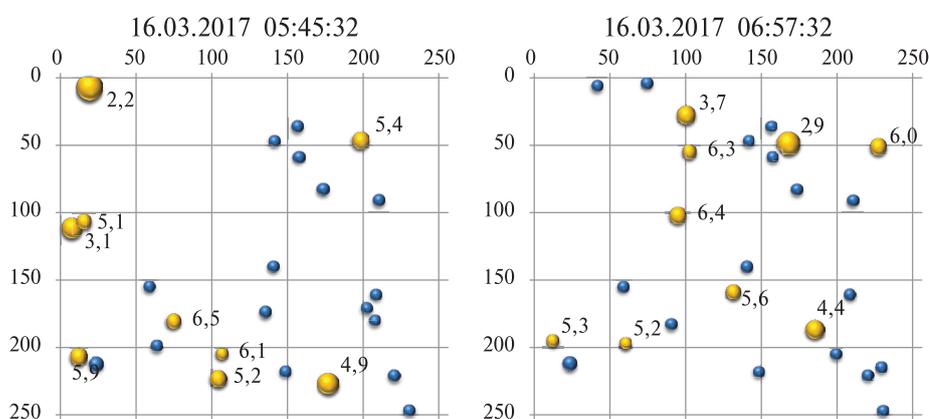


Рис. 3. Наиболее яркие объекты, выделенные на двух кадрах прибора после его четырёхлетней эксплуатации в космосе, полученные с интервалом в один час

Следует заметить, что процедура выделения объектов на кадрах проводится с учётом низкочастотной фильтрации, адаптивного выбора порога, учёта конфигурационных и яркостных признаков звёзд, т.е. показанные на рис. 3 дефектные объекты по своим признакам приняты алгоритмом прибора как потенциальные звёзды. Кроме того, видно, что среди 25 наиболее ярких объектов, выделенных на кадрах, только 9 являются звёздами. Это означает, что остальные звёзды, которые находятся в поле зрения, имеют яркость меньшую, чем 16 помеховых объектов. Данная ситуация в значительной степени затрудняет решение задачи начальной ориентации.

В приборах БОКЗ-М60 имеется многоразовая защитная крышка, которая закрывается при выключении. При включении прибора производится съёмка темновых кадров с оценкой уровня шума, величина СКО которого передаётся в телеметрической информации.

Не трудно показать, что при использовании фоточувствительной матрицы с количеством пикселей  $N$ , с яркостью фона  $I_k^{(F)}$  и возникновением на изображении  $N_D$  «горячих» пикселей с яркостью  $I_k^{(D)}$  средний уровень яркости  $m(I)$  и СКО  $\sigma(I)$  на кадре будут изменяться следующим образом:

$$m(I) = \frac{\sum_{k=1}^N I_k}{N} = \frac{\sum_{k=1}^{N_F} I_k^{(F)} + \sum_{k=1}^{N_D} I_k^{(D)}}{N} = \frac{I_k^{(F)}(N - N_D) + I_k^{(D)}N_D}{N} \approx I_k^{(F)} + \frac{I_k^{(D)}N_D}{N},$$

$$\sigma(I) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (I_k - m(I))^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_F} (I_k^{(F)} - m(I))^2 + \sum_{k=1}^{N_D} (I_k^{(D)} - m(I))^2}{N - 1}} \approx \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_D} (I_k^{(D)})^2}{N}} = I_k^{(D)} \sqrt{\frac{N_D}{N}}.$$

В приборе БОКЗ-М60 применена ПЗС-матрица «Лев-4» форматом 512×512 пикселей с 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем. Нетрудно оценить, что появление на изображении 40 «горячих» пикселей с яркостью 3000 ЕМР изменит средний уровень яркости на кадре менее чем на 2 ЕМР, тогда как СКО вырастет до уровня в 70 ЕМР.

На рис. 4 и 5 (см. с. 92) показана статистика измерения СКО темновых кадров приборов БОКЗ-М60 на шести КА за время их работы на различных орбитах.

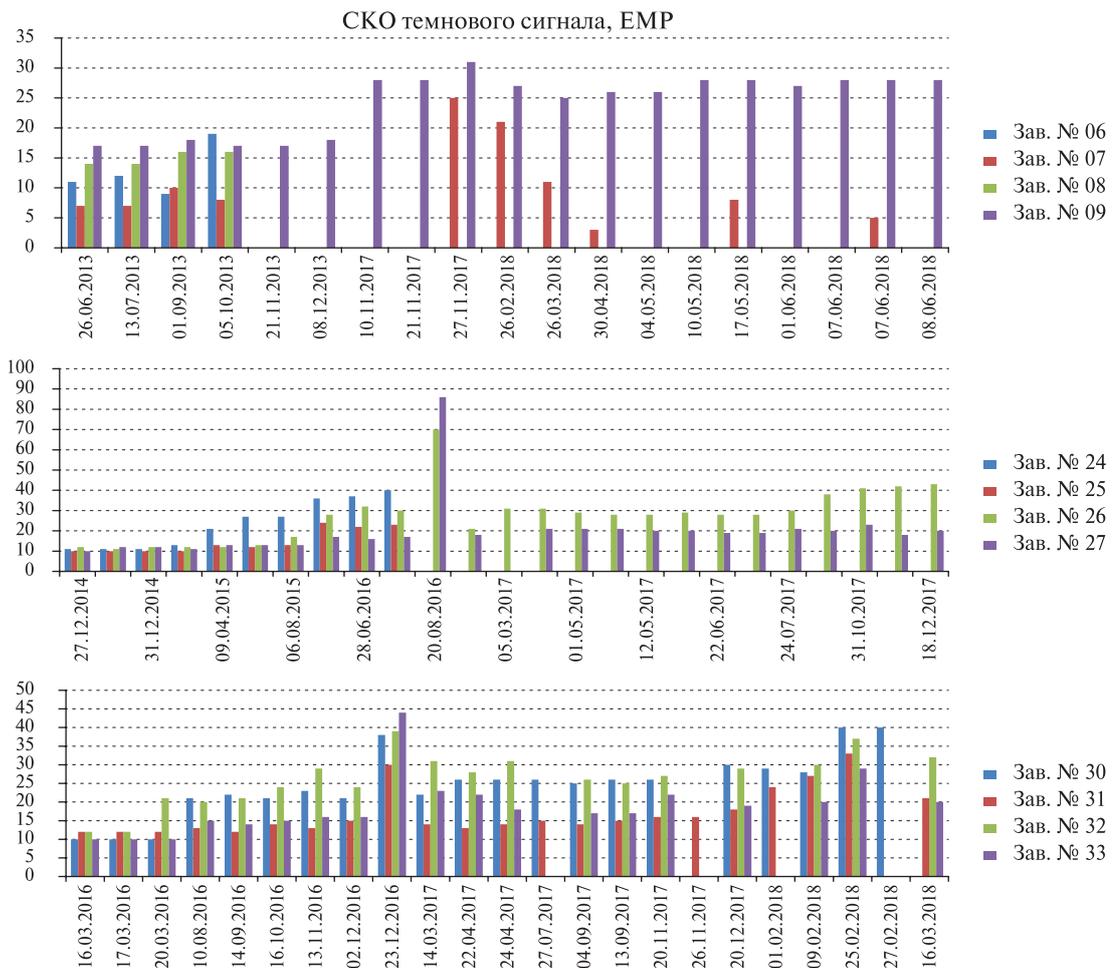


Рис. 4. СКО темновых кадров, полученных с приборов БОКЗ-М60, установленных на КА № 1 (вверху), № 2 (посередине), № 3 (внизу)

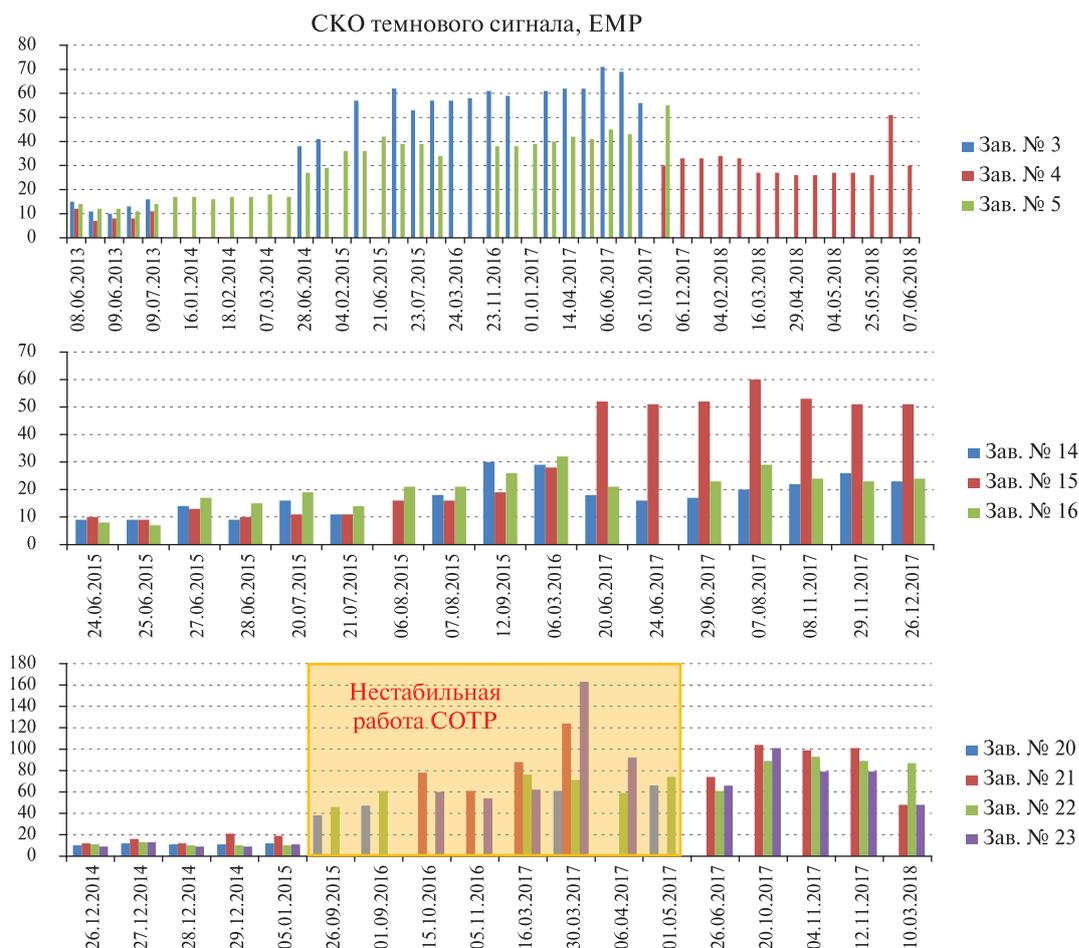


Рис. 5. СКО темновых кадров, полученных с приборов БОКЗ-М60, установленных на КА № 4 (вверху), № 5 (посередине), № 6 (внизу)

На рис. 4 приведены данные с КА № 1–3, работающих на солнечно-синхронной орбите высотой около 475 км. При высоком наклонении орбиты каждый виток КА пересекает области полюсов Земли, где радиационные пояса гораздо ниже.

На рис. 5 демонстрируются данные, полученные с КА № 4–6. КА № 4 и 5 работают на орбите с высотой около 730 км и при высоком наклонении. Также на рис. 5 представлены телеметрические данные с приборов БОКЗ-М60, установленных на КА № 6 с высотой орбиты более 920 км.

Анализируя данные, представленные на рис. 4 и 5, можно сделать следующие выводы:

1. Изменение СКО темновых кадров между приборами БОКЗ-М60 на каждом КА коррелированы, что говорит о внешнем воздействии на приборы. Изменение СКО темновых кадров вследствие изменения температуры исключено, так как на данных КА реализована высокоточная жидкостная система терморегулирования, а в приборах БОКЗ-М60 элемент Пельтье ПЗС-матрицы также работает в режиме стабилизации температуры. Поэтому представленное на рисунках изменение СКО темновых кадров вызвано радиацией.
2. СКО темновых кадров со всех приборов БОКЗ-М60 растёт со временем, что характеризует накопление дозы излучения и, как следствие, увеличение количества и яркости «горячих пикселей».
3. На КА № 1 три прибора были выключены, а спустя пять лет один прибор был включён. СКО темновых кадров прибора, находящегося в холодном резерве, оказалось сравнимо с СКО кадров прибора, который работал непрерывно. Это говорит о дозе структурных повреждений, которая накапливается в выключенном приборе.

4. Наблюдаются коррелированные всплески в СКО темновых кадров у приборов на одном КА, которые могут объясняться солнечными вспышками и накоплением ионизационной дозы, которая отжигалась со временем. Кроме того, в ряде случаев резкое изменение СКО темновых кадров вызвано нестабильной работой системы обеспечения температурного режима (СОТР).
5. Для каждой орбиты можно выделить уровень СКО темновых кадров, на который выходит прибор через несколько лет функционирования. Данный уровень можно объяснить различным темпом накопления и отжига радиационных повреждений для этих орбит. Для орбиты 475 км этот уровень СКО равен 20–30 ЕМР, для орбиты 730 км — 40–60 ЕМР, для орбиты 900 км уровень СКО достигает 100–110 ЕМР. При этом все приборы на момент начала эксплуатации имели уровень СКО темновых кадров около 10 ЕМР.

В табл. 1 и 2 приведены расчётные данные о темпах накопления ионизационной и структурной составляющих дозы на различных КА. Расчёты основаны на использовании программы OMERE, позволяющей рассчитывать потоки частиц за сферическими защитами на различных орбитах, и программы «Щит», в которой учитывается экранирование излучения конструкцией прибора и КА. В качестве меры дозы структурных повреждений в расчётах используется значение эквивалентного флюенса протонов с энергией 10 МэВ, когда эффект от какого-то вида излучения равен эффекту от воздействия протонов с энергией 10 МэВ при наборе соответствующего флюенса.

Таблица 1. Расчёт дозовых нагрузок на ФППЗ (Фоточувствительный односекционный матричный прибор с переносом заряда) приборов серии БОКЗ по ионизационным эффектам

Прибор	Изделие	Параметры орбиты (высота, км; наклонение, град)	Поглощённая доза за 10 лет, рад	Темп накопления, рад/сут	Коэффициент увеличения дозы по отношению к орбите МКС
БОКЗ	МКС	415 км; 51,63°	2,31E+02	6,34E-02	1
БОКЗ-М60	КА № 1–3	470 км; 97,28°	7,28E+02	2,00E-01	3
БОКЗ-М60	КА № 4–5	730 км	1,28E+03	3,52E-01	5,5
БОКЗ-М60	КА № 6	920 км	3,09E+03	8,47E-01	13
БОКЗ-У	Ямал-200	ГСО	4,41E+03	1,21E+00	19

Таблица 2. Расчёт значений эквивалентного флюенса протонов 10 МэВ для ФППЗ приборов серии БОКЗ

Прибор	Изделие	Параметры орбиты (высота, км; наклонение, град)	Эквивалентный флюенс протонов 10 МэВ за 10 лет, прот./см <sup>2</sup>	Темп накопления, прот./((см <sup>2</sup> ·сут)	Коэффициент увеличения флюенса по отношению к орбите МКС
БОКЗ	МКС	415 км; 51,63°	4,33E+08	1,19E+05	1
БОКЗ-М60	КА № 1-3	470 км; 97,28°	1,34E+09	3,67E+05	3
БОКЗ-М60	КА № 4-5	730 км	2,48E+09	6,80E+05	5,7
БОКЗ-М60	КА № 6	920 км	6,28E+09	1,72E+06	15
БОКЗ-У	Ямал-200	ГСО	5,49E+08	1050E+05	1,2

Как видно из табл. 2, доза структурных повреждений во многом определяется высотой и наклонением орбиты. В соответствии с расчётом, темп накопления дозы структурных повреждений на КА с орбитой 920 км в 5 раз больше, чем на КА с орбитой 475 км, и в 2,5 раза больше, чем на КА с орбитой 730 км. Это коррелирует с экспериментальными данными. Как было показано, СКО темновых кадров в приборах БОКЗ-М60 на КА № 6 в 4–5 раз больше, чем на КА № 1–3, и 2–2,5 раза больше, чем на КА № 4–5.

Кроме того, видно, что темп накопления дозы структурных повреждений на КА с орбитой 920 км в 13–15 раз выше, чем на МКС и спутниках «Ямал-200». Это означает, что приборы, работающие на МКС 18 лет и на КА «Ямал-200» 15 лет, набрали такую же дозу структурных повреждений, какую получили приборы на КА № 6 за год. Также можно сказать, что за четыре года эксплуатации на КА № 6 приборы БОКЗ набрали такую дозу структурных повреждений, какую получили бы на МКС за 60 лет!

Также в *табл. 1* показано, что разница в темпе накопления ионизационной дозы в ПЗС-матрицах приборов БОКЗ-М60 на МКС и «Ямал-200» отличается в 20 раз. При этом существенных различий в функционировании приборов не наблюдается. Это говорит о стойкости приборов к ионизационной дозе, а также ещё раз подчёркивает, что именно доза структурных повреждений в большей степени влияет на деградацию приборов и ограничивает срок их активного функционирования.

### Методы борьбы со структурными повреждениями в фоточувствительных матрицах приборов

Существует три метода борьбы с радиационными структурными повреждениями в фоточувствительных матрицах приборов звёздной ориентации:

- 1) введение локальной радиационной защиты вокруг фотоприёмника, обеспечивающей снижение темпа накопления дозы;
- 2) охлаждение кристалла фоточувствительной матрицы, что приводит к уменьшению количества и яркости «горячих» пикселей;
- 3) развитие программно-математического обеспечения прибора в направлении повышения помехозащищённости при работе с большим уровнем структурного шума.

Введение дополнительной массовой защиты не является эффективной мерой по снижению темпа накопления дозы структурных повреждений. Увеличение массовой толщины сферической защиты алюминия с 3 до 6 г/см<sup>2</sup> уменьшает эквивалентный флюенс протонов с энергией 10 МэВ только на 20–30 % в зависимости от типа орбиты. Дальнейшее увеличение массовой толщины защиты становится ещё менее эффективным. Однако снижение темпа накопления дозы структурных повреждений даже на 30 % увеличивает срок активного существования приборов на один-два года, что уже немало. Поэтому использование массовой радиационной защиты фоточувствительной матрицы целесообразно, и такая защита реализована во всех приборах БОКЗ.

Наиболее эффективным способом борьбы с «горячими» пикселями является охлаждение. Глубокое охлаждение кристалла фоточувствительной матрицы позволят практически полностью «погасить» структурный шум на кадрах даже при значительных структурных повреждениях. В этом отношении в сильном авангарде оказываются фоточувствительные матрицы с встроенным элементом Пельтье. Снижение температуры кристалла ПЗС-матрицы «Лев-4» с –18 до –30 °С потребовало увеличения энергопотребления прибора всего на 1 Вт. Такое охлаждение достигается при температуре посадочного места прибора +45 °С. При этом количество дефектов уменьшилось практически на порядок.

Однако столь глубокое охлаждение недостижимо при использовании внешнего охлаждения фотоприёмника. При использовании КМОП-матрицы, не имеющей встроенного элемента охлаждения, путём реализации целого ряда конструктивных мер удалось обеспечить перепад температур не более 30 °С за счёт дополнительного потребления мощности 6 Вт, что соизмеримо с общим энергопотреблением прибора.

Кроме того, ИКИ РАН сделан большой шаг в развитии алгоритмов работы приборов, а также методов обработки программно-математического обеспечения. В приборы введена более тонкая селекция изображений звёзд от дефектных объектов по конфигурационным признакам. Для этого осуществляется контроль расфокусировки приборов при их сборке, юстировке и испытаниях, в том числе в вакууме. Реализованы алгоритмы выделения двигающихся

по кадру изображений звёзд от неподвижного структурного шума. В следующих поколениях приборов будет введена кадровая память, используемая для хранения структурного шума, что позволит устранить его из кадра в темпе считывания видеоданных с КМОП-матрицы.

Совместное применение перечисленных мер позволяет полностью решить проблему структурных дозовых повреждений в фотоприёмниках приборов звёздной ориентации. Более того, благодаря этим мерам при построении прибора можно использовать не специализированные для космоса фоточувствительные матрицы. Конечно, после их детального исследования.

## Литература

1. *Аванесов Г. А., Акимов В. В., Воронков С. В.* Исследование влияния заряженных частиц на функционирование астронавигационных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 79–83.
2. *Аванесов Г. А., Акимов В. В., Воронков С. В.* Радиационные испытания электронных компонентов астроприборов при низких мощностях дозы // 7-я Всерос. научно-техн. конф. «Радиационная стойкость электронных систем — Стойкость-2004»: сб. тр. 2004. С. 105–106.
3. *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 CMV4000 и ФППЗ «Лев-4» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 119–130.
4. *Кобелева А. А., Эльяшев Я. Д., Бессонов Р. В., Куделин М. И., Аванесов Г. А., Форш А. А.* Результаты испытаний фотосенсоров CMV20000 на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // 5-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса. 5–8 сент. 2016. М: ИКИ РАН, 2017. С. 154–162.
5. *Котов Ю. Д.* Радиационные эффекты в ПЗС матрицах, вызываемые однократным взаимодействием нейтронов // Научная сессия МИФИ-1999. Ч. 6. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. 1999. С. 97–98.
6. *Sirianni M., Mutchler M., Lucas R. A.* Hot Pixels Growth in ACS CCDs // The 2005 HST Calibration Workshop Hubble after the Transition to Two-gyro Mode, Proc., Space Telescope Science Institute. Baltimore, Maryland. 26–28 Oct. 2005 / eds. A. M. Koekemoer, P. Goudfrooij, L. L. Dressel. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2006. P. 45–51.
7. *Xue Y., Wang Z., Chen W., Liu M., He B., Yao Z., Sheng J., Ma W., Dong G., Jin J.* Proton Radiation Effects on Dark Signal Distribution of PPD CMOS Image Sensors: Both TID and DDD Effects // Sensors. 2017. V. 17(12). P. 2781.

## The effect of outer space radiation on the operation of BOKZ devices during their long-term operation

R. V. Bessonov, A. A. Kobeleva, A. N. Kurkina, A. K. Malkov, A. A. Forsh

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: besson777@gmail.com*

The work is devoted to a review of events caused by the influence of radiation factors of outer space on stellar orientation devices of the BOKZ family. These devices are widely used and currently have a total flying time of more than 2.8 million hours in space. So long operating time of devices, of course, was accompanied by the occurrence of events and effects caused by the influence of cosmic radiation. The paper describes the effects that can occur in BOKZ devices when they work in space. It is shown that the main effect of space radiation during long-term operation of devices in space is caused by structural damage in the CCD of devices. For near-Earth spacecraft, structural effects arise mainly due to the action of protons captured by the Earth's radiation belts, and therefore the dose of structural

damage strongly depends on the satellite's orbit. The paper describes the results of data analysis from nine spacecraft located in different orbits. In addition, the article presents the results of radiation tests of CCD and CMOS matrices both on the effects of ionization radiation and on the effects of a heavy charged particle and high-energy protons. The paper provides methods to minimize the effect of radiation on the photosensitive matrices of BOKZ devices.

**Keywords:** star tracker, astrometry, radiation resistance, effects outer space

Accepted: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-85-96

## References

1. Avanesov G. A., Akimov V. V., Voronkov S. V., Issledovanie vliyaniya zaryazhennykh chastits na funktsionirovanie astronavigatsionnykh priborov (Investigation of the effect of charged particles on the functioning of astronomical instruments), *Izvestiya vuzov, Priborostroenie*, 2003, Vol. 46, No. 4, pp. 79–83.
2. Avanesov G. A., Akimov V. V., Voronkov S. V., Radiatsionnye ispytaniya elektronnykh komponentov astro-priborov pri nizkikh moshchnostyakh dozy (Radiation tests of electronic components of astroprobe at low dose rates), *7-ya Vserossiiskaya nauchno-technicheskaya konferentsiya "Radiatsionnaya stoikost' elektronnykh system (Stoikost'-2004)"* (7<sup>th</sup> All-Russia Scientific and Technical Conf. "Radiation Resistance of Electronic Systems"), Proc. conf., 2004, pp. 105–106.
3. Belinskaya E. V., Kobeleva A. A., Smetanin P. S., Elyashev Ya. D., Chernyak M. E., Sravnenie effektivnykh povrezhdenii v matritsakh KMOP i PZS, primenyaemykh v zvezdnykh datchikakh, na primere CMV4000 i FPPZ "Lev-4" (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.
4. Kobeleva A. A., Elyashev Ya. D., Bessonov R. V., Kudelin M. I., Avanesov G. A., Forsh A. A., Rezul'taty ispytaniy fotosensorov CMV20000 na stoikost' k vozdeistviyu ioniziruyushchikh izluchenií kosmicheskogo prostranstva (CMV20000 photosensor test results for resistance to the effects of outer space ionizing radiation), *5-ya Vserossiiskaya nauchno-technicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (5<sup>th</sup> All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Proc. conf., Tarusa, 5–8 Sept., 2016, Moscow: IKI RAN, 2017, pp. 154–162.
5. Kotov Yu. D., Radiatsionnye efekty v PZS matritsakh, vyzyvaemye odnokratnym vzaimodeistviem neutronov (Radiation effects in CCD matrices caused by a single neutron interaction), *Nauchnaya sessiya MIFI-1999, Avtomatika, Mikroelektronika, Elektronika, Elektronnyye izmeritel'nye sistemy*, 1999, pp. 97–98.
6. Sirianni M., Mutchler M., Lucas R. A., Hot Pixels Growth in ACS CCDs, *The 2005 HST Calibration Workshop Hubble after the Transition to Two-gyro Mode*, Proc. Workshop, Baltimore, Maryland, Oct. 26–28, 2005, A. M. Koekemoer, P. Goudfrooij, L. L. Dressel (eds.), National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2006, pp. 45–51.
7. Xue Y., Wang Z., Chen W., Liu M., He B., Yao Z., Sheng J., Ma W., Dong G., Jin J., Proton Radiation Effects on Dark Signal Distribution of PPD CMOS Image Sensors: Both TID and DDD Effects, *Sensors*, 2017, Vol. 17(12), p. 2781.