

## Обеспечение радиационной стойкости бортовой аппаратуры командных радиолиний при длительных сроках активного существования космических аппаратов (Часть 1)

**Н. Н. Булгаков**, *contact@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**В. Ф. Зинченко**, *д. ф.-м. н., contact@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Обобщен опыт работ, выполненных в АО «Российские космические системы» за период с 2003 г. по 2021 г., по разработке бортовой аппаратуры командных радиолиний космических аппаратов различного назначения с заданным уровнем радиационной стойкости в условиях длительного воздействия ионизирующих излучений космического пространства. Рассмотрены основные этапы работ по обеспечению стойкости бортовой аппаратуры к интегральным дозовым эффектам и эффектам одиночных событий.

Разработано методическое и программное обеспечение, позволяющее проводить корректное прогнозирование локальных дозовых нагрузок ионизирующих излучений космического пространства в приборах бортовой аппаратуры командных радиолиний с учетом эффекта «усиления дозы» вторичного тормозного излучения.

Рассмотрены методические вопросы обеспечения сроков активного существования бортовой аппаратуры при использовании «холодного» резервирования критичных приборов и узлов. Использование «холодного» резервирования дает возможность увеличить сроки активного существования относительно стойкости к интегральным дозовым эффектам примерно в 1,5 раза.

Эффективность разработанного методического и программного обеспечения для подтверждения радиационной стойкости бортовой аппаратуры командных радиолиний подтверждается успешной эксплуатацией в период 2005–2021 гг. порядка 100 космических аппаратов различного назначения.

**Ключевые слова:** ионизирующие излучения, радиационная стойкость, интегральные дозовые эффекты, командные радиолинии

## Ensuring the Radiation Resistance of the Onboard Command Radio Link Equipment during Long Periods of Active Existence of Spacecraft (Part 1)

**N. N. Bulgakov**, *contact@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**V. F. Zinchenko**, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), contact@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The experience of JSC “Russian Space Systems” in the development of on-board equipment for command radio links of spacecraft for various purposes with a given level of radiation resistance under conditions of long-term exposure to ionizing radiation of outer space for the period from 2003 to 2021 is summarized. The main stages of work to ensure the resistance of onboard equipment to integral dose effects and the effects of single events are considered.

Methodological and software resources have been developed that allow correct prediction of local dose loads of ionizing radiation from outer space in the on-board equipment of command radio links, taking into account the effect of “dose amplification” of secondary bremsstrahlung.

The methodological issues of ensuring the terms of the active existence of the onboard equipment are considered, using the cold redundancy of critical devices and components. The use of cold redundancy makes it possible to increase the duration of active existence relative to resistance to integral dose effects by about 1.5 times.

The effectiveness of the developed methodological and software resources for confirming the radiation resistance of the on-board equipment of command radio links is proved by successful operation of about 100 spacecraft for various purposes in the 2005–2021 period.

**Keywords:** ionizing radiation, radiation resistance, integral dose effects, command radio links

## Введение

Бортовая аппаратура командных радиолиний (далее БА) космических аппаратов (КА) должна сохранять работоспособность в течение длительных сроков активного существования (САС) в условиях непрерывного воздействия различных видов ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП): электронов и протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ). Радиационные эффекты в электрорадиоизделях (ЭРИ), примененных в БА, проявляются, с одной стороны, как интегральные дозовые эффекты, приводящие к непрерывному изменению параметров ЭРИ в течение САС. С другой стороны, при действии отдельных ВЭП и ТЗЧ могут возникать так называемые эффекты одиночных событий (ЭОС), приводящие к необратимому отказу ЭРИ либо инициированию обратимых переходных процессов в схемах БА.

Основная проблема, возникающая при проектировании перспективной БА, — отсутствие в ряде случаев требуемой номенклатуры радиационно-стойких ЭРИ с уровнем дозы отказа не менее 100 крад (Si) и пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) ТЗЧ относительно необратимых ЭОС не менее  $60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}(\text{Si})$ . Доступные ЭРИ импортного производства (ИП) уровня качества «industrial» имеют, как правило, более низкие показатели радиационной стойкости (РС). С другой стороны, разработка радиационно-стойких ЭРИ отечественного производства (ОП) в рамках планируемых опытно-конструкторских работ (ОКР) требует определенного времени. В этих условиях необходимо применение комплекса мер для обеспечения заданных требований по РС БА, включая повышение точности расчета дозовых нагрузок на приборы БА, резервирование критичных узлов и применение их дополнительной защиты, чередование активных и пассивных режимов функционирования приборов БА, повышение уровня методического обеспечения испытаний ЭРИ на стойкость к дозовым эффектам и ЭОС. Исследования в этих направлениях, разработка методик их проведения являются

важной научно-технической задачей. В следующих разделах подробно рассматриваются перечисленные вопросы с учетом накопленного в АО «РКС» за последние почти 20 лет опыта по разработке БА для КА различного назначения с заданным уровнем РС в условиях длительного воздействия ИИ КП.

Данная статья состоит из двух частей. В первой части представлен обзор основных результатов исследований, выполненных в АО «Российские космические системы» за период с 2010 г. по 2020 г., связанных с обеспечением РС БА к интегральным дозовым эффектам ИИ КП. Вторая часть, которая планируется к опубликованию в следующих номерах журнала, посвящена методическим вопросам проведения испытаний и прогнозирования стойкости БА к ЭОС, вызываемых ТЗЧ и ВЭП КП.

## 1. Общая характеристика дозовых эффектов в БА при воздействии ионизирующих излучений космического пространства

Дозовые эффекты в БА обусловлены применением в приборах БА ЭРИ (интегральных микросхем, полупроводниковых приборов, элементов электроники), чувствительных к воздействию ИИ КП. Интегральные дозовые эффекты делятся на две основные группы — ионизационные и структурные.

**Ионизационные эффекты** обусловлены генерацией в активных областях ЭРИ при воздействии ИИ КП электрон-дырочных пар, которые в присутствии электрического поля быстро разделяются и могут дрейфовать или диффундировать в материале до рекомбинации или захвата на ловушки. Захваченный заряд дырок в подзатворном окисле МОП транзисторов (МОПТ) либо изолирующих окислах ЭРИ, изготовленных по биполярной технологии, может приводить к постепенной деградации их параметров (сдвигу порогового напряжения и увеличению токов утечки МОПТ, уменьшению коэффициента усиления биполярных транзисторов и т.п.) вплоть до полного функционального отказа. Как правило, ионизационные эффекты связаны с процессами, протекающими в поверхностных слоях активных областей ЭРИ.

**Структурные эффекты** проявляются в ЭРИ, радиационная стойкость которых определяется структурными повреждениями материалов активных областей. Взаимодействие ВЭП КП с ядрами атомов полупроводниковых материалов активных областей ЭРИ (Si, Ge, GaAs) приводит к образованию структурных дефектов, что вызывает деградацию электрофизических характеристик данных материалов, в частности времени жизни, подвижности и концентрации носителей заряда. Это может приводить, в свою очередь, к заметной деградации параметров и функциональному отказу таких ЭРИ, как солнечные элементы, оптоэлектронные приборы, а также дискретные транзисторы и микросхемы биполярной технологии.

В качестве критерия при сравнении эффективности различных видов ИИ относительно структурных эффектов обычно используют неионизационные потери энергии частиц (Non-Ionizing Energy Loss — NIEL в зарубежной литературе) для данного материала. Величина NIEL сильно зависит от вида и энергии ИИ, материала полупроводника. В условиях КП определяющий вклад в структурные дефекты вносит протонное излучение. При наличии информации о зависимости NIEL от энергии протонов нетрудно оценить плотность структурных дефектов в рассматриваемом материале для заданного энергетического спектра протонов ГКЛ, СКЛ и ЕРПЗ.

Разработка БА КА с заданным уровнем стойкости к дозовым эффектам при воздействии ИИ КП включает в себя решение следующих основных задач [1, 2]:

- определение характеристик радиационной обстановки для заданной орбиты КА;

- анализ перечня ЭРИ в составе приборов БА и имеющейся информации об их чувствительности к интегральным дозовым эффектам (ионизационным и структурным) при действии электронов и протонов КП;

- расчет локальных дозовых нагрузок (ЛДН) в местах расположения в приборах БА ЭРИ, чувствительных к дозовым эффектам, с учетом защиты конструктивными элементами КА;

- сравнение рассчитанных ЛДН с имеющимися данными об уровнях стойкости ЭРИ к дозовым эффектам и определение коэффициентов запаса по РС для отдельных приборов и БА в целом;

- проведение испытаний приборов БА с расчетным коэффициентом запаса по стойкости к дозовым эффектам ниже единицы, определение реального уровня их РС и выдача рекомендаций по применению дополнительных мер для обеспечения заданных требований по стойкости БА.

В следующих разделах будут подробно рассмотрены вопросы практической реализации перечисленных этапов.

## 2. Расчет стойкости БА КА к воздействию ионизирующих излучений космического пространства

Исходной информацией для прогнозирования РС БА являются дифференциальные энергетические спектры ВЭП,  $\varphi_P(E_P)$ , и электронов ЕРПЗ,  $\varphi_E(E_e)$ , характеризующие радиационные условия в открытом космосе для ЕРПЗ, ГКЛ и СКЛ. В России для получения характеристик радиационных полей КП используется разработанный НИИ ЯФ МГУ программный комплекс COSRAD [3]. Дополнительно к указанным характеристикам открытого космоса комплекс COSRAD позволяет получить дифференциальные спектры  $\varphi_P(E)$ ,  $\varphi_E(E_e)$  за сферической защитой, а также поглощенные дозы от электронов и протонов ЕРПЗ, протонов и ТЗЧ СКЛ и ГКЛ за сферической и плоской защитой различной толщины.

Используя указанную информацию, можно рассчитать параметры, характеризующие чувствительность критичных ЭРИ, примененных в БА КА, к интегральным дозовым эффектам. Следует отметить, что степень защищенности конкретных ЭРИ в составе приборов БА отличается сильной анизотропией и зависит от компоновки приборов БА в КА, толщины корпуса приборов и защитных свойств окружающих конструктивных элементов КА. Поэтому для достижения приемлемой точности прогнозирования уровня стойкости БА к дозовым эффектам требуется детальный учет реальной степени защищенности критичных ЭРИ в составе приборов БА с различных направлений [4, 5]. Ниже подробно рассмотрены программные

комплексы, разработанные в АО «РКС» для решения данной задачи.

## 2.1. Программное обеспечение для расчета локальных дозовых нагрузок в приборах БА

В настоящее время методы моделирования переноса различных видов ИИ (электронов, протонов, тяжелых заряженных ионов) в веществе разработаны в полном объеме для решения широкого круга прикладных задач. В частности, используя метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), можно получить с заданной точностью необходимую информацию о распределении дозовых полей ИИ внутри приборов БА в реальных условиях для произвольной трехмерной 3D-геометрии КА [4, 5]. В качестве примера реализации метода Монте-Карло для 3D-геометрии рассматриваемого объекта можно привести программы GEANT4, NOVICE, FLUKA. Однако сложность проблемы заключается в том, что при использовании метода Монте-Карло в 3D-геометрии для достижения приемлемой точности при массовых расчетах ЛДН в объеме приборов БА требуются весьма значительные затраты машинного времени.

Как правило, все применяемые на практике методы расчета распределения дозовых полей ИИ КП в объеме КА являются приближенными и отличаются между собой только принятыми упрощениями геометрии и алгоритма расчета. В связи с этим возникает задача разработки эффективных инженерных методик и программ, которые позволяли бы при разумных затратах машинного времени с достаточно высокой точностью оперативно проводить массовые расчеты ЛДН в объеме приборов БА КА.

К наиболее распространенным приближенным методам расчета ЛДН в критических узлах КА относится метод секторирования (лучевой метод). Он заключается в следующем: полный телесный угол, окружающий точку детектирования в объеме КА, разбивается на множество элементарных секторов (не менее  $10^4$ ). Для каждого сектора определяется полная массовая толщина защиты (в  $\text{г/см}^2$  алюминия), пересекаемая виртуальным лучом, испускаемым из данной точки, до выхода на внешнюю поверхность КА.

Далее рассчитывается вклад в дозу, поглощенную в определенном материале, помещенном в рассматриваемую точку  $D$ , от флюенса электронов (протонов), падающих в данный элементарный сектор телесного угла  $ds_i$ , с учетом полной толщины защиты точки детектирования в данном секторе конструктивными элементами КА, а также рассматриваемого прибора БА. При этом используется предварительно рассчитанная зависимость дозы электронов (протонов),  $D(r)$ , с заданным энергетическим спектром от толщины сферической защиты из алюминия, тормозная способность которого для электронов и протонов КП близка к средним тормозным способностям для совокупности конструкционных материалов КА с атомными номерами  $Z$  в диапазоне  $6 \leq Z \leq 30$ .

Полная ЛДН в точке детектирования определяется суммированием вклада от всех секторов по полному телесному углу  $4\pi$ .

К достоинствам лучевого метода относится скорость проведения расчетов, достаточно высокая точность, а также возможность быстро находить слабые места в защите конкретной точки или прибора БА в целом.

Рассмотренный подход в настоящее время реализован в таких программах как SPENVIS, OMERE, FASTRAD, COSRAD, а также программное обеспечение (ПО) ДОЗА, разработанное в ВКА им. М. Ф. Можайского.

Для проведения расчетов ЛДН в АО «РКС» разработан комплекс программ DOZA-ELECTRON-3D, DOZA-PROTON-3D [6, 7], который позволяет учитывать при проведении расчетов в 3D-геометрии основные элементы КА и приборов БА, заданные в конструкторской документации. Детали численного алгоритма реализации лучевого метода, используемого в программах DOZA-ELECTRON-3D, DOZA-PROTON-3D, подробно рассмотрены в [4, 5]. Следует отметить, что данные программы рекомендованы АО «ЦНИИ машиностроения» для использования в организациях ГК «Роскосмос» при проведении расчетов стойкости БА к дозовым эффектам ИИ КП.

Основное влияние на точность расчета ЛДН с помощью лучевого метода оказывает используемая зависимость дозы электронов (протонов) с заданным энергетическим спектром от толщины

сферической защиты из алюминия. Для расчета зависимости  $D(r)$  для электронов и протонов КП в АО «РКС» на основе метода Монте-Карло разработаны программы ELECTRON-МК, PROTON-МК, входящие в комплекс программ [6, 7] и позволяющие получить кривые ослабления дозовых характеристик электронов и протонов КП сферической защитой из алюминия со статистической погрешностью не более 2%.

Необходимо отметить, что, задавая в качестве входных данных для программ DOZA-ELECTRON-3D, DOZA-PROTON-3D соответствующие кривые ослабления, можно рассчитать в данной точке детектирования в объеме БА любые величины, характеризующие взаимодействие ИИ КП с конструктивными материалами БА: дозу протонов КП, затраченную на структурные повреждения (смещения атомов) в полупроводниковых материалах (Si, Ge, GaAs); энергетические спектры электронов и протонов КП в точке детектирования; плотность поглощенного заряда в диэлектрических материалах и т. п.

К достоинствам разработанного комплекса программ следует также отнести то, что расчеты ЛДН проводятся в декартовой системе координат. Это обстоятельство делает процедуру задания 3D-геометрии расчета менее трудоемкой по сравнению с использованием сферической геометрии, поскольку подавляющее большинство объектов в составе КА и БА можно представить в виде прямоугольных параллелепипедов.

В заключение данного раздела целесообразно обсудить, насколько достоверны результаты расчетов ЛДН в реальных объектах КА, полученные с помощью лучевого метода. В [8] представлено сравнение результатов расчетов ЛДН в различных модулях КА ConeXpress с помощью лучевого метода и с помощью моделирования переноса ИИ КП в трехмерной геометрии КА на основе прямого метода Монте-Карло. Как показало сравнение, для реальной геометрии КА ConeXpress ЛДН в отдельных подсистемах КА, полученные с помощью лучевого метода, могут превышать результаты расчетов с помощью прямого метода Монте-Карло в среднем в 2–3 раза. Важно отметить, что в любом случае с помощью лучевого метода получаем консервативные оценки ЛДН в приборах БА.

## 2.2. Эффект «усиления дозы» вторичного тормозного излучения

При суммарной эквивалентной толщине защиты ЭРИ, комплектующих приборы БА (включая панели приборного отсека КА, корпуса приборов и конкретных ЭРИ), выше  $\approx 1,5$  г/см<sup>2</sup> алюминия вклад в ЛДН в объеме приборов БА от электронов КП практически полностью определяется вторичным тормозным излучением (ТИ), генерируемым при прохождении электронов через слои защиты.

Следует отметить, что энергетический спектр вторичного ТИ довольно мягкий, средняя энергия составляет (150–200) кэВ. Поэтому при оценках дозовых нагрузок на ЭРИ различной технологии, в структуре которых ЧО (например, подзатворный окисел SiO<sub>2</sub> в МОП структурах) может находиться вблизи границы раздела с материалом с высоким атомным номером  $Z$ , например коваром, необходимо учитывать так называемый эффект «усиления дозы» [9]. Это обусловлено следующим обстоятельством. Поскольку сечение фотоэффекта зависит от атомного номера  $Z$  материала как  $\sigma_{\text{ф}} \sim Z^5$ , то при падении фотонов на границу раздела материалов с различными атомными номерами  $Z$  ток фотоэлектронов из материала с высоким  $Z$  будет значительно превышать встречный ток электронов из материала с низким  $Z$ . Это может значительно увеличить («усилить») дозу в легком материале вблизи границы раздела с материалом с высоким  $Z$  по сравнению с равновесной дозой в данном материале при выполнении условий электронного равновесия [10].

Для количественной оценки рассматриваемого эффекта вводится так называемый коэффициент дозового усиления (КДУ), равный отношению плотности поглощенной энергии фотонов в материале чувствительного объема (ЧО) конкретного изделия к ее равновесному значению в этом материале.

В связи с вышеизложенным были проведены расчетные исследования вклада вторичного ТИ в дозовые нагрузки на типовые ЭРИ с учетом эффекта «усиления дозы» [11] для следующих типовых орбит КА: ГСО (геостационарная орбита, удаленность от Земли от 39 000 км) и ВКО (высокая круговая орбита, удаленность от Земли 20 000 км). Для данных орбит, как показано в [11], вклад вторичного ТИ в полные ЛДН, начиная с толщин защиты выше 5 мм алюминия, составляет

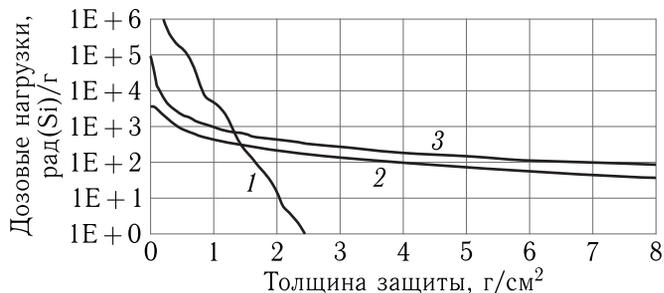


Рис. 1. Кривые ослабления дозовых характеристик ИИ КП для ГСО (сферическая геометрия защиты): 1 — первичные электроны, 2 — вторичное ТИ, 3 — протоны

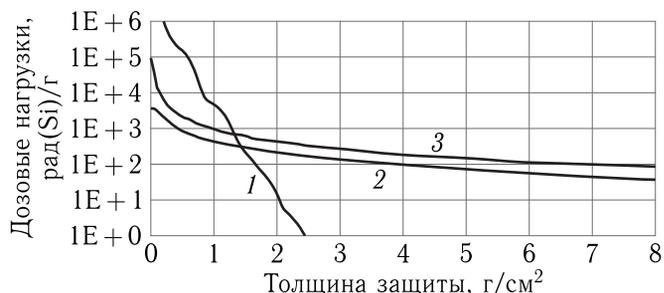


Рис. 2. Кривые ослабления дозовых характеристик ИИ КП для ВКО,  $H = 20\,000$  км (сферическая геометрия защиты): 1 — первичные электроны, 2 — вторичное ТИ, 3 — протоны

не менее 30% даже без учета эффекта «усиления дозы» (рис. 1, 2).

На первом этапе были проведены расчеты максимальных ЛДН в типовой геометрии прибора БА с характерными размерами  $200 \times 200 \times 100$  мм и массой 5 кг при толщине корпуса прибора от 3 мм до 7 мм алюминия без учета эффекта «усиления дозы» (табл. 1, 2). Поскольку ЛДН в приборах БА зависят от реальной компоновки БА и конструктивных элементов КА, считали, что наименее защищена одна грань прибора; с остальных направлений прибор полагали защищенным другими приборами БА и конструкциями КА.

Из рассмотрения представленных в табл. 1, 2 результатов следует, что вклад вторичного ТИ в максимальные ЛДН на ГСО и ВКО при толщине защиты более 5 мм алюминия сопоставим с вкладом протонов СКЛ даже без учета эффекта «усиления дозы» в ЧО ЭРИ.

Для расчета величин КДУ в типовых структурах ЭРИ использовалась упомянутая выше про-

Таблица 1. Максимальные ЛДН в объеме прибора на ГСО в зависимости от толщины корпуса, рад(Si) за год

Толщина корпуса, мм (алюминий)	Первичные электроны ЕРПЗ + ТИ	ТИ	Протоны СКЛ	Относительный вклад ТИ в полную дозу, %
3	175	93	200	25
4	90	75	165	29
5	65	60	140	29
6	55	55	120	31
7	50	50	110	31

Таблица 2. Максимальные ЛДН в объеме прибора на ВКО,  $H = 20\,000$  км, в зависимости от толщины корпуса, рад(Si) за год

Толщина корпуса, мм (алюминий)	Первичные электроны ЕРПЗ + ТИ	ТИ	Протоны СКЛ	Относительный вклад ТИ в полную дозу, %
3	3000	235	200	7,3
4	1000	200	165	17
5	390	170	140	32
6	200	150	120	47
7	150	140	110	54

грамма ELECTRON-МК, разработанная на основе метода Монте-Карло и позволяющая провести расчет поглощенной энергии ТИ в реальной гетерогенной структуре ЭРИ по следующей схеме:

*электроны КП → генерация вторичного ТИ в материалах защиты → поглощение энергии ТИ в чувствительном объеме ЭРИ.*

Энергетические и угловые характеристики выходящего из барьера ТИ рассчитывали исходя из полученного распределения источников ТИ,  $S(E\gamma, r, \theta)$ , в приближении экспоненциального закона ослабления фотонов ТИ в барьере.

Как показали проведенные расчеты, основной вклад в выход ТИ из барьера (до 90%) дает слой барьера толщиной около 3 мм или  $\approx 0,8$  г/см<sup>2</sup> алюминия; остальная часть барьера служит поглотителем ТИ, что приводит к росту средней энергии выходящего ТИ с увеличением толщины барьера. В табл. 3 для иллюстрации представлены значения средней энергии выходящего ТИ для различных толщин барьера при воздействии ИИ КП на ВКО и ГСО.

Таблица 3. Средние энергии выходящего ТИ для различных толщин защиты из алюминия, кэВ

ВКО			ГСО		
3 мм	5 мм	7 мм	3 мм	5 мм	7 мм
205	220	233	142	154	162

При использовании полученных энергетических спектров ТИ для ВКО и ГСО за различными защитами с помощью программы ELECTRON-МК были проведены расчеты КДУ в чувствительном объеме ЭРИ ОП, а также для ЭРИ ИП с многослойной структурой, представленной в [12].

Полученные величины КДУ для типовых структур ЭРИ представлены в табл. 4.

Таблица 4. КДУ в ЧО ЭРИ (слое  $\text{SiO}_2$ ) для спектров вторичного ТИ на ВКО и ГСО, полная толщина защиты 5 мм алюминия

Конструкция крышки корпуса и состав материалов **)	ВКО	ГСО
300 мкм керамика/ <b>1 мкм <math>\text{SiO}_2</math></b> /500 мкм Si	1	1
100 мкм Al/ 3 мкм Ni/100 мкм 29НК/ 3 мкм Ni/ <b>1 мкм <math>\text{SiO}_2</math></b> /500 мкм Si	2,0	2,6
300 мкм 29 НК/10 мкм ПОС-61/ <b>1 мкм <math>\text{SiO}_2</math></b> /500 мкм Si	3,3	3,9
300 мкм Ni/ <b>1 мкм <math>\text{SiO}_2</math></b> /500 мкм Si	2,2	3,0
250 мкм 29НК/3 мкм Ni/2,5 мкм Au/ 1 мкм $\text{SiO}_2$ /1 мкм Al/ <b>50 нм <math>\text{SiO}_2</math></b> / 640 мкм Al *)	3,6	4,4

Примечание: \* — одномерная структура ЭРИ ИП из [12];  
\*\* — жирным шрифтом выделен ЧО (слой  $\text{SiO}_2$ )

Как показали проведенные расчеты, величина КДУ слабо зависит от угла падения фотонов на гетерогенный барьер, моделирующий структуру ЭРИ, хотя абсолютная величина поглощенной энергии ТИ в ЧО может изменяться. Этот факт объясняется тем, что для диапазона энергий фотонов ниже 400 кэВ поглощенная энергия в тяжелых материалах определяется в основном фотоэффектом и слабо зависит от угла падения фотонов на барьер [9].

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что вклад вторичного ТИ в дозовые нагрузки на ЭРИ в составе приборов БА с учетом эффекта «усиления дозы» может возрастать от двух до пяти раз по сравнению с оценками в приближении выполнения УЭР для материала активного объема ЭРИ при суммарной толщине защиты выше 5 мм алюминия. Это приводит к увеличению полной ЛДН (с учетом вклада протонного излучения КП) в 2–3 раза, что необходимо учитывать при прогнозировании стойкости БА к дозовым эффектам ИИ КП (*если коэффициент запаса по стойкости к дозовым эффектам ниже трех*).

В качестве примера, подтверждающего влияние эффекта «усиления дозы» на ЛДН в приборах БА, рассмотрим данные о необратимых отказах микросхемы микроконтроллера, входящего в состав идентичных приборов БА, функционирующих в различных КА: на ВЭО, САС 7 лет и ГСО, САС 10 лет. Как показывает анализ полученной информации, в обоих случаях необратимый отказ микроконтроллеров произошел через примерно одинаковое время после запусков КА ( $\approx 81$  месяц). Отсюда следует, что если для условий ВЭО микросхема практически подтвердила прогнозируемый уровень стойкости, то для ГСО доза отказа была набрана за время в 1,5 раза меньше САС.

Эффект «усиления дозы» вторичного ТИ позволяет объяснить данное противоречие. Для ВЭО вклад ТИ в ЛДН незначителен, поэтому доза отказа микроконтроллера соответствует прогнозируемому уровню, полученному без учета эффекта «усиления дозы» (при испытаниях на изотопной установке с энергией гамма-излучения  $\approx 1,25$  МэВ).

С другой стороны, на ГСО реальные дозовые нагрузки на ЭРИ с учетом эффекта «усиления дозы» ТИ могут возрастать в 2–3 раза по сравнению с расчетами ЛДН без учета указанного эффекта. Отсюда следует, что на ГСО доза отказа может быть получена микроконтроллером за время, значительно меньшее прогнозируемого САС, что и наблюдали на практике. Необходимо подчеркнуть, что вероятность необратимого отказа данной микросхемы вследствие возникновения одиночного тиристорного эффекта при действии ТЗЧ КП, как показали проведенные оценки, не превышает  $10^{-4}$  за САС 10 лет, поэтому основной причиной ее отказа являются дозовые эффекты.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что эффект «усиления дозы» вторичного ТИ при прогнозировании дозовых нагрузок на ЭРИ должен обязательно учитываться в случае выполнения следующей совокупности условий:

- применение в приборах БА ЭРИ, в структуре которых ЧО граничит с материалами с высоким атомным номером  $Z$  (корпус из кобальта, металлизация W, Au);

- суммарная эквивалентная толщина защиты критичных ЭРИ составляет не менее 5 мм алюминия;

- орбиты — ВКО, ГСО, где вклад вторичного ТИ сопоставим с вкладом протонов СКЛ в ЛДН даже без учета эффекта «усиления дозы».

С другой стороны, можно полагать, что для указанных условий функционирования БА эффект «усиления дозы» ТИ можно не учитывать при расчетном коэффициенте запаса по стойкости приборов БА к дозовым эффектам ИИ КП как минимум не ниже трех.

В заключение данного раздела отметим, что на основе сравнения результатов расчетов ЛДН в объеме приборов БА, проведенных с использованием разработанного в АО «РКС» программного обеспечения, и имеющихся данных по дозам отказа ЭРИ определяется перечень критичных ЭРИ (приборов) в составе БА для проведения испытаний на стойкость к дозовым эффектам при воздействии ИИ КП.

### **3. Проведение испытаний ЭРИ, примененных в БА, на стойкость к дозовым эффектам ионизирующих излучений космического пространства**

#### **3.1. Общие положения**

Испытания приборов БА КА на стойкость к воздействию дозовых эффектов ИИ КП проводят в соответствии с рекомендациями ОСТ 134-1034-2012, в котором подробно рассмотрены основные методические вопросы, включая:

- определение норм испытаний (НИ) на основании рассчитанных ЛДН в приборах БА;

- учет эффектов низкой интенсивности ИИ в условиях КП;

- критерии адекватности замены электронного и протонного излучений КП гамма-нейтронным излучением моделирующих установок.

Следует отметить, что ОСТ 134-1034-2012 допускает вместо испытаний приборов БА проводить испытания примененных критичных (т.е. определяющих РС БА) ЭРИ отдельно. Такой подход имеет как достоинства, так и недостатки. При испытаниях в составе приборов для критичных ЭРИ естественным образом реализуются электрический и температурный режимы функционирования в аппаратуре, что трудно обеспечить при испытаниях отдельных ЭРИ, в частности, сложнофункциональных ЭРИ типа Система в корпусе (СвК) или Система на кристалле (СнК).

С другой стороны, испытания отдельных ЭРИ можно проводить в наиболее жестких, согласно ТУ, электрических и температурных режимах до их полного функционального отказа, т.е. как определяющие. Это позволяет получить наиболее полную информацию о РС ЭРИ для обоснования их применения в БА различных КА при изменении электрических и температурных режимов функционирования в широком диапазоне. Кроме того, при испытаниях ограниченной выборки ЭРИ можно учесть разброс стойкости ЭРИ от образца к образцу, увеличивая НИ в зависимости от объема выборки.

Относительно выбора НИ при испытаниях приборов БА необходимо отметить следующее.

Как правило, НИ определяется на основании рассчитанной максимальной ЛДН,  $D_{\text{МАКС}}$ , в объеме рассматриваемого прибора БА. С учетом полученной при испытаниях дозы отказа прибора,  $D_{\text{ОТК}}$ , и рассчитанной максимальной ЛДН определяется коэффициент запаса прибора по стойкости к дозовым эффектам ИИ КП,

$$K_3 = D_{\text{ОТК}}/D_{\text{МАКС}}.$$

При  $K_3 > 1$  данный прибор БА считается стойким к дозовым эффектам ИИ КП. При  $K_3 < 1$  выполняются последовательно следующие процедуры:

- определяется ЭРИ, функциональный отказ которого привел к отказу прибора;
- рассчитывается ЛДН в месте расположения критичного ЭРИ,  $D_{\text{КРИТ}}$ ;
- определяется уточненный коэффициент запаса

$$K_{3,\text{ЭРИ}} = D_{\text{ОТК}}/D_{\text{КРИТ}}.$$

При  $K_{3,\text{ЭРИ}} > 1$  БА считается стойкой к дозовым эффектам ИИ КП. При  $K_{3,\text{ЭРИ}} < 1$  выдаются рекомендации по применению дополнительной защиты для критичного ЭРИ. Толщина и геометрия дополнительной защиты (локальная защита или защита приборов в целом) уточняются расчетным путем при использовании разработанного программного обеспечения (см. раздел 2).

Необходимо отметить, что в составе приборов БА могут быть также применены ЭРИ, потенциально чувствительные к эффекту «усиления дозы» ТИ в активных областях ЭРИ, рассмотренному в предыдущем разделе. Это может привести к увеличению дозовой нагрузки на критичные ЭРИ в 2–3 раза по сравнению с рассчитанными ЛДН  $D_{\text{МАКС}}$ . Поэтому для компенсации данного эффекта рекомендуется, как отмечалось выше, обеспечивать коэффициенты запаса по стойкости приборов БА к дозовым эффектам ИИ КП как минимум не ниже трех.

### **3.2. Использование резервирования критических узлов БА для обеспечения требований по стойкости БА к дозовым эффектам**

Одним из эффективных методов увеличения САС КА является резервирование критических ЭРИ, а также приборов БА в целом [13]. При общем резервировании параллельно функционируют

отдельные приборы БА, при раздельном возможно резервирование отдельных ЭРИ в составе приборов БА. Применяется как «горячее», так и «холодное» резервирование. При «горячем» резервировании резервные элементы работают в одинаковых электрических режимах с основными элементами, при «холодном» — резервные элементы находятся в режиме выключенного питания.

Наиболее эффективным с точки зрения увеличения САС, как показывает практика эксплуатации различных КА, является использование «холодного» резервирования отдельных приборов в составе БА КА.

Данный вывод подтверждается результатами проведенных исследований уровня РС как дискретных ЭРИ различной технологии, так и типовых приборов РЭА при облучении в активном и пассивном электрическом режиме на изотопной гамма-установке при мощности дозы гамма-излучения около 10 Р/с [13]. Получено, что доза отказа для ЭРИ МОП технологии в пассивном режиме,  $D_{\text{ПАС}}$ , может более чем на порядок превышать дозу отказа в активном режиме,  $D_{\text{АКТ}}$ . Для ЭРИ биполярной технологии стойкость при облучении в пассивном режиме также выше, чем в активном, в 1,5–2 раза, однако отношение доз отказа  $D_{\text{ПАС}}/D_{\text{АКТ}}$  не столь велико, как для ЭРИ МОП-технологии.

Наряду с облучением дискретных ЭРИ, были также проведены исследования влияния электрического режима на РС типового прибора БА — усилителя мощности. Было показано, что доза отказа при облучении прибора в пассивном режиме более чем в три раза превышает дозу отказа для активного режима.

Таким образом, проведенный анализ влияния электрического режима на РС ЭРИ основных технологий показывает, что использование «холодного» резервирования отдельных приборов в составе БА является весьма эффективным с точки зрения увеличения САС БА.

### **3.3. Оптимизация параметров программного переключения режимов функционирования приборов БА**

Деградация параметров современных ЭРИ МОП и биполярной технологии при воздействии

ИИ КП определяется конкурирующими процессами накопления и отжига положительного заряда в подзатворном окисле и в изолирующих толстых окислах вблизи границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . На кинетику отжига положительного заряда основное влияние оказывают два процесса [14]:

- туннелирование электронов из кремниевой подложки на положительно заряженные дефекты, расположенные в пределах до 3 нм вблизи границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Кинетика процесса носит логарифмический по времени характер в очень широком временном диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^8$  с [16];

- компенсация положительных дефектов, накапливаемых в окисле  $\text{SiO}_2$  при облучении, радиационно-индуцированными электронами из зоны проводимости окисла кремния (радиационно-стимулированный отжиг). Этот процесс имеет экспоненциальную кинетику и оказывается доминирующим при больших дозах, когда из-за большой концентрации положительного заряда в окисле скорость захвата электронов на положительные дефекты может приближаться к скорости накопления этих дефектов.

Методы количественной оценки оптимальных параметров переключения режимов приборов БА КА при использовании «холодного» резервирования в настоящее время практически отсутствуют. Из публикаций по данной тематике можно отметить лишь [15], где представлена методика выбора оптимальных характеристик переключения режима функционирования ИС КМОП-технологии с целью повышения их САС.

При этом для обоснования оптимального временного алгоритма переключения режимов приборов БА необходимы как минимум следующие параметры:

- кривые дозовой зависимости деградации критериального параметра  $U = f(D)$  для активного и пассивного режима;

- энергия активации отжига критериального параметра при облучении в активном и пассивном электрическом режиме для перехода от условий облучения на моделирующих установках (МУ) к реальной радиационной обстановке КП.

В качестве примера можно привести предлагаемые в [15] зависимости деградации критериального параметра ИС КМОП технологии от дозы  $D$

при облучении в активном режиме

$$U_{\min}(D) = U_{\min}(0) + AD^n, \quad (1)$$

где  $U_{\min}(0)$ ,  $U_{\min}(D)$  – минимальное напряжение питания, при котором сохраняется функционирование ИС соответственно до и после облучения в активном режиме;

$D$  – доза облучения в активном режиме;

$A$ ,  $n$  – параметры модели.

В качестве аппроксимационной функции восстановления критериального параметра используют функцию вида

$$U_{\min}(D)_{\text{пасс}} = U_{\min}(D)_{\text{акт}} e^{-D/D\tau} + BD^k, \quad (2)$$

где  $U_{\min}(D)_{\text{акт}}$ ,  $U_{\min}(D)_{\text{пасс}}$  – среднее минимальное напряжение питания, при котором сохраняется функционирование ИС соответственно до и после облучения в пассивном режиме, проводимом после облучения в активном режиме;

$D$  – доза облучения в пассивном режиме после переключения из активного режима;

$D\tau$ ,  $B$ ,  $k$  – параметры модели.

Заметим, что используемые в [15] зависимости (1), (2) аналогичны характерным зависимостям сдвига порогового напряжения МОП-транзисторов от поглощенной дозы ИИ в подзатворном окисле.

Как следует из выражений (1), (2), для аппроксимации параметров переключения режимов даже одного типа ЭРИ требуется не менее четырех подгоночных констант. Таким образом, для реальных приборов БА, в которых применены ЭРИ различных технологий, можно подобрать только обобщенные константы для аппроксимации зависимостей, описывающих деградацию и восстановление критериальных параметров приборов. Однако практическая реализация данной методики требует значительных затрат на проведение радиационных испытаний большой выборки (не менее 7) тестируемых ИС.

Следует также отметить, что, поскольку реальные приборы БА содержат компоненты, изготовленные по различным технологиям, априори нельзя однозначно определить наиболее опасный электрический режим функционирования конкретного прибора в условиях действия низкоинтенсивного ИИ КП.

Анализ эффективности применения «холодного» резервирования необходимо начинать с анализа

перечня примененных в рассматриваемом приборе (блоке БА) ЭРИ, уровней их РС и особенностей деградации их параметров в условиях воздействия низкоинтенсивного ИИ КП от электрического режима. После проведения указанного анализа разрабатывается программа исследований (испытаний) с целью определения оптимального временного алгоритма переключения электрических режимов рассматриваемого прибора БА. Может оказаться, что стойкость прибора в активном режиме определяют одни элементы, в пассивном — другие, и энергии активации отжига образующихся при облучении радиационных дефектов у них будут разные. Таким образом, в данном случае строго обосновать временной алгоритм переключения электрических режимов довольно сложно, особенно при ограниченном количестве приборов для испытаний (обычно доступны два образца).

Можно рекомендовать следующую программу испытаний приборов БА КА на стойкость к интегральным дозовым эффектам для определения оптимальных параметров алгоритма переключения электрических режимов отдельных приборов БА с учетом наличия «холодного» резерва.

Программа испытаний рассчитана на использование как минимум двух приборов: один облучается в активном, другой — в пассивном электрическом режиме.

Заданная дозовая нагрузка (ЛДН) за САС рассматриваемого прибора набирается ступенчато, за  $N$  сеансов. После каждого сеанса проводится регистрация критериальных параметров приборов, облучаемых в активном и пассивном электрическом режиме, определяется наихудший (критический) режим.

На основании анализа и обработки полученной информации об изменении критериальных параметров приборов, облучаемых в активном и пассивном режимах, определяются константы, необходимые для оптимизации режимов переключения приборов в реальных условиях воздействия ИИ КП.

В заключение данного раздела следует отметить, что использование «холодного» резервирования при наличии даже одного дополнительного резервного прибора дает возможность увеличить САС полного комплекта относительно интегральных дозовых эффектов примерно в 1,5 раза.

Представляет интерес рассмотреть влияние переключения режимов работы на функционирование реальной БА КА при наличии «холодного» резервирования отдельных приборов. При эксплуатации одного из приборов БА через 3,5 года функционирования на ГСО было зафиксировано снижение чувствительности на 4–6 дБ, после чего прибор был переведен в «холодный» резерв на две недели. После переключения в активный режим он продолжал штатно функционировать в течение определенного времени, после чего чувствительность прибора вновь стала снижаться и потребовалось переключение в пассивный режим для отжига накопленных радиационных дефектов и т. д.

Оптимальный интервал чередования активных и пассивных режимов работы приборов БА, очевидно, зависит от темпов накопления дозовых эффектов в ЭРИ, комплектующих прибора БА, т. е. от типа орбиты КА. Для ВЭО и НОО указанный интервал может составлять около двух недель, для ГСО и ВКО — не менее месяца.

## Заключение

Рассмотрены основные этапы практической реализации программы работ по подтверждению стойкости БА к дозовым эффектам ИИ КП в течение длительных САС до 15 лет.

Разработано методическое и программное обеспечение, позволяющее проводить корректное прогнозирование локальных дозовых нагрузок ИИ КП в приборах БА с учетом эффекта «усиления дозы» вторичного ТИ.

Рассмотрены методические вопросы обеспечения САС БА при использовании холодного резервирования критичных приборов и узлов БА. Использование холодного резервирования дает возможность увеличить САС БА относительно стойкости к интегральным дозовым эффектам примерно в 1,5 раза.

Эффективность разработанного методического и программного обеспечения для подтверждения РС БА командных радиолиний подтверждается успешной эксплуатацией в период 2005–2021 гг. порядка 100 КА различного назначения на НОО, СОО, ГСО, ВЭО и лунной орбитах.

## Список литературы

1. *Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Липский А. К., Усеинов Р. Г., Булгаков Н. Н., Сахарова Л. Ю.* Основные этапы обеспечения стойкости аппаратуры космических систем к интегральным дозовым эффектам // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 3. С. 76–79.
2. *Анашин В. С., Бодин В. В., Герасимов В. Ф. и др.* Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.
3. *Кузнецов Н. В., Мельников Ю. М., Николаев Н. И. и др.* Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 2.
4. *Булгаков Н. Н., Зинченко В. Ф., Миршавка Ю. А., Яхутин С. А.* Комплекс программ для расчета локальных дозовых нагрузок в приборах бортовой аппаратуры космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, Труды IX конференции. 2018. С. 386–402.
5. *Булгаков Н. Н., Зинченко В. Ф., Миршавка Ю. А., Яхутин С. А.* Повышение достоверности расчетов дозовых нагрузок на электронные компоненты в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. Вып. 3. С. 39–45.
6. *Зинченко В. Ф., Миршавка Ю. А.* Свидетельство о государственной регистрации программы DOZA-ELECTRON-3D 2017662797. Программа расчета локальных дозовых нагрузок в бортовой аппаратуре космических аппаратов при действии электронного излучения космического пространства «DOZA-ELECTRON-3D»; заявитель и правообладатель АО «Российские космические системы». № 2017662797; заявл. 22.09.2017; зарег. 17.11.2017.
7. *Зинченко В. Ф., Миршавка Ю. А.* Свидетельство о государственной регистрации программы DOZA-PROTON-3D 2017662798. Программа расчета локальных дозовых нагрузок в бортовой аппаратуре космических аппаратов при действии протонного излучения космического пространства «DOZA-PROTON-3D»; заявитель и правообладатель АО «Российские космические системы». № 2017662798; заявл. 22.09.2017; зарег. 17.11.2017.
8. *Lindberg R., Santin G., Evans H., et al.* Detailed Comparison of Monte Carlo and Sector-Shielding Analyses for Space Applications // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. Vol. 53, № 6. P. 3745–3749.
9. *Garth J. C.* Monte-Carlo analysis of dose profile near photon irradiated material interfaces // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1975. Vol. NS-22. № 6. P. 2562–2567.
10. *Иванов В. И.* Курс дозиметрии. 4 изд. М., 1988.
11. *Булгаков Н. Н., Бахтызин И. В., Зинченко В. Ф.* Учет эффекта «усиления дозы» вторичного тормозного излучения при прогнозировании дозовых нагрузок на ЭРИ в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2020. Вып. 1. С. 31–38.
12. *Solin J. R.* Bremsstrahlung dose enhancement factors for satellites in 12-, 14.4- and 24-Hr circular earth orbits // Proceedings of the 7th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. RADECS 2003. P. 627–633.
13. *Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Усеинов Р. Г., Булгаков Н. Н., Семочкин А. С.* Использование резервирования критических узлов бортовой аппаратуры для увеличения сроков активного существования космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2016. № 1. С. 22–28.
14. *Зебрев Г. И.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. НИЯУ МИФИ, 2010.
15. РД 134-0151-2008. Аппаратура радиоэлектронная бортовая космических аппаратов. Типовая методика экспериментально-аналитического определения оптимальных характеристик переключения режима функционирования интегральных микросхем типа «металл–оксид–полупроводник» с целью повышения срока активного функционирования резервированной бортовой аппаратуры в условиях воздействия естественного ионизирующего излучения космического пространства.
16. *Анашин В. С.* Разработка методов обеспечения функционирования устройств спутниковых телекоммуникаций в условиях длительного воздействия излучений космического пространства. Специальность 05.12.13. «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2008.