

О. А. Акулов, Е. В. Фролков,
А. В. Шатунов

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Приведены результаты натурального эксперимента на космическом аппарате “Можгаец-4” по оценке воздействия факторов космического пространства на работоспособность микросхем статической оперативной памяти. На основе результатов эксперимента в виде соответствующей модели получены эмпирические соотношения для оценки и прогнозирования защищенности бортовых вычислительных систем космических аппаратов.

E-mail: oakulov@yandex.ru; frolov@mail.ru;
suovik@mail.ru

Ключевые слова: защищенность бортовых вычислительных систем, среднее отклонение числа отказов ячеек, мощность дозы протонов.

Анализ применения космических аппаратов (КА) наблюдения с длительными сроками активного существования за последние десять лет (1998–2008) показал, что одной из важнейших проблем функционирования КА является обеспечение функциональной устойчивости бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к естественным ионизирующим излучениям космического пространства. При этом чаще всего происходят перемежающиеся отказы — многократно возникающие самоустраняющиеся отказы одного и того же характера. На практике [1] интенсивность перемежающихся отказов на 2-3 порядка выше интенсивности других отказов (внезапных, постепенных и др.).

Источниками ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве являются в основном естественный радиационный пояс Земли (ЕРПЗ), солнечные и галактические космические лучи (СКЛ и ГКЛ). При этом радиационные условия могут значительно различаться в зависимости от обстоятельств полета, которые обусловлены как характерными чертами планируемого полета (орбитой, продолжительностью, конструкцией КА), так и различными факторами космического пространства (солнечной активностью, магнитосферой Земли) [2].

В общем случае ионизирующее излучение (ИИ) оказывает разное воздействие на интегральные микросхемы (ИМС). С точки зрения отказов представляют интерес два физических эффекта: ионизация носителей заряда и тепловой нагрев. Анализ физических механизмов

отказов сводится к рассмотрению процессов генерации носителей заряда в чувствительных микрообъемах структуры элементов ИМС при воздействии отдельных частиц ИИ и условий, при которых эти процессы вызывают временную неисправность элементов [3].

В настоящее время для современных и перспективных КА наблюдения с учетом специфики выполнения целевых задач в основном используются солнечно-синхронные орбиты (ССО). Ввиду наличия магнитосферы Земли для КА, функционирующих на ССО, основной радиационной составляющей является солнечное ионизирующее излучение (СИИ), поскольку вблизи магнитных полюсов, куда частицы приходят в основном параллельно магнитным силовым линиям, влияние магнитного отклонения на энергетический спектр частиц наименьшее. Солнечное ионизирующее излучение, в состав которого входят СКЛ и солнечный ветер, является наиболее нестабильным компонентом ИИ космического пространства. Прогнозирование пространственно-временного распределения характеристик СИИ сталкивается с серьезными трудностями из-за отсутствия фундаментальной физической теории солнечной активности [4].

Защищенность таких сложных технических систем, как бортовая вычислительная система (БВС), являющаяся центральным звеном бортового комплекса управления (БКУ) КА, определяется надежностью составляющих ее элементов и способом их соединения. С точки зрения выполнения вычислительных операций типовая БВС состоит из трех базовых узлов: вычислительного устройства, реализованного на k ИМС с интенсивностью отказов $\lambda_1(t)$, блоков оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), реализованного на m ИМС с интенсивностью отказов $\lambda_2(t)$, и постоянного ЗУ, реализованного на n ИМС с интенсивностью отказов $\lambda_3(t)$. При этом на практике $\lambda_1 \ll \lambda_2$, $\lambda_3 \ll \lambda_2$, поэтому надежность БВС определяется в основном надежностью ОЗУ в силу наибольшей степени интеграции данного вида микросхем.

Для оценки и прогнозирования частоты перемежающихся отказов в ИМС, функционирующих в составе БВС на борту КА, существуют специальные расчетные методики, например интерактивный пакет программ COSRAD [5]. В качестве исходных данных для прогнозирования вероятности возникновения радиационных эффектов в ИМС используются параметры чувствительности микросхем: сечение насыщения, порог возникновения эффекта или чувствительный объем элемента, устанавливаемые в результате испытаний ИМС на ускорителях тяжелых ионов.

В устройствах на цифровых ИМС кратковременные функциональные сбои под действием импульсного ИИ существенно зависят от внутреннего состояния микросхемы. Особенно сложно моделировать кратковременные функциональные сбои под воздействием отдельных

тяжелых частиц, которые наблюдаются в бортовых информационных системах (БИС). При этом ионизационный эффект носит, как правило, локальный характер, поскольку реакция базовой логической ячейки связана с порогом срабатывания при вводе неравновесного заряда в ее наиболее чувствительный пассивный или активный элемент. Критический заряд, достаточный для сбоя элементарной ячейки, различен для БИС, изготовленных по разной технологии, и определяется ее схематехническим построением, геометрическими размерами чувствительных элементов, логическим состоянием и электрическим режимом их работы. Моделирование кратковременных сбоев под воздействием отдельных тяжелых частиц усложняется еще и потому, что при этом существенна роль факторов, связанных с вероятностью попадания частиц в разные по чувствительности к проявлению ионизационной реакции области микросхемы [6].

В работе [7] отмечено, что характеристики радиационной стойкости ИМС в реальных условиях эксплуатации при низких интенсивностях излучения, определенные на моделирующих лабораторных установках, могут различаться более чем в 3 раза. При этом доминирующие механизмы отказов в лабораторных условиях и космосе могут быть различными. Поэтому одним из перспективных направлений по исследованию влияния ИИ космического пространства на бортовую радиоэлектронную аппаратуру является проведение натуральных экспериментов, в том числе эксперимент с КА “Можаяц-4” [8].

На борту КА, функционирующего с 27 сентября 2003 г. на круговой орбите высотой ≈ 680 км и наклоном 98° , установлен комплекс научной аппаратуры “Призма-2”, имеющий в своем составе блоки с испытываемыми микросхемами статической оперативной памяти 537РУ16 и управляющий микропроцессор в блоке согласования, посредством которого тестируются микросхемы с использованием тестовых кодов и подсчитывается число сбойных ячеек. Блоки имеют толщину алюминиевого корпуса 1, 2 и 3 мм. Внешний вид комплекса приведен на рис. 1. Ценность данного эксперимента заключается в том, что на указанных микросхемах построено ОЗУ БВС “Салют-5М”, применяемой в составе БКУ современных КА наблюдения. Результаты натурального эксперимента показали, что микросхемы ОЗУ, используемые в БВС КА, значительно сильнее подвержены влиянию внешних факторов по сравнению с микропроцессором и постоянным ЗУ.

На рис. 2 приведены результаты функционирования комплекса “Призма-2” с января 2004 г. по сентябрь 2007 г. Как видно на графике, изменение интенсивности перемежающихся отказов ячеек ОЗУ имеет циклический сезонный характер: минимум приходится на январь-февраль, максимум — на июль. Предполагая, что значения интенсивности отказов ячеек изменяются в зависимости от периода функцио-

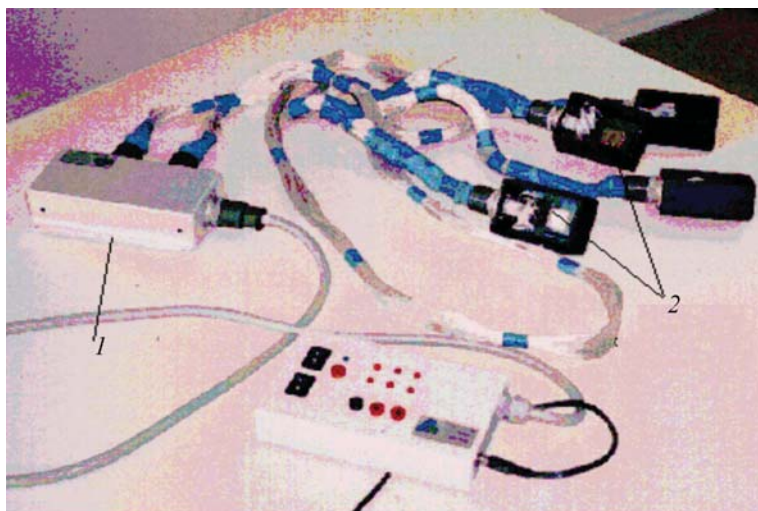


Рис. 1. Внешний вид комплекса научной аппаратуры “Призма-2”:
 1 — блок согласования; 2 — блоки с испытываемыми микросхемами

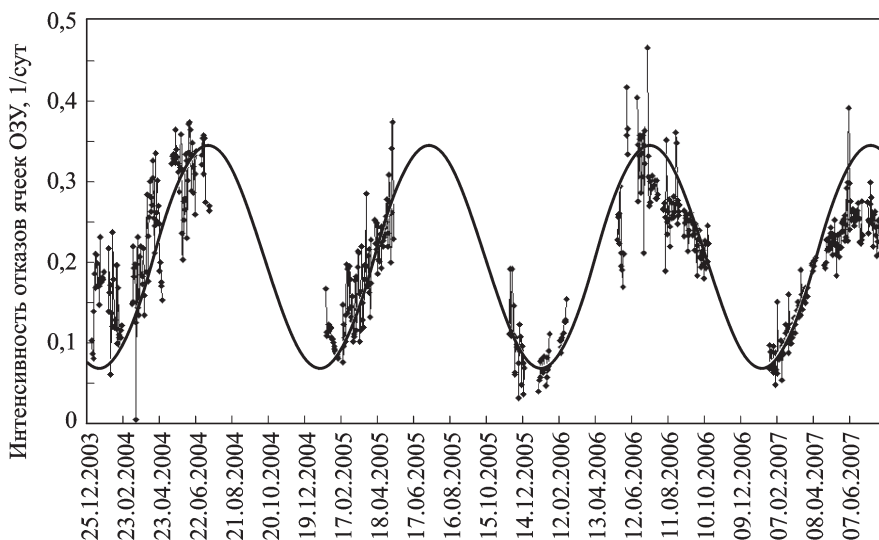


Рис. 2. Изменение интенсивности отказов ячеек в ОЗУ комплекса “Призма-2” с января 2004 г. по сентябрь 2007 г.

нирования по закону синуса, прогнозируемое среднее значение можно определить с помощью соотношений:

$$\lambda(i)|_{\Delta t=30 \text{ сут}} = 0,207 + 0,137 \sin(0,17\pi \cdot i - 0,625\pi), \quad (1)$$

где i — номер календарного месяца; $i = \overline{1; 12}$ — для месячного интервала оценки;

$$\lambda(i) = 0,207 + 0,137 \sin(0,0055\pi \cdot i - 0,541\pi), \quad (2)$$

где i — номер календарного дня в году; $i = \overline{1; 365}$ — для ежедневной оценки.

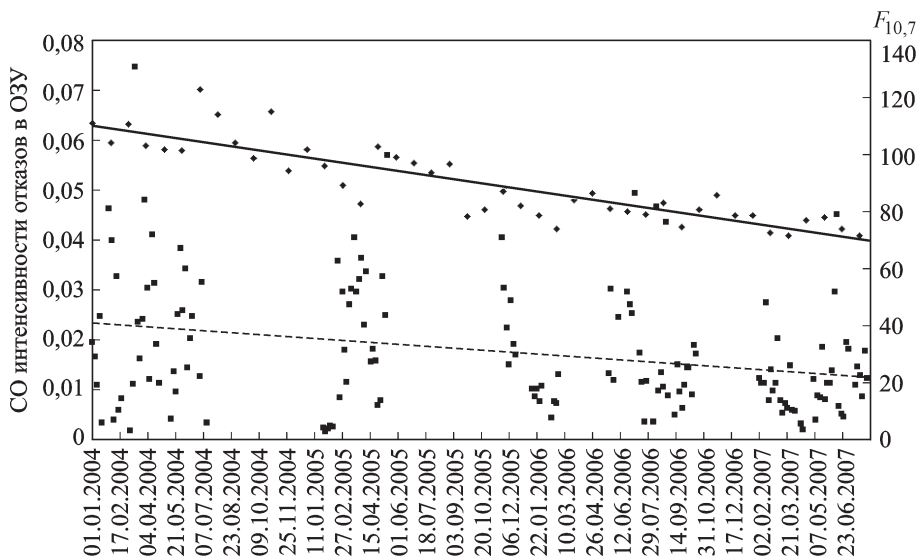


Рис. 3. Изменение СО интенсивности отказов ячеек (■) и потока радиоизлучения Солнца $F_{10,7}$ (◆) ($t = 30$ суток):

— — линейный ($F_{10,7}$); - - - - линейный (СО интенсивности отказов ОЗУ)

Также на рис. 3 видно, что наибольший разброс интенсивности отказов ячеек (наибольшие значения среднего отклонения (СО)) приходится на 2004 г. и к 2007 г. постепенно снижаются. Данная тенденция может быть обусловлена спадом 23-го цикла солнечной активности, максимум которого пришелся на 2002 г.

Сопоставив полученные результаты с различными показателями гелиогеофизической активности (характеристиками ИИ и геомагнитной активности, характеристиками солнечной активности, рентгеновского и других видов излучений), установили, что явной зависимости числа перемежающихся отказов микросхем от указанных характеристик не прослеживается.

Вследствие сложного характера механизмов возникновения отказов в ИМС в условиях воздействия ИИ существование прямой зависимости числа отказов ячеек ОЗУ от воздействия ИИ не является обязательным ввиду того, что в статических ЗУ основную роль в образовании перемежающихся отказов играет суммарный заряд, собранный из ионизационного трека носителей [3]. При этом зависимость вероятности ошибки от этого заряда имеет порог, которому соответствует значение критического заряда. Если суммарный заряд превысит данное значение, происходит переход ячейки оперативной памяти в другое логическое состояние (из “0” в “1” или из “1” в “0”). Таким образом, в качестве характеристики качества функционирования микросхем предлагается использовать не интенсивность отказов, как обычно принято, а СО интенсивности отказов ОЗУ, которая является мерой нестабильности работы микросхемы.

В качестве параметра СИИ используется мощность дозы протонов, поскольку, по оценкам многих исследователей [2, 3, 7], протоны ответственны за большинство радиационных эффектов солнечного происхождения.

Результаты анализа данных, полученных в ходе космического эксперимента, показали удовлетворительную корреляцию СО интенсивности отказов ОЗУ со значениями мощности дозы протонов, что говорит о линейной зависимости СО числа отказов от мощности дозы протонов. В качестве примера на рис. 4 приведены графики изменения СО интенсивности отказов и мощности дозы протонов всех энергий за 2004 и 2005 г., рассчитанного на основе данных с КА серии POES [9] с использованием известного соотношения [10]:

$$P_{Dx}(t) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} k \int_{E_1}^{E_2} \varphi_t(E, t) S(E) dE, \quad (3)$$

где $S(E)$ — удельные потери в поглощающей среде, $\text{МэВ} \cdot \text{см}^{-1}$; k — коэффициент перехода от потока к дозе, $k = 1,6 \cdot 10^{-8}$.

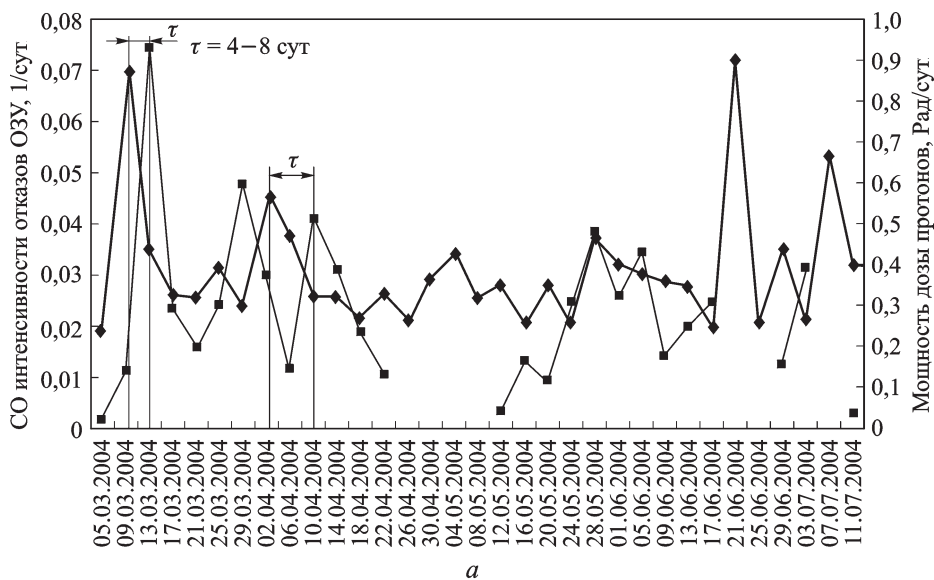
Нижний предел интегрирования в выражении (3) определяется пороговой энергией $E_1 = \sqrt{r/x/a}$, верхний предел E_2 — значениями энергий заряженных частиц, для которых определены и имеют смысл значения коэффициентов a и r , зависящие от материала и вида частицы.

При этом, как следует из графиков, задержка воздействия ионизирующего излучения составляет порядка 4–8 суток, что может быть обусловлено временем достижения критического заряда, достаточного для сбоя ячейки ОЗУ.

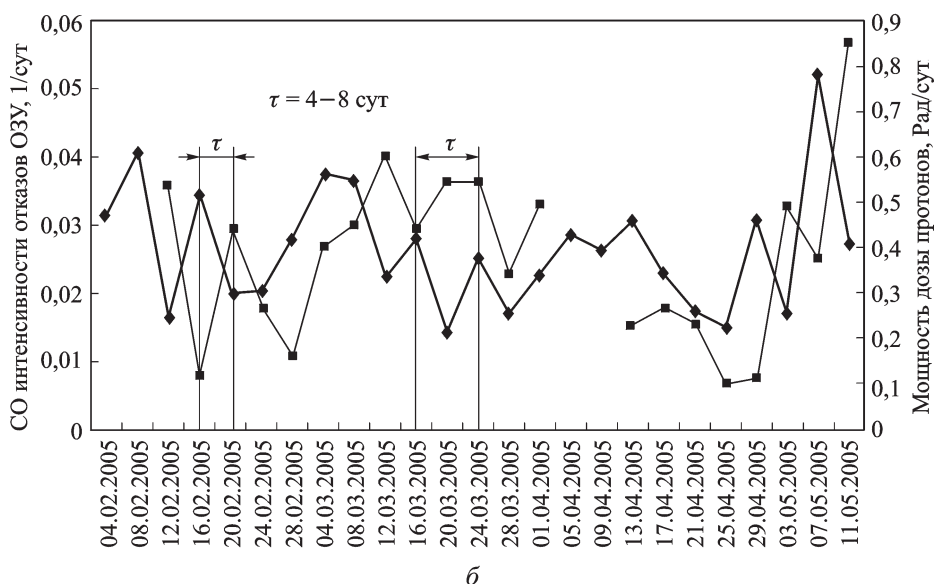
Кроме того, сравнительный анализ значений мощности дозы протонов по данным с КА серии POES со значениями индекса геомагнитной активности, в частности A_p -индекса, показал удовлетворительную корреляцию указанных величин ($r = 0,76$). Поэтому показатели геомагнитной активности также могут использоваться при оценке функционирования РЭА в условиях отсутствия непосредственно данных о потоках частиц ионизирующих излучений $\varphi_p(E)$ с КА.

На рис. 5 с учетом представленных результатов показана схема модели защищенности типовой БВС с учетом принятых обозначений для расчета интенсивности отказов РЭА, в частности ОЗУ, по отношению к перемежающимся отказам. Вероятность безотказной работы и другие комплексные показатели надежности определяются с использованием известных соотношений [1] в зависимости от принятых схем резервирования.

Таким образом, в результате эксперимента на КА “Можаяц-4” получены зависимости, характеризующие циклическое сезонное изменение интенсивности отказов микросхем оперативной памяти в процессе



a



b

Рис. 4. Графики изменения СО интенсивности отказов ячеек ОЗУ (■) и мощности дозы протонов (◆) в 2004 (а) и 2005 гг. (б)

функционирования комплекса “Призма-2”. С использованием методов регрессионного анализа установлены зависимости среднего отклонения интенсивности отказов от мощности дозы протонов.

Использование в качестве характеристики работоспособности микросхем среднего отклонения интенсивности отказов обусловлено сложным механизмом возникновения перемежающихся отказов. Полученные эмпирические соотношения при оперативном учете гелиогеофизической информации могут быть использованы при оценке и



Рис. 5. Схема модели для оценки надежности типовой БВС по отношению к перемежающимся отказам

прогнозировании состояния БВС КА наблюдения, функционирующих на солнечно-синхронной орбите, при планировании работ в рамках технологических циклов управления космическими аппаратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о з л о в Д. И. Управление космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли. Компьютерные технологии. – М.: Машиностроение, 1998. – 367 с.
2. К у з н е ц о в Н. В., П а н а с ю к М. И. Космическая радиация и прогнозирование сбое- и отказоустойчивости интегральных микросхем в бортовой аппаратуре космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2001. – Вып. 1–2. – С. 3–8.
3. Ч е р н ы ш е в А. А. Перемежающиеся и устойчивые отказы в цифровых интегральных микросхемах при воздействии ионизирующего излучения // Зарубежная электронная техника. – 1986. – № 7. – С. 3–157.
4. К у з н е ц о в В. Д., Б о л д ы р е в С. И., З а й ц е в А. В. Прогноз космической погоды в околоземном пространстве // Научная сессия МИФИ. – 2007. – Т. 7. – С. 29–31.
5. Интегрированный пакет программ COSRAD (<http://cosrad.sinp.msu.ru>)
6. Н и к и ф о р о в А. Ю. Радиационные эффекты в КМОП интегральных схемах. – М.: Радио и связь, 1994. – 180 с.
7. Н о в ы е наукоёмкие технологии в технике // Энциклопедия. Т. 16. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов; Под ред. Л.С. Новикова и М.И. Панасюка. – М.: ЭНЦИТЕХ, 2000. – 296 с.
8. Ф а т е е в В. Ф., К р е м е з Г. В., Ф р о л к о в Е. В. Исследование работоспособности электронных компонентов бортовой аппаратуры космических аппаратов посредством экспериментальных комплексов “Призма-1” и “Призма-2” // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 2. – С. 78–81.

9. <http://ngdc.noaa.gov>

10. Модель космического пространства. Т. III. Расчетная модель; Под ред. С.Н. Вернова. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1983. – 636 с.

Статья поступила в редакцию 12.11.2009

Олег Анатольевич Акулов родился в 1966 г. В 1989 г. окончил Военный инженерно-космический институт им. А.Ф. Можайского. Д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 60 научных работ в области методологии подготовки и проведения испытаний космических средств.

O.A. Akulov (b. 1966) graduated from the Military Engineering Space Institute n.a. A.F. Mozhaiskii in 1989. D. Sc. (Eng.), professor of “Information Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 60 publications in the field of methodology of preparation and conduction of testing of space aids.

Евгений Владимирович Фролков родился в 1982 г. В 2004 г. окончил Военно-космическую академию им. А.Ф. Можайского. Канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории Главного испытательного центра (испытаний и применения космических средств). Автор более 20 научных работ в области функциональной устойчивости автоматизированных систем управления космическими аппаратами.

Ye.V. Frolkov (b. 1982) graduated from the Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaiskii in 2004. Ph. D. (Eng.), head of research laboratory of Main Test Center (of testing and application of space aids). Author of more than 20 publications in the field of functional stability of automated systems for space aids control.

Александр Владимирович Шатунов родился в 1982 г. В 2007 г. окончил Военно-космическую академию им. А.Ф. Можайского. Ассистент кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 6 научных работ в области функциональной устойчивости автоматизированных систем управления космическими аппаратами.

A.V. Shatunov (b. 1982) graduated from the Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaiskii in 2007. Assistant lecturer of “Information Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 6 publications in the field of functional stability of automated systems for space aids control.