

В.В. Буторин, С.В. Мороз

ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ С УЧЕТОМ ГЕЛИОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Проведен анализ гелиофизических факторов, воздействующих на космические системы и комплексы в околоземном космическом пространстве. Осуществлена оценка их воздействия на бортовую аппаратуру космических аппаратов. Разработан подход по прогнозированию нештатных ситуаций при функционировании космических аппаратов по целевому назначению с учетом гелиофизических факторов.

Ключевые слова: космический аппарат, нештатные ситуации, аварии, сбои в бортовой аппаратуре, гелиофизические факторы, прогнозирование технического состояния.

V.V. Butorin, S.V. Moroz

THE APPROACH TO THE FORECASTING OF NONSTANDARD SITUATIONS ON SPACE SATELLITES BASED ON THE HELIOPHYSICAL FACTORS

The heliophysical factors making influence on space systems and complexes in the circumterrestrial space were analyzed. The estimation of their influence on the satellite-borne equipment of space satellites was taken. The approach to the forecasting of nonstandard situations during space satellites operation by purpose based on the heliophysical factors was developed.

Keywords: space satellite, nonstandard situations, errors in satellite-borne equipment, emergency situations, heliophysical factors, technical state forecasting.

Введение

В настоящее время космические системы (КС), функционирующие в околоземном космическом пространстве, применяются для решения широкого круга задач информационного обеспечения потребностей населения страны из космоса (например, навигационных, геодезических, геофизических в интересах сельского хозяйства).

Для решения задач КС на требуемом уровне необходимо реализовывать эффективные мероприятия по устойчивому функционированию космических аппаратов (КА), составляющих основу орбитальных группировок КС. При этом стойкость конструктивных материалов и элементов бортового оборудования КА к воздействию окружающей среды играет существенную роль при их длительной и безотказной работе [1].

Однако достаточно часто при функционировании КА возникают различного рода нештатные ситуации, сбои в работе бортовой аппаратуры, отказы в работе отдельных элементов. При этом анализ указанных ситуаций, как правило, связан с неблагоприятными факторами космического пространства (ФКП) [2–4]. Указанные ситуации происходят неожиданно и не позволяют заблаговременно принимать решения и своевременно реализовывать операции управления по парированию возможных нештатных ситуаций.

Поэтому одним из ключевых элементов качественного решения задач орбитальными группировками КА является отсутствие сбоев и нештатных ситуаций в работе бортовой аппаратуры КА, а также прогнозирование их технического состояния и возникновения нештатных ситуаций в процессе использования по целевому назначению под влиянием различных негативных факторов космической среды.

Оценка воздействия гелиофизических факторов на бортовую аппаратуру космических аппаратов

На данный момент к основным ФКП, оказывающим наибольшее влияние на функционирование КА, являются гелиофизические факторы (ГФ), к которым относятся:

- галактические космические лучи (ГКЛ);
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- геомагнитные бури (ГМБ) и геомагнитные суббури (ГСБ) [5].

Рассмотрим каждый ГФ в отдельности, его особенности и влияние на бортовую аппаратуру КА.

ГКЛ – это постоянные потоки заряженных релятивистских частиц, начиная от протонов и ядер гелия и заканчивая ядрами более тяжелых элементов вплоть до урана, рожденных и ускоренных до высоких и предельно высоких (вплоть до 10^{20} эВ) энергий вне пределов Земли. ГКЛ высоких энергий ($E > 10^9$ эВ) имеют галактическое (и, возможно, при самых высоких энергиях экстрагалактическое) происхождение.

В составе ГКЛ преобладают протоны, на долю остальных ядер приходится менее 10%. При энергиях ниже 10 ГэВ/нуклон интенсивность ГКЛ, измеряемая в околосолнечном космическом пространстве, зависит от уровня солнечной активности (от меняющегося в течение солнечных циклов магнитного поля).

Ввиду высокой проникающей способности ГКЛ высоких энергий, их воздействие на бортовую аппаратуру КА имеет наиболее выраженный характер по сравнению с другими ФКП, так как они наиболее часто вызывают одиночные сбои и отказы в бортовой аппаратуре.

Это связано с тем, что при прохождении тяжелых заряженных частиц ГКЛ через чувствительную область элементов интегральных схем создается локальное нарушение электропроводности материала, что приводит к сбою в работе бортового оборудования и КА в целом. Также подобное воздействие может привести и к электрическому пробоя слоя диэлектрика в интегральной схеме вследствие нарушения параметров его электропроводности.

Второй механизм формирования сбоев связан с взаимодействием тяжелых заряженных частиц ГКЛ с материалами конструкции КА, в результате которых порождаются нейтроны. При взаимодействии с материалами корпуса (защиты) бортового оборудования (например, с магниевыми сплавами) нейтрон создает тяжелые заряженные частицы (α -частицы), которые, при взаимодействии с чувствительной областью элемента, также приводят к нарушению параметров электропроводности диэлектрика и сбою или отказу в работе интегральной схемы, находящейся в составе бортовой аппаратуры КА.

Для оценки воздействия ГКЛ на КА необходимо отметить зависимость интенсивности ГКЛ от солнечной активности (солнечная модуляция галактических космических лучей). Кроме того, при этом присутствует Форбуш-эффект (Форбуш-понижение), который заключается в уменьшении потока галактических космических лучей, распространяющихся через гелиосферу, в зависимости от конфигурации магнитного поля (межпланетных корональных выбросов веществ) [5–6].

СКЛ – это потоки заряженных частиц высоких энергий (более 5 МэВ) солнечного происхождения. Основным источником СКЛ являются солнечные вспышки, реже – корональный выброс масс и распад эруптивного протуберанца.

Наибольший вклад в суммарную радиационную дозу СКЛ, поглощаемую бортовой аппаратурой КА, вносят солнечные протоны с энергией от 20 до 500 МэВ и

электроны с энергией от 1 до 12 МэВ. Влияние протонов и электронов с меньшей энергией из состава СКЛ достаточно эффективно исключает защита и корпус КА.

Физически солнечная вспышка является откликом солнечной атмосферы на незапный быстрый процесс выделения энергии, по всей вероятности, магнитного происхождения. Отклик затрагивает, в основном, хромосферу и корону. Выделение энергии приводит прежде всего к локализованному временному нагреву (тепловая вспышка), а также к ускорению частиц (электронов, протонов и более тяжелых ионов). При этом температура в хромосфере составляет ~104 К (хромосферная, или низкотемпературная, вспышка), а в короне достигает ~107 К (высокотемпературная вспышка). Энергии ускоренных частиц, регистрируемых на орбите Земли, составляют от ~20 кэВ (для электронов) до ≥ 10 ГэВ (для протонов).

Результатами воздействия частиц высоких энергий из состава СКЛ на бортовую аппаратуру КА могут стать отказы плат (комплектов аппаратуры) из-за глубинного пробоя диэлектрика или одиночные сбои в работе КА при его использовании по целевому назначению.

Что касается прогноза солнечной активности и возникновения СКЛ, то на основании ретроспективного анализа информации наблюдений активных областей на Солнце за один его оборот возможно составить примерную карту пятен Солнца на один-два следующих его оборота. Но при этом следует учитывать, что точный момент возникновения отдельных солнечных вспышек, длительность которых не превышает нескольких часов, а создаваемых ими магнитных бурь, предсказать практически невозможно. Реально лишь попытаться предугадать время предполагаемого прохода уже известной активной области на поверхности Солнца через центральный меридиан, откуда ее воздействие на Землю наиболее вероятно. Именно на эти интервалы времени и предсказывают слабозмущенную геомагнитную обстановку. Высокие значения индексов K_p и A_p , характерные для магнитных бурь, в долгосрочном прогнозе встретить практически невозможно.

В случае прогноза на ближайшие три-семь дней возможно использование сведений о видимой в данный момент части солнечной поверхности. Когда из-за восточного лимба солнечного диска появляется новая активная область, выдается предупреждение о повышенной вероятности возникновения солнечных вспышек и, соответственно, геомагнитных бурь [5; 7].

ГМБ – это сильные возмущения магнитного поля Земли длительностью от нескольких часов до нескольких суток, наблюдающиеся одновременно по всей Земле, причем амплитуда возмущений возрастает с увеличением широты [8].

ГСБ – это авроральные возмущения в зоне полярных сияний длительностью порядка часа. В самом общем случае ГСБ можно характеризовать как последовательность процессов накопления энергии в магнитосфере и ее взрывного высвобождения.

Источником ГМБ и ГСБ являются приходящие к Земле высокоскоростные потоки солнечного ветра, спорадические, связанные с солнечными вспышками и корональным выбросом масс, и квазистационарные, истекающие из корональных дыр, которые образуют короткодействующие области взаимодействия и вызывают ударную волну.

Магнитные бури приводят к сильным возмущениям в ионосфере, которые, в свою очередь, отрицательно сказываются на состоянии радиозфира. В приполярных районах и зонах аврорального овала ионосфера связана с наиболее динамичными областями магнитосферы и поэтому наиболее чувствительна к приходящим от Солнца возмущениям. Магнитные бури в высоких широтах могут практически полностью блокировать передачу сигнала между КА и наземными средствами в некоторых диапазонах волн на несколько суток.

Другим негативным эффектом, связанным с ГМБ и ГСБ, является потеря ориентации КА, навигация которых осуществляется по геомагнитному полю, сильно возмущенному во время бурь.

С точки зрения радиационной опасности, которую несут потоки СКЛ для высокоширотных участков орбит КА типа МКС, необходимо учитывать не только интенсивность событий СКЛ, но и границы их проникновения в магнитосферу Земли. Причем СКЛ проникают достаточно глубоко даже для средних и слабых (~100 нТ и меньше) магнитных бурь.

Помимо этого, на фазе восстановления магнитной бури повышается вероятность отказа электронного оборудования КА, поскольку во время фазы восстановления примерно в половине случаев происходит значительный (иногда до двух порядков величины) рост потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли. Эти электроны могут вызвать одиночные сбои в микросхемах бортового оборудования КА.

ГСБ являются мощным источником электронов во внешней магнитосфере. Сильно возрастают потоки низкоэнергетических электронов, что приводит к существенному усилению электризации КА. Во время сильной суббуревой активности на несколько порядков возрастают потоки релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли, что представляет серьезную опасность для КА, орбиты которых пересекают эту область, поскольку внутри КА накапливается достаточно большой объемный заряд, приводящий к выходу из строя бортовой аппаратуры.

Во время сильных ГМБ суббуревая активность может опускаться с высоких геомагнитных широт на средние. В данном случае на средних широтах будет наблюдаться нарушение радиосвязи, вызванное возмущающим воздействием на ионосферу высокоэнергетических заряженных частиц, генерируемых во время суббуревой активности [5; 7; 8].

Каждый из вышеперечисленных факторов оказывает свойственное ему влияние, начиная от деградации материалов конструкции КА и заканчивая сбоями и отказами бортовой аппаратуры КА вплоть до полного выхода его из строя. Наибольшее влияние на КА оказывает радиация, являющаяся неотъемлемой частью ГФ и околоземного космического пространства [1; 2].

Появление проблемы возникновения радиационных эффектов в элементах бортового оборудования КА в результате воздействия отдельных заряженных частиц явилось следствием технологического прогресса в микроэлектронике [1]. В современных интегральных схемах с высокой степенью интеграции электрические заряды, управляющие их работой, оказались сопоставимыми с зарядами, образующимися в материале микросхемы при прохождении тяжелых ядер ГКЛ или высокоэнергетических протонов СКЛ. При текущей тенденции развития микроэлектроники в сторону увеличения степени интеграции интегральных схем, уменьшения массогабаритных характеристик КА и увеличения их срока активного существования, с каждым годом ГФ оказывают все большее влияние на техническое состояние КА [1; 8].

Исходя из всего вышеизложенного, получается, что при использовании КА по целевому назначению на его элементы конструкции и бортовую аппаратуру оказывает воздействие широкий спектр ГФ.

Для прогнозирования технического состояния КА в условиях воздействия сложной динамической системы ГФ необходим учет огромного множества различных параметров космического пространства, характеристик материалов КА, компоновки защиты, динамики изменения свойств материалов под влиянием поглощенной дозы радиации и текущего технического состояния бортовой аппаратуры.

По результатам проведенных исследований для прогнозирования технического состояния КА выявлена необходимость разработки комплексного подхода оценки воздействия ГФ на бортовую аппаратуру КА как сложной динамической системы, а также разработки научно-методического аппарата прогнозирования технического состояния КА.

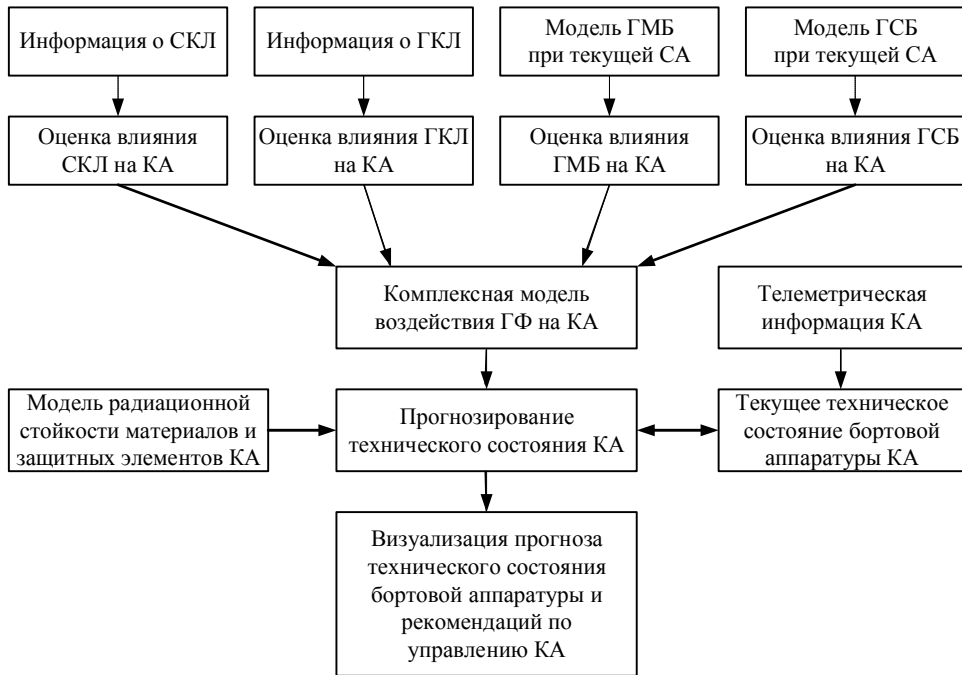


Рис. 1. Структурная схема подхода к прогнозированию нештатных ситуаций на космических аппаратах с учетом гелиофизических факторов

На рис. 1 представлена структурная схема подхода к прогнозированию нештатных ситуаций на космических аппаратах с учетом гелиофизических факторов.

Представленная структурная схема подразумевает выдачу информации лицу, принимающему решения по управлению КА, прогнозных значений технического состояния КА на основе комплексирования информации получаемых измерений параметров ГФ и телеметрической информации (ТМИ) КА.

Однако на практике не всегда имеется возможность получать необходимые измерения параметров ГФ и ТМИ с достаточной периодичностью. В этой связи возникает необходимость использования прогнозируемых параметров ГФ на краткосрочном (до 3 суток), среднесрочном (до 10 суток) и долгосрочном (до 30 суток) интервалах времени.

Реализация указанного подхода на предприятиях ракетно-космической промышленности с учетом особенностей по разрабатываемым и изготавливаемым КА позволит существенно снизить отказы и сбои в работе бортовой аппаратуры аппарата, своевременно прогнозировать нештатные ситуации и принимать своевременно решения по их парированию, что в конечном итоге отразится на сроках активного существования аппаратов, что является особенно актуальным в условиях существующего состояния околоземного космического пространства.

Заключение

По результатам проведенных исследований выявлен ряд негативных факторов космического пространства, к которым относятся галактические космические лучи, солнечные космические лучи, геомагнитные бури (ГМБ) и геомагнитные суббури, которые наиболее существенно оказывают воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов.

Для прогнозирования технического состояния КА для лиц, принимающих решения по их управлению с целью обеспечения выполнения КС задач из космоса на требуемом уровне, предложен научно-методический подход по комплексированию информации оценки воздействия ГФ на бортовую аппаратуру КА с учетом получаемой ТМИ как сложной динамической системы. Предполагается, что указанный подход позволит снизить отказы и сбои в работе бортовой аппаратуры, а также своевременно прогнозировать нештатные ситуации и принимать своевременно решения по их парированию.

Литература

1. Семкин Н.Д., Телегин А.М., Калаев М.П. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов. – Самара : СГАУ им. С.П. Королева, 2013.
2. Будько Н. Космическая среда вокруг нас // Н. Будько, А. Зайцев, А. Карпачев [и др.]. – Троицк : Изд-во ТРОВАНТ, 2005. – 231 с.
3. Основные факторы космической погоды [Электронный ресурс]. – <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cosmw/cosmw3.htm>
4. Новиков Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. – М. : МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 192 с.
5. Солнечный ветер, гелиосфера и распространение космических лучей [Электронный ресурс]. – <http://www.nmdb.eu/?q=node/288>
6. Мирошниченко Л.И. Физика Солнца и солнечно-земных связей / под ред. М.И. Панасюка. – М. : НИИЯФ им. Д.В. Скобельцина, 2011. – 174 с.
7. Лытова М.Ф., Остряков В.М. Физика космической плазмы. Ускорение тяжелых ионов : учебное пособие. – СПб. : СПбГПУ, 2006. – 107 с.
8. Безбородных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. Радиационные эффекты в космосе // Радиация в околоземном космическом пространстве. – М. : ВНИИЭМ, 2014. – Ч. 1. – 107 с.

References

1. Semkin, N.D., Telegin, A.M., Kalaev, M.P. Kosmicheskoe prostranstvo i ego vliyanie na elementy konstruksiy kosmicheskikh apparatov. – Samara : SGAU im. S.P. Koroleva, 2013.
2. Bud'ko, N. Kosmicheskaya sreda vokrug nas // N. Bud'ko, A. Zaytsev, A. Karpachev [i dr.]. – Troitsk : Izd-vo TROVANT, 2005. – 231 s.
3. Osnovnye faktory kosmicheskoy pogody [Elektronnyy resurs]. – <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cosmw/cosmw3.htm>
4. Novikov, L.S. Radiatsionnye vozdeystviya na materialy kosmicheskikh apparatov. – M. : MGU im. M.V. Lomonosova, 2010. – 192 s.
5. Solnechnyy veter, geliosfera i rasprostranenie kosmicheskikh luchey [Elektronnyy resurs]. – <http://www.nmdb.eu/?q=node/288>
6. Miroshnichenko L.I. Fizika Solntsa i solnechno-zemnykh svyazey / pod red. M.I. Pansyuka. – M. : NIIFYAF im. D.V. Skobel'tsina, 2011. – 174 s.
7. Lytova, M.F., Ostryakov, V.M. Fizika kosmicheskoy plazmy. Uskorenie tyazhelykh ionov : uchebnoe posobie. – SPb. : SPbGPU, 2006. – 107 s.
8. Bezborodnykh, I.P., Tyutnev, A.P., Semenov, V.T. Radiatsionnye efekty v kosmose // Radiatsiya v okolozemnom kosmicheskom prostranstve. – M. : VNIIEEM, 2014. – Ch. 1. – 107 s.