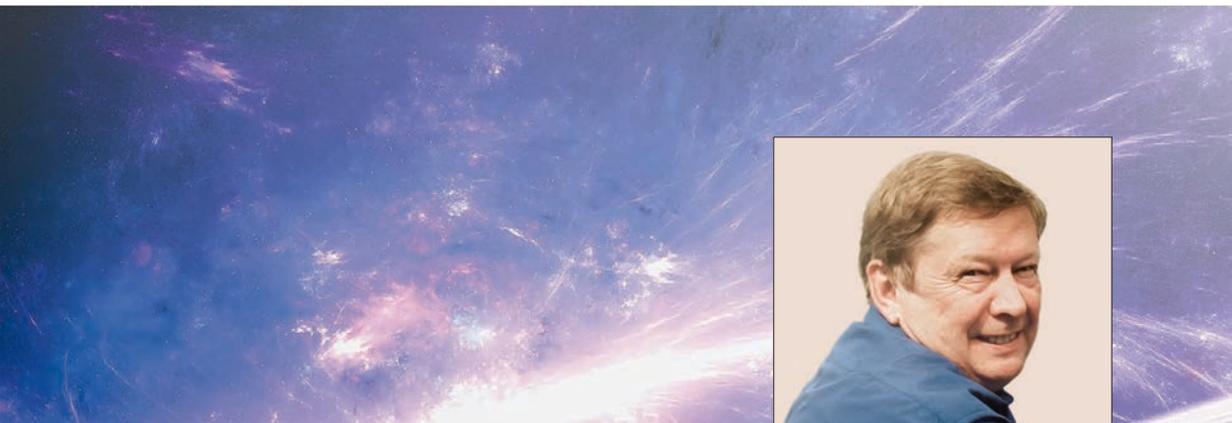


ТЯЖЕЛЫЕ ЯДРА КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИИ И ПЛАНИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ¹



М.И. ПАНАСЮК,

*доктор физико-математических наук
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
МГУ им. М.В. Ломоносова*

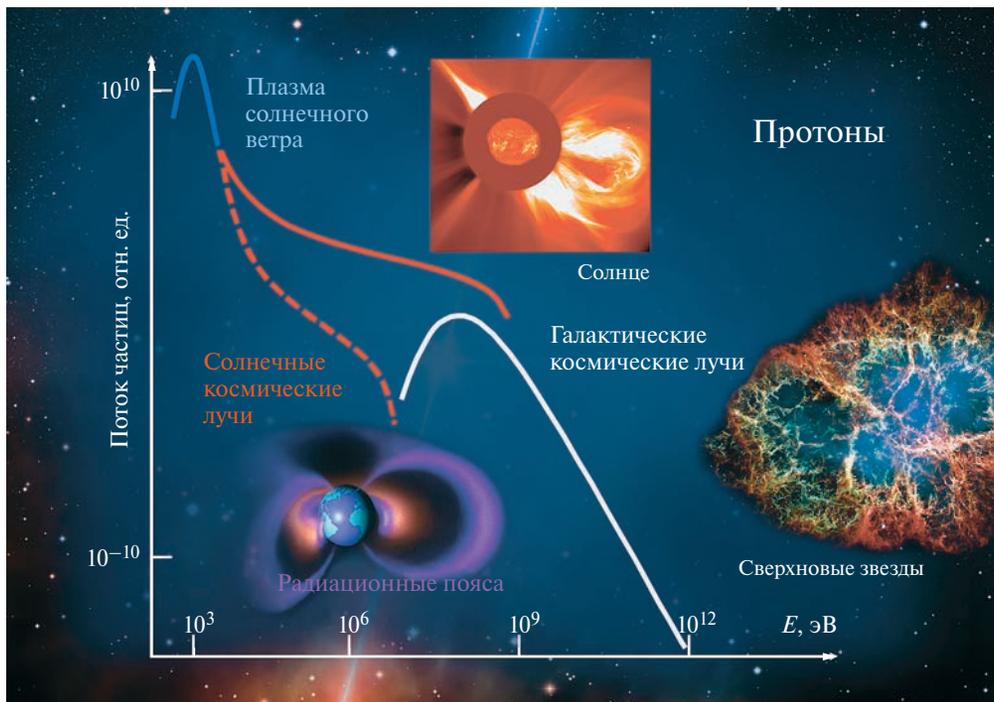
DOI: 10.7868/50044394819030010

Радикация в околоземном космическом пространстве сложна по своему составу, а диапазон ее энергий широк. Среди основных источников заряженных частиц – галактические космические лучи (**ГКЛ**), солнечные космические лучи (**СКЛ**) и захваченные в магнитное поле Земли частицы радиационных поясов (**РП**). Наиболее энергичные частицы – ГКЛ. Максимум их потока приходится на энергию около 400 МэВ/нуклон². Они

более “свободно” проникают вглубь магнитного поля – в отличие от СКЛ, средняя энергия которых значительно меньше. Однако во время наиболее мощных солнечных вспышек максимальная энергия протонов СКЛ может достигать довольно больших значений – таких, как 10–30 ГэВ, что даже значительно больше энергий протонов ГКЛ в максимуме их потока. Но, в отличие от ГКЛ, их потоки – спорадические. Энергия ионов в радиационных поясах Земли находится в широком диапазоне – от сотен кэВ до 1 ГэВ (для протонов). Что касается состава ионов в РП, то к настоящему времени экспериментально подтверждено существование элементов – вплоть до железа. Есть еще другие компоненты радиации на

¹ Окончание (начало статьи опубликовано в *ЗиВ*, 2019, № 2, с. 4–14).

² Электронвольт (эВ) – единица измерения энергии. 1 килоэлектронвольт (кэВ) = 10^3 эВ, 1 мегаэлектронвольт (МэВ) = 10^6 эВ, 1 гигаэлектронвольт (ГэВ) = 10^9 эВ.

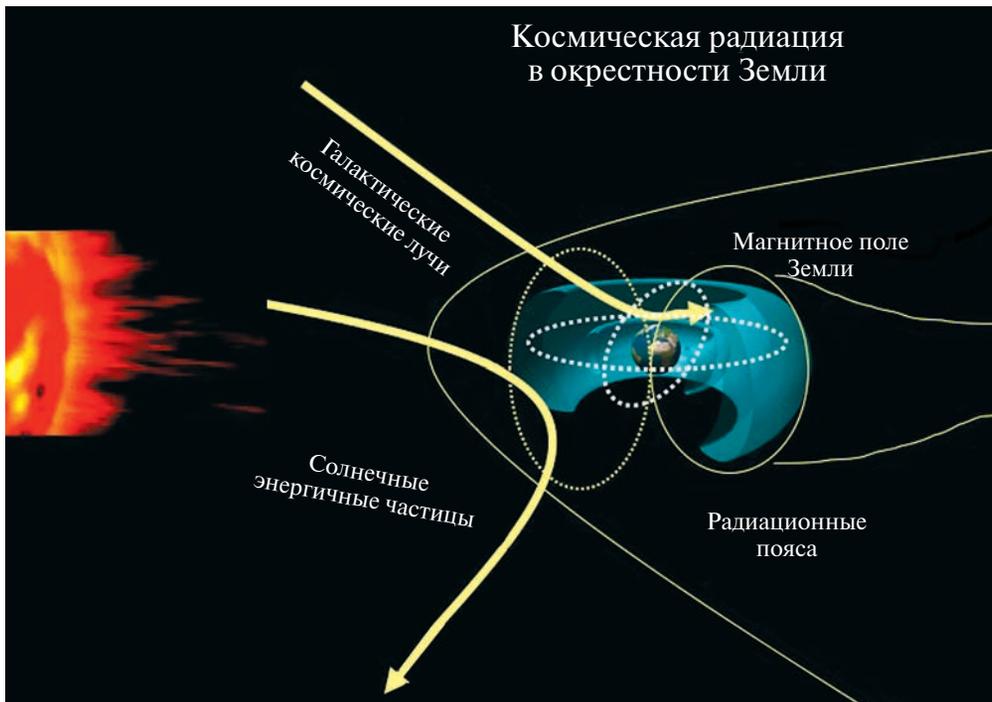


Примерные энергетические спектры протонов солнечной плазмы, солнечных и галактических космических лучей; показан также интервал величин энергий протонов, “захваченных” в радиационных поясах Земли. Для солнечных космических лучей представлены спектры, характерные для спокойного Солнца и во время вспышек

малых высотах. В первую очередь это – альбедные частицы – электроны и протоны, возникающие в результате распада нейтронов (продуктов ядерных реакций протонов ГКЛ с атомами атмосферы) и вылетающие обратно, в космическое пространство, где захватываются в магнитную ловушку, а также квазизахваченные частицы в магнитном поле (то есть совершающие не более одного оборота вокруг Земли), “высыпающиеся” из РП. Рассмотрим более детально эти основные природные компоненты космической радиации в плане присутствия в них тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).

ТЯЖЕЛЫЕ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ

Радиационные пояса Земли – потоки захваченных в магнитном поле Земли заряженных частиц различного происхождения. Здесь “живут” частицы солнечного происхождения – ускоренная плазма солнечного ветра и СКЛ, частично проникающие вглубь магнитного поля и захваченные им. ГКЛ, вследствие значительной величины их импульса, не могут быть захвачены магнитным полем Земли, но продукты их взаимодействия с атмосферой – нейтроны, распадаясь, создают протоны и электроны, которые заполняют внутреннюю область радиационных поясов Земли. И наконец, частицы из ионосферы Земли – вполне реальный источник электронов и протонов, а также ионов кислорода в радиационных поясах.

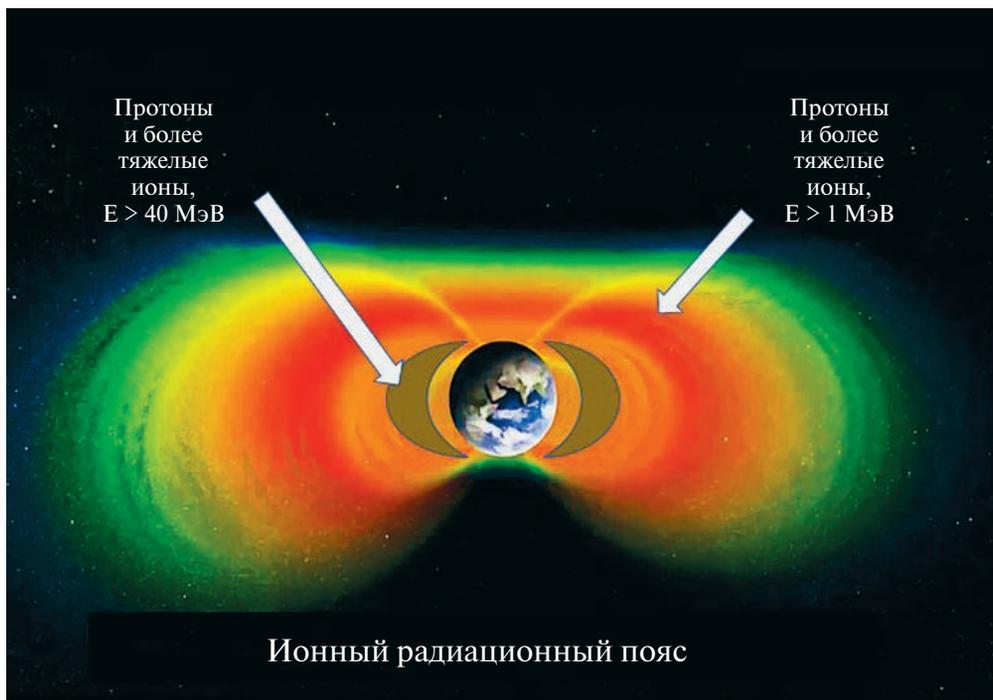


В рамках предлагаемой статьи интерес для нас представляют тяжелые заряженные частицы, обладающие достаточной линейной передачей энергии (ЛПЭ – удельные потери энергии частицей на единицу длины ее пробега в веществе; именно они способны вызвать сбои в работе электроники космических аппаратов и нарушения в биологических структурах). Область локализации таких частиц – во внутренней зоне радиационных поясов Земли (см. рисунок). Известно, что основной источник частиц радиационных поясов находится вблизи их внешней границы, в районе орбит геостационарных космических аппаратов, на расстояниях 6–7 радиусов Земли (R_3). Частицы от различных источников (солнечного ветра, ионосферы) посредством механизма переноса – радиальной диффузии – перемещаются внутрь РП под действием флуктуаций электрических и магнитных полей и одновременно ускоряются,

Космические лучи солнечного и галактического происхождения в околоземном космическом пространстве. Эти частицы, наряду с радиационными поясами Земли, представляют основную радиационную опасность для космических полетов

дрейфуя поперек магнитных силовых линий. В результате на внутренних магнитных оболочках в плоскости экватора, на расстояниях менее нескольких тысяч километров от поверхности Земли, происходит формирование очень энергичного ионного пояса, состоящего из тех частиц, которые присутствуют в солнечном ветре и в ионосфере. Энергия захваченных протонов в этой области может достигать ~1 ГэВ, то есть в этой области она сопоставима с энергией ГКЛ.

Тем не менее радиальная диффузия не может быть преобладающим механизмом формирования протонов и ТЗЧ во внутренней зоне

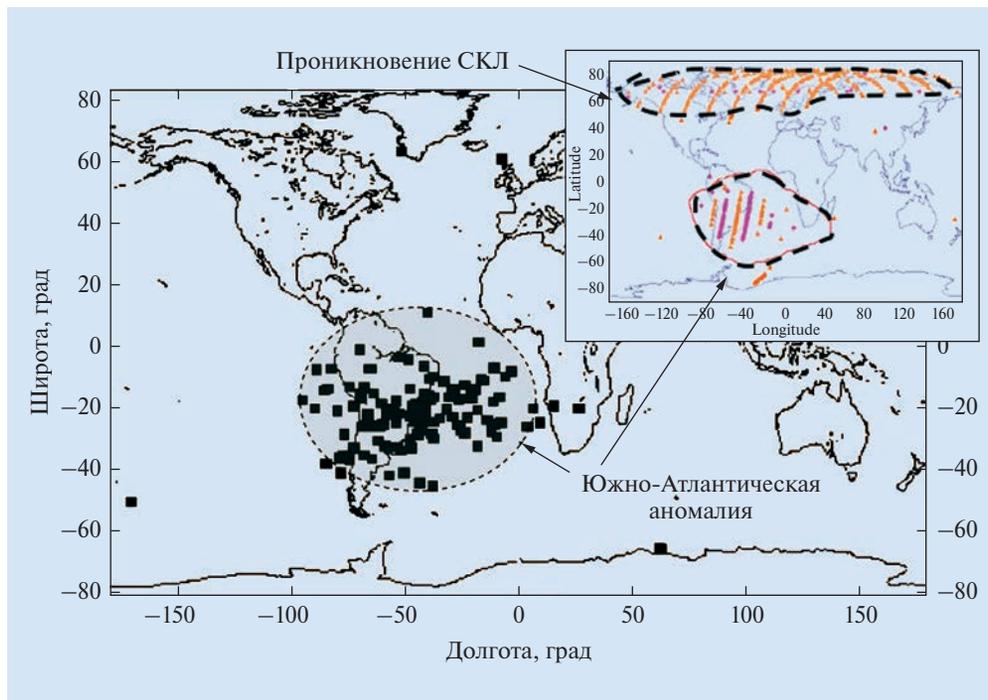


Радиационные пояса ионов. Протоны и более тяжелые частицы высоких энергий (более десятков и сотен МэВ) существуют только во внутренней зоне, около Земли

радиационных поясов – прежде всего из-за малого “времени жизни” частиц в этой области: они теряют свою энергию вследствие ионизационных потерь на остатках атмосферы значительно быстрее, чем происходит пополнение этой области дрейфующими внутрь “свежими частицами”. Так называемый “альбедный” механизм распада нейтронов – возникающих при взаимодействии ГКЛ с атмосферой, часть которых вылетает из атмосферы в космическое пространство, – является дополнительным и мощным источником протонов в области высоких энергий в этой области пространства. Более тяжелые частицы возникают здесь как продукты ядерных реакций – в результате взаимодействия первичных протонов ГКЛ и протонов внутренней зоны радиационных

поясов с атомами атмосферы Земли. Однако следует констатировать, что наши знания об ионном составе внутренней зоны РП крайне ограничены, что связано с экспериментальными трудностями проведения здесь измерений ТЗЧ на фоне очень интенсивных потоков высокоэнергичных протонов (с энергиями более десятков МэВ). Тем не менее существуют модельные расчеты формирования потоков ядер в радиационных поясах Земли, которые доказывают существование захваченных ТЗЧ в этой области.

Из рассмотренной структуры радиационных поясов очевидно, что источником сбоев и нарушений в них являются ТЗЧ во внутренних областях РП. Отсюда вывод: орбиты высотой до нескольких тысяч километров (и ниже)



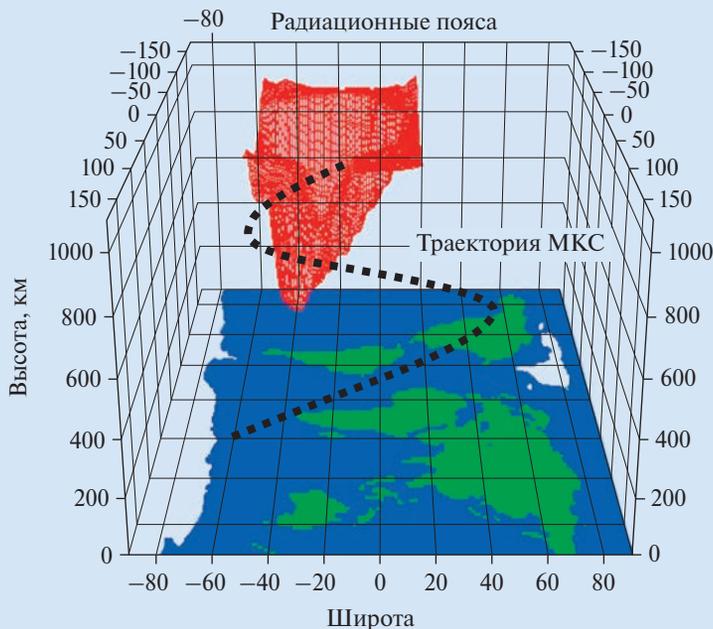
Карта пространственного распределения одиночных сбоев в микросхемах по измерениям, выполненным на высоте около 500 км. Большая часть сбоев происходит в районе магнитной аномалии – в районе Южной Атлантики. Именно здесь радиационные пояса “провисают” над Землей. Во время солнечных вспышек частицы СКЛ проникают в авроральные зоны, где и вызывают одиночные сбои в работе электроники КА (показано во врезке) (Bashkirov V., Kuznetsov N., Nymmik R. An analysis of the SEU rate of microcircuits exposed by the various components of space radiation // Radiation Measurements, 1999. V. 3. P. 427–433)

наиболее опасны для космических аппаратов с точки зрения проявления эффектов от ТЗЧ. При этом следует отметить, что эта область радиационно опасна как вследствие дозовых эффектов от высокоинтенсивных потоков протонного пояса, так и из-за последствий, вызванных генерацией одиночных сбоев в электронике и воздействием на биообъекты от малоинтенсивной тяжелой ядерной компоненты радиационных поясов.

При этом высокая зависимость частоты сбоев характеризуется ярко выраженной ограниченной пространственной структурой: с уменьшением высоты орбиты КА сбои начинают

локализоваться в пределах сравнительно узкой географической зоны над Южной Атлантикой и – частично – над Южным континентом Америки (Южно-Атлантической магнитной аномалией, ЮАА), областью локального ослабления магнитного поля Земли. Для низкоорбитальных КА, например, для Международной космической станции (МКС), высота орбиты которой – примерно 400 км, этот участок ее траектории наиболее радиационно опасен. Нетрудно представить, что электроника любого КА, летающего на высотах в несколько сотен километров и ниже, должна “чувствовать” эти частицы именно в указанной зоне.

Южно-Атлантическая аномалия



Радиационные пояса Земли над Южной Атлантикой. Именно здесь, на высоте около 400 км, МКС пересекает область повышенного уровня радиации

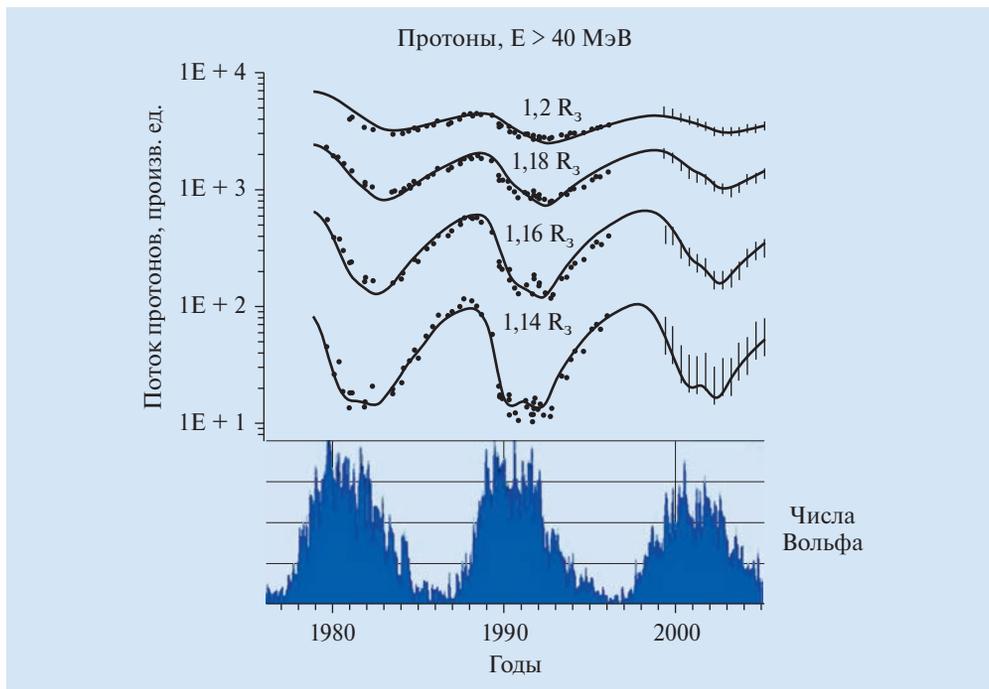
Так оно и есть: наибольшая частота сбоев наблюдается как раз в районе ЮАА.

По свидетельству многих космонавтов, именно в этой области частота появления фосфенов в их глазах превышает их наблюдаемое количество на других участках орбиты пилотируемой орбитальной станции.

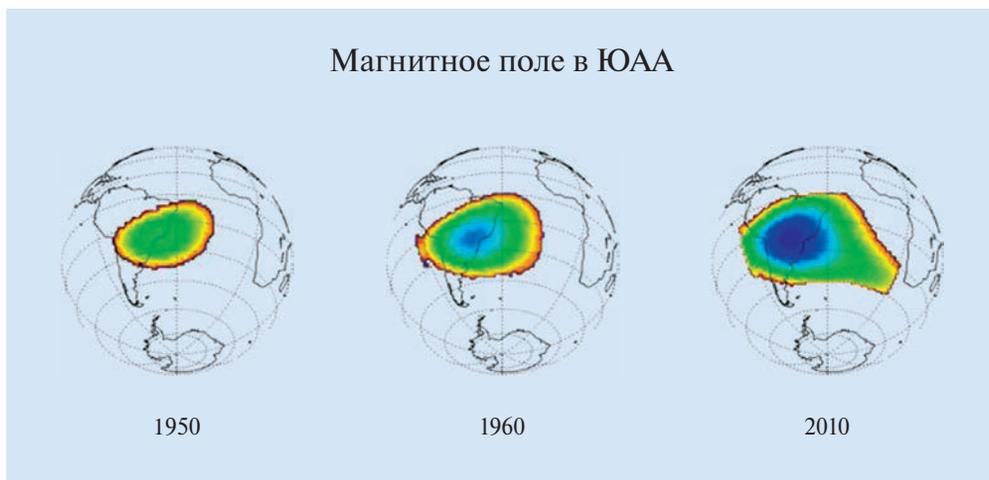
Очевидно, что источником сбоев в электронике (и фосфенов) являются высокоинтенсивные потоки протонов и более тяжелые частицы, существующие в ЮАА. Что касается протонов, то такие явления сбоев под их воздействием должны возникать как следствие взаимодействия продуктов ядерных реакций (с участием протонов) с материалом КА, расположенным вокруг микросхем.

В связи с этим отметим, что существуют характерные для этой области пространственно-временные вариации потоков протонов ЮАА, которые связаны как с солнечным циклом, так и с вековыми (долговременными) вариациями главного магнитного поля Земли. Очевидно, такие вариации следует учитывать при планировании будущих космических миссий с целью снижения радиационного риска.

Солнечно-циклические вариации потоков высокоэнергичных протонов (очевидно, и более тяжелых частиц) на высотах <1000 км обусловлены изменением ионизационных потерь частиц вследствие нагрева и охлаждения верхней атмосферы в течение 11-летнего цикла солнечной активности. Во время солнечного минимума

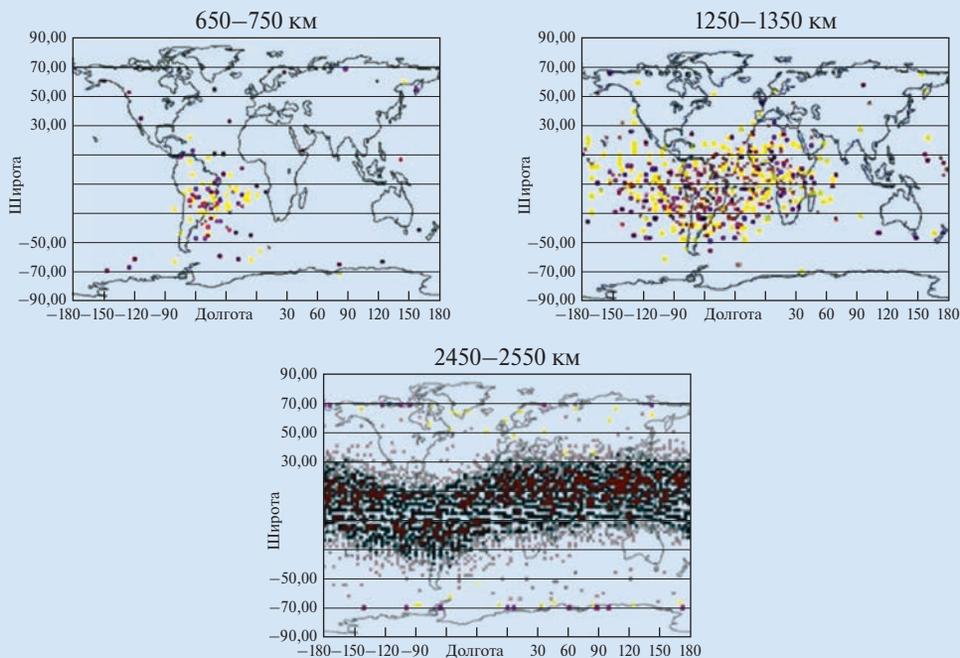


Солнечно-циклические вариации потоков протонов на малых высотах (расстояние в экваториальной плоскости указано в радиусах Земли (R_3), обусловленные изменением плотности атмосферы (Kuznetsov N.V., Nikolaeva N.I., Panasyuk M.I. Variation of the trapped proton flux in the inner radiation belt of the earth as a function of solar activity // Cosmic Research, 2010. V. 48. № 1. P. 80–85)



Медленные, "вековые" вариации магнитного поля Земли: с течением времени поле в ЮАА ослабевает и расширяется, двигаясь в северо-западном направлении (Башкиров В.Ф. Динамические модели захваченной радиации на низких высотах в магнитосфере // Космические исследования, 1993. Т. 36. № 5. С. 359–369)

Одинокые сбои на малых высотах



Пространственное распределение сбоев в микросхемах с изменением высоты орбиты (данные со спутника APEX; Coka T., Matsumoto H., Nemoto N. SEE Flight Data from Japanese Satellites // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1998. V. 45. № 6. P. 2771–2778)

потоки возрастают, что должно приводить к повышению частоты сбоев. Обратная картина будет наблюдаться в солнечном максимуме: в это время плотность атмосферы на больших высотах увеличивается, вызывая рост потерь частиц и, соответственно, уменьшая потоки захваченных частиц (в том числе, конечно, и ТЗЧ).

Поэтому можно ожидать, что в максимуме цикла солнечной активности частота сбоев в работе электроники в районе ЮАА и количества фосфенов в глазах космонавтов должна быть меньше.

Топология ЮАА меняется и вследствие существования вариаций главного магнитного поля Земли. Как пока-

зывают модельные расчеты, на шкале времени в десятки лет и более область ЮАА должна будет расширяться и смещаться к западу. И этому уже есть экспериментальные подтверждения. Таким образом, можно ожидать, что в перспективе ЮАА будет представлять большую радиационную опасность, чем в настоящее время, в том числе и в плане генерации одиночных сбоев от ТЗЧ.

С увеличением высоты орбиты КА пространственная картина расширяется: «географическое» распределение частоты сбоев в работе электроники приобретает пространственные очертания, характерные для распределений ТЗЧ внутренней зоны РП.

ТЯЖЕЛЫЕ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

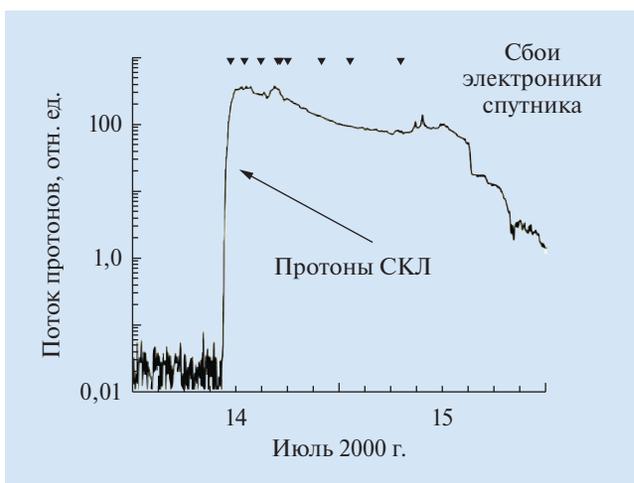
Одиночные сбои в работе электроники происходят и при мощных солнечных вспышках. Протоны и тяжелые ядра в составе СКЛ могут вызвать в чипах такие же одиночные сбои, как и протоны, и ТЗЧ в РП. И они, действительно, наблюдаются. Так, например, во время мощной солнечной бури 14 июля 2000 г. (она произошла 14 июля, в день взятия Бастилии, поэтому ей присвоили имя “День Бастилии”) на магнитосферу Земли “обрушились” интенсивные потоки солнечных протонов, вызвавших сбои в работе спутников. Как результат – появились сбои в работе электроники космического аппарата. Какие частицы в составе СКЛ их вызвали?

Солнечные космические лучи генерируются в активных областях Солнца посредством, к примеру, механизма пересоединения – быстрого изменения конфигурации магнитного поля во вспышечной области или вследствие стохастического ускорения на фронтах ударных волн, распространяющихся в межпланетном пространстве (так

называемых корональных инжекций масс). Помимо протонов в составе СКЛ присутствуют и более тяжелые ионы. В данном контексте нас интересуют прежде всего ТЗЧ с энергиями в десятки и сотни МэВ/нуклон – наиболее вероятные источники сбоев микросхем и нарушений в биологических объектах на клеточном уровне. Есть ли такие частицы в СКЛ? Да, есть. И об этом убедительно свидетельствуют эксперименты. Но и здесь не все очевидно.

Так, для ряда солнечных событий обогащение состава СКЛ тяжелыми ядрами группы Fe (по сравнению с другими, более легкими), действительно, наблюдается при достаточно больших энергиях (>30 МэВ/нуклон). Однако такое обогащение происходит не всегда: оно было замечено только для периода 1997–2005 гг. и не позже. Но нас интересуют ТЗЧ в СКЛ достаточно высоких энергий, а такие частицы генерируются только во время очень мощных солнечных вспышек. В качестве примера можно привести результат, “обобщающий” энергетические спектры ряда мощных возрастных потоков СКЛ. Из него следует совершенно очевидное указание на возрастание обогащения тяжелыми ионами состава СКЛ с ростом полной

График изменений потоков СКЛ и сбоев в работе электроники КА на геостационарной орбите. Во время мощного возрастания потока частиц СКЛ 14 июля 2000 г. (в День Бастилии) начались сбои (их временная “привязка” отмечена треугольниками) в работе бортовой электроники. (Tylka A., Dietrich W.F., Voberg P.R. Solar Events Upsets caused by heavy solar particles // IEEE, Trans. Nucl. Sci., 1996. V. 43. P. 2758–2766)



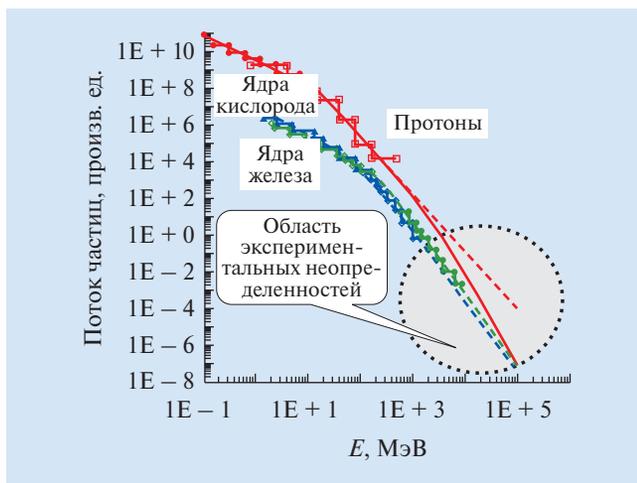
энергии, при условии аппроксимации протонного спектра в сторону больших энергий с показателем наклона, характерным для более низкоэнергичных частиц.

Однако важно подчеркнуть, что область энергий более сотен МэВ – пока “белое пятно” для прямых наблюдений протонов на КА. Этот энергетический диапазон “перекрывается” измерениями только наземных нейтронных мониторов. Результаты именно этих экспериментов используются для оценки максимальной энергии инжектируемых во время вспышек солнечных частиц. Но следует принять во внимание, что данные нейтронных мониторов не могут “дать” независимые от модельных представлений оценки относительного содержания ионов в этом диапазоне энергий. Поэтому следует констатировать, что в экспериментальном плане наши знания о ядерном составе СКЛ для самых больших их энергий на сегодня весьма ограничены.

Если же обратиться к теории генерации СКЛ, то, согласно стохастическому механизму ускорения, их максимальная энергия, генерируемая во время активных процессов (E_{\max}), должна быть пропорциональна заряду ядер Z ,

то есть относительное содержание тяжелых ионов по мере приближения к предельной энергии ускорения должно увеличиваться. В этом диапазоне энергий наблюдается очевидное обогащение состава ГКЛ тяжелыми ядрами.

Следует отметить, что, согласно данным, полученным с помощью мюонных подземных телескопов, максимальная энергия ускоренных протонов во время GLE (Ground Level Enhancement – возрастание потока солнечных частиц, наблюдаемое на уровне Земли) может достигать 10–30 ГэВ. Если это так – то можно ожидать, что при генерации самых мощных солнечных событий (типа GLE) поток тяжелых ионов в составе СКЛ на “хвосте” энергетического распределения может превысить (при равных энергиях) протонный. В этом случае значения потоков ТЗЧ, используемых в современных моделях СКЛ в качестве основы для расчета сбоев, следует считать несоответствующими фактическим космическим условиям. Этот вывод относится к энергиям более сотен МэВ. Ну а если это так, то и для электронных чипов, и для биологических объектов в космосе мощные события СКЛ должны представлять гораздо большую опасность в плане инициирования сбоев и нарушений на



Спектры ядер солнечных космических лучей. Показаны усредненные по нескольким событиям спектры протонов (p) и более тяжелых элементов (O и Fe) в СКЛ. Интерполяция спектров к большим энергиям (пунктирные линии) демонстрирует обогащение тяжелыми элементами состава СКЛ (Ныммик Р.А. К вопросу об особенностях химического состава солнечных космических лучей // Космические исследования, 2011. Т. 49. № 2. С. 1–7)

клеточном уровне, чем менее мощные события СКЛ.

Немного успокаивает тот факт, что мощных событий на Солнце значительно меньше, чем слабых... Но вероятность генерации их все же отлична от нуля, и не учитывать этот факт при планировании долговременных космических миссий нельзя.

Рассмотрим некоторые особенности характеристик наиболее энергичных в нашей Солнечной системе частиц – ГКЛ.

ТЯЖЕЛЫЕ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

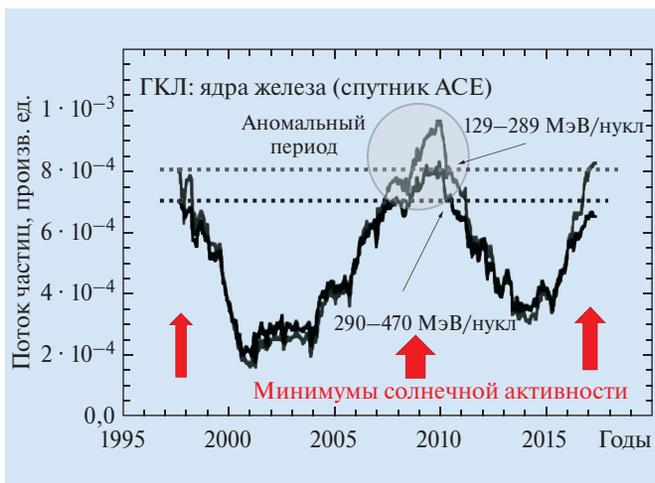
ТЗЧ в составе ГКЛ так же относительно мало, как и в СКЛ. Максимум интенсивности этих частиц приходится на диапазон энергий от 300 до 600 МэВ/нуклон. Как отмечалось выше, именно эти частицы и представляют опасность: могут возникать сбои в работе электроники и повреждения в биологических структурах.

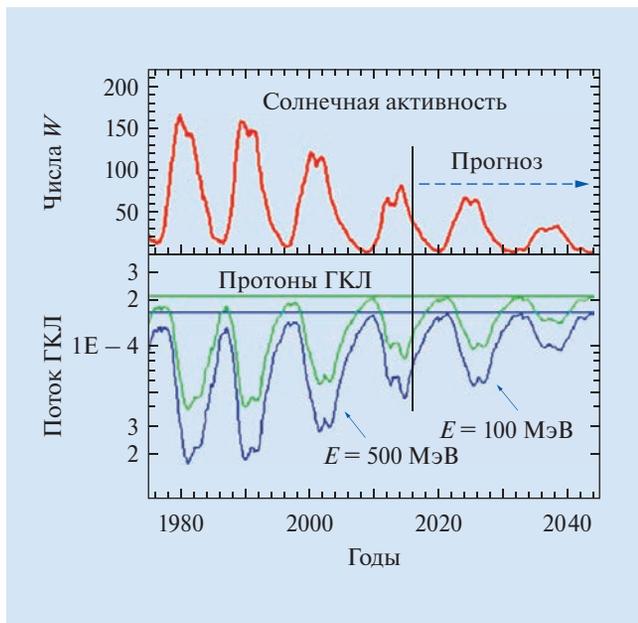
Важные особенности ГКЛ – их постоянное присутствие в космическом пространстве и характерная модуляция потока в течение солнечного

цикла: изменения солнечной активности сопровождаются синхронными – но в противофазе – изменениями потоков ГКЛ. Для расчетов частоты сбоев в микросхемах применяются модели потоков ГКЛ, описывающие временные характеристики их изменения, в зависимости от параметра солнечной активности – чисел Вольфа. Прямым доказательством воздействия ТЗЧ ГКЛ на микросхемы КА служит наблюдаемая в эксперименте корреляция между частотой сбоев и долговременной солнечно-циклической модуляцией ГКЛ. Очевидно, что ТЗЧ ГКЛ представляют особую опасность для длительных межпланетных миссий в силу именно их постоянного присутствия в космосе. Использование моделей модуляции ГКЛ для расчета сбоев позволяет выбрать оптимальный временной интервал для осуществления космических миссий. Такие модели созданы и применяются для инженерных расчетов прогноза сбоев в работе электроники на КА.

Однако здесь следует вспомнить об аномалии в проявлении солнечной активности – затянувшегося минимума солнечного цикла в 2007–2012 гг., который привел к возрастанию потока

График изменения потоков ядер железа ГКЛ за 20 лет их наблюдений на космическом аппарате ACE (США). Так же, как и для протонов ГКЛ, аномально высокие потоки ядер железа наблюдались в период с 2009 по 2011 гг. Пунктирами показаны средние уровни потоков ядер Fe с данными энергиями. (Полученные данные со спутника ACE: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/OSS-reports/ACE-OSS-Cumulative.pdf>)





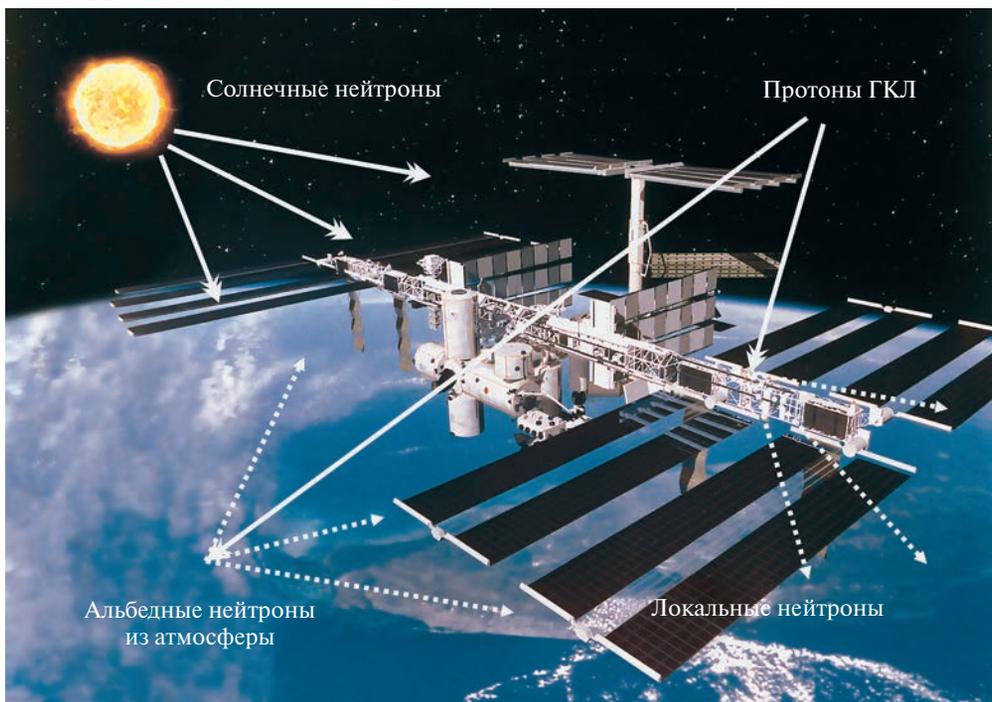
Прогноз изменения потоков ГКЛ на основе одной из моделей солнечной активности, которая предсказывает ее снижение в будущем. Согласно этому сценарию, следует ожидать увеличения потока ГКЛ, что приведет и к возрастанию радиационного риска при длительных полетах. Две горизонтальные линии демонстрируют максимальные потоки ядер железа при числе Вольфа $W = 0$. (Kuznetsov N., Popova H., Panasyuk M. Empirical model of long-time variations of galactic cosmic ray particle fluxes // J. Geophys. Res: Space Physics, 2017. V. 2. P. 1472)

протонов ГКЛ. Аналогичная ситуация наблюдается и для ядер железа. Это – относительно короткий промежуток времени, но мы, земляне, не гарантированы от того, что он не повторится. Этот пример с определенностью указывает на то, что корректная оценка эффектов воздействия ТЗЧ сталкивается с трудностями прогностического характера (которые не учтены в существующих моделях). Поэтому их следует корректировать.

Что будет с потоками ТЗЧ ГКЛ в будущем? Этого не знает никто, но можно сделать оценки наихудшего сценария на основе моделей солнечной активности. Одна из таких моделей приведена на рисунке. Ее можно считать близкой к экстремальной, так как она демонстрирует значительное уменьшение активности Солнца в ближайшие десятилетия. Если это так и будет, то в ближайшем будущем следует ожидать повышения потока ГКЛ и, следовательно, увеличения радиационного риска длительных космических полетов.

ВТОРИЧНЫЕ ТЯЖЕЛЫЕ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

Следует заметить, что не только протоны и более тяжелые ядра могут быть источниками сбоев электроники и нарушений в биоструктурах на низких орбитах в околоземном пространстве (в частности, на орбите МКС). Как отмечалось выше, ТЗЧ могут возникать в результате ядерных реакций в веществе, окружающем микросхему. Вторичные нейтроны, возникающие при взаимодействии первичных ГКЛ с окружающим веществом, могут создавать тяжелые ядра, которые, в свою очередь, и будут источниками воздействия на электронику и биоструктуры. В действительности по факту ситуация с нейтронным полем еще сложнее. Источниками нейтронов в окружении КА могут стать и ГКЛ, взаимодействующие с атмосферой Земли: они генерируют потоки альбедных нейтронов,



Формирование вблизи КА нейтронного поля, состоящего из нескольких компонентов: прямых (солнечных нейтронов); полей нейтронов, возникающих в результате взаимодействия протонов ГКЛ с поверхностью КА (локальные нейтроны); а также нейтронов, рожденных в результате взаимодействия ГКЛ с атомами атмосферы (альбедные частицы)

приходящих от Земли, а также солнечные нейтроны – во время очень мощных событий на нашем светиле.

Для межпланетных миссий роль локальных нейтронов становится еще более существенной: в течение длительного полета КА подвергается непрерывной бомбардировке частицами ГКЛ. Нейтронный фон представляет собой значительную часть накопленной радиационной дозы, поэтому она становится довольно существенной при полетах большой продолжительности. Ее величина (помимо времени полета) зависит от массы КА, а так как ожидаемая масса пилотируемого КА (к примеру, для марсианских миссий) составит десятки тонн – поток вторичных нейтронов ожидается весьма

большим. Следовательно, и частота сбоев от вторичных ТЗЧ должна будет увеличиться.

"ВТОРИЧНЫЕ" ТЯЖЕЛЫЕ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ И МАРСА

Для посадочных модулей и долговременных станций на поверхности Луны и Марса в расчетах нейтронного фона следует учитывать как свойства самого грунта, так и наличие (отсутствие) атмосферы. Как отличаются энергии вторичных нейтронов на Марсе и на Луне?

Марс (так же, как и Земля) имеет атмосферу, но слабую. Именно наличие атмосферы и дает возможность

полагать, что на Марсе нейтронный фон будет представлен более энергичными частицами – вплоть до 1 ГэВ (по сравнению с Луной); вследствие роста вероятности ядерных реакций с увеличением энергии вторичных нейтронов, генерируемых потоками ГКЛ, можно ожидать более эффективного – нежелательного – воздействия вторичных ТЗЧ. Это чрезвычайно важно для оценки частоты сбоев в работе электроники и эффективности воздействия на биологические структуры.

Следует подчеркнуть, что вторичные нейтроны – не единственный источник радиационной опасности в плане возникновения сбоев электроники и повреждений биологических структур. Выше отмечалось, что локальные повреждения могут создаваться и протонами: последние могут генерироваться при взаимодействии протонов ГКЛ с лунным и марсианским грунтом, причем с ростом толщины грунта поток вторичных частиц – нейтронов – должен возрастать до определенной глубины, в то время как поток первичных протонов ГКЛ – уменьшаться. Отсюда следует вывод, что при создании как “поверхностных”, так и “подповерхностных” станций обитания человека на Луне и Марсе требуется тщательно рассчитывать радиационные поля различной природы.

Источником вторичных частиц на Луне и Марсе являются не только ГКЛ. СКЛ – очевидный источник вторичной радиации для этих объектов Солнечной системы. Луна не имеет магнитного поля, и, соответственно, ее поверхность подвергается прямому воздействию СКЛ. Марс имеет слабое магнитное поле, которое не может эффективно “отклонить” потоки солнечных частиц. Следовательно,

СКЛ – дополнительный источник радиационного риска при осуществлении дальних космических миссий.

ПРОБЛЕМА ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПЛАНИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

Необходимо сделать очевидный вывод: в настоящее время любые оценки одиночных сбоев, полученные либо в ходе экспериментов на ускорительных и других (например, на лазерных или с использованием источников радиоактивных излучений) установках и тем более – расчетным путем носят приблизительный, оценочный характер – в силу прежде всего ограниченности наших знаний о механизмах самого воздействия частиц на вещество.

Проблема усугубляется еще и тем, что космический аппарат подвергается облучению космической радиации, которая по своей природе многокомпонентна, причем каждая составляющая имеет свои, особенные простран-

венно-энергетические, массовые и временные характеристики, которые невозможно воспроизвести в условиях наземного эксперимента. Возникает вопрос: как минимизировать радиационный риск, обусловленный ТЗЧ? Можно рассмотреть

следующие рекомендации, которые, конечно, необходимо уточнять по мере накопления наших знаний.

Для того чтобы минимизировать частоту сбоев в работе электроники и тем самым снизить радиационный риск, скорее всего, целесообразно проводить радиационное тестирование на стадии разработки микросхем, а не испытания готовых изделий. Применение

Вторичные нейтроны – не единственный источник радиационной опасности в плане возникновения сбоев электроники и повреждений биологических структур

специальных конструкционных материалов, схем резервирования и программного обеспечения вместе с радиационным тестированием на стадии разработки – конкретный путь к минимизации сбоев и снижению радиационного риска для космической электроники. Сложный состав космической радиации, разнообразие ее энергетических характеристик и временных вариаций свидетельствует о необходимости проведения натурных испытаний электроники в условиях космического полета для адекватной оценки радиационных рисков – в дополнение к наземным ее отработкам.

То, что можно сделать для электроники – по естественным причинам невозможно для биологических объектов, включая человека. Вряд ли возможно скорректировать (изменить структуру, скажем, ДНК), сделав ее нечувствительной к ТЗЧ. Здесь возможен только путь исследования механизмов воздействия ТЗЧ на биологические структуры на клеточном уровне и, как следствие, оценка радиационных рисков. Поэтому оптимальный и наиболее эффективный способ минимизации риска от ТЗЧ – оптимизация планирования космических миссий. Она должна включать следующие рекомендации:

- запрет (или ограничение) проведения ответственных операций на борту КА во время его попадания в наиболее интенсивное поле ТЗЧ (например, при пролете над ЮАА);

- корректировка орбиты, выход человека в космос и другие подобные работы в таких районах должны быть исключены или ограничены по времени. То же относится и к периодам мощных солнечных вспышек;

- для околоземных орбит – там, где наблюдается проникновение мощных потоков СКЛ (это происходит в основном в полярных и авроральных областях на высоких широтах) – ответственные операции также должны быть исключены;

- для человека, работающего в космосе, должны быть установлены максимальные временные пределы космического полета. Они должны быть разные – для околоземных орбит, для межпланетных перелетов, для нахождения на поверхности Луны или Марса, а также для разных периодов солнечной активности.

Можно сделать вывод о том, что именно время (*продолжительность миссии*), по сути, является наиболее эффективной “защитой” для биологических объектов от воздействия ТЗЧ в условиях космического полета.