

Ионизирующее излучение космического пространства и конструирование радиационно-стойких приборов для систем управления космическими аппаратами.

Часть 1

к.т.н. Сергей Кравчук, д.т.н. Владимир Соколов,
к.т.н. Оксана Вовк, к.т.н. Михаил Марченко,
к.т.н. Дмитрий Шеломанов (МОКБ «Марс» – филиал ФГУП «ВНИИА»)

Космическое пространство (КП) является естественной радиационной средой, в которой действуют: галактическое излучение, излучение Солнца, особенно в периоды солнечной активности. Магнитное поле Земли, захватывая заряженные частицы, образует естественные радиационные пояса Земли и искусственные радиационные пояса Земли, оказывающие значительное влияние на аппаратуру и человека. При полётах к некоторым планетам космические аппараты (КА) могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений этих планет.

Общеизвестно, что основные необратимые дефекты в приборах создают нейтроны из-за своей высокой проникающей способности, результатом чего является смещение атомов из узлов кристаллической решетки и образование устойчивых радиационных дефектов. Протонное излучение также приводит к образованию необратимых дефектов кристаллической структуры. Заряженные частицы, протоны и электроны, помимо этого, создают эффекты ионизации, которые, как правило, являются обратимыми, если только ионизационные токи не вызывают пробой [1].

При определении уровня воздействия ионизирующих излучений КП необхо-

димо принимать во внимание влияние на аппаратуру экранов, корпусов, которые, в свою очередь, не только ослабляют воздействие излучений, но и могут являться источниками вторичного излучения в виде нейтронов, гамма-квантов, протонов и других тяжёлых частиц [1].

Для обеспечения длительного функционирования в условиях КП аппаратура проектируется таким образом, чтобы минимизировать нарушения работоспособности из-за действия ИИ КП.

Природа происхождения и характеристики ионизирующих излучений космического пространства (ИИ) в настоящее время достаточно хорошо изучены, а различные тонкости этой проблем

рассмотрены, в частности, в [2, 3]. Приведём общие сведения об ионизирующем излучении КП, которое оказывает существенное влияние на вопросы проектирования аппаратуры КА.

Галактические космические лучи (ГКЛ) образуются вне Солнечной системы, воздействуя на КА в межзвёздном и околоземном пространстве за счёт притяжения магнитного поля Земли. ГКЛ состоят из протонов (приблизительно 85%), ядер гелия (10%), более тяжёлых ядер (1%), электронов (1%), а также рентгеновского и гамма-излучений [4, 5]. Частицы ГКЛ обладают очень высокой энергией – от 10^8 до 10^{20} эВ. Плотность потока частиц подвержена относительно небольшим колебаниям, обусловленным вариациями межпланетного магнитного поля, и составляет около 5 част/(см²·с).

Из-за низкой плотности потока ГКЛ доза, которую может получить аппаратура за год от воздействия лучей ГКЛ, составляет 1...50 рад [1]. Однако вспышки многих звёзд создают мощное ионизационное воздействие.

Солнечные космические лучи (СКЛ) связаны с хромосферными процессами на Солнце, которые имеют нерегулярный характер, проявляясь в период повышенной солнечной активности (до 10 вспышек, длящихся несколько суток в год). Плотность потока частиц может составлять 10^6 част/(см²·с) при энергии до 10^7 эВ. Их воздействие может вызывать деградацию отдельных приборов, в том числе солнечных элементов. Интенсивность солнечного излучения изменяется от вспышки к вспышке, годовые дозы радиации могут составлять 10^3 ... 10^4 рад на поверхности космического аппарата [5]. Вероятность появления солнечных протонов на траектории Земли вне магнитосферы в период максимумов

Таблица 1. Усреднённые параметры потоков частиц космических лучей и радиационных поясов Земли

Вид излучения	Состав излучения	Энергия частиц, эВ	Плотность потока, част/(см ² ·с)	Средняя доза облучения КА на его поверхности за год, рад	
Галактические космические лучи (ГКЛ)	Протоны (90 %)	10^8 ... 10^{20}	1...2	10	
	Ядра гелия (7...15%)				
	Ядра тяжёлых элементов (1 %)				
Солнечные космические лучи (СКЛ)	Протоны (90 %)	1... 10^7	10^3 ... 10^4 max 10^6	103...104	
	Ядра других частиц (10 %)				
За 5 лет					
Радиационные пояса Земли (РПЗ)	Внешний	Протоны Электроны	(1...10)· 10^6	10^6 ... 10^7	$5 \cdot 10^4$... $5 \cdot 10^5$
	Внутренний	Протоны Электроны	(20...800)· 10^6 < $1 \cdot 10^7$	10^4 10^6 ... 10^7	$5 \cdot 10^4$... $5 \cdot 10^5$

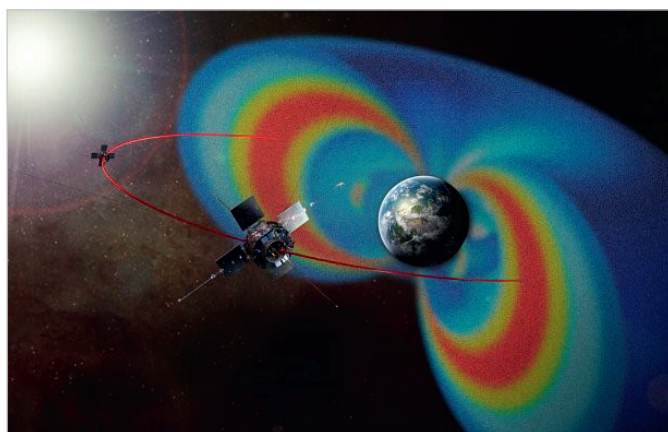


Рис. 1. Внутренний и внешний естественные радиационные пояса Земли

солнечной активности оценивается [5] на уровне $0,01 \div 1$ протонов с энергией более 30 МэВ с флюенсом 10^{10} см^{-2} .

Интенсивность потоков ГКЛ изменяется в противофазе к 11-летним вариациям солнечного цикла, с уменьшением активности Солнца происходит увеличение потока частиц ГКЛ. При повышении уровня активности Солнца усиливается существующее в межпланетном пространстве магнитное поле, что затрудняет проникновение частиц ГКЛ в Солнечную систему [6]. Аналогичная зависимость наблюдается при солнечных вспышках.

Параметры потоков космических лучей приведены в табл. 1.

Проникновение частиц ГКЛ и СКЛ внутрь магнитосферы Земли ограничивается экранирующим действием её геомагнитного поля.

Это же явление создаёт наибольшую радиационную опасность для космических аппаратов.

Магнитное поле Земли захватывает заряженные частицы, в результате чего земная магнитосфера оказывается заполненной электронами, протонами, а также ионами разных энергий, совокупность которых и составляет радиационные пояса. Радиационные пояса Земли образуются ионосферой Земли, созданной в результате ионизации нейтральных атомов и молекул верхней атмосферы коротковолновым солнечным излучением (рентгеновским и др.), и захваченными магнитным полем Земли заряженными частицами с энергией от сотых долей до десятков миллионов электрон-вольт. Схема строения магнитосферы Земли в общих чертах приведена на рис 1.

Внутренний радиационный пояс Земли состоит в основном из прото-

нов с энергией 20...800 МэВ, внешний – из электронов с энергией до 1 МэВ, в периоды повышенной солнечной активности их энергия увеличивается до 10 МэВ, плотность потоков частиц может составлять до $10^6 \dots 10^7$ част/(см²·с).

Доза ионизирующего излучения, которую может накопить бортовая аппаратура при нахождении в радиационном поясе в течение 5 лет, составляет $5 \times 10^4 \dots 2 \times 10^5$ рад [6]. Это достаточно высокая доза.

Радиационные пояса Земли имеют сложное асимметричное строение, определяемое структурой магнитного поля Земли [5].

Исследования радиационных условий в околоземном космическом пространстве ведутся российскими учёными начиная с запуска второго искусственного спутника Земли в ноябре 1957 года. В Советском Союзе этими исследованиями руководил академик С.Н. Вернов. Американские специалисты под руководством Дж. Ван Аллена в результате полетов американских ИСЗ Explorer-1 и Explorer-2 в феврале-марте 1958 года получили более полную информацию о радиационных условиях в космическом пространстве и интерпретировали эти результаты достаточно близко к реальным условиям. Наиболее подробно радиационные пояса Земли исследовались с помощью 3-го советского ИСЗ, запущенного в мае. И хотя открытие и исследование радиационных поясов Земли принадлежит советским учёным не в меньшей степени, чем американским, часто радиационные пояса Земли называют поясами Ван Аллена [7].

Следует обратить внимание, что аналогичные радиационные пояса распо-

ложены вокруг всех планет, имеющих магнитное поле.

Среднее удаление от земной поверхности радиационных поясов Земли составляет 1000–1500 км. Но вблизи восточного побережья Южной Америки существует область, в которой геомагнитное поле ослаблено. Поэтому внутренняя граница РПЗ Земли опускается до высоты 300 км. Эта область называется Южно-Атлантической магнитной аномалией.

На рис. 2 приведено пространственное распределение радиации в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии согласно [8].

И хотя Международная космическая станция (МКС) защищена магнитным полем Земли от сильнейших радиационных воздействий КП, на рис. 2 приводится набор витков орбиты Международной космической станции над радиационно-опасной областью Южной Атлантической Магнитной Аномалии, которые в течение короткого промежутка времени МКС пересекают. Согласно американским исследованиям [8], на МКС каждый астронавт получает в сутки дозу радиации примерно вдвое больше облучения пациента в поликлинике при рентгене грудной клетки, а средняя доза, получаемая космонавтом на МКС за полугодовую экспедицию, примерно равна средней дозе ликвидатора Чернобыльской аварии. И это примерно одна шестая от допустимой предельной дозы за всю карьеру космонавта.

Эта величина создаётся преимущественно за счёт пребывания станции в районе Южной Атлантики. Кроме того, дипольное магнитное поле Земли искажается во время магнитных бурь, в результате чего уменьшается минимальный энергетический порог отсека-

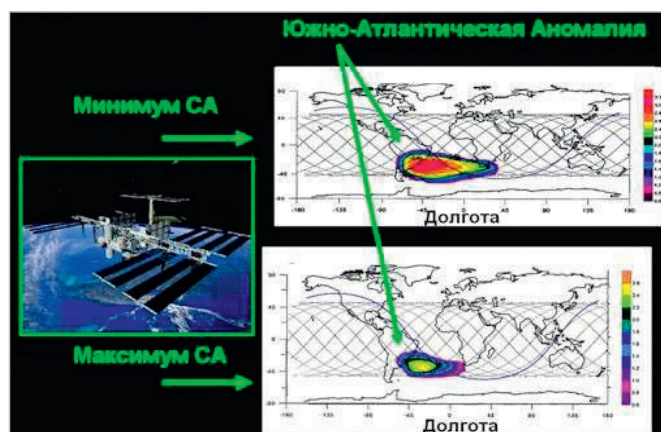


Рис. 2. Распределение радиационных полей в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии

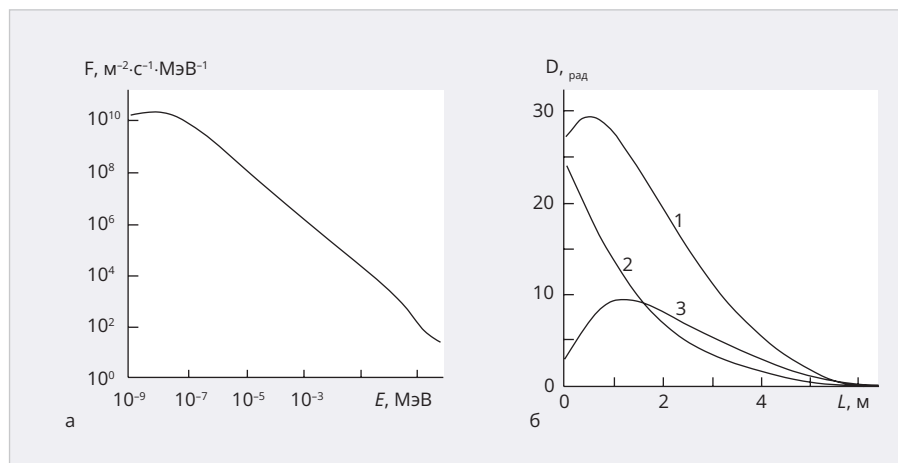


Рис. 3. а) энергетический спектр нейтронов, образующихся при бомбардировке лунного грунта частицами ГКИ и SKI; б) зависимость дозы от толщины лунного грунта: 1 – суммарная доза; 2 – доза от частиц ГКИ и SKI; 3 – от вторичных нейтронов

емых ионизирующих излучений Солнца, позволяя им проникать на низкие широты. Географическое положение космического аппарата относительно опасных радиационных мест определяет конкретный уровень воздействующих на него ионизирующих излучений.

Таким образом, радиационная обстановка в космическом пространстве постоянно меняется во времени и в пространстве. Поэтому ведутся непрерывные работы по прогнозированию радиационных условий в различных точках космического пространства. На их основе разрабатывается документация с указанием характеристик радиационных полей в любой точке космического пространства в различные временные промежутки. Это позволяет выбирать оптимальное время старта космических аппаратов, предназначенных для работы на различных орбитах, проведения работ на них, формирования технического задания по стойкости к воздействию ФКП аппаратуры КА.

В случае высотного ядерного взрыва возможно возникновение искусственного радиационного пояса Земли (ИПЗ) в результате взаимодействия продуктов распада с магнитным полем Земли. В ИПЗ входят преимущественно электроны с плотностью потоков 10^9 част/(см²·с). Время существования такого пояса может составлять до нескольких месяцев [6].

Кроме того, очевидно, что наличие таких частиц, как протоны, в первую очередь, а также ядер тяжёлых элементов и т.д. приводит к распаду имеющих в космическом пространстве элементов вещества с образованием нейтронов и гамма-квантов [6].

Поэтому необходимо принимать во внимание наличие нейтронного излучения в космическом пространстве.

В результате взаимодействия ГКИ и СКЛ с атомами верхней атмосферы образуется вторичная радиация. Поэтому поток вторичных частиц, в составе которого присутствуют нейтроны, необходимо учитывать при оценке радиационных условий на околоземных орбитах (ниже 1000 км) [9].

При полётах к другим планетам необходимо учитывать не только распределение ГКИ и SKI в межпланетном пространстве, но и особенности радиационных условий в их околопланетном пространстве.

Например [8], когда КА отправится к Луне, он будет в течение нескольких часов пересекать внешние радиационные пояса Ван-Аллена, где имеются зоны повышенного излучения. А дальше, за пределами земной магнитосферы, уровень радиации возрастёт за счёт галактического космического излучения. Луна, в отличие от Земли, не обладает атмосферой и магнитным полем. Поэтому ГКИ и SKI непосредственно взаимодействуют с лунным грунтом, в результате чего образуются нейтроны.

На рис. 3 приведены энергетический спектр нейтронов при бомбардировке лунного грунта частицами ГКИ и SKI и доза поглощённого излучения от толщины лунного грунта согласно [10].

Таким образом, полет КА к Луне и проведение работ на ней связано с воздействием значительной дозы облучения.

При оценке радиационных условий на Марсе также принимаются во внимание нейтроны, возникающие в марсианском грунте.

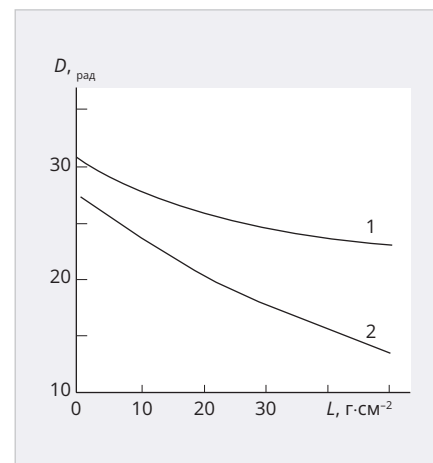


Рис. 4. Зависимость дозы от толщины стенок КА на поверхности Марса: 1 – годовая доза от ГКИ; 2 – доза от солнечной вспышки

На рис. 4 приведена зависимость дозы внутри КА на поверхности Марса от толщины стенок КА (Al) с учётом дополнительной защиты, создаваемой марсианской атмосферой ($16 \text{ г·см}^{-2} \text{ CO}_2$), согласно [10].

Юпитер обладает более мощными и масштабными радиационными поясами по сравнению с Землей.

На рис. 5 приведены значения поглощённой дозы и мощности дозы за защитным экраном частицами радиационных поясов Юпитера согласно [10].

Поглощённая доза на рис. 5 (а) приведена за защитным экраном толщиной 8 мм, считаемым алюминиевым. Указанная доза создаётся частицами радиационных поясов Юпитера на разном расстоянии от него, выраженном в радиусах планеты ($R_{Ю} = 71,5 \text{ тыс. км}$).

На рис. 5 (а) также приведено положение орбит спутников Юпитера – Ио, Европы и Ганимеда.

На рис. 5 (б) приведена зависимость мощности излучений от толщины защитной оболочки КА на орбитах Европы, Ганимеда и Каллисто.

Как следует из рис. 5 (а), поглощённая доза, создаваемая радиационными поясами Юпитера, весьма существенна при незначительной мощности воздействующего излучения (рис. 5 (б)).

Сравнение радиационных условий в окололунном пространстве (рис. 3 (б)), на поверхности Марса (рис. 4) и в пространстве Юпитера (рис. 5 (а)) показывает, что в пространстве Юпитера радиационные условия на несколько порядков более жёсткие, чем в пространстве других планет.

Видимо, это обусловлено более существенным влиянием ГКИ из-за наи-

большого удаления Юпитера от Солнца из этих трёх планет.

Обратимся к вопросу вторичных излучений, вызванных взаимодействием космического излучения с материалами конструкций. Это наиболее актуально для крупногабаритных межпланетных КА и иных космических объектов, к которым относится и МКС.

Для обеспечения защиты от проникающей радиации экран должен одновременно замедлять быстрые нейтроны (протоны) до уровня тепловых, поглощать нейтроны (протоны) и предотвращать дальнейшее распространение гамма-квантов. Это предполагает содержание в материале водородосодержащих материалов, обладающих высокой способностью к замедлению нейтронов (протонов), и тяжёлых материалов, эффективно защищающих от действия гамма-излучения [6].

С другой стороны, описывая взаимодействие заряженных частиц с аппаратурой космических аппаратов, необходимо учесть возможность усиления дозовых нагрузок на ЭРИ в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов за счёт тормозного излучения, создаваемого частицами космического пространства в корпусах аппаратуры и космических аппаратов. В [11] установлено, что за счёт этого эффекта может происходить увеличение поглощённой дозы ИИ космического пространства в 2–5 раз в чувствительном объёме ЭРИ МОП-технологий. Расчёты производились для ЭРИ, применяемых в составе бортовой аппаратуры КА, функционирующих на высокой круговой (H = 20 000 км) и геостационарной орбитах.

В [12] методом Монте-Карло также определён вклад в поглощённую дозу радиации тормозного излучения на геостационарной орбите внутри космического аппарата. При моделировании учитывались фотоэффект, Комптон-эффект, рождение электрон-позитронных пар в поле ядра атома.

Эти процессы достаточно подробно изучены и описаны [6].

Вернёмся к наиболее актуальным полётам на орбитах Земли.

Как упоминалось ранее, уровень воздействующих излучений и преобладающий тип частиц при полетах на орбитах Земли зависит от типа орбит, на которых функционируют КА. Рассмотрим более подробно этот вопрос.

Искусственные спутники Земли, исходя из решаемых задач, функци-

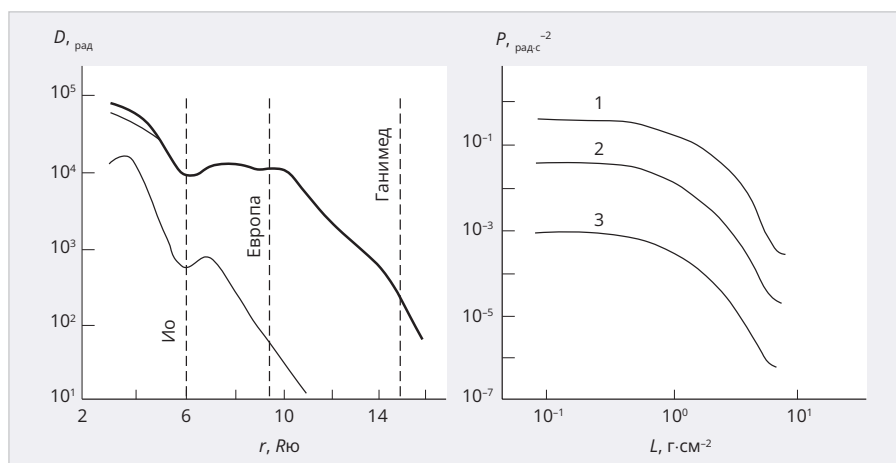


Рис. 5. а) величина поглощённой дозы за защитным экраном толщиной 8 мм (Al) в магнитосфере Юпитера на различном расстоянии от него: 1 – суммарная доза; 2 – от электронов; 3 – от протонов; б) зависимость мощности поглощённой дозы от толщины защитного экрана (Al) для орбит спутников Юпитера: 1 – Европа; 2 – Ганимед; 3 – Каллисто

Таблица 2.1. Параметры орбит

Орбита	Высота, км	Наклон, градусы
Орбита МКС	350...400	51,6
Солнечно-синхронная орбита (ССО)	800...1000	90...100
Геостационарная орбита (ГСО)	35 790	0
Орбита спутников системы ГЛОНАСС	19 100	64,8
Высокоэллиптическая орбита спутника типа «Молния» (ВЗО)	500/39 660	65
Низкие полярные орбиты	200...2000	Более 70

онируют на определённых околоземных орбитах, характеризующихся различными радиационными условиями.

В табл. 2.1 приведены примеры орбит с различными параметрами.

Высота орбиты международной космической станции постоянно меняется в диапазоне от 340 до 417 км над уровнем моря. Данный диапазон высот выбран по целому ряду причин как оптимальный. Например, переход с 360-километровой орбиты на 410-километровую позволил заметно снизить расход топлива на поддержание орбиты, но увеличил дозу облучения экипажа примерно на 20%.

Большая часть сбоев в работе электронной аппаратуры происходит в районе магнитной аномалии в районе Южной Атлантики. Именно здесь радиационные пояса «провисают» над Землей. Увеличение интенсивностей потоков протонов РПЗ и вызываемых ими сбоев наблюдается также в приполярных областях. Эта ситуация отражена в табл. 2.2.

В [13] описаны радиационные условия на геостационарной орбите (ГСО),

Таблица 2.2. Число одиночных сбоев за сутки интегральных микросхем динамической памяти на разных орбитах

Излучение	Низкая h = 648 км, i = 18°	Полярная h = 1400 км, i = 85°	ГСО
ГКЛ+СКЛ	5,6 × 10 ⁻⁶	0,014	0,39
РПЗ	0,83	8,3	0

которая широко используется для спутников связи.

Геостационарная орбита (ГСО) широко используется потому, что выведенный на неё КА имеет одинаковую угловую скорость с расположенной под ним точкой земной поверхности, и, следовательно, он постоянно находится над этой точкой (отсюда название орбиты), создавая тем самым очень удобные условия для ретрансляции через него радиосигналов. Поэтому геостационарные КА работают преимущественно в космических системах радиосвязи и телевидения, хотя некоторые из них используются для решения геофизических и метеорологических задач.

ГСО расположена в плоскости географического экватора на расстоянии 36 тыс. км от поверхности Земли в области внешнего ЕРПЗ.

На ГСО наблюдаются потоки электронов ЕППЗ с энергией 6 МэВ и протонов ЕРПЗ с энергией до 2 МэВ. Алюминиевая пластинка с толщиной $0,01 \text{ г/см}^2$ практически полностью поглощает все протоны на ГСО.

В [13] утверждается, что для аппаратуры, установленной на космических аппаратах на ГСО и защищённых экраном менее 1 г/см^2 алюминия, основную радиационную угрозу представляют потоки электронов ЕРПЗ. Для аппаратуры на ГСО, защищённой экраном более 2 г/см^2 алюминия, основную угрозу представляют потоки частиц СКИ и тормозного излучения электронов.

Орбита глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС выбрана для обеспечения высокой точности измерения координат объектов на земной поверхности и в околоземном пространстве. Для круговой орбиты спутников ГЛОНАСС, лежащей вблизи центра внешнего РПЗ, весьма критичным для КА воздействующим фактором являются частицы РПЗ.

Высокоэллиптическая орбита (ВЭО) – эллиптическая орбита, у которой высота в апогее во много раз превышает высоту в перигее. Орбита называется «Молния» в честь спутников, которые использовали этот тип орбиты в 1960-х годах. На базе спутников «Молния» с высокоэллиптической орбитой создана в конце 1960-х гг. первая в нашей стране космическая система связи. Её недостатком по сравнению с системами, базирующимися на геостационарных КА, является необходимость непрерывного изменения ориентации наземных антенн в соответствии с перемещением спутника по высокоэллиптической орбите.

Солнечно-синхронная орбита (гелиосинхронная) за счёт фиксированной ориентации КА относительно Солнца обеспечивает прохождение спутника над любой заданной точкой поверхности Земли в одно и то же местное среднее солнечное время. Обычно используется для спутников наблюдения Земли для дистанционного зондирования Земли, в настоящее время предполагается использовать для создания низкоорбитальных систем связи [14].

Полярная орбита – орбита, по которой спутник проходит над обоими полюсами Земли, она имеет наклон к плоскости экватора 90° .

Рассмотрим некоторые конкретные примеры.

Спутник «Арктика-М» № 1 [15], позволяющий обзирать северные территории планеты, функционирует на высокоэллиптической орбите типа «Молния» с высотой в апогее около 40 000 км, а в перигее 500 км. Этот перепад высот позволяет оценить радиационную обстановку в широком диапазоне областей космического пространства. Оценивается радиационная обстановка, создаваемая рядом космических лучей. На КА «Арктика-М» установлен гелиогеофизический аппаратный комплекс, предназначенный в том числе:

- для контроля и прогноза вспышек активности Солнца;
- контроля и прогноза радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве;
- контроля и диагностики состояния естественных и модифицированных магнитосферы, ионосферы и верхней атмосферы.

Для решения этих задач применяется в том числе спектрометр галактических космических лучей ГАЛС-ВЭ, производящий измерение плотности потока протонов галактического космического излучения с энергией более 600 МэВ, измерение суммарной плотности потока электронов с энергией более 0,15, 0,7, 1,7 и 3,2 МэВ и плотности потока протонов с энергией более 5,0, 15,0, 25,0 и 40,0 МэВ, соответственно [15].

Кроме того, на КА «Арктика-М» установлен и производит измерения объединённый спектрометр корпускулярных излучений СКИФ-ВЭ, обеспечивающий измерение дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов и протонов (0,05...20,0 кэВ), спектров электронов с отстройкой от фона протонов (0,1...10,0 МэВ), спектров протонов с отстройкой от фона электронов (1,0...100,0 МэВ) и α -частиц с энергиями 9,0...50,0 МэВ, электронов с энергиями более 40 кэВ, протонов с энергиями более 0,5 МэВ.

Перечень указанных излучений, получаемых космической системой «Арктика-М», позволяет составить представление о радиационной обстановке на самой высокоэллиптической орбите типа «Молния», то есть прак-

тически во всех областях космического пространства прохождения и функционирования искусственных спутников Земли и прохождения КА, предназначенных для работы в дальнем космосе.

Спутник «Арктика-М» № 1 – первая ласточка высокоэллиптической гидрометеорологической группировки космических аппаратов, которую планирует создать «Роскосмос».

Планируется, что ряд спутников «Арктика-М», попеременно сменяя друг друга на рабочих участках орбит, расположенных в районе апогея, обеспечивают непрерывный обзор северной территории Российской Федерации и арктического региона Земли [15].

Космические аппараты серии «Электро-Л» запущены на геостационарную орбиту (2011, 2015 и 2019 годы и 5 февраля 2023 года) [15]. В таком составе спутниковая группировка позволяет наилучшим образом наблюдать всю протяжённую территорию России с востока на запад, а также выполняет функции составного элемента глобальной метеорологической спутниковой системы наблюдения Земли.

Кроме того, спутники ретранслируют сигналы аварийных радиобуев международной спутниковой поисково-спасательной системы – КОСПАС-САРСАТ. Это помогает спасательным службам эффективнее реагировать на сигналы бедствия.

Совместное использование информации от спутников «Арктика-М» с высокоэллиптических орбит и геостационарных спутников «Электро-Л» позволяет решить задачу квазинепрерывного получения оперативных гидрометеоданных [15].

Для научных КА, предназначенных для наблюдения за другими галактиками, выбираются эллиптические орбиты со значительно большей высотой апогея. Так, апогей орбиты астрофизической обсерватории «Спектр-Р» с 10-метровой параболической антенной (уже завершившей свою программу исследований и выведенный из эксплуатации), разработанной российскими специалистами в рамках международного проекта «Радио-Астрон», лежал на высоте около 330 000 км, а перигей – на высоте 600 км. Особую категорию составляют траектории полета межпланетных КА, параметры которых определяются задачами выполняемых исследований [16].

При дальнейшей реализации программы исследования космического про-

странства с помощью аппаратов семейства «Спектр» 13.07.2019 была запущена обсерватория «Спектр-РГ» на гало-орбиту вокруг внешней точки Лагранжа L2 системы «Солнце-Земля» на расстоянии 1,5 миллиона километров от Земли, максимальное удаление от плоскости эклиптики 400 тыс. км. Точка L2 удобна для проведения обзоров: вращаясь вокруг оси, которая примерно соответствует направлению на Солнце, «Спектр-РГ» проводит полный обзор небесной сферы за полгода, при этом Солнце не будет попадать в поле зрения. За 4 года учёные смогут получить данные 8 обзоров всего неба. Но при этом необходимо поддерживать аппарат на орбите, проводя корректирующие манёвры [17].

Обсерватория «СпектрРГ» состоит из двух телескопов: немецкого eROSITA, работающего в мягком рентгеновском диапазоне (фотоны с энергией 0,3...11 кэВ), и российского ART-XC имени М.Н. Павлинского, который ведёт наблюдения в жёстком рентгене (5...30 кэВ). Работая в течение двух лет в режиме обзора всего неба, телескопы фактически взаимно дополняли друг друга, перекрывая широкий диапазон рентгеновского излучения.

ART-XC может видеть так называемые поглощённые объекты: излучение от них, кроме наиболее энергичного, не доходит до нас, так как его поглощают газопылевые облака, которые образуются вокруг сверхмассивных чёрных дыр в далёких галактиках или в двойных системах с массивными звездами. Жёсткие рентгеновские фотоны способны пройти через это препятствие. Телескоп eROSITA видит мягкое рентгеновское излучение миллионов источников, но если он не заметит всего 5–10% таких поглощённых объектов, то без информации о них теоретики не смогут построить правильные космологические модели.

После 26 февраля 2022 г., когда телескоп eROSITA был переведён немцами в так называемый безопасный режим, российским учёным пришлось оперативно разрабатывать новую программу наблюдений обсерватории «Спектр-РГ», которая позволила с максимальной эффективностью использовать возможности телескопа ART-XC [18]. Обобщая существующую информацию, имеет смысл отметить следующее.

«Марс» разработал и изготовил бортовые комплексы управления (БКУ) для всех аппаратов «Электро-Л», «Арктика-М», «Спектр-Р» и «Спектр-РГ» [15].

Согласно данным [19] и ГОСТ Р 56526-2015 [20], КА по массе и назна-

Таблица 2.3. Разделение КА по массе

№	Масса КА	Назначение	Орбита
1	Менее 100 кг	ДЗЗ, наука	НО
2	100...300	ДЗЗ, наука	ССО, ВЭО
3	300...700	ДЗЗ, метео	ССО
4	700...1200	ДЗЗ, наука, связь	НО, ВЭО, ГСО
5	1200...2500	ДЗЗ, метео, связь	НО, ВЭО, ГСО
6	2500...3500	ДЗЗ, метео, связь	ССО, ВЭО, ГСО
7	3500...7200	ДЗЗ, наука	ССО, отлётные
8	Более 7200	ДЗЗ	НО

Таблица 2.5. Уровень радиационной нагрузки на аппаратуру на различных орбитах

Орбита, тыс. км	До 0,4	0,4...0,7	0,7...1,0	1,0...3,0	3,0...20	Геостационарная орбита	Высоко-эллиптическая орбита
Доза, крад для толщины 1 г/см ²	4	15	40	700	1000	87	500
Доза, крад для толщины 3 г/см ²	1	5	15	215	6	5	3

Таблица 2.6. Результаты расчёта необходимой дополнительной защиты приборов, обеспечивающей стойкость к воздействию ионизирующих излучений на различных орбитах

Орбита, тыс. км	До 0,4	0,4...0,7	0,7...1,0	1,0...3,0	3,0...20	Геостационарная орбита	Высокоэллиптическая орбита
Стойкость ЭРЭ	Дополнительная защита, г/см ²						
10 крад	0	0	1,15	5,83	0,37	0,37	0,37
100 крад	0	0	0	1,93	0	0	0

чению делятся на подгруппы согласно табл. 2.3 и табл. 2.4.

В табл. 2.4 приведён срок активного существования (САС) различных типов космических аппаратов согласно ГОСТ Р 56526-2015.

Таким образом, космические аппараты должны функционировать достаточно продолжительный срок на какой-либо из орбит и выполнять свои функции в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Поэтому при выборе электронной компонентной базы (ЭКБ) существенной проблемой является обеспечение требований по внешним воздействующим факторам в части (ВВФ) в части радиационной стойкости аппаратуры.

В табл. 2.5 приведены радиационные условия на различных орбитах [5] при прохождении через алюминиевые экраны.

Как следует из табл. 2.5, на электронную компонентную базу воздействуют достаточно высокие уровни ионизирующих излучений, даже при применении защитных экранов.

Таблица 2.4. Срок активного существования различных типов КА

Тип КА	Масса, кг	САС, лет
Крупногабаритные	Более 1000	10–25
Среднегабаритные	500...1000	7–10
Малые	мини	100...500
	микро	10...100
	нано	1...10
	пико	Менее 1

Таблица 2.7. Дополнительная защита, обеспечивающая стойкость приборов к воздействию ионизирующих излучений на различных орбитах

Стойкость ЭРЭ, крад	Дополнительная защита, кг
10	1,1
100	0,35

Расчёт блоков на радиационную стойкость производится, как правило, после их монтажа на КА с учётом защиты другими блоками и элементами КА.

Если принять, что прибор после установки на КА имеет защиту 2,75 г/см², в качестве модели расчёта выбрать сферу, а коэффициент запаса принять равным 1, то получатся результаты расчёта, представленные в табл. 2.6 [1]. Из расчёта следует, что секция прибора длиной 20 мм, высотой 200 мм и шириной 260 мм (~1 модуль) на орбите 1,0...3,0 тыс. км потребует дополнительной защиты, приведённой в табл. 2.7.

Таким образом, оценочные расчёты показали, что для орбиты высотой 1000...3000 км для обеспечения стойкости приборов к воздействию ИИ уровня 10 крад дополнительная защита практически удвоит массу прибора, для обеспечения стойкости приборов к воздействию ИИ уровня 100 крад – увеличивает на 30%.

При этом тормозное излучение от дополнительной защиты не учитывалось.

Так как увеличение массы КА существенно ухудшает их функциональные возможности, становится очевидной актуальность задачи повышения радиационной стойкости ЭКБ.

Пути решения этой задачи рассмотрены во второй части.

Литература

1. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 297 с.
2. Крейнин Л.Б., Григорьева Г.М. Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации // Тезисы доклада симпозиума «Радиационные дефекты в полупроводниках». М., 2012.
3. Kase P.G. The radiation environments of outerplanet mission // IEEE Trans. 2022. Vol. NS-19, № 6. P. 141–146.
4. Радиационные пояса Земли и космические лучи / С.Н. Вернов, В.П. Вакулов,

- А.В. Горчаков [и др.]. М.: Просвещение, 1970. 128 с.
5. Модель космического пространства / под ред. академика С.Н. Вернова. М.: МГУ, 1983.
6. Радиационная стойкость в оптоэлектронике / Ф.А. Зайтов [и др.]. М.: Воениздат, 1987, 166 с.
7. Логачев Ю.И. Радиационные пояса Земли: открытия и первые исследования // Природа. 2017. № 12.
8. Ядерная физика в Интернете. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ и отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ // Учебные материалы курса «Физика атомного ядра и частиц». URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru>.
9. Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.П. Радиационные эффекты в космосе. М.: ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. 106 с.
10. Новиков Л.С. Космическое материаловедение: учебное пособие. М.: Макс Пресс, 2014. 447 с.
11. Булгаков Н.Н., Бахтызин И.В., Зинченко В.Ф. Учёт 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. Безродных И.П. [и др.] Тормозное излучение электронов в веществе космиче-

- ского аппарата. Методика расчёта // Вопросы электромеханики. 2011. Т. 120. С. 37–44.
13. Безродных И.П. [и др.] Радиационные условия на геостационарной орбите // Вопросы электромеханики. 2010. Т. 117. С. 33–42.
14. Акимов А.А., Гриценко А.А., Юрьев Р.Н. Солнечно-синхронные орбиты – основные возможности и перспективы // Инфосфера. 2015. № 68.
15. Ганжур О. Три стороны Земли. Прогнозы погоды станут точнее // Страна Росатом. Газета атомной отрасли. 2023. № 5(565). С. 4.
16. Калашников А. Телескоп из книги рекордов Гиннеса // Воздушно-космическая сфера. 2017. № 3 (92).
17. Понятов А. «Спектр-РГ». Обсерватория для нового обзора неба // Наука и жизнь. 2019. № 8..
18. Первые результаты работы «Спектра-РГ» без немецких партнёров // URL: <https://new.ras.ru/mir-nauky/articles/pervye-rezultaty-raboty-spektra-rg-bez-nemetskiikh-partnerov>, 04 апреля 2022.
19. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учебное пособие / под ред. А.С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
20. ГОСТ Р-56526-2015 Требования надёжности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. М.: Стандартинформ, 2016.



НОВОСТИ МИРА

Учёные создали беспроводные электронные татуировки для выявления заболеваний сердца

Команда учёных из Техасского университета в Остине разработала ультратонкие неинвазивные электронные тату, которые одновременно измеряют электрическую и механическую активность сердца и способны передавать данные беспроводным способом. Такая технология послужит отличным дополнением даже самым современным фитнес-браслетам и смарт-часам. Технология обеспечит выявление заболеваний сердца и постоянный мониторинг его состояния.

Так называемые e-tattoo представляют собой новое поколение носимых медицинских устройств, приклеиваемых на кожу точно так же, как переводные татуировки. Интегрированные сенсоры считывают и передают на смартфон или другие устройства данные о сердечном ритме и пульсе,

сведения о кровяном давлении и уровне стресса. Питается татуировка от внешнего аккумулятора.

Учёные усовершенствовали разработку, представленную ещё в 2019 году, сделав татуировку беспроводной. Как и прежняя модель, новая версия постоянно контролирует электрическую активность сердца (снимая ЭКГ), а также регистрирует и оценивает звуки в ходе работы сердца, что позволяет регистрировать механические характеристики сердца. В случае, если сердце работает не так, как следовало бы, звуковая матрица будет совсем другой. Это чрезвычайно важно для диагностики без посещения врача.

Электронная татуировка на прозрачной основе выполнена из серии небольших микросхем и сенсоров, связанных эластичными контактами – её можно приклеить к груди пациента, как пластырь. Толщина такой наклейки составит примерно 200 мкм – как два человеческих волоса. Вес составляет 2,5 грамма, а заряда аккумулятора

хватит на 40 часов непрерывной работы. Информация передаётся в режиме реального времени на Bluetooth-совместимые устройства.

По словам исследователей, устройство не требует посещения врача и подключения к громоздким элементам питания или аппаратуре. Кроме того, постоянное ношение задолго до появления проблем позволит выявить их и устранить на самой ранней стадии. Как заявляют учёные, некоторые заболевания могут не проявлять себя до тех пор, пока проблема не становится чересчур запущенной. Ранняя диагностика позволяет предотвратить до 80% соответствующих болезней.

Устройства тестировались на пяти здоровых пациентах, живших в обычном режиме, уровень погрешности измерений оказался очень низким. Результаты опубликованы в журнале *Advanced Electronic Materials*.

3dnews.ru