

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 537.591

РАДИАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ НА КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ПРИ ВЫВОДЕ ИХ НА МЕЖПЛАНЕТНУЮ ТРАЕКТОРИЮ В ПЕРИОД МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И.П. Безродных, Е.И. Морозова,
А.А. Петрукович
(ИКИ РАН)

В.Т. Семёнов, В.М. Долкарт
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

На основании расчётов поглощённых доз радиации от частиц радиационных поясов Земли сделано заключение, что при выводе космического аппарата с промежуточной околоземной орбиты (наклонение орбиты 51° , перигей 220 км, апогей 13 000 км, аргумент перигея 270° , время пребывания на орбите около 6 ч) на межпланетную траекторию, в отсутствие солнечных вспышек, наибольшую радиационную опасность представляют релятивистские электроны внешнего радиационного пояса. Потерируемые космические аппараты, использующие вышеуказанную промежуточную орбиту, для радиационной защиты экипажа должны иметь экран из алюминия массовой толщиной не менее 3 г/см^2 . При данных параметрах экрана не зависимо от состояния внешнего радиационного пояса поглощённая доза радиации от частиц радиационных поясов с вероятностью 99,9% за 6 ч не превысит 12 рад.

Ключевые слова: поглощённая доза радиации, радиационные пояса, защита от ионизирующих излучений космических лучей.

Введение

Цель данной работы – оценка ожидаемых радиационных нагрузок от частиц внутреннего и внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) на электронные системы и экипаж космического аппарата (КА) при полёте к Луне в период минимума вспышечной активности Солнца. РПЗ – это область магнитного поля внутри магнитосферы, представляющая собой магнитную ловушку для заряженных частиц и низкочастотных электромагнитных волн. РПЗ условно разделён на два: внутренний и внешний пояс [1, 2]. Формирование зазора между внутренним и внешним РПЗ в электронной компоненте радиационных поясов обусловлено усилением питч-угловой диффузии электронов в конус потерь вблизи внешней границы плазмосферы [3]. Причиной питч-угловой диффузии является рассеяние электронов на низкочастотных электромагнитных волнах [4]. В отличие от электронной компоненты протонно-ядерная компонента РПЗ не имеет особенностей на границе раздела двух поясов. Энергичные частицы, населяющие РПЗ, в основном являются продуктом взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли [5 – 7]. Внутренний пояс располагается внутри плазмосферы. Плазмосфера – область плотной холодной плазмы, вращающейся вместе с Землей. Нижняя граница плазмосферы расположена непосредственно над ионосферой, верхняя граница в плоскости экватора расположена на высоте нескольких радиусов Земли. В плоскости геомагнитного экватора внутренний РПЗ находится на высоте от 1000 км над поверхностью Земли и примерно до 13 000 км с

максимумом потока протонов ($E > 100 \text{ МэВ}$) порядка 10 000 частиц/(см²·с) на высоте 3500 км. Выше 13 000 км и примерно до 65 000 км располагается внешний радиационный пояс. На высоких широтах силовые магнитные линии внутреннего и внешнего РПЗ погружены в ионосферу. Основная популяция частиц внутреннего РПЗ – высокоэнергичные протоны, основная популяция частиц внешнего РПЗ – релятивистские электроны. Релятивистские электроны – это электроны, кинетическая энергия которых сравнима или больше их собственной энергии покоя ($E_{\text{кин}} \geq m_0c^2$). Поглощённая доза радиации от частиц внутреннего РПЗ меняется в небольших пределах, в то время как во внешнем РПЗ поглощённая доза радиации может изменяться со временем в широких пределах. Функция пространственного распределения частиц РПЗ по питч-углам из-за существования конуса потерь никогда не бывает абсолютно изотропной.

Наличие анизотропии функции пространственного распределения быстрых частиц достаточной концентрации при наличии холодной плотной фоновой плазмы приведёт к развитию неустойчивости [8], сопровождающейся генерацией в области плазмосферы когерентного низкочастотного электромагнитного излучения [9], которое в течение короткого времени заполнит внутренний и внешний радиационные пояса. Следует отметить, что процесс генерации волн и рассеяние частиц самосогласованы. Электроны генерируют низкочастотное электромагнитное излучение и сами же на этом излучении рассеиваются, таким образом,



Рис. 1. Этапы вывода космического аппарата на межпланетную траекторию [10]

электроны сами для себя создают рассеивающую среду.

В периоды относительно спокойной геомагнитной обстановки основной поток высокоэнергичных частиц сосредоточен в области геомагнитного экватора. Как правило, при удалении вдоль магнитной силовой линии от экватора к более высоким широтам интенсивность высокоэнергичных частиц РПЗ плавно уменьшается. Экваториальная область РПЗ представляет основную радиационную угрозу для КА.

В периоды повышенной геомагнитной возмущённости, например, связанные с воздействием на магнитосферу Земли крупномасштабных структур солнечного ветра, это правило нарушается. При увеличении давления солнечного ветра на магнитосферу Земли происходит поджатие магнитных силовых линий (движение к Земле) на дневной стороне магнитосферы и вытягивание силовых линий магнитного поля (движение от Земли) в хвост на ночной стороне магнитосферы. В этом случае функция распределения частиц по питч-углам становится сильно не изотропной. На дневной стороне она принимает форму блина, поверхность которого перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. На ночной стороне она принимает форму банана, вытянутого вдоль силовых линий поля. Такое распределение частиц по питч-углам на ночной стороне приводит к тому, что в

высоких широтах появляются большие потоки высокоэнергичных заряженных частиц, представляющих радиационную угрозу для высокоширотных КА.

Радиационные нагрузки на космические аппараты при полёте к Луне

Также как и при полётах к планетам солнечной системы, вывод КА на окололунную орбиту обычно осуществляется в несколько этапов [10, 11]. Первый этап – вывод КА на опорную круговую орбиту с высотой около 200 км, которая проходит под РПЗ, и по этой причине воздействием радиации на КА можно пренебречь. Второй этап – с помощью разгонного блока вывод КА на промежуточную орбиту с типичными параметрами: перигей ≈ 220 км; апогей $\approx 13\ 000$ км; наклонение орбиты $\approx 51^\circ$; аргумент перигея $\approx 270^\circ$; период, в течение которого КА на промежуточной орбите делает полный оборот, составляет около 4 ч.

Особенность промежуточной орбиты состоит в том, что вблизи перигея она проходит под радиационными поясами, вблизи апогея орбита пересекает область внешнего РПЗ. Третий этап – с помощью разгонного блока вывод КА с промежуточной орбиты на межпланетную траекторию (рис. 1). В течение последних двух этапов (это около 6 ч) КА подвергается интенсивному воздействию высокоэнергичных частиц внутреннего и внешнего РПЗ.

При оценке поглощённой дозы радиации автарами не учитывался вклад солнечных космических лучей (СКЛ) от солнечных вспышек. Это допустимо, если рассматривать временной период, когда ожидается минимум активности Солнца. В период повышенной активности Солнца потоки частиц СКЛ могут представлять определённую опасность для полётов КА, но с учётом современного уровня прогнозирования солнечных вспышек и способов защиты от ионизирующих излучений эта проблема вполне преодолима. Количество солнечных вспышек за 11-летний цикл солнечной активности составляет величину порядка нескольких десятков тысяч. В период максимума солнечной активности солнечные вспышки могут происходить очень часто, интервал между отдельными вспышками может быть менее 2 ч [12]. Большинство солнечных вспышек сопровождается потоками частиц солнечных космических лучей с энергиями менее 1 МэВ. В максимуме активности Солнца в среднем возможна одна вспышка в неделю с потоками частиц СКЛ, максимальная энергия которых для ядер химиче-

ских элементов может достигать 10 МэВ/нуклон и для электронов – 1 МэВ. Такие слабые солнечные вспышки не представляют радиационной опасности для КА. Небольшую опасность представляют солнечные вспышки средней мощности. В период высокой солнечной активности обычно происходит одна такая вспышка в месяц с максимальной энергией частиц СКЛ около 100 МэВ/нуклон для ядер и около нескольких МэВ для электронов. Полный пробег протонов с энергией 100 МэВ в алюминии составляет около 10 г/см², а полный пробег электронов с энергией 3 МэВ около 2 г/см² [13]. Для космических полётов более опасны мощные вспышки, которые могут происходить в среднем один раз в год, максимальная энергия частиц СКЛ в таких вспышках около 1 ГэВ/нуклон для ядер и несколько десятков МэВ для электронов. Полный пробег протонов с энергией 1 ГэВ в алюминии около 400 г/см², полный пробег электронов с энергией 40 МэВ около 20 г/см². Наибольшую опасность для космических полётов представляют сверхмощные солнечные вспышки, за весь 11-летний цикл активности Солнца их может быть не более трёх. Максимальная энергия частиц СКЛ в таких вспышках достигает 10 ГэВ/нуклон для ядер и 100 МэВ для электронов. Такие вспышки обычно происходят спустя три, четыре года после максимума солнечной активности. Полный пробег протонов с энергией 10 ГэВ около 5000 г/см², а полный пробег электронов с энергией 100 МэВ около 30 г/см². Учитывая, что число частиц СКЛ быстро убывает с возрастанием их энергии [14 – 18], можно ожидать на орбите Земли от одной сверхмощной солнечной вспышки увеличение поглощённой дозы радиации до двух тысяч радиан под экраном с массовой толщиной 0,1 г/см² и увеличение поглощённой дозы до сотни радиан под экраном 3 г/см².

На рис. 2 приведены данные измерений интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите. На рисунке видно, что во внешнем радиационном поясе бывают возрастания интенсивности потоков релятивистских электронов продолжительностью от нескольких дней до нескольких десятков дней.

При полётах за пределы магнитосферы Земли КА пересекает внутренний и внешний РПЗ. Как мы уже упоминали, во внутреннем радиационном поясе потоки высокоэнергичных протонов со временем меняются в небольших пределах. В первом приближении изменениями уровня радиации во внутреннем поясе можно пренебречь. Во внешнем поясе потоки релятивистских электронов

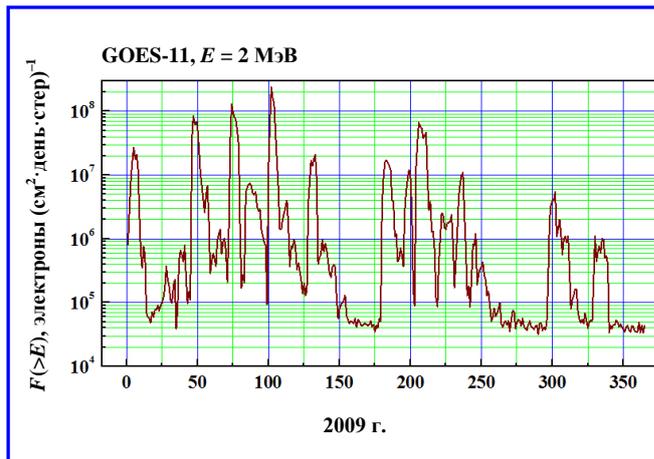


Рис. 2. Изменение со временем интенсивности потока релятивистских электронов за период с 1 января по 31 декабря 2009 г. вблизи экваториальной области по данным КА GOES на высоте около 36 тыс. км

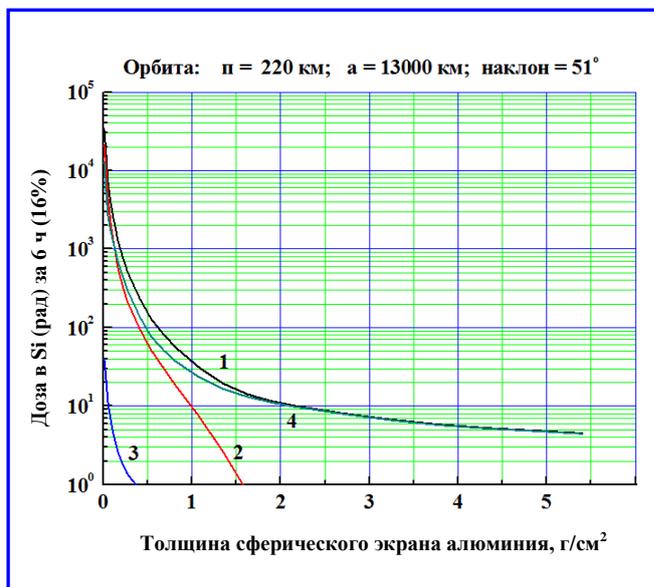


Рис. 3. Поглощённая доза радиации на промежуточной орбите за 6 ч с вероятностью 16% внутри сферического экрана не превысит приведённых числовых значений для: 1 – суммарной радиации; 2 – радиации от электронов (в основном) внешнего РПЗ; 3 – от тормозного излучения электронов; 4 – от протонов внутреннего РПЗ

со временем меняются в десятки, а в некоторых случаях и в сотни раз. При полётах за пределы магнитосферы Земли полная доза радиации складывается из почти постоянной составляющей дозы радиации внутреннего пояса и переменной составляющей дозы радиации внешнего пояса.

На рис. 3 показана оценка поглощённой дозы радиации на промежуточной орбите КА, которая в

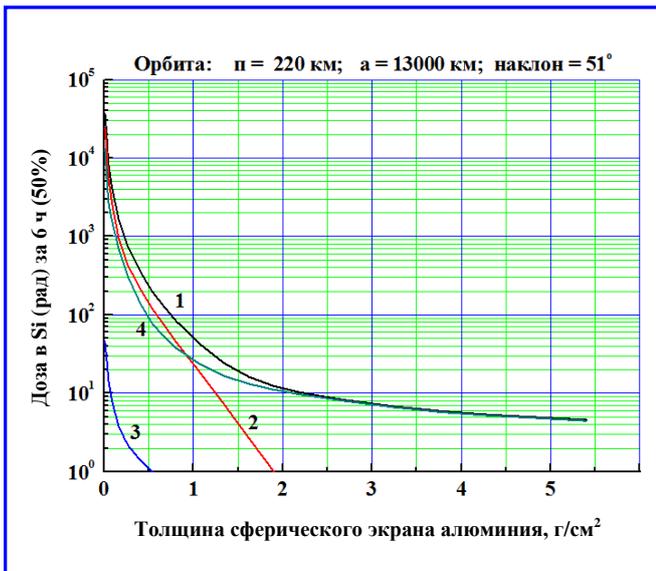


Рис. 4. Поглощённая доза радиации на промежуточной орбите за 6 ч с вероятностью 50% внутри сферического экрана не превысит приведённых числовых значений для: 1 – суммарной радиации; 2 – радиации от электронов (в основном) внешнего РПЗ; 3 – от тормозного излучения электронов; 4 – от протонов внутреннего РПЗ

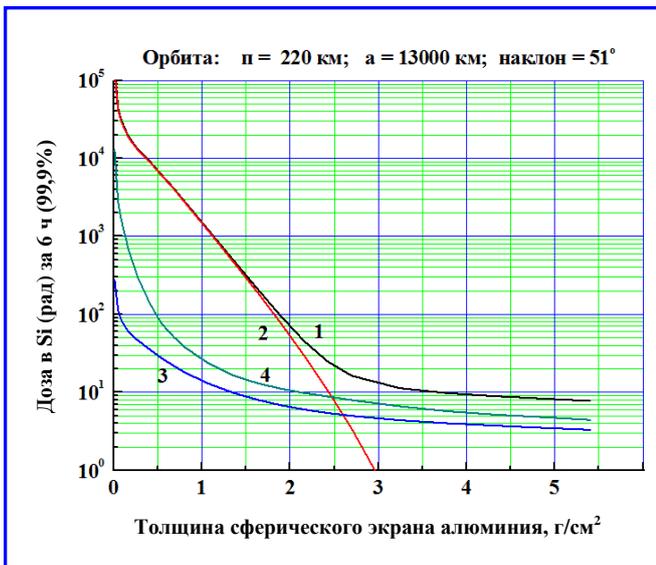


Рис. 5. Поглощённая доза радиации на промежуточной орбите за 6 ч с вероятностью 99,9% внутри сферического экрана не превысит приведённых числовых значений для: 1 – суммарной радиации; 2 – радиации от электронов внешнего РПЗ; 3 – от тормозного излучения электронов; 4 – от протонов внутреннего РПЗ

течение 6 ч с вероятностью около 16% не будет превышена. Оценка поглощённой дозы радиации относится к периоду, когда во внешнем РПЗ, в той его части, где проходит участок промежуточной

орбиты, отсутствует высокая интенсивность потоков релятивистских электронов. В этом случае фактически вся поглощённая доза радиации обусловлена потоками протонов высоких энергий внутреннего РПЗ.

На рис. 4 показана оценка поглощённой дозы радиации на промежуточной орбите КА, которая в течение 6 ч с вероятностью около 50% не будет превышена. Оценка поглощённой дозы радиации относится к умеренно возмущённому периоду, когда во внешнем РПЗ, в той его части, где проходит участок промежуточной орбиты, имеется небольшое увеличение интенсивности потока релятивистских электронов. В этом случае поглощённая доза радиации под экраном из алюминия массовой толщиной менее 1 г/см² состоит из поглощённой дозы радиации внутреннего и внешнего РПЗ. Под экраном массовой толщиной более 1 г/см² поглощённая доза по-прежнему определяется, в основном, высокоэнергичными протонами внутреннего РПЗ.

На рис. 5 показана оценка поглощённой дозы радиации на промежуточной орбите КА, которая в течение 6 ч с вероятностью около 99,9% не будет превышена. Оценка поглощённой дозы радиации относится к периоду, когда во внешнем РПЗ, в той его части, где проходит участок промежуточной орбиты, имеется высокая интенсивность потоков релятивистских электронов. В этом случае поглощённая доза радиации под экраном из алюминия массовой толщиной менее 2,5 г/см² состоит из поглощённой дозы радиации от релятивистских электронов внешнего РПЗ. Под экраном массовой толщиной более 2,5 г/см² поглощённая доза определяется высокоэнергичными протонами внутреннего РПЗ и тормозным электромагнитным излучением быстрых электронов.

В периоды высокой интенсивности релятивистских электронов внешнего РПЗ большую роль играет химический состав вещества защитного экрана. Поскольку эффективность генерации глубоко проникающего тормозного излучения электронов прямо пропорционально зависит от атомного номера вещества мишени, то не целесообразно в качестве защитных экранов использовать вещества с большим атомным номером [19, 20].

Выводы

Поскольку при получении экипажем КА поглощённой дозы радиации более 150 рад, возможно развитие лучевой болезни, то при планируемых

полётах к Луне максимальная доза радиации, полученная космонавтами, должна быть меньше этой цифры более чем на порядок.

При выводе космического аппарата на межпланетную траекторию с промежуточной околоземной орбиты (наклонение орбиты 51° , перигей 220 км, апогей 13 000 км, аргумент перигея 270° , время пребывания на орбите около 6 ч), в отсутствие солнечных вспышек, наибольшую радиационную опасность представляют релятивистские электроны внешнего радиационного пояса. При пилотируемых полётах космических аппаратов массовая толщина защитного экрана из алюминия должна быть не менее 3 г/см^2 . При данных параметрах экрана не зависимо от состояния внешнего радиационного пояса поглощённая доза радиации от частиц радиационных поясов с вероятностью 99,9% за 6 ч не превысит 12 рад.

При толщине экрана более 3 г/см^2 полёты к Луне могут происходить при любой радиационной обстановке внутри магнитосферы и даже в периоды умеренных потоков космических лучей от солнечных вспышек.

Литература

1. Радиационный пояс и магнитосфера / В. Хесс. – Пер. с англ. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с. : ил.
2. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем / Х. Редерер. – Пер. с англ. – М. : Мир, 1972. – 193 с. : ил.
3. О формировании зазора в электронной компоненте радиационных поясов / П. А. Беспалов, Х. У. Вагнер, А. Графе [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 1983. – Т. 23. – Вып. 1. – С. 68 – 74.
4. Диффузия электронов по питч-углам в магнитосфере / Ч. С. Робертс; под ред. Д. Вильямса и Дж. Мида. – М. : Мир, 1972. – С. 374 – 412. – (Физика магнитосферы).
5. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью / И. П. Безродных, Ю. Г. Шафер // Изв. АН. СССР. – 1983. – Т. 47. – № 9. – С. 1684 – 1686. – (Физика).
6. Всплески релятивистских электронов на магнитопаузе и во внешнем радиационном поясе / И. П. Безродных, Е. Г. Бережко, Е. И. Морозова [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 1984. – Т. 24. – № 5. – С. 818 – 820.
7. Исследование внешнего радиационного пояса Земли [Электронный ресурс] / И. П. Безродных // В кн. Космофизические исследования в Якутии. Часть 2. – Якутск : ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – С. 156 – 162. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/bezrodnykh.aspx>, свободный. – Прямая ссылка: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/200003.pdf>.
8. О неустойчивости плазмы с анизотропным распределением скоростей в магнитном поле / Р. З. Сагдеев, В. Д. Шафранов // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 39. – С. 181 – 184.
9. Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе / В. Ю. Трахтенгерц, М. Дж. Райкрофт; под ред. А.Г. Демехова. – Пер. с англ. – М. : Физматлит, 2011. – 344 с. : ил.
10. Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. М. Полищука и д-ра техн. наук, проф. К.М. Пичхадзе. – М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 660 с. : ил.
11. Баллистика и навигация космических аппаратов / Н. М. Иванов, Л. Н. Лысенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2004. – 544 с. : ил.
12. Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике Коронас-Ф / под ред. В. Д. Кузнецова. – М. : Физматлит, 2009. – 488 с.
13. Оценка оптимальных параметров экранов для защиты электронных систем космических аппаратов от ионизирующих излучений [Электронный ресурс] / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович, В. Т. Семенов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012. – Т. 131. – № 6. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/bezrodnykh.aspx>, свободный. – Прямая ссылка: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201203.pdf>.
14. Солнечные космические лучи / А. В. Белов, В. Г. Курт // В кн.: Модель космоса (под ред. проф. М. И. Панасюка). – М. : КДУ, 2007. – Т. 1. – С. 294 – 313.
15. Солнечные космические лучи / Л. И. Дорман, Л. И. Мирошниченко. – М. : Наука, 1968. – 468 с. : ил.
16. Спектр в источнике и энергетика солнечного протонного события 7 августа 1978 г. / Л. И. Мирошниченко // Геомагнетизм и аэрономия. – 1984. – Т. 24. – № 6. – С. 865 – 870.
17. Об оценках плотности энергии солнечных космических лучей у Земли / Л. И. Мирошниченко // Геомагнетизм и аэрономия. – 1984. – Т. 24. – № 6. – С. 871 – 874.
18. Распространение заряженных частиц, генерированных во вспышке 07 августа 1972 г. / Е. И. Морозова, О. Б. Ликин, Н. Ф. Писаренко // Геомагнетизм и аэрономия. – 1977. – Т. 17. – Вып. 5. – С. 811 – 819.
19. Радиационные условия на геостационарной орбите / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] [Электронный ресурс] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 33 – 42. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/bezrodnykh.aspx>, свободный. – Прямая ссылка: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201006.pdf>.
20. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчёта [Электронный ресурс] / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. –

Т 120. – № 1. – С. 37 – 44. – Режим доступа: бодный. – Прямая ссылка: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201104.pdf>.

Поступило в редакцию 01.03.2013

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,
т. (495) 366-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.

Евгения Ивановна Морозова, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,
т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2012@yandex.ru.

Анатолий Алексеевич Петрукович, член-корреспондент РАН, зав. отделом,
т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.

Владимир Тимофеевич Семёнов, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38,
e-mail: vniiem@vniiem.ru.

Владимир Михайлович Долкарт, д-р техн. наук, главный научн. сотрудник,
т. (495) 624-86-65, e-mail: vniiem@orc.ru.