

РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ПЕРИОД МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.Е. Шилов
(ФКА)

С.Н. Волков, И.П. Безродных, В.Т. Семенов
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Представлены результаты оценки радиационных условий для высокоорбитального КА с высотой круговой орбиты порядка 19 000 км и наклоном орбиты около 65°. Оценка радиационных условий выполнена для периода максимума солнечной активности. Обсуждается зависимость радиационных условий на орбите от динамики солнечной активности. Отмечается, что высокоорбитальные КА в основном находятся во внешнем ЕРПЗ, где существуют высокие интенсивности потоков релятивистских электронов. В связи с этим предлагается в конструкциях высокоорбитальных КА, по возможности, избегать использования тяжелых материалов, таких как медь, железо, свинец и т.д., так как в веществах с большим атомным номером релятивистские электроны более эффективно генерируют глубокопроникающее жесткое электромагнитное излучение, способное отрицательно повлиять на работу электронных систем КА.

Ключевые слова: солнечные космические лучи, доза радиации, орбита космического аппарата, электроны, протоны.

Введение. Солнечный ветер, взаимодействуя с магнитным полем Земли, сжимает его на дневной стороне и вытягивает силовые линии магнитного поля Земли на ночной стороне в противоположную сторону от Солнца. Таким образом, магнитосфера Земли представляет собой кометообразную область, занятую магнитным полем Земли. Расстояние от Земли до границы магнитосферы на дневной стороне около $10 R_z$, где R_z – радиус Земли, на ночной стороне протяженность хвоста магнитосферы более $100 R_z$.

В околоземном космическом пространстве, внутри магнитосферы Земли, в области замкнутых силовых линий магнитного поля образуется магнитная ловушка для заряженных частиц. Эта геомагнитная ловушка (естественный радиационный пояс) имеет тороидальную форму и содержит потоки высокоэнергичных частиц, интенсивность которых может в миллионы раз превосходить потоки частиц за ее пределами [1]. Основные частицы естественного радиационного пояса Земли: протоны, антипротоны, электроны, позитроны и ядра химических элементов.

Условно принято считать, что естественный радиационный пояс Земли (ЕРПЗ) разделен на два: внутренний и внешний. Внутренний ЕРПЗ расположен внутри плазмосферы, которая представляет собой область с высокой концентрацией холодной плазмы.

В плоскости геомагнитного экватора внутренний ЕРПЗ располагается на высоте от 1000 км над поверхностью Земли и примерно до 13 000 км с максимумом потока протонов ($E > 100$ МэВ) порядка 10 000 частиц/(см²·с) на высоте около 3500 км. Выше 13 000 км и примерно до 65 000 км располагается внешний ЕРПЗ с максимумом потока электронов ($E > 40$ кэВ) порядка 500 000 000 частиц/(см²·с) на высоте около 16 500 км. Внешний радиационный пояс более динамичен, чем внутренний, его параметры могут существенно ме-

няться в зависимости от состояния межпланетной среды. Фактически вся динамика частиц внешнего радиационного пояса контролируется скоростью солнечного ветра [2 – 8]. Необходимым условием для возрастания интенсивности релятивистских электронов во внешнем ЕРПЗ является возрастание скорости солнечного ветра [2 – 4].

При этом особую роль в наполнении релятивистскими электронами внешнего ЕРПЗ играют рекуррентные высокоскоростные потоки солнечного ветра, повторяющиеся с периодом 27 дней. В отличие от вспышечных потоков, рекуррентные потоки солнечного ветра всегда сопровождаются более сильными и продолжительными возрастаниями потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе [5].

Солнечные вспышки космических лучей, высокоскоростные вспышечные потоки плазмы на орбите Земли и рекуррентные высокоскоростные потоки плазмы солнечного ветра принято связывать с проявлением солнечной активности.

Ожидаемые радиационные условия для высокоорбитального космического аппарата типа ГЛОНАСС в период максимума солнечной активности. Орбита КА ГЛОНАСС круговая, расположена на высоте около 19 000 км и имеет наклон около 65°. Орбита полностью расположена во внешнем ЕРПЗ. Интенсивность потоков ионизирующих частиц на орбите, в зависимости от солнечной активности, может за несколько часов изменяться в десятки и сотни раз. Состояние солнечной активности можно прогнозировать и, следовательно, можно прогнозировать радиационные нагрузки на аппаратуру КА ГЛОНАСС. Краткосрочный прогноз радиационных условий на орбитах КА представляет собой сложную проблему, но при определенных условиях вполне решаемую. Гораздо проще прогнозировать усредненные радиационные нагрузки по большому интервалу време-

ни, например за год. При этом можно использовать данные из предыдущего 11-летнего цикла солнечной активности. Ближайший максимум 11-летнего цикла солнечной активности и повышенные радиационные нагрузки на космические аппараты ожидаются в конце 2012-го или в начале 2013-го года. Одиннадцатилетний цикл солнечной активности – это некоторое абстрактное понятие, характеризующее средний период активности Солнца. Реальный период солнечной активности может быть на несколько лет больше или меньше. Был период, когда Солнце было не активно почти 50 лет (минимум Маундера).

Начиная с 1610 г., солнечная активность оценивалась по числу пятен и групп пятен на поверхности Солнца по следующему алгоритму:

$$W=K(F + 10G),$$

где W – активность Солнца (число Вольфа); K – коэффициент, учитывающий качество наблюдений; F – количество всех отдельных пятен на Солнце; G – число образованных ими групп пятен.

На рис. 1 схематично показано ожидаемое положение максимума 24-го цикла солнечной активности. К прогнозу о том, что амплитуда максимума 24-го цикла будет больше максимума 23-го цикла солнечной активности и, что максимум будет наблюдаться в 2012 г., а не в 2013 г., следует относиться крайне осторожно. На то, что поведение солнечной активности не так предсказуемо, как нам бы хотелось, указывает аномально низкий и слишком сильно затянутый минимум солнечной активности в конце 23-го цикла (2007 – 2008 гг.).

Наибольший вклад в общий поток радиации во внешнем ЕРПЗ вносят потоки релятивистских электронов, кинетическая энергия которых сравнима с их собственной энергией покоя $m_0c^2 = 0,511$ МэВ или больше ее.

На рис. 2 показаны ожидаемые в максимуме солнечной активности усредненные за год энергетические спектры потоков релятивистских электронов ЕРПЗ на орбите КА ГЛОНАСС. Реальные пиковые значения потоков, которые будут наблюдаться в 2012 и 2013 гг., могут быть в сотни раз выше приведенных средних значений.

Для оценки величины пробега электронов в алюминии, мы модифицировали известную формулу Фламмерсфельда:

$$X = 0,11 \left[\sqrt{1,0 + 22,4EE} - 1 \right] \text{ (пробег } X, \text{ г/см}^2; \text{ энергия электрона } E, \text{ МэВ)},$$

описывающую зависимость пробега электрона в алюминии от энергии в диапазоне от 0,2 до 5 МэВ [9].

После модификации формула Фламмерсфельда приобрела вид

$$X = 0,11 \left[\sqrt{1,0 + 22,4EE} + 0,02 \lg(100E) - 0,999 \right], \text{ г/см}^2.$$

Сопоставляя пробеги электронов, рассчитанные по данной формуле, с экспериментальными значениями пробегов электронов, приведенных в справочнике по ядерной физике [9], мы пришли к выводу, что модифицированная формула применима

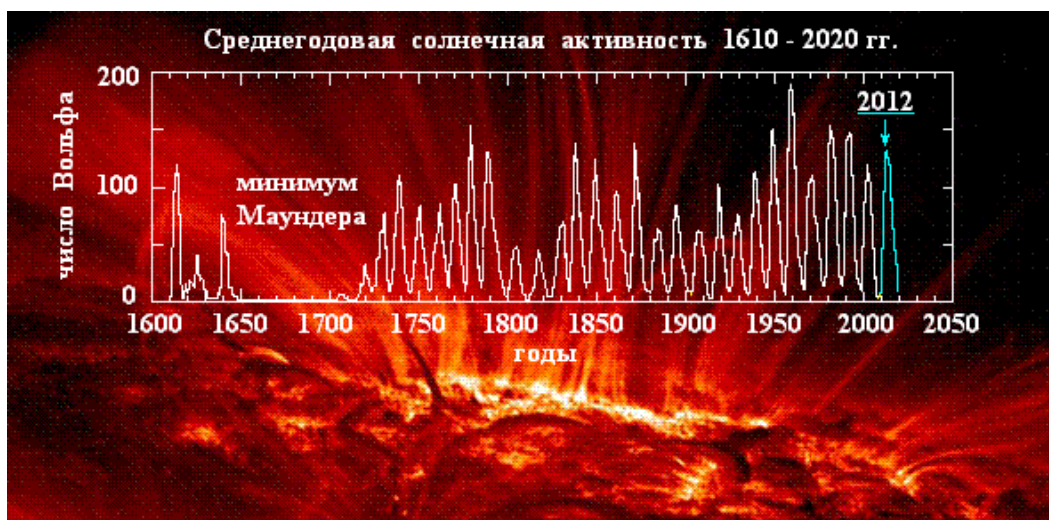


Рис. 1. Изменение солнечной активности с 1610 по 2010 гг. и ожидаемая солнечная активность с 2010 по 2020 гг. Стрелочкой показано положение ожидаемого осенью 2012 г. максимума 24-го цикла солнечной активности

в диапазоне энергии от 0,01 до 10 МэВ. Единица энергии 1 МэВ = $1,6 \cdot 10^{-6}$ – это энергия, которую электрон приобретает при прохождении разности потенциалов в один миллион вольт.

Ниже показаны пробеги электронов в алюминии, рассчитанные по вышеприведенной формуле:

E_e , МэВ	0,01	0,1	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	10,0
X , г/см ²	0,00023	0,014	0,427	0,94	1,50	1,99	2,50	3,02	5,10

Данные указывают на то, что электроны способны проникать далеко вглубь вещества. Если это вещество диэлектрик, то внутри этого вещества под воздействием электронов может сформироваться мощный объемный электрический заряд и, при определенных условиях, это может стать причиной электрических разрядов, способных повлиять на нормальную работу электронных систем КА.

На рис. 3 показаны ожидаемые в максимуме солнечной активности усредненные за год энергетические спектры потоков протонов ЕРПЗ на орбите КА ГЛОНАСС. Протоны ЕРПЗ на данной орбите имеют низкие энергии и практически полностью поглощаются алюминиевой пластиной толщиной порядка 0,07 г/см².

Ниже показаны пробеги протонов в алюминии. Обратите внимание, что пробеги протонов до их полного поглощения много меньше пробегов электронов тех же энергий.

E_p , МэВ	1	2	4	6	10	20	30	50	100
X , г/см ²	0,0034	0,011	0,035	0,069	0,169	0,571	1,181	2,939	9,89

Согласно современным представлениям, солнечная активность может проявлять себя и как вспышечный процесс в хромосфере Солнца, связанный с аннигиляцией магнитного поля (сближением силовых линий поля, образованием токового слоя и магнитного пере- замыкания силовых линий). Аннигиляция магнитного

поля сопровождается трансформацией энергии магнитного поля в энергию электрического поля и затем в энергию заряженных частиц. Вспышечный процесс длится до нескольких десятков минут, за это время выделяется до 10^{32} эрг в виде энергичного выброса плазмы и потока солнечных космических лучей (СКЛ), плотность энергии которых может в несколько тысяч раз превосходить плотность энергии галактических космических лучей (ГКЛ). Кроме СКЛ во вспышке генерируется электромагнитное излучение всех диапазонов – от метровых радиоволн до диапазона гамма-излучений. Выбросы вспышечной плазмы порождают межпланетные ударные волны, на фронтах которых может происходить ускорение заряженных частиц. К явлениям, связанным с ускорением заряженных частиц межпланетными ударными волнами до энергий порядка миллиарда электрон-вольт, можно отнести произошедшие: 17.07.1956, 12.11.1960, 04.08.1972 гг. и др. Солнечные вспышки бывают не только в максимуме солнечной активности, но и на ее подъеме или спаде активности Солнца. В качестве примера можно привести несколько известных солнечных вспышек:

- 1 – 07.07.1961; 24.09.1977; 22.11.1977 гг. на фазе подъема активности;
- 2 – 19.11.1949; 25.02.1969; 30.03.1969 гг. в максимуме активности;
- 3 – 21.03.2003; 28.10.2003; 05.09.2006 гг. на фазе спада активности.

На рис. 4 показаны ожидаемые в максимуме солнечной активности усредненные за год энергетические спектры потоков протонов СКЛ на орбите КА ГЛОНАСС.

Реальные пиковые значения потоков СКЛ, которые будут наблюдаться в максимуме и на спаде максимума солнечной активности, могут быть в десятки и сотни раз вышеприведенных средних значений.

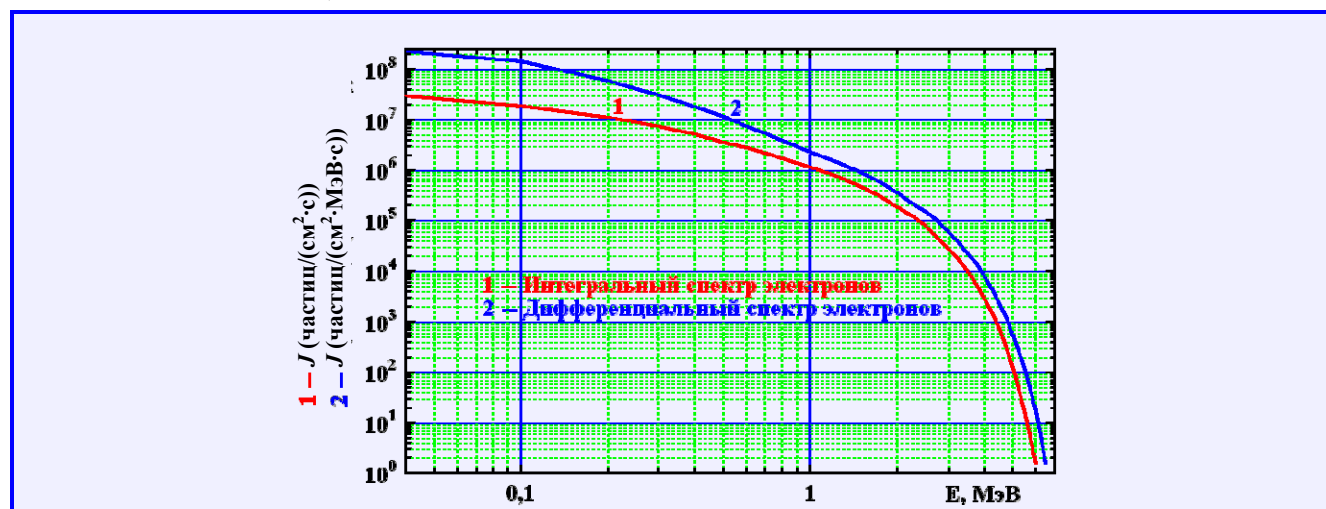


Рис. 2. Ожидаемые энергетические спектры электронов на орбите КА ГЛОНАСС-К в максимуме солнечной активности

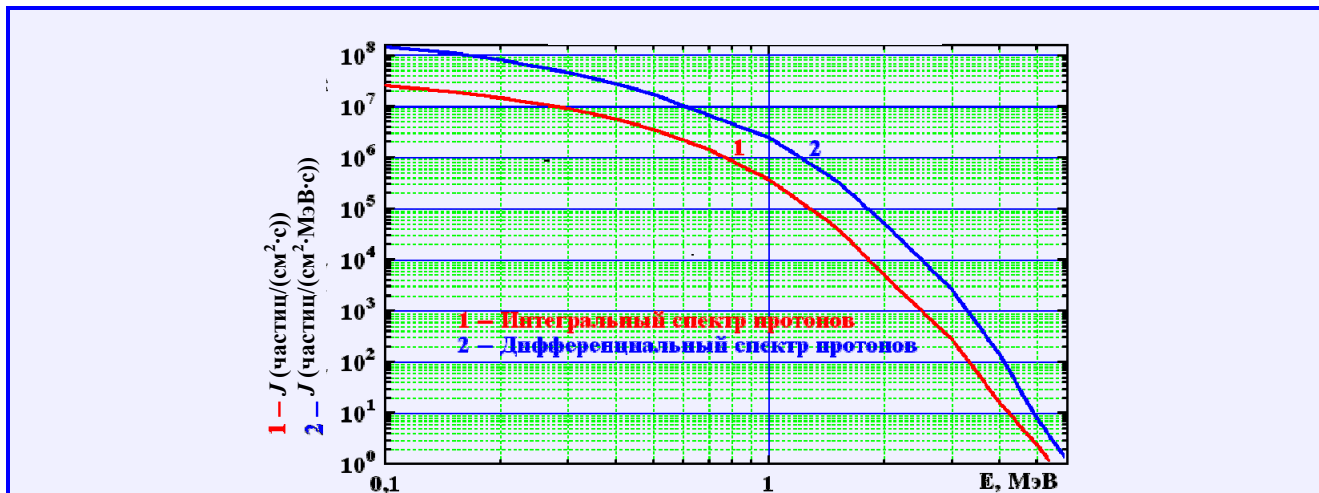


Рис. 3. Ожидаемые энергетические спектры протонов на орбите КА ГЛОНАСС-К в максимуме солнечной активности

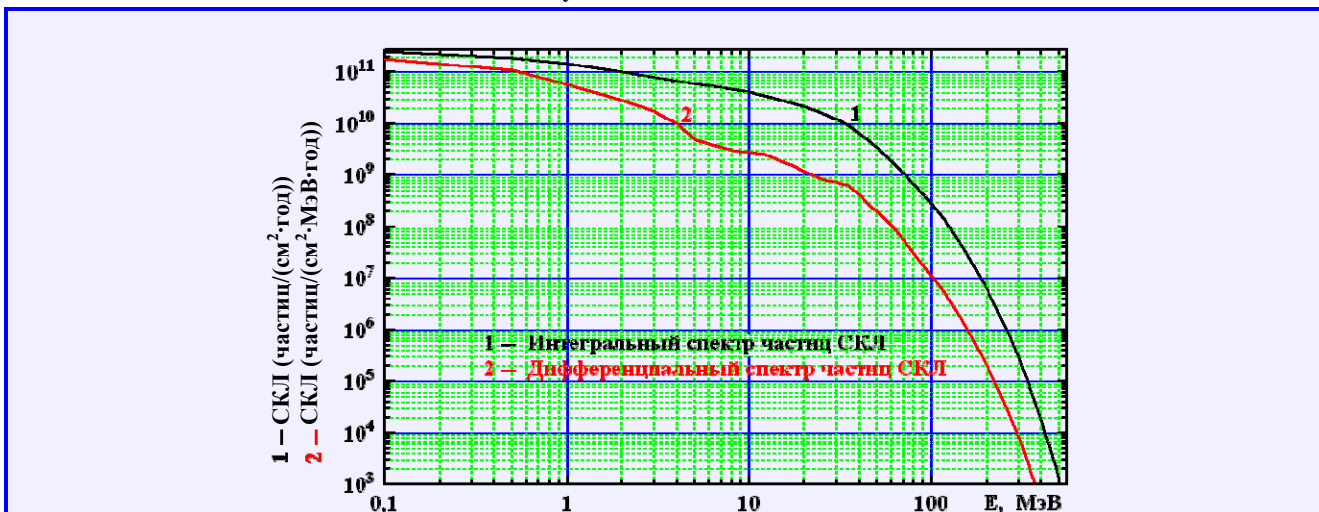


Рис. 4. Ожидаемые энергетические спектры СКЛ на орбите КА ГЛОНАСС-К в максимуме солнечной активности

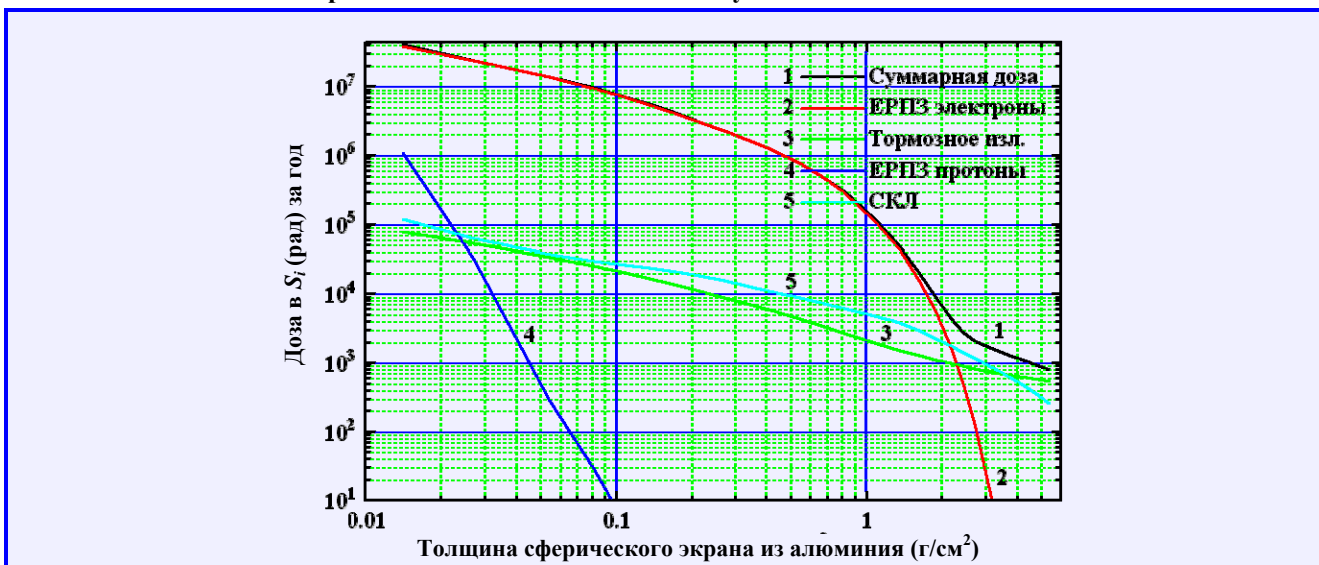


Рис. 5. Ожидаемые поглощенные дозы радиации на орбите КА ГЛОНАСС-К в максимуме солнечной активности, в центре сферы различной толщины

На рис. 5 показаны для периода максимума солнечной активности оценки средних значений поглощенных доз радиации в единицах рад (1 рад = 100 эрг/г). Оценки выполнены в предположении, что поглощающее вещество кремний расположено в центре сферы из алюминия, и что распределение ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве согласуется с моделями АЕ8 и AP8. Информацию о моделях распределения частиц в околоземном пространстве можно найти в работах [10 – 13].

При оценке радиационных условий мы не учитывали эффекты, связанные с образованием ливней частиц внутри КА высокоэнергичными частицами ГКЛ [14].

Высокоэнергичные заряженные частицы при взаимодействии с веществом КА ионизируют атомы этого вещества и генерируют фотоны тормозного излучения (ТИ), обладающие высокой проникающей способностью. Потери энергии заряженной частицы на ТИ пропорциональны энергии частицы, плотности вещества, квадрату заряда атомов вещества и обратно пропорциональны квадрату массы частицы:

$$(-dE/dx)_{\text{ти}} \sim EnZ^2/m^2.$$

Из этой зависимости следует, что в качестве экранов радиационной защиты не следует использовать такие вещества как медь, железо, свинец, поскольку в веществах с большим значением Z более эффективно генерируется глубоко проникающее жесткое электромагнитное излучение.

При оценке интенсивности потоков ТИ и поглощенных доз радиации от ТИ обычно учитывают только тормозное излучение электронов, поскольку из-за большой массы протона интенсивность излучения протона при тех же условиях почти в три миллиона раз меньше, чем тормозное излучение электрона.

За радиационной защитой в $2,5 \text{ г/см}^2$ алюминия поглощенная доза радиации на орбите КА ГЛОНАСС от тормозного излучения более чем в 10 раз превосходит дозу радиации от релятивистских электронов, которые генерируют это излучение. При радиационной защите электронных систем КА алюминием более $2,5 \text{ г/см}^2$, основной вклад в поглощенную дозу дают не потоки электронов, а их тормозное излучение и потоки частиц СКЛ.

Выводы. Возрастание скорости солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли может сопровождаться возрастанием интенсивности релятивистских электронов во внешнем ЕРПЗ и в частности

на орбите КА ГЛОНАСС. Если высокоскоростной поток солнечного ветра представляет собой рекуррентный поток солнечной плазмы, то возрастание интенсивности релятивистских электронов во внешнем ЕРПЗ и в частности на орбите КА ГЛОНАСС может быть более сильным и продолжительным.

Для высокоорбитальных КА, имеющих круговую орбиту с высотой около 19 000 км, при расчете поглощенных доз радиации можно пренебречь потоками протонов ЕРПЗ (за радиационной защитой более $0,07 \text{ г/см}^2$ алюминия). Под радиационной защитой менее 1 г/см^2 при оценке поглощенной дозы радиации достаточно учитывать только потоки релятивистских электронов внешнего ЕРПЗ, всеми другими видами радиации можно пренебречь. Под радиационной защитой от 1 до $2,5 \text{ г/см}^2$ следует учитывать потоки частицы СКЛ, релятивистских электронов ЕРПЗ и их тормозное излучение. Под радиационной защитой более $2,5 \text{ г/см}^2$ необходимо учитывать только потоки частицы СКЛ и тормозное излучение электронов ЕРПЗ.

Из-за высокой интенсивности потоков релятивистских электронов во внешнем ЕРПЗ, в конструкциях высокоорбитальных КА следует, по возможности, избегать использования тяжелых материалов, например, таких как медь, железо или свинец и т.д., поскольку в веществах с большим атомным номером релятивистскими электронами более эффективно генерируется глубокопроникающее жесткое электромагнитное излучение, защита от которого электронных компонент КА представляет особую сложность.

Литература

1. Радиационные пояса Земли / С.Н. Кузнецов, Л.В.Тверская // Модель космоса. – М.: Книжный дом Университет, 2007. – Т. 1. – С. 518 – 546.
2. О связи всплесков электронов во внешнем радиационном поясе Земли с высокоскоростными потоками солнечного ветра / И.П. Безродных // Нестационарные потоки заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. Сб. науч. трудов. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. – С.73 – 77.
3. Эмпирическая зависимость плотности потока релятивистских электронов на геосинхронной орбите от величины скорости солнечного ветра / И.П. Безродных // Физические процессы в околоземной плазме. Сб. науч. трудов. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. – С. 47 – 50.
4. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью / И.П. Безродных, Ю.Г. Шафер // Изв. АН СССР. Сер. физ. – М.: АН СССР, 1983. – Т.47. – № 9. – С.1684 – 1686.

5. Вариации интенсивности потока релятивистских электронов на орбите геостационарного спутника / И.П. Безродных, Е.И. Морозова, Ю.Г. Шафер // Космические исследования. – М.: Наука, 1986. – Т. 24. – Вып. 5. – С. 762 – 769.
6. Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в магнитосфере Земли / И.П. Безродных, Е.И. Морозова, Ю.Г. Шафер // Космические исследования. – М.: Наука, 1987. – Т. 25. – Вып. 1. – С. 64 – 73.
7. Всплески релятивистских электронов на магнитопаузе и во внешнем радиационном поясе / И.П. Безродных, Е.Г. Бережко, Е.И. Морозова [и др.] // Геомагнетизм и аэронавигация. – М.: Наука, 1984. – Т. 24. – № 5. – С. 818 – 820.
8. Потoki энергичных электронов вблизи магнитопаузы и на геостационарной орбите. Анализ экспериментальных результатов и механизм генерации / И.П. Безродных, Е.Г. Бережко, И.Я. Плотников [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физ. – М.: АН СССР, 1984. – Т. 48. – № 11. – С. 2165 – 2167.
9. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике / О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман. – Киев: Наукова Думка, 1975. – 416 с.
10. Влияние ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве на КА «Метеор-М» №1 / И.В. Гецелев, М.В. Подзолко, И.П. Безродных [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – № 5. – С. 29 – 34.
11. Радиационные факторы риска для космических аппаратов / Е.И. Морозова, И.П. Безродных, В.Т. Семенов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 112. – № 5. – С. 35 – 40.
12. Введение в расчетную модель / И.В. Гецелев // Модель космоса. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – Т. 3. – С. 7 – 13.
13. Модель пространственно-энергетического распределения потоков заряженных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли / И.В. Гецелев, Ф.Н. Гусев, Л.А. Дарчиева [и др.]; препринт НИИЯФ МГУ-91-37/241 М.: МГУ, 1991.
14. Ливни релятивистских частиц внутри космических аппаратов типа «Метеор» / И.П. Безродных, В.Т. Семенов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 27 – 32.

Поступила в редакцию 23.03.2010

Анатолий Евгеньевич Шилов, канд. техн. наук, заместитель руководителя ФКА.
Сергей Николаевич Волков, д-р техн. наук, 1-й зам. генерального директора-генерального конструктора, т. 366-42-56.
Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, т. 366-38-38.
Владимир Тимофеевич Семенов, начальник лаборатории, т. 366-38-38.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.