

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 537.591

РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ОРБИТАХ В ПЕРИОД МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И.П. Безродных

(ИКИ РАН)

С.Г. Казанцев, В.Т. Семенов

(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Представлены результаты расчетов радиационных условий на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности. Обсуждается зависимость радиационных условий на орбите от динамики солнечной активности. Ожидаемые малые поглощенные дозы радиации на солнечно-синхронных орбитах объясняются тем, что орбиты в основном проходят под радиационным поясом Земли и в экваториальной области хорошо защищены от солнечных космических лучей геомагнитным полем. На основании оценки поглощенных доз радиации утверждается, что на солнечно-синхронных орбитах можно полностью пренебречь тормозным излучением и за радиационной защитой более 2 г/см² алюминия можно пренебречь потоками релятивистских электронов ЕРПЗ, поскольку основной вклад в поглощенную дозу радиации за этой защитой дают протоны ЕРПЗ и частицы СКЛ.
Ключевые слова: космические аппараты, солнечно-синхронная орбита, поглощенная доза радиации, максимум солнечной активности.

Введение. Солнечно-синхронная орбита представляет собой орбиту, находясь на которой космический аппарат (КА) проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Таким образом, угол освещения земной поверхности будет приблизительно одинаковым на всех витках спутника. Такие постоянные условия освещения очень хорошо подходят для спутников, получающих изображения земной поверхности, спутников дистанционного зондирования Земли и метеоспутников. Например, спутник, находящийся на солнечно-синхронной орбите, может пересекать экватор около 15 раз в день и каждый раз в одно и то же местное время. Для получения этого эффекта параметры орбиты выбираются таким образом, чтобы орбита прецессировала в восточном направлении на 360° в год, компенсируя вращение Земли вокруг Солнца. Прецессия орбиты КА, в первую очередь, происходит из-за сжатия Земли на полюсах. Землю нельзя считать идеальным сферическим телом с радиальной и угловой симметрией распределения масс вещества. Нужную скорость прецессии можно достичь лишь для определённого диапазона углов наклона и высот орбит КА (как правило, высоты орбит выбираются в диапазоне 500 – 900 км, а наклон орбит в диапазоне 97 – 99°).

Специальными случаями солнечно-синхронных орбит являются орбиты, на которых КА пересекает экватор в полдень/полночь, а также орбиты, которые лежат в плоскости терминатора, то есть в плоскости закатов и восходов.

Одна из особенностей солнечно-синхронных орбит состоит в том, что они имеют большой наклон и обычно расположены на небольших высотах.

В высоких широтах солнечно-синхронные орбиты пересекают внутренний и внешний естественный радиационный пояс Земли (ЕРПЗ). В низких широтах орбиты могут пересекать область магнитной Бразильской аномалии. Для КА, находящихся на таких орбитах, важную роль играют не только потоки ионизирующих излучений ЕРПЗ [1] и потоки солнечных космических лучей (СКЛ), но и потоки частиц, выпадающие из ЕРПЗ [2 – 5]. Интенсивность выпадения частиц из ЕРПЗ увеличивается с возрастанием геомагнитного возмущения. Геомагнитные возмущения связаны с изменением состояния межпланетной среды, в частности, с увеличением скорости солнечного ветра [4]. В период геомагнитных бурь (мощных геомагнитных возмущений) наиболее интенсивные выпадения частиц из ЕРПЗ наблюдаются в районах северного и южного аврорального овала. Поскольку в период геомагнитных бурь авроральный овал смещается с высоких широт на более низкие (до широты ~50°), интенсивные выпадения частиц можно ожидать и на более низких широтах. Одной из основных причин выпадения релятивистских электронов из внешнего ЕРПЗ является их рассеяние на очень низкочастотных (ОНЧ) электромагнитных волнах. Интенсивность ОНЧ волн во внешней магнитосфере зависит от возмущения геомагнитного поля Земли. Вероятно этим объясняется высокий коэффициент корреляции (около 0,8 [4]) между динамикой выпадающих частиц и K_p – индексом, характеризующим степень возмущенности геомагнитного поля.

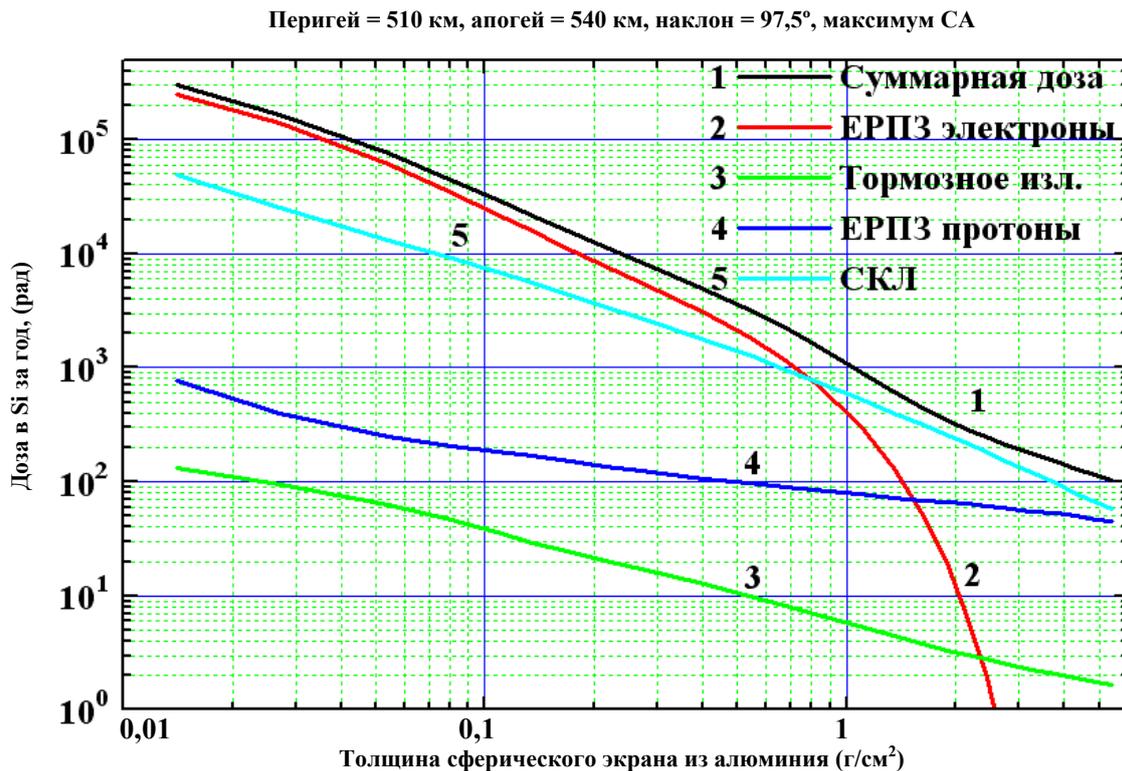


Рис. 1. Ожидаемые поглощенные дозы радиации в максимуме солнечной активности в центре сферы на орбите КА «Канопус-В»

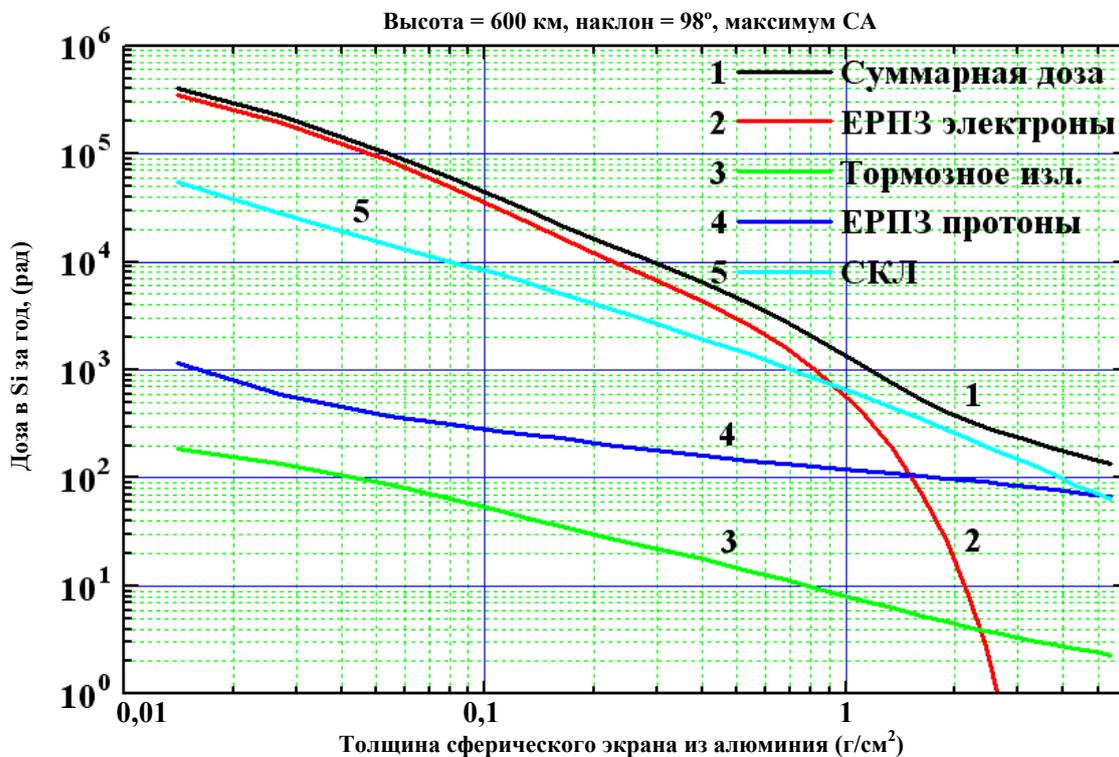


Рис. 2. Ожидаемые поглощенные дозы радиации в максимуме солнечной активности в центре сферы на круговой орбите с высотой 600 км и наклоном 98°

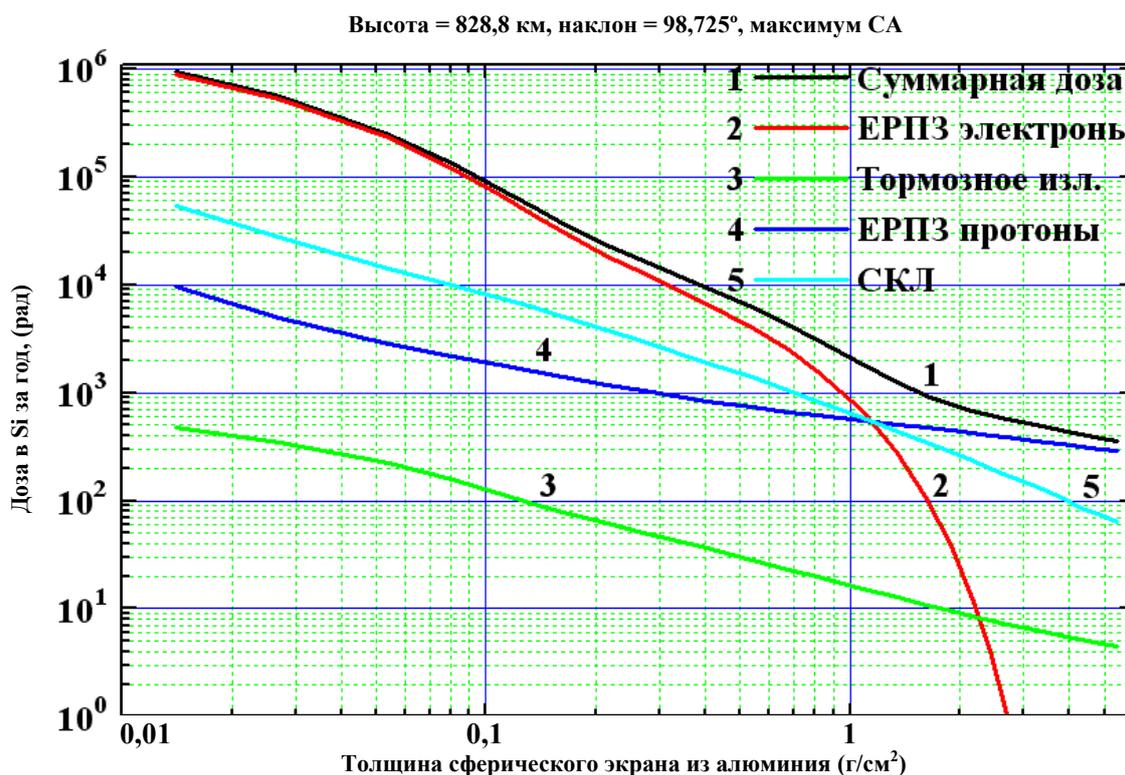


Рис. 3. Ожидаемые поглощенные дозы радиации в максимуме солнечной активности в центре сферы на орбите КА «Канопус-СТ»

Началом 24-го цикла солнечной активности (СА) можно считать начало 2009 г. Максимум 24-го цикла СА ожидается в конце 2012 или в начале 2013 г. [6]. Предполагая, что в одиннадцатилетнем 24-м цикле СА Солнце будет не менее активно, чем в предыдущем цикле СА [7], можно ожидать, что в 2012 – 2013 гг. солнечные вспышки будут следовать одна за другой с интервалом менее 2 ч. Солнце будет выбрасывать ежедневно более десятка миллионов тонн плазмы со сверхзвуковой скоростью. Всего за период с 2009 по 2020 гг. ожидается около 40 тыс. солнечных вспышек и более 500 мощных геомагнитных бурь.

Возрастание СА приведет к увеличению уровня радиации на многих орбитах, в том числе и на солнечно-синхронных орбитах, на орбите КА «ГЛОНАСС» и на геостационарной орбите.

Увеличение СА будет сопровождаться увеличением температуры верхних слоев атмосферы Земли. Повышение температуры верхних слоев атмосферы автоматически приведет к ее разбуханию. На высотах менее 600 км в периоды высокой СА заметно может возрасти аномальное торможение КА.

Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в 2012 году. Радиационный пояс располо-

жен в плоскости экватора на высоте около 1000 км. Большая часть солнечно-синхронной орбиты находится под ЕРПЗ, и только небольшой участок орбиты в высоких широтах проходит через внутренний и внешний ЕРПЗ. Почти вся солнечно-синхронная орбита, кроме небольшого участка в высоких широтах, хорошо защищена от потоков частиц СКЛ геомагнитным полем. Для оценки радиационных условий использовались модели (AP-8 и AE-8 NASA) пространственного и энергетического распределения частиц.

На рис. 1 показаны результаты оценки ожидаемых в 2012 году значений поглощенных доз радиации на орбите КА «Канопус-В». Ожидаемая мощность поглощенной дозы радиации внутри сферы толщиной в 1 г/см² алюминия будет около 1 тыс. рад в год.

Основной вклад в суммарную поглощенную дозу радиации будут вносить (в высоких широтах) частицы СКЛ и электроны внешнего ЕРПЗ. Вклады в общую поглощенную дозу радиации тормозного излучения электронов и протонов внутреннего ЕРПЗ не существенны.

На рис. 2 показаны результаты оценки ожидаемых в 2012 году поглощенных доз радиации на

круговой орбите с высотой 600 км и наклоном 98° . Ожидаемая мощность поглощенной дозы радиации внутри сферы толщиной в 1 г/см^2 алюминия будет около 1200 рад в год.

Основной вклад в суммарную поглощенную дозу радиации будут вносить (в высоких широтах) частицы СКЛ и релятивистские электроны внешнего ЕРПЗ, а поглощенной дозой радиации от тормозного излучения электронов и от потока протонов ЕРПЗ можно пренебречь.

На рис. 3 показаны результаты оценки ожидаемых в 2012 году поглощенных доз радиации на орбите КА «Канопус-СТ». Ожидаемая мощность поглощенной дозы радиации внутри сферы толщиной в 1 г/см^2 алюминия будет около 2 тыс. рад в год.

Основной вклад в суммарную поглощенную дозу радиации будут вносить (в высоких широтах) частицы СКЛ, релятивистские электроны внешнего ЕРПЗ и протоны внутреннего ЕРПЗ. На данной орбите поглощенной дозой радиации от тормозного излучения релятивистских электронов можно пренебречь.

Сравнение дозовых нагрузок на солнечно-синхронных орбитах и на орбите КА ГЛОНАСС. Результаты оценки ожидаемых в 2012 году поглощенных доз радиации на орбите КА ГЛОНАСС приведены в [6]. Ожидаемая мощность поглощенной дозы радиации внутри сферы толщиной в 1 г/см^2 алюминия будет около 130 тыс. рад в год. Отметим, что величина ожидаемой поглощенной дозы радиации на орбите КА «Канопус-СТ» в этот же период не более 2 тыс. рад в год.

На орбите КА ГЛОНАСС основной вклад в суммарную поглощенную дозу радиации дают релятивистские электроны внешнего ЕРПЗ. При данной толщине радиационной защиты всеми другими источниками радиации можно пренебречь. В отличие от протонов релятивистские электроны при взаимодействии с веществом эффективно генерируют тормозное электромагнитное излучение.

При толщине радиационной защиты более 4 г/см^2 алюминия на орбите КА ГЛОНАСС основной вклад в суммарную поглощенную дозу радиации даст тормозное излучение релятивистских электронов внешнего ЕРПЗ.

Выводы. Очень низкие поглощенные дозы радиации на солнечно-синхронных орбитах объясняются тем, что орбиты в основном проходят под ЕРПЗ и хорошо защищены от СКЛ геомагнитным полем. На солнечно-синхронных орбитах можно полностью пренебречь тормозным излучением релятивистских электронов. В отличие от солнечно-синхронных орбит на орбите КА ГЛОНАСС можно пренебречь только потоками протонов ЕРПЗ. Основной вклад в поглощенную дозу радиации на орбите КА ГЛОНАСС дают потоки частиц СКЛ, релятивистские электроны внешнего ЕРПЗ и тормозное излучение релятивистских электронов ЕРПЗ.

Литература

1. Радиационные пояса Земли. / С.Н. Кузнецов, Л.В. Тверская // Модель космоса. – М.: Изд-во «КДУ», 2007. – Т. 1. – С. 518 – 546.
2. 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.
3. Регистрация внезапных ионосферных возмущений меридиональной цепочкой риометрических станций / В.А. Кузьмин, В.Д. Соколов, И.П. Безродных // Геомагнетизм и аэрoномия. – М.: Наука, 1998. – Т. 38. – № 1. – С. 163 – 166.
4. Динамика спектра мощности частоты высыпания в авроральной ионосфере в период фазы спада и минимума 22-го цикла солнечной активности / В.А. Кузьмин, В.Д. Соколов, И.П. Безродных // Геомагнетизм и аэрoномия. – М.: Наука, 2000. – Т.40. – № 3. – С.114 – 118.
5. Вариации частоты высыпания частиц в 22 цикле солнечной активности / В.А. Кузьмин, В.Д. Соколов, И.П. Безродных // Геомагнетизм и аэрoномия. – М.: Наука, 2000. – Т. 40. – № 6. – С.103 – 106.
6. Радиационные условия на орбите КА ГЛОНАСС в период максимума солнечной активности / А.Е. Шилов, С.Н. Волков, И.П. Безродных [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 115. – № 2. – С. 47 – 52.
7. Проект КОРОНАС-Ф: исследование солнечной активности и ее воздействие на Землю / В.Д. Кузнецов // В кн. «Солнечно-Земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф». – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С. 10 – 34.

Поступила в редакцию 25.05.2010

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. 366-38-38.
Сергей Геннадьевич Казанцев, д-р техн. наук, зам. генерального директора – генерального конструктора, т. 366-12-01.
Владимир Тимофеевич Семенов, начальник лаборатории, т. 366-38-38.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.