

РАДИАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ РИСКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е.И. Морозова
(ИКИ РАН)

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

Обсуждаются модели динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли и влияние этих потоков на радиационные нагрузки, которые испытывают космические аппараты во внешней магнитосфере.

Ключевые слова: космический аппарат, релятивистские электроны, внешний радиационный пояс, модель.

Введение

Вследствие воздействия ряда неблагоприятных факторов, определяющих ресурс работы аппаратуры, эксплуатация спутников связана со значительными потенциальными рисками. Основным фактором риска для спутников, размещаемых на орбитах внутри магнитосферы (от ионосферных до геостационарных высот), являются радиационные воздействия потоков заряженных частиц радиационных поясов Земли (в основном, это протоны и электроны). Большие трудности возникают при расчете возможных радиационных нагрузок на высоко апогейных орбитах, которые эксплуатируют большинство научных и коммерческих спутников. Эти орбиты пересекают область внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ), наиболее динамичную область радиационных поясов [1 – 8]. При геомагнитных возмущениях, связанных с воздействием активных солнечных процессов на магнитосферу, наблюдаются значительные изменения в пространственной структуре и энергетических спектрах потоков энергичных электронов, которые в области ВРПЗ определяют основные дозовые нагрузки на этих орбитах. Эти изменения часто сопровождаются значительным увеличением потока релятивистских электронов (иногда на два – три порядка величины) [3]. При этом значительно увеличиваются дозовые нагрузки, и соответственно, увеличиваются эксплуатационные риски для спутников. При исследовании ресурса работы технологических систем было найдено, что порядка одной трети всех наблюдаемых на спутниках поломок связаны с потоками высокоэнергичных электронов. Это, в значительной степени, определило широкий практический интерес к изучению динамики потоков электронов ВРПЗ и необходимость разработки методов прогноза изменения структуры ВРПЗ при внешних воздействиях.

КА «Метеор-М» №1 в полярных областях магнитосферы подвергается воздействию радиации как внутреннего, так и внешнего РПЗ. Разработка модели динамики частиц ВРПЗ позволила бы прогнозировать за несколько дней или даже недель радиационно опасные периоды для КА «Метеор-М» №1.

Радиационные факторы риска

В последнее десятилетие стало ясно, что использование спутников для решения целого ряда научных и прикладных задач целесообразно и экономически оправдано только в случае безаварийной длительной эксплуатации космических систем. Однако эксплуатация спутников связана со значительными потенциальными рисками, которые, в основном, определяются радиационным воздействием потоков заряженных частиц на технологические системы КА. Деградация солнечных батарей, электризация поверхности, образование объемных зарядов внутри спутника и сбои в работе электронных схем, нарушение и потеря ориентации – возникновение всех этих негативных факторов, определяющих ресурс работы спутников, напрямую связано с изменением радиационных условий в магнитосфере [9]. Для решения целого ряда эксплуатационных задач КА необходимы количественные оценки возможных изменений пространственно-временной структуры потоков заряженных частиц. Практически, при расчете технических систем КА эксплуатационные характеристики рассчитываются на основе среднестатистических величин потоков частиц и, кроме того, закладывается некоторый «запас прочности» с учетом данных о вероятности возникновения активных процессов, вызывающих значительное увеличение потоков.

В околоземном пространстве дозовые нагрузки, в основном, связаны с радиационным воздействием потоков галактических космических лучей (ГКЛ),

заряженных частиц от солнечных вспышек и заряженных частиц, генерированных в магнитосфере Земли (частиц радиационных поясов).

Динамика ГКЛ хорошо изучена. Модуляция ГКЛ, в основном, связана с 11-летним циклом солнечной активности. Фактически радиационное воздействие ГКЛ можно считать достаточно постоянным, мало изменяющимся фактором, эффекты которого хорошо просчитываются [10, 11].

В отличие от ГКЛ увеличения потоков заряженных частиц от солнечных вспышек, как и сами вспышки, имеют спорадический характер. Их главным свойством является очень большая возможная величина потока, на много порядков превышающая фоновые потоки ГКЛ, и достаточно высокие энергии, иногда до нескольких ГэВ. Однако значительные потоки частиц, генерированных в солнечных вспышках, наблюдаются вблизи Земли достаточно редко.

Следует отметить, что хотя радиационные воздействия от солнечных вспышек могут быть значительными, особенно в максимуме солнечной активности, но они являются «одноразовыми», спорадическими, и для основных орбит спутников внутри магнитосферы радиационный вклад потоков солнечных заряженных частиц в полную годовую дозу не превышает ~10% [12].

Для космических аппаратов внутри магнитосферы Земли самым значительным по радиационным воздействиям, и главное, постоянно действующим фактором являются частицы радиационных поясов, в основном, это потоки протонов и электронов. Радиационные пояса Земли имеют весьма сложную структуру [7, 13]. Заряженные частицы непрерывно распределены в диапазоне от десятков кэВ до сотен МэВ для протонов и до десятков МэВ для электронов.

Низкоэнергичные частицы (<100 кэВ) заполняют почти равномерно магнитосферу Земли до расстояний $\sim 10R_s$ (R_s – радиус Земли). Пространственное распределение частиц высоких энергий характеризуется наличием больших градиентов и чрезвычайно высокими величинами потоков. Электроны с энергией $E > 100$ кэВ образуют две зоны, получившие название внутреннего ($1,2 \leq L \leq 2,5$, L – параметр Мак-Илвайна) и внешнего радиационных поясов ($3 \leq L \leq 7$). В зазоре между ними (в области $L \sim 2 - 2,5$) потоки электронов на 2 – 3 порядка меньше. Например, вблизи максимумов поясов (внутреннего на $L \sim 1,5$ и внешнего на $L \sim 4$) потоки электронов с $E > 2$ МэВ достигают величин $\sim 10^5$ частиц/(см²·с). Потоки протонов и электронов во

внутреннем поясе достаточно стабильны. Поэтому задача прогноза радиационных условий на орбитах спутников во внутреннем поясе решается достаточно точно с использованием средних экспериментальных величин потоков частиц [12, 14, 15].

При расчете дозовых нагрузок на высокоапогейных орбитах, которые пересекают область ВРПЗ, наиболее динамичную область радиационных поясов Земли, необходимо учитывать возможную динамику потоков частиц [3]. Пространственное распределение и энергетические спектры потоков энергичных электронов, определяющие основные радиационные нагрузки на этих орбитах, зависят от геомагнитной возмущенности и фазы солнечного цикла.

Структура потока частиц ВРПЗ формируется при воздействии определенных динамических процессов в магнитосфере Земли, которые, в свою очередь, определяются солнечной активностью. Наиболее значительные изменения в структуре потоков частиц в ВРПЗ при магнитных бурях и суббурях [16 – 18] регистрируются в области внешнего радиационного пояса [5, 19 – 21]. Во время геомагнитных возмущений изменяется пространственная структура электронной компоненты ВРПЗ, протонная компонента (это, в основном, низкоэнергичные протоны) практически не меняется. Следует отметить, что перестройка структуры потоков электронов ВРПЗ на фоне развития магнитной бури (суббури) может продолжаться в течение нескольких суток, причем вариации потоков электронов различных энергий неодинаковы, что приводит к изменению их энергетических спектров. Основным результатом такой перестройки структуры ВРПЗ является значительное увеличение (часто на несколько порядков) потока релятивистских электронов $>0,5$ МэВ [3, 22 – 24], что, в свою очередь, приводит к усилению радиационных нагрузок на технологические системы КА и снижению их рабочего ресурса [25].

Динамика потоков релятивистских электронов ВРПЗ

Классическую временную последовательность изменений структуры потоков релятивистских электронов ВРПЗ можно представить, конечно достаточно условно, следующим образом: значительное уменьшение потоков во время основной фазы магнитной бури, регистрируемой по уменьшению Dst-индекса; далее на фазе восстановления (увеличение Dst-индекса) – увеличение интенсивности потоков (часто на 2 – 3 порядка) и энергии электронов (до десятка МэВ); затем следует мед-

ленный спад потоков (обычно для высоких энергий постоянная спада больше). Как правило, начало увеличения потоков совпадает с началом фазы восстановления (увеличение Dst-индекса после минимума) и продолжается несколько дней [26]. При этом в энергетическом распределении потоков электронов регистрируется локальный максимум, который сдвигается в процессе восстановления от энергий порядка 500 кэВ до более высоких энергий. В некоторых случаях увеличению потока релятивистских электронов предшествует увеличение потока электронов средних энергий <400 кэВ (так называемые «seed» particles или «начальные» частицы), которые далее в течение нескольких дней могут быть ускорены до релятивистских энергий [20, 27].

Сравнение динамики потоков релятивистских электронов в разных зонах ВРПЗ (на разных высотах и L -оболочках) показало, что процесс генерации потоков высокоэнергичных электронов имеет глобальный характер. Ускоренные электроны появляются почти одновременно на всех L -оболочках в области $3,5 \leq L \leq 6,5$ независимо от высоты места наблюдения и с почти идентичной временной динамикой [28].

Сопоставление временных профилей потоков релятивистских электронов, измеренных одновременно в разных точках ВРПЗ, выявило чрезвычайно высокую корреляцию временных структур на разных спутниках. Коэффициент корреляции достаточно высок ($\sim 0,6 - 0,8$) и достигает максимальных значений при нулевой задержке между моментами регистрации выделенных структур на разных L -оболочках и высотах. Эти результаты указывают на когерентный характер реакции внешней области магнитосферы на геомагнитные возмущения, изменения охватывают всю область ВРПЗ.

Однако последствия воздействия магнитных бурь на электроны ВРПЗ могут быть разными [29, 30]. Магнитные бури могут как увеличивать, так и уменьшать потоки релятивистских электронов в ВРПЗ, все зависит от отношения мощности источников и стоков релятивистских электронов в ВРПЗ, реализованных в текущий момент времени.

Поведение динамики источников и истоков релятивистских электронов ВРПЗ в текущий момент времени зависит от многих факторов:

- от степени возмущенности магнитосферы в данный момент времени;
- от состояния магнитосферы до начала текущего возмущения;
- от состояния межпланетного магнитного поля;

– от параметров плазмы солнечного ветра.

Не все факторы равнозначны, в работах [1 – 6] показано, что необходимым условием возрастания потока релятивистских электронов во внешней магнитосфере является возрастание скорости солнечного ветра. Существенное влияние на величину максимального возрастания потока релятивистских электронов оказывает продолжительность высокоскоростного потока плазмы солнечного ветра и его структура.

Аналитические и эмпирические модели ВРПЗ

Многообразие вариантов реакции электронов ВРПЗ на геомагнитные возмущения приводит к значительным трудностям при разработке теоретических моделей, определяющих динамику потоков электронов ВРПЗ (ускорение и потери частиц). Предлагаемые теории образования ВРПЗ предполагают либо существование внешних по отношению к магнитосфере источников, либо формирование некоторых многократных циклов ускорения как резонансного (ускорение на электромагнитных колебаниях и геомагнитных пульсациях), так и нерезонансного типов (комбинация радиальной и питч-угловой диффузии).

Два основных магнитосферных процесса рассматриваются в качестве базовых для объяснения ускорения релятивистских электронов ВРПЗ: радиальная диффузия и взаимодействие волна – частица с низкочастотными пульсациями. В магнитосфере оба этих процесса работают одновременно, но эффективность каждого, конечно, определяется конкретными геомагнитными условиями. Следует отметить, что магнитосферные возмущения (магнитные бури и суббури) сопровождаются значительным усилением волновой активности в широком частотном диапазоне [31]. Современные теоретические модели предлагают несколько механизмов взаимодействия волна – частица, которые, действуя одновременно с радиальной диффузией, ускоряют электроны ВРПЗ до релятивистских энергий [32 – 35].

В моделях, использующих для ускорения электронов низкочастотные волны, необходимым условием ускорения электронов до релятивистских энергий, как правило, является наличие предварительно ускоренных до сотен кэВ «начальных» частиц [«seed» particles] [36]. Появление таких потоков, обычно, связывают с развитием суббуревой активности, когда электроны из хвостовой области магнитосферы Земли ($\sim 10 - 15 R_E$) в процессе

транспортировки до $\sim L = 4 - 4,5$ ускоряются индукционными электрическими полями, или ускоряются за счет эффектов, связанных с деполяризацией магнитного поля [37, 38]. Ускоренные во время суббурь электроны с энергиями $\sim 10 - 100$ кэВ рассматриваются как начальные частицы («seed» particles) для дальнейших процессов увеличения энергии частиц; кроме того эти электроны значительно усиливают интенсивность вистлеровских волн, которые далее участвуют в процессе ускорения электронов.

Теоретические разработки динамики потоков релятивистских электронов, как правило, концентрируются на объяснении возрастаний потоков, но почти не касаются вопросов, связанных с потерями электронов во время геомагнитных возмущений [29]. Очевидно, что реакция электронов ВРПЗ на геомагнитное возмущение в каждом конкретном событии определяется сложным балансом процессов ускорения и потерь частиц. В настоящее время не существует единой аналитической модели для описания поведения электронов ВРПЗ, поэтому для конкретного события на основе предлагаемых механизмов ускорения и транспортировки невозможно предсказать ожидаемую динамику потоков электронов. Практическая задача предсказания радиационной обстановки на орбитах КА в области ВРПЗ обычно решается на основе эмпирических моделей [2].

Эмпирические модели, не конкретизируя механизмы ускорения и потерь, рассматривают возможность выделения некоторых геоэффективных параметров, динамику которых можно использовать для предсказания динамики потоков электронов ВРПЗ. В качестве таких параметров обычно привлекаются геомагнитные индексы (Kp, Dst, AE, PC) и параметры солнечного ветра (скорость, магнитное поле). На основе статистического анализа обширного экспериментального материала выделяются наиболее вероятные зависимости между этими параметрами и потоками электронов. Метод линейных фильтров часто используется для выделения корреляционных связей потоков электронов с Kp-индексом [39] или с AE-индексом и скоростью солнечного ветра [40]. Эти фильтры дают средние вариации потоков электронов с 2 – 3-дневным запаздыванием относительно суммарной за день величины Kp-индекса или с однодневным запаздыванием относительно средней за день скорости солнечного ветра. Эффективность предсказаний, основанных на линейных фильтрах, не превышает 50 – 60%.

Эффективность предсказания $\sim 80\%$ (для потоков на геосинхронной орбите, измеренных в 1995 –

1996 гг.) была получена при использовании Dst-индекса и скорости солнечного ветра в качестве параметров, контролирующих динамику электронов; при этом предполагается наличие источника («seed» particles) на внешней границе ВРПЗ на $L \sim 11$ [41]. Сравнительный анализ возрастных потоков релятивистских электронов на геосинхронной орбите (данные спутника GOES-8 за 1997 – 2000 гг.) и геомагнитных параметров показал, что в качестве основных параметров, контролирующих возрастания, можно использовать геомагнитные индексы Kp и PC, а также размер магнитосферы в точке терминатора [42]. Найденная эмпирическая зависимость имеет, конечно, достаточно приближенный характер, но сам факт получения такой зависимости еще раз доказывает, что на внешние воздействия магнитосфера реагирует изменением (коррелированным или некоррелированным) целого ряда параметров: изменяется магнитное поле, изменяется структура электрических полей, изменяются волновые процессы и, наконец, изменяется структура ВРПЗ.

Многообразие вариантов динамики релятивистских электронов ВРПЗ, регистрируемых при почти одинаковых геомагнитных условиях, отражает многообразие процессов внутри магнитосферы Земли, сопровождающих геомагнитные возмущения. Малые значения коэффициентов корреляции между потоками электронов и геомагнитными параметрами указывают на сложный нелинейный характер процессов, управляющих динамикой потоков релятивистских электронов. Предлагаемые модели (как аналитические, так и эмпирические) среди всего набора возмущающих факторов не могут для каждого конкретного события выделить процессы, наиболее эффективные по воздействию на электроны ВРПЗ, и с достаточной точностью предсказать ожидаемую динамику наблюдаемых с космических аппаратов потоков электронов ВРПЗ. Трудность состоит в том, что у нас нет точных данных о количестве частиц, которые инжектируются в магнитосферу и нет точных данных о том, какое количество частиц утекает из магнитосферы. В экспериментах мы получаем информацию только о разности потоков этих частиц. Процессы ускорения и сброса частиц из магнитосферы происходят на фоне многих случайных событий. Следовательно, модель, которая могла бы прогнозировать радиационные условия в ВРПЗ с удовлетворительной точностью, может быть только статистической и должна учитывать текущее состояние межпланетной среды, текущее состояние магнитосферы и состояние магнитосферы перед началом возмущения.

Литература

1. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью / И.П. Безродных, Ю.Г. Шафер // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1983. – Т. 47. – № 9. – С. 1684 – 1686.
2. Эмпирическая зависимость плотности потока релятивистских 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.
3. 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.
4. Вариации интенсивности потока релятивистских электронов на орбите геостационарного спутника / И.П. Безродных, Е.И. Морозова, Ю.Г. Шафер // Космические исследования. – 1986. – Т. 24. – Вып. 5. – С. 762 – 769.
5. Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в магнитосфере Земли / И.П. Безродных, Е.И. Морозова, Ю.Г. Шафер // Космические исследования. – 1987. – Т. 25. – № 1. – С. 64 – 73.
6. Безродных И.П. Исследование внешнего радиационного пояса Земли / И.П. Безродных // Космофизические исследования в Якутии. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – Часть 2. – С. 156 – 162.
7. Кузнецов С.Н. Радиационные пояса Земли / С.Н. Кузнецов, Л.В. Тверская // Модель космоса. – М.: Изд-во «КДУ», 2007. – Т. 1. – С. 518 – 546.
8. Влияние ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве на космический аппарат «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. – С. 29 – 34.
9. Koskinen, H., Tanskanen E., Pirjola R. [et al.] Space weather effect catalogue; ESTEC/Contract No 14069/99/NL/SB, ESWS-FMI-RP-0001, issue 2.2. – January 2001.
10. CREME96: A revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code/ A.J. Tylka, J.H. Adams, P.R. Bobirg [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci., 44. – 1996. – № 6. – P. 2150 – 2160.
11. Galactic cosmic ray flux simulation and prediction / R.A. Nymmik, M.I. Panasyuk, A.A. Suslov // Adv. Space Res., 17. – 1996. – № 2. – P. 19 – 30.
12. Гецелев И.В. Радиационная обстановка на борту космических аппаратов / И.В. Гецелев, А.И. Зубарев, О.Л. Пудовкин. – М.: УИПК, 2001. – 316 с.
13. Vette J.I. Summary of particle populations in the magnetosphere. In Particles and fields in the magnetosphere. Dordrecht, D.Reidel. – 1970. – P. 305 – 318.
14. Sawyer D.M., Vette J.I. AP-8 Trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. NSSDC/WDC-A-R&S 76-06. – 1979.
15. Vette, J.I. The AE-8 Trapped electron environment. NSSDC/WDC-A-R&S 1-24. – 1991.
16. Solar wind control of magnetopause shape, location and motion / O.G. Sibeck, R.E. Lopez, E.C. Roelof // J. Geophys. Res. – 1991. – 96. – P. 5489 – 5495.
17. Interplanetary origin geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle / B.T. Tsurutani, W.D. Conzales, A.L. Conzales [et al.] // J. Geophys. Res. – 1995. – 100. – P. 21717.
18. Current understanding of magnetic storm. Storm-substorm relationships / Y. Kamide, W. Baumjohann, I.A. Daglis [et al.] // J. Geophys. Res. – 1998. – 103. – № A8. – P. 17705 – 17728.
19. Global dynamics of the plasmasphere and ring current during magnetic storms / J.L. Burch, O.G. Mitchell, B.R. Sandel [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2001. – 28(6). – P. 1159 – 1162.
20. Coronal mass ejections, magnetic clouds, and relativistic magnetospheric electron events: ISTP / D.N. Baker, T. Pulkkinen, X. Li, S. Kanekal [et al.] // J. Geophys. Res. – 1998. – 103(A8). – P. 17279 – 17291.
21. Relativistic electrons and magnetic storms: 1992 – 1995 / G.D. Reeves // Geophys. Res. Lett., 1998. – 25(11). – P. 1871 – 1820.
22. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere / R.H.W. Friedel, G.D. Reeves, T. Obara // J. Atmosph. Solar. Terr. Phys. – 2002. – 64(2). – P. 265 – 285.
23. Relativistic electrons near geostationary orbit: Evidence for internal magnetospheric acceleration / D.N. Baker, J.B. Blake, L.B. Callis [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 1989. – 16(6). – P. 559 – 562.
24. SAMPEX observations of storm-associated electron flux variations in the outer radiation belt / R. Nakamura, K. Kami, Y. Kamide [et al.] // J. Geophys. Res. – 1998. – 103. – P. 26261 – 26269.
25. Solar storms: The silent menace / S. Odenwald // Sky Telescope. – 2000. – 99. – P. 50 – 56.
26. Structure of Earth's outer radiation belt inferred from long-term electron flux dynamics / D. Vassiliadis, A.J. Klimas, R.S. Weigel [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2003. – 30(19). – P. 2015.
27. A strong CME-related magnetic cloud interaction with Earth magnetosphere: ISTP observation of rapid relativistic electron acceleration on May 15, 1997 / D.N. Baker, T. Pulkkinen, X. Li [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 1998. – 25. – P. 2975 – 2978.
28. Multisatellite measurements of relativistic electrons: Global coherence / S.G. Kanekal, D.N. Baker // J. Geophys. Res. – 2001. – 106(12). – P. 29721 – 29732.
29. Acceleration and loss relativistic electrons during geomagnetic storms / G.D. Reeves, K.L. McAdams, R.H.W. Friedel [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2003. – 30(10). – P. 1529.
30. Which magnetic storms produce relativistic electrons on geosynchronous orbit? / O'Brien T.P., McPerron R.L., Sornette D. [et al.] // J. Geophys. Res. – 2001. – 106. – P. 15533 – 15544.
31. Two types of magnetospheric ELF chorus and their substorm dependencies / B.T. Tsurutani, E.J. Smith // J. Geophys. Res. – 1977. – 82. – P. 5112.

32. Internal acceleration of relativistic electrons by large-amplitude ULF-pulsation's / W.W. Liu, G. Rostoker, D.N. Baker // J. Geophys. Res. – 1999. – 104. – P. 17391 – 17407.
33. Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere / D. Summers, R.M. Thorne, F. Xiao // J. Geophys. Res. – 1998. – 103. – P. 20487 – 20500.
34. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal mode Pc-5 ULF oscillation / S.R. Elkington, M.K. Hudson, A.A. Chan // Geophys. Res. Lett. – 1999. – 26. – P. 3273 – 3276.
35. Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus / N.P. Meredith, R.B. Horne, R.H.A. Iles [et al.] // J. Geophys. Res. – 2002. – 107(A7). – P. 1144.
36. Main phase creation of “seed” electrons in the outer radiation belt / T. Obara, T. Nagatsuma, M. Den [et al.] // Earth Planet. Space. – 2000. – 52. – P. 41.
37. Rapid enhancement of radiation belt electron fluxes due substorm depolarization of the geomagnetic field / M.-L. For, T.E. Moore, W.N. Spjeldrik // J. Geophys. Res. – 2001. – 106. – P. 3873.
38. Particle transport and energization associated with substorms / S. Zaharia, C.Z. Cheng, J.R. Johnson // J. Geophys. Res. – 2000. – 105. – P. 18741.
39. “Space weather forecast”: Prediction of relativistic electron intensity at synchronous orbit / T. Nagai // Geophys. Res. Lett. – 1988. – 15. – P. 425.
40. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at $6.6R_E$ / D.N. Baker, R.L. McPherron, T.E. Cayton [et al.] // J. Geophys. Res. – 1990. – 95. – P. 15133.
41. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit, based on solar wind measurements / Li X., Temerin M., Baker D.N. [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2001. – 28. – № 9. – Pp. 1887 – 1890.
42. Dependence of geosynchronous relativistic electron enhancements on geomagnetic parameters / A.V. Dmitriev, J.K. Chao // J. Geophys. Res. – 2003. – 108(11). – P. 1388.

Поступила в редакцию 18.09.2009

Евгения Ивановна Морозова, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, т. 333-20-00.
Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, т. 366-38-38.
Владимир Тимофеевич Семенов, нач. лаборатории, т. 366-38-38.
E-mail: vniiet@vniiet.ru.