

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА КА «МЕТЕОР-М» №1

И.В. Гецелев, М.В. Подзолко
(НИИЯФ МГУ)

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

Обсуждаются вопросы распределения потоков ионизирующих излучений в околоземном пространстве и рассматриваются наиболее радиационно опасные участки траектории для КА «Метеор-М» №1.

Ключевые слова: космический аппарат, ионизирующие излучения, радиационные пояса, модель.

Воздействие потоков космической радиации на космический аппарат (КА) «Метеор-М» №1 является наиболее вероятной причиной возможных сбоев в работе его электронных систем. Анализ распределения потоков космической радиации в околоземном космическом пространстве позволит выявить участки траектории полета КА «Метеор-М» №1, где сбои в работе электронных систем КА наиболее вероятны.

Общая характеристика динамики заряженных частиц в околоземном космическом пространстве

По накопленным к настоящему времени результатам экспериментальных и теоретических исследований можно создать сравнительно полную картину пространственных распределений, состава и энергетических спектров заряженных частиц, а также физических явлений, ответственных за их генерацию и динамику изменений. Наибольшую угрозу для космических аппаратов представляет радиация, которая сосредоточена в околоземном космическом пространстве в области радиусом около 65 тыс. км и удерживается магнитным полем Земли. Внутри магнитосферы Земли область «замкнутых» силовых линий магнитного поля представляет для заряженных частиц космических лучей геомагнитную ловушку, которую принято называть радиационным поясом [1 – 3]. Плотность потока ионизирующих излучений внутри радиационного пояса может в миллионы раз превосходить плотность потока ионизирующих излучений тех же энергий за пределами магнитного поля Земли.

«Герметизация» геомагнитной ловушки не совершенна, частицы постоянно высыпаются из нее вдоль силовых линий в ионосферу Земли. Плот-

ность потока высыпающихся частиц со временем может меняться в несколько тысяч раз. Несмотря на «дыры» в геомагнитной ловушке, плотность ионизирующих излучений в ней всегда высока, благодаря физическим механизмам, которые в околоземном космическом пространстве эффективно ускоряют заряженные частицы и наполняют ими область замкнутых силовых линий магнитного поля. Электроны с энергией $E_e > 100$ кэВ в геомагнитной ловушке образуют две зоны, получившие название внутреннего и внешнего естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ). Между внутренним и внешним ЕРПЗ в электронной компоненте наблюдается провал (зазор) в интенсивности потока электронов.

Радиационные пояса схематично представлены на рис. 1. Внутренний радиационный пояс показан зеленым цветом, внешний – показан фиолетовым цветом. Красным цветом показана область высыпания ионизирующих излучений из ЕРПЗ в ионосферу.

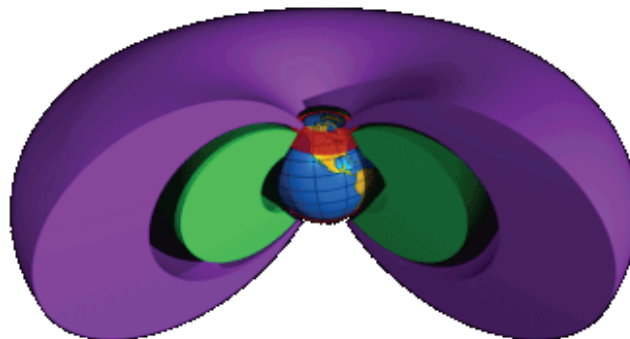


Рис. 1. Условное изображение внутреннего, внешнего радиационных поясов Земли и области высыпания заряженных частиц из ЕРПЗ в ионосферу

На магнитном экваторе расстояние от поверхности Земли до ЕРПЗ составляет величину около 1000 км. Например, орбита КА «Метеор-М» №1 в области магнитного экватора проходит под радиационным поясом (вблизи нижней границы), в более высоких широтах орбита КА может пройти через область Южно-Атлантической (Бразильской) магнитной аномалии, а в полярных областях орбита КА проходит через внутренний и внешний ЕРПЗ. Наиболее вероятные сбои в работе электронной аппаратуры КА следует ожидать при прохождении полярных областей магнитосферы и при прохождении области Южно-Атлантической аномалии.

КА «Метеор-М» №1 в высоких широтах попадает под воздействие ионизирующих излучений: частиц внутреннего и внешнего ЕРПЗ; частиц выпадающих из радиационных поясов, частиц ускоренных межпланетными ударными волнами; частиц галактических космических лучей и частиц солнечных космических лучей.

В области Южно-Атлантической аномалии КА подвержен воздействию ионизирующих излучений, обогащенных тяжелыми высокоэнергичными ядрами химических элементов.

Формирование зазора между внутренним и внешним ЕРПЗ в электронной компоненте радиационных поясов обусловлено усилением питч-угловой диффузии высокоэнергичных электронов в конус потерь вблизи границы плазмосферы [4].

Питч-углом называется угол между силовой линией магнитного поля и импульсом частицы. Конус потерь – это конус, расположенный вдоль силовой линии магнитного поля. При «попадании» питч-угла частицы в конус потерь, частица уходит (высыпается) вдоль силовой в атмосферу Земли и «погибает», теряя свою энергию на ионизацию атомов вещества атмосферы на высотах около 100 км и ниже.

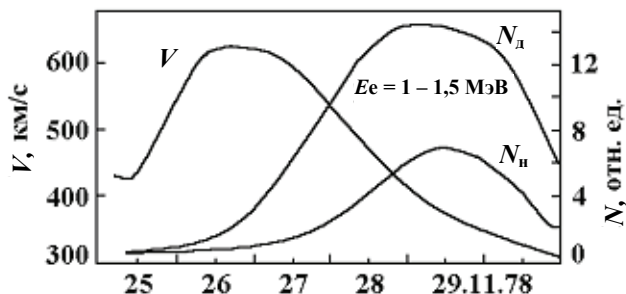


Рис. 2. Временной ход скорости солнечного ветра V вблизи магнитосферы и потока релятивистских электронов на дневной N_d и ночной N_n сторонах геостационарной орбиты с 25 по 30 ноября 1978 г. на КА «Радуга»

Внутренний пояс ЕРПЗ располагается внутри плазмосферы в плоскости геомагнитного экватора на высоте от 1000 км над поверхностью Земли и примерно до 13 000 км с максимумом потока протонов ($E > 100$ МэВ) порядка 10000 частиц/(см²·с) на высоте около 3500 км. Выше 13 000 км и примерно до 65 000 км располагается внешний радиационный пояс Земли (ВРПЗ) с максимумом электронов ($E > 40$ кэВ) порядка 500 000 000 частиц/(см²·с) на высоте около 16 500 км. Пояс – динамическая система и его параметры существенно могут меняться в зависимости от состояния межпланетной среды [5, 6].

Радиационные пояса всегда заполнены частицами, но их концентрация, пространственное распределение, распределение по энергиям, угловое распределение частиц со временем меняется в зависимости от состояния солнечной активности и динамики процессов, которые реализуются в текущий момент внутри магнитосферы (области, занятой магнитным полем Земли).

Вследствие геомагнитных возмущений (например связанных с увеличением скорости потока солнечного ветра) релаксация избытка энергии реализуется, в частности, за счет включения целого спектра механизмов, приводящих к ускорению заряженных частиц. На границе магнитосферы реализуется механизм ускорения в сдвиговых течениях плазмы. В хвосте магнитосферы – механизм ускорения, связанный с высвобождением энергии при аннигиляции встречных магнитных потоков. В магнитосфере Земли реализуется статистический механизм ускорения альвеновскими волнами и ускорение частиц в результате их радиальной диффузии, связанной с нарушением 3-го адиабатического инварианта при взаимодействии с крупномасштабными колебаниями магнитосферы, а также ускорение электронов при их резонансном взаимодействии с КНЧ – ОНЧ волнами.

Существование радиальной диффузии обеспечивает наполнение высокоэнергичными частицами внутренних областей ЕРПЗ. Во время магнитной бури такое наполнение частицами радиационного пояса распространяется почти до высот около $2R_z$ и отвечает за главную фазу геомагнитной бури. Дополнительными источниками релятивистских частиц во внутреннем ЕРПЗ могут быть, например, наклонные широкие атмосферные ливни релятивистских частиц и мощные грозовые разряды в верхних частях атмосферы Земли. Здесь перечислены не все возможные источники частиц ЕРПЗ. Фактически, генерация потоков высокоэнергичных частиц идет везде, где есть избыток энергии и соответствующие условия.

Среди большого количества различных явлений, наблюдаемых в радиационных поясах, можно выделить четыре наиболее важных, управляющих динамикой частиц ЕРПЗ:

- инжекцию высокоэнергичных заряженных частиц в область внешнего ЕРПЗ;
- инжекцию высокоэнергичных заряженных частиц в область внутреннего ЕРПЗ;
- радиальную диффузию заряженных частиц поперек силовых линий магнитного поля с границы магнитосферы внутрь;
- высыпание частиц из радиационных поясов в ионосферу Земли.

Баланс между интенсивностью источников и стоков высокоэнергичных частиц ЕРПЗ и определяет наблюдаемую концентрацию этих частиц в ЕРПЗ.

Потоки релятивистских частиц внешнего радиационного пояса гораздо более динамичны по сравнению с потоками частиц внутреннего радиационного пояса.

На рис. 2 показана характерная временная динамика потока релятивистских электронов внешнем ЕРПЗ при погружении магнитосферы в высокоскоростной поток плазмы солнечного ветра. При этом время запаздывания максимума потока релятивистских электронов от максимума скорости солнечного ветра может составлять величину от суток до четырех, в зависимости от степени возмущенности геомагнитного поля. Чем больше значения Кр-индекса, тем меньше время запаздывания [6].

Экспериментальные данные указывают на то, что увеличение скорости солнечного ветра приводит к увеличению потока высокоэнергичных электронов на границе магнитосферы и усиливается их диффузия внутрь радиационных поясов [5]. В связи с этим следует ожидать, что при погружении магнитосферы Земли в высокоскоростной поток плазмы солнечного ветра существенно изменятся радиационные условия для всех КА при их движении во внешнем ЕРПЗ.

В периоды геомагнитных возмущений усиливается скорость радиальной диффузии заряженных частиц, увеличивается скорость их питч-угловой диффузии в конус потерь и, как следствие этой диффузии, увеличивается интенсивность высыпания заряженных частиц из ЕРПЗ в ионосферу.

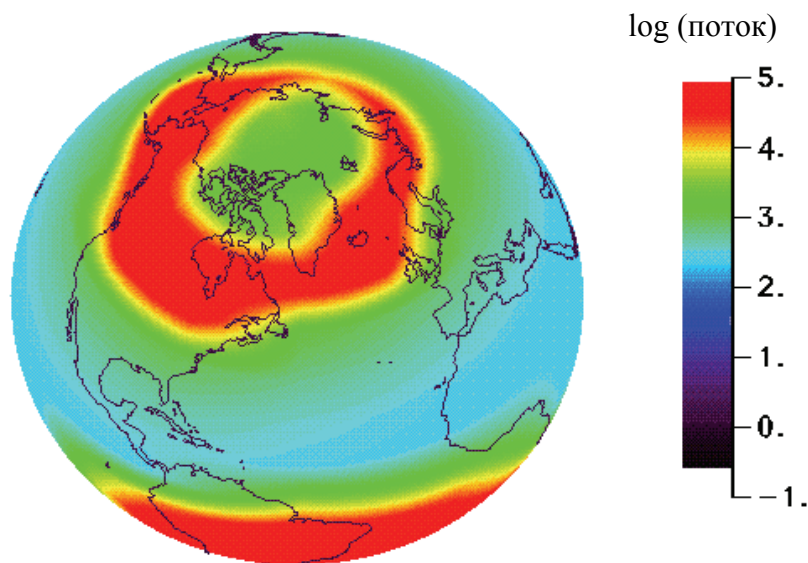


Рис. 3. Проекция на поверхность Земли вдоль L -оболочек магнитного поля потоков электронов ЕРПЗ с энергией более 1 МэВ [7]

Пространственные области, где в период магнитных возмущений наблюдаются наиболее интенсивные потоки высыпающихся частиц из ЕРПЗ, представляют собой слегка ассиметричный овал вокруг южного и овал вокруг северного магнитного полюсов Земли, кроме этого, высыпания наблюдаются в области Южной-Атлантической магнитной аномалии.

В период сильной геомагнитной бури, в следствии питч-угловой диффузии, высыпание релятивистских электронов из ЕРПЗ в ионосферу Земли будет происходить вдоль L -оболочек, на которых они находятся. Очевидно, что проекции на поверхность Земли пространственного распределения высыпающихся и захваченных в ЕРПЗ электронов будут соответствовать друг другу. Следовательно, можно ожидать, что пространственное распределение высыпающихся релятивистских электронов будет таким, каким оно показано на рис. 3. Эти предположения согласуются с экспериментальными исследованиями пространственного распределения высыпающихся из радиационных поясов высокоэнергичных электронов. Экспериментальные исследования во внешней магнитосфере потоков высокоэнергичных заряженных частиц показали, что интенсивность потоков этих частиц может изменяться в течение нескольких дней на несколько порядков. Динамика этих изменений зависит от динамики солнечного ветра и степени возмущенности геомагнитного поля Земли. Несмотря на

это, усреднение потоков ионизирующих излучений за период порядка солнечного цикла активности, позволяет получать достаточно надежные оценки прогнозируемых средних значений потоков частиц космических лучей. Кроме того, учитывая периодический характер изменения потоков ионизирующих излучений, можно прогнозировать средние значения потоков космических лучей и на более короткие промежутки времени, чем цикл солнечной активности.

Модель пространственного распределения интенсивности потока частиц ЕРПЗ

В результате освоения космического пространства накоплена обширная информация о радиационных поясах Земли. Проведенный анализ указал на ряд особенностей, которые следует учитывать при определении возможностей и путей использования этой информации для построения пространственно-энергетического распределения потоков частиц ЕРПЗ.

Прежде всего, необходимо отметить, что подавляющая часть данных получена в экспериментах, целью которых являлось изучение физических процессов, протекающих в магнитосфере Земли. Измерения производились с помощью различной аппаратуры, а к их результатам не предъявлялись требования, которые обычно предъявляются к статистической информации. Поэтому имеющиеся данные являются весьма разнородными как с точки зрения измеряемых величин, так и с точки зрения времени и места регистрации.

Кроме того, вследствие несовершенства измерительной аппаратуры, особенно на начальном этапе исследований, возникали трудности с интерпретацией полученных данных, что приводило в ряде случаев к ошибкам в определении потоков частиц, достигающих порядков величины.

Несмотря на трудности, начиная с середины 60-х годов, был разработан ряд зарубежных и отечественных моделей пространственно-энергетического распределения частиц ЕРПЗ.

В настоящее время наибольшее распространение получили модели AP-8 и AE-8 NASA и модель НИИЯФ МГУ [8, 9]. Предпочтение было отдано разработанной в 1991 г. модели НИИЯФ МГУ [9], при построении которой использовались результаты экспериментов, выполненных в 1975 – 1985 гг.

Для каждой L -оболочки и энергии частиц даётся высотный ход потока, отражающий зависимость его от величины магнитного поля B в диапазоне значений от B_0 (на геомагнитном экваторе)

до B_{\max} (на малых высотах, где поток не превышает 1 частиц·с⁻¹·см⁻²). Выбранное разбиение L , B -пространства позволяет достаточно подробно отобразить особенности высотного хода в распределении частиц.

К настоящему времени сложилось мнение, что модели обладают рядом недостатков, в особенности на высоте меньше 1000 км, и нуждаются в уточнении. Основными недостатками этих моделей считается использование устаревших экспериментальных данных, относящихся к аномально слабому солнечному циклу, засоренности экспериментальных результатов частицами, инжектированными в результате высотных ядерных взрывов, искаживших как их уровни, так и форму энергетических спектров, характерных для области внутреннего пояса.

Медленные изменения магнитного момента Земли и его переориентация (смещение центра и наклона) существенно изменили картину захваченной радиации на малых высотах, вызвав такие эффекты как смещение области Бразильской магнитной аномалии и опускание силовых линий с населяющими их частицами в более плотные слои атмосферы.

Принято считать, что основными источниками частиц ЕРПЗ являются ионосфера, солнечный ветер и солнечные космические лучи. Первичные космические лучи галактического происхождения могут также быть отнесены к источникам частиц ЕРПЗ (высокоэнергичных протонов, возникающих в результате распада нейтронов альbedo, образованных частицами ГКЛ при взаимодействии с ядрами атмосферы).

Недавно был обнаружен новый радиационный пояс, образованный высокоэнергичными ионами (в основном ¹⁶O, источником которых является аномальная компонента космических лучей (АКЛ)). Этот пояс возник в результате обдирки однократно заряженных ионов АКЛ в верхних слоях атмосферы и их последующего захвата магнитным полем Земли. Время жизни пояса сравнимо со временем жизни АКЛ в межпланетном пространстве.

Данный пояс характеризуется очень узким питч-угловым распределением с максимумом вблизи локального питч-угла, равного 90°, на малых высотах (~400 км).

Поскольку исследования захваченных АКЛ проводились только на малых высотах (на спутниках серии «Космос» (200 – 400 км) и «SAMPEX» (500 – 700 км)), разработка модели, охватывающей все

геомагнитные широты, потребует дополнительных теоретических расчетов.

Большой вклад в признание неадекватности моделей внесли результаты измерений потоков частиц, выполненные на КА CRRES. Эти измерения позволили обнаружить новый мощный радиационный пояс протонов и электронов с энергиями в десятки МэВ в области от $L = 2$ до $L = 3,5$, который образовался в течение одной минуты после внезапного начала магнитной бури, вызванной приходом мощной ударной волны к Земле. Дозы от протонов нового пояса с энергиями более 5 МэВ и свыше 100 МэВ максимум на два порядка превышают модельные, а от электронов с энергией более 13 МэВ – на три порядка величины.

Данные, полученные в экспериментах на станции «Мир» и низковысотном спутнике «Корона-И», также существенно отличаются от модельных, причем чаще всего в большую сторону. К такому же выводу о неадекватности моделей во многих случаях приводит сопоставление с модельными расчетами результатов измерений потоков частиц, выполненных на высокоорбитальных КА серий «Молния», «Глонасс», «Горизонт», «Галс» и «Электро».

Приведенные выше факты, вопреки сложившемуся мнению, не могут служить доказательством неадекватности используемых в настоящее время моделей.

Причин здесь несколько. Прежде всего, ошибочное представление об универсальности этих моделей, в результате чего для сопоставлений использовались измерения, полученные в отдельных экспериментах за сравнительно короткий период времени при различных уровнях геомагнитной обстановки.

Кроме того, экспериментальные данные часто засорены аналогичными типами частиц других видов ИИ КП, а усредненные данные за периоды максимума и минимума солнечной активности по всей вероятности отличаются в различных циклах.

Следует отметить, что благодаря быстрому накоплению новых экспериментальных данных, модели пространственного распределения излучений ЕРПЗ регулярно подвергаются корректировке. В 1998 г. была выполнена очередная корректировка, при которой модели представлены в виде, удобном для расчёта радиационных условий полёта КА методом обобщения L - B -координат.

В основе методики расчета потоков заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ) лежит динамическая модель потоков час-

тиц ГКЛ, разработанная в НИИЯФ МГУ. Один из вариантов этой модели был утвержден в виде Государственного стандарта. В настоящее время динамическая модель ГКЛ включена в состав новой версии модели CREME и одобрена экспертами международной организацией стандартизации (ISO) в качестве международного стандарта.

Модель предназначена для количественного описания потоков частиц ГКЛ вне магнитосферы Земли в ходе модуляции, обусловленной 11-летней вариацией солнечной активности и 22-летним циклом изменения крупномасштабного магнитного поля Солнца.

Модель устанавливает дифференциальные энергетические спектры потоков частиц ГКЛ (электронов, протонов и ядер с зарядом Z от 2 до 92) в интервале энергий от 1 до 10^5 МэВ/нуклон в зависимости от календарного времени. Используемые в модели формулы и численные параметры позволяют проводить прогнозирование изменения потоков частиц в зависимости от хода времени в течение 11-летнего цикла солнечной активности.

В настоящее время ФГУП «НПП ВНИИЭМ» проводит расчеты радиационных условий для космических аппаратов с использованием алгоритмов и программ, разработанных сотрудниками НИИЯФ МГУ профессором И.В. Гецелевым и научным сотрудником В.М. Подзолко.

Научные статьи по аналогичной тематике можно найти на сайте лаборатории космических исследований www.cosmicray.ru.

Литература

1. Радиационные пояса Земли и космические лучи / С.Н. Вернов, П.В. Вакулов, Е.В. Горчаков [и др.]. – М.: Просвещение, 1970. – 128 с.
2. Основные механизмы формирования радиационных поясов Земли / Б.А. Тверской // Физика магнитосферы / Под ред. Д. Вильямса и Дж. Мида. – М.: Мир, 1972. – С. 278 – 291.
3. Радиационные пояса / С.Н. Кузнецов, Л.В. Тверская // Модель космоса. – М.: КДУ, 2007. – Т. 1. – С. 518 – 546.
4. 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.
5. 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.
6. Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в маг-

нитосфере Земли / И.П. Безродных, Е.И. Морозова, Ю.Г. Шафер // Космические исследования. – 1987. – Т. 25. – № 1. – С. 64 – 73.

7. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTR coordinated measurements / D.N. Baker [et al.] // J. Geophys. Res. – 1997. – V.102. – № A7. – Pp. 14141 – 14148.

8. Гецелев И.В. Введение в расчетную модель / И.В.

Гецелев // Модель космоса. – М.: МГУ, 1978. – Т.3. – С. 7 – 13.

9. 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. – 1991.

Поступила в редакцию 03.08.2009

Игорь Владимирович Гецелев, д-р физ.-мат. наук, т. 939-52-33.

Михаил Владимирович Подзолко, науч. сотрудник, т. 939-52-33.

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, т. 366-38-38.

Владимир Тимофеевич Семенов, нач. лаборатории, т. 366-38-38.

Владимир Михайлович Фадеев, канд. физ.-мат. наук, т. 366-38-38.

Владимир Павлович Ходненко, д-р техн. наук, нач. лаборатории, т. 624-94-98.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.