

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

И.П. Безродных

Введение

Радиационные пояса Земли были открыты в 1958 г. Ван Алленом [1,2] (внутренний пояс) и С.Н. Верновым и А.Е. Чудаковым [3,4] (внешний пояс). Весной 1958 г. группа исследователей из Айовы, в которую входили Эрни Рей, Ван Аллен и др., анализировала данные скорости счета газоразрядных счетчиков, установленных на космических аппаратах "Эксплорер-1" и "Эксплорер-3". Именно тогда Эрни Рей, обсуждая результаты анализа, воскликнул "Боже мой, космос радиоактивен!" [5], этот момент можно считать началом исследования свойств потоков заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. Ван Аллен по данным "Эксплорер-1" и "Эксплорер-3", С.Н. Вернов и А.Е. Чудаков по данным "ИСЗ-2" и "ИСЗ-3", исследуя изменения скорости счета газоразрядных счетчиков по траектории полета космических аппаратов, пришли к заключению, что интенсивность заряженных частиц распределена в околоземном космическом пространстве не равномерно. Ее основная часть сосредоточена в замкнутой области. Это можно было объяснить предполагая, что для заряженных частиц магнитное поле Земли представляет собой ловушку в форме искаженного тороида. Потоки частиц в этой ловушке (радиационном поясе) могут в сотни миллионов раз превосходить потоки аналогичных частиц за ее пределами. Так произошло одно из выдающихся открытий 20-го века - радиационного пояса Земли (РПЗ), расположенного внутри магнитосферы.

РПЗ условно разделен на две части: внутренний и внешний пояс. Формирование зазора в электронной компоненте радиационных поясов обусловлено усилением питч-угловой диффузии электронов в конус потерь вблизи границы плазмосферы [6].

Внутренний пояс располагается внутри плазмосферы, в плоскости геомагнитного экватора, это высоты от 1000 км над поверхностью Земли и примерно до 13000 км с максимумом потока протонов ($E > 100$ МэВ) порядка 10000 частиц/(см² сек) на высоте 3500 км. Выше 13000 км и примерно до 65000 км располагается внешний радиационный пояс Земли (ВРПЗ) с максимумом электронов ($E > 40$ кэВ) порядка 500 000 000 частиц/(см² сек) на высоте около 16500 км. Все эти цифры приближенны и даны для ориентира. Пояс динамическая система и его параметры существенно могут меняться в зависимости от состояния межпланетной среды. На рис.1 приведены радиальные профили потоков протонов для нескольких пороговых энергий от 0.1 МэВ до 500 МэВ на $L < 6$ (L -параметр Мак-Илвейна, например, оболочка $L=6$ удалена в плоскости экватора от центра Земли на $6R_z$, где R_z - радиус Земли) [7]. Данные получены на различных космических аппаратах и усреднены по долготе и времени.

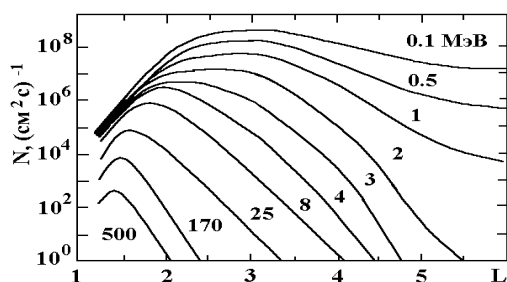


Рис.1. Радиальные профили потоков протонов в плоскости геомагнитного экватора для $L < 6$ [7].

Пространственное распределение электронов в магнитосфере Земли более динамично, чем протонов, и менее регулярно. На рис.2 представлены радиальные интенсивности электронов в плоскости геомагнитного экватора для $L < 12$ вблизи минимума солнечной активности [7].

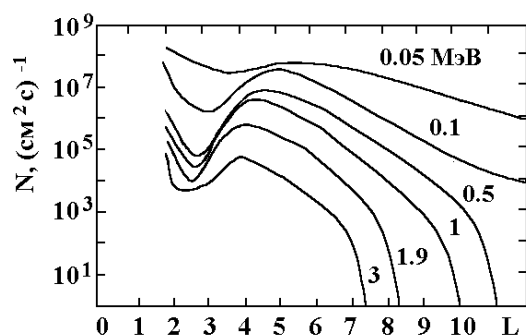


Рис.2. Радиальные профили средних по времени потоков электронов в плоскости геомагнитного экватора для $L < 12$ [7].

Радиационные пояса всегда заполнены частицами, но их концентрация, пространственное распределение, распределение по энергиям, по питч-углам (питч-углом называется угол между силовой линией магнитного поля и импульсом частицы) со временем меняется в зависимости от состояния межпланетной среды, солнечной активности и динамики тех процессов, которые реализуются в текущий момент внутри магнитосферы. Обычно внешний РПЗ на расстояниях более $5R_z$ от центра Земли в плоскости экватора наполнен частицами до отказа, т.е. до такой концентрации, которую геомагнитное поле в состоянии удержать, следовательно, давление частиц практически всегда составляет величину порядка $B^2/8\pi$.

Во время магнитной бури такое наполнение частицами радиационного пояса распространяется на более низкие высоты, до $3-4R_z$, и отвечает за главную фазу геомагнитной бури (Dessler [8], Frank [9]). Радиационные пояса Земли состоят в основном из электронов, позитронов, протонов и антипротонов, удерживаемых магнитным полем Земли. Ядра химических элементов легкой, средней и тяжелой группы также присутствуют в радиационных поясах, но их потоки незначительны по сравнению с потоками протонов и электронов тех же энергий.

Среди большого количества различных явлений, наблюдаемых в радиационных поясах, можно выделить три наиболее фундаментальных процесса, управляющих динамикой основной массы частиц: инжекцию в область захваченной радиации, диффузию, сопровождающуюся адиабатическим ускорением, и утечку.

Инжекция и диффузия, по-видимому, обусловлены вынужденными колебаниями (в случае инжекции сильно не линейными) магнитосферы при вариациях параметров солнечного ветра. Теоретически механизм радиальной диффузии заряженных частиц в магнитосфере Земли под действием импульсных возмущений магнитосферы, приводящий к увеличению энергии частиц по мере их дрейфа внутрь магнитосферы, был предложен и разработан Б.А. Тверским [10]

Утечка электронов из радиационных поясов связана с возбуждением некоторых типов собственных колебаний магнитосферной плазмы. при взаимодействии частиц с волнами основную роль играют различные резонансные эффекты [11-13].

Уже первые экспериментальные исследования динамики частиц радиационных поясов показали, что заполнения магнитосферы частицами может происходить в период геомагнитных возмущений в следствии быстрой радиальной диффузии частиц с больших

L оболочек на меньшие. Скорость такой диффузии, как правило, на порядок больше, чем скорость радиальной диффузии в магнитоспокойное время. На рис. 3 по данным спутника "Электрон-3" показано изменение внешнего пояса в результате быстрой радиальной диффузии электронов с $E > 0.4$ МэВ в течении начальной фазы магнитной бури [14].

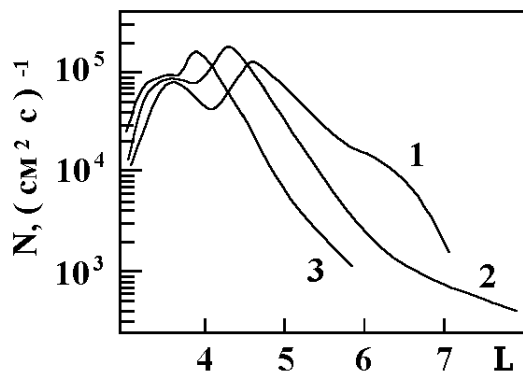


Рис.3. Изменение профиля внешнего радиационного пояса в следствии аномально быстрой радиальной диффузии электронов с $E > 0.4$ МэВ, под действием трех сильных внезапных импульсов в геомагнитном поле [14].
1) 0 ч 30 мин 2) 3 ч 00 мин 3) 6 ч 00 мин UT.

На рис. 4 показано изменение профиля интенсивности электронов внешнего пояса в результате быстрой радиальной диффузии электронов с $E > 1.6$ МэВ [15].

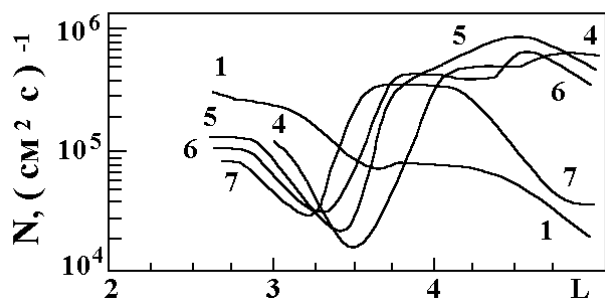


Рис.4. Изменение профиля внешнего радиационного пояса в следствии аномально быстрой радиальной диффузии электронов с $E > 1.6$ МэВ, (цифры у кривых - номера витков спутника) [15].

Из экспериментальных данных, представленных на рис.3 и рис. 4, следует, что механизм радиальной диффузии заряженных частиц под действием внезапных магнитных импульсов играет важную роль в звене цепи процессов, ответственных за наполнение частицами радиационных поясов Земли. Экспериментальные данные косвенно указывали на то, что в следствии торможения солнечного ветра при его взаимодействии с магнитосферой Земли, кинетическая энергия солнечного ветра на границе магнитосферы трансформируется в энергию ускоренных частиц, которые в процессе радиальной диффузии доускоряются и заполняют внутреннюю часть магнитосферы. Это можно понять сейчас, но тогда в начале 70-х было не просто представить, как может происходить трансформация кинетической энергии солнечного ветра на границе магнитосферы в энергию ускоренных частиц. Проще было вообще отказаться от идеи ускорения на границе магнитосферы и поискать какие то другие источники частиц радиационных поясов. Этим путем пошли многие исследователи. Более того гипотеза заполнения радиационных поясов в следствии радиальной диффузии частиц с границы магнитосферы внутрь, на первый взгляд, противоречила и здравому смыслу. Действительно диффузия частиц происходит из области пространства, где плотность мала в область пространства, где плотность во много раз больше. Мы в

обыденной жизни привыкли наблюдать обратную картину. Вероятно это и явилось причиной того, что появились гипотезы, претендующие на объяснение динамики частиц радиационных поясов, основанные на представлении, что ускорение частиц происходит в центре радиационного пояса в области максимальной концентрации частиц, а затем в следствии диффузии от больших плотностей к меньшим происходит наполнение частицами как нижних L оболочек так и верхних [16,17]. Согласно этой гипотезы, экспериментально обнаруженный слой энергичных электронов на границе магнитосферы это всего лишь следствие диффузии электронов из радиационного пояса наружу. Представления о магнитосфере как о системе с мощным ускорителем в центре радиационного пояса были далеко не убедительны. Было очевидно, что для понимания природы радиационных поясов необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования.

В конце 70-х годов сотрудники лаборатории космических исследований ИКФИА СО РАН разработали и осуществили, с помощью геостационарных космических аппаратов серии "Радуга", проект мониторинговых наблюдений потоков высокоэнергичных электронов и протонов в магнитосфере Земли. К этому моменту лаборатория космических исследований уже имела большой опыт, как в разработке научной аппаратуры для исследования околоземного космического пространства с помощью ракет и искусственных спутников Земли, так и в проведении самих исследований [18]. Например, сотрудники лаборатории исследовали радиационные эффекты, связанные с высотным термоядерным взрывом произведенным США 09.07.62 г. над островом Джонстона [19,20] и термоядерным взрывом в КНР 27.12.68 г. [21]. В результате экспериментальных исследований на космических аппаратах было установлено, что продукты взрыва на больших высотах, в области магнитосопряженной с местом взрыва, могут существовать продолжительное время [19,20]. Для объяснения эффекта продолжительного удержания осколков деления в магнитосопряженной с местом взрыва области, сотрудниками лаборатории была в первые предложена и разработана модель магнитогравитационной ловушки [22].

В эксперименте "Радуга" аппаратура, установленная на геостационарных спутниках, представляла собой модернизацию аппаратуры, проверенной на информативность и надежность в предыдущих исследованиях [18].

1. Краткое описание научной аппаратуры, установленной на геостационарных спутниках серии "Радуга"

В СССР первый геостационарный спутник (ГС) был запущен в сентябре 1976 г. Это был космический аппарат серии "Радуга", разработанный выдающимся советским конструктором академиком Михаилом Федоровичем Решетневым.

"Радуга" располагалась в плоскости экватора на удалении от центра Земли около $6.6R_z$ (где R_z -радиус Земли) и имела период вращения по орбите 24 часа, т.е. спутник вращался синхронно с Землей, фактически (не будучи очень строгим) можно сказать, что он все время "висел" над одной и той же точкой планеты. На первых трех спутниках "Радуга" была установлена научная аппаратура ЗК-72 для регистрации ионизирующих излучений, разработанная и изготовленная в лаборатории космических исследований ИКФИА СО РАН под руководством профессора Ю.Г. Шафера [23].

Датчик прибора Зк-72 состоял из 16 газоразрядных счетчиков СБМ-10, размещенных по окружности, в центре которой находился семнадцатый счетчик. Этот центральный счетчик образовывал с каждым из внешних счетчиков телескоп двойных, а с каждыми двумя диаметрально противоположными счетчиками телескоп тройных совпадений. Пространство между центральным счетчиком и шестнадцатью одиночными внешними (ОВ) счетчиками заполнено свинцом. Снаружи ОВ счетчики экранированы свинцом $3,4 \text{ г/см}^2$ и алюминием $0,3 \text{ г/см}^2$. Суммарный геометрический фактор ОВ счетчиков составлял величину $13 \text{ см}^2 \text{ ср}$. Интенсивность электронов определялась по интенсивности тормозного рентгеновского излучения, генерируемого ими в веществе внешнего экрана счетчиков. Коэффициент пересчета к потоку электронов составлял $4 \cdot 10^4$.

Рентгеновское излучение регистрировалось ОВ счетчиками на фоне проникающего излучения заряженных частиц (протоны $E > 45 \text{ МэВ}$; электроны $E > 6 \text{ МэВ}$). Телескопы из газоразрядных счетчиков двойных совпадений ($E_p > 85 \text{ МэВ}$) и тройных совпадений ($E_p > 130 \text{ МэВ}$) служили для оценки уровня радиации солнечных и галактических космических лучей. В составе датчиков прибора дополнительно находится одиночный газоразрядный счетчик без свинцового экрана. Счетчик имел геометрический фактор $0,5 \text{ см}^2 \text{ ср}$ и служил для регистрации электронов с энергией $E > 2 \text{ МэВ}$ на фоне протонов с $E_p > 20 \text{ МэВ}$. Временное разрешение прибора 30 минут [24].

2. Общая характеристика экспериментального материала

Измерение интенсивности потоков электронов с энергиями $E_e = 1-1,5 \text{ МэВ}$ и $E_e > 2 \text{ МэВ}$ проводилась во внешнем радиационном поясе на фазе нарастания 21-го цикла солнечной активности с помощью ГС "Радуга-1" и "Радуга-2", расположенных в плоскости географического экватора на $85,5$ и 35 градусов восточной долготы, соответственно. За три года наблюдений (с 1977 по 1979 гг.), получен непрерывный и однородный ряд экспериментальных данных по динамике энергичных электронов и протонов внешнего радиационного пояса.

За этот период было зарегистрировано ГС «Радуга» 7 вспышек солнечных космических лучей (СКЛ). Для всех семи вспышек была определена: средняя энергия частиц по спектру, полное количество инжектируемых в межпланетное пространство частиц в процессе солнечной вспышки, энергия затраченная на ускорение частиц во вспышке, длины свободных пробегов частиц солнечных космических лучей в межпланетном пространстве и их зависимость от энергии, коэффициенты диффузии в межпланетной среде и зависимость коэффициентов диффузии от энергии частиц и расстояния от точки инжекции [25]. Было проведено сопоставление потоков СКЛ на геостационарной орбите и в солнечном ветре [26].

При исследовании динамики электронов внешнего РПЗ было зарегистрировано около 50 всплесков интенсивности потока электронов продолжительностью до 7 суток и амплитудой, превышающий средний уровень фона более чем в 5 раз. Данные по всплескам на геостационарной орбите сопоставлялись с данными состояния межпланетной среды. Дополнительно для анализа привлекались данные спутников "Прогноз-6" и "Прогноз-7" по регистрации электронов в диапазонах энергии $0,3 - 1,3$ и $1,3 - 3,0 \text{ МэВ}$ на границе магнитосферы [24,29,30].

3. Результаты эксперимента

1. В процессе сопоставления потоков частиц солнечных космических лучей вне и внутри магнитосферы Земли было обнаружено превышение потока частиц солнечных космических лучей внутри магнитосферы Земли над потоком частиц вне магнитосферы [25,26]. Так в событиях 24.09.77 г., 07.05.78 г. и 23.09.78 года поток частиц от солнечных вспышек на $L=6.6$ превышал поток частиц СКЛ в межпланетной среде в 3, 7 и 5 раз соответственно. Было экспериментально установлено, что разница показаний регистрирующей аппаратуры вне и внутри магнитосферы Земли тем больше, чем больше анизотропия потока СКЛ в межпланетной среде.

2. Выявлены вариации потока электронов с энергией $E_e=1-1.5$ МэВ на $L=6.6$ с периодами около 2.5 часов, 7 суток, 15 суток, 30 суток, 6 месяцев и 13 месяцев [24,27,28]. Период 13 месяцев совпадает с синодическим период вращения мощного источника релятивистских электронов в солнечной системе - Юпитера.

3. Впервые обнаружено, что всем всплескам потока релятивистских электронов на границе магнитосферы и на орбите геостационарного спутника предшествует увеличение скорости солнечного ветра. Показано, что максимум скорости солнечного ветра опережает возрастание потока электронов на орбите геостационарного спутника, в среднем, на величину 2,5 суток. Показано, что время запаздывания максимума потока релятивистских электронов на орбите геостационарного спутника относительно максимума потока скорости солнечного ветра уменьшается с увеличением K_p - индекса геомагнитной активности и по порядку величины равно времени диффузии электронов с границы магнитосферы до точки наблюдения [24,28-33].

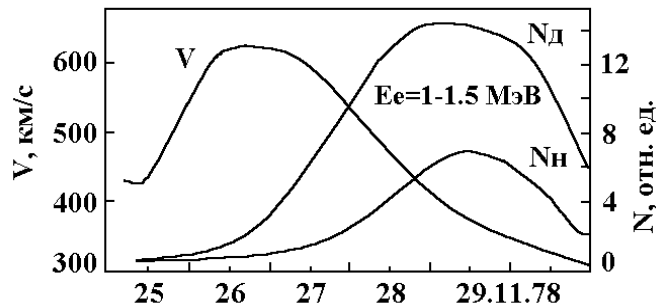


Рис.5. Временной ход скорости солнечного ветра (V) вблизи магнитосферы и потока электронов на дневной (N_d) и ночной (N_n) сторонах геостационарной орбиты в с 25 по 30 ноября 1978 г.

На рис.5 показана характерная временная динамика высокоэнергичных электронов на дневной и ночной сторонах геостационарной орбиты, при погружении магнитосферы в рекуррентный высокоскоростной поток плазмы солнечного ветра.

При этом время запаздывания максимума потока электронов от максимума скорости солнечного ветра может составлять величину от суток до 4 суток, в зависимости от степени возмущенности геомагнитного поля. Чем больше значения K_p -индекса, тем меньше время запаздывания [24].

На рис 6. показаны, нормированное на единицу распределение числа суток, в которые проводились наблюдения (непрерывные линии) и числа (около 50) всплесков интенсивности потока электронов ($E_e = 1-1.5$ МэВ) (штриховые линии) на $L = 6.6$ за период с 1977 по 1978 год по среднесуточным значениям скорости солнечного ветра. На рисунке видно, что наибольшее число всплесков электронов наблюдается тогда, когда скорость солнечного ветра превышает 450 км/с.

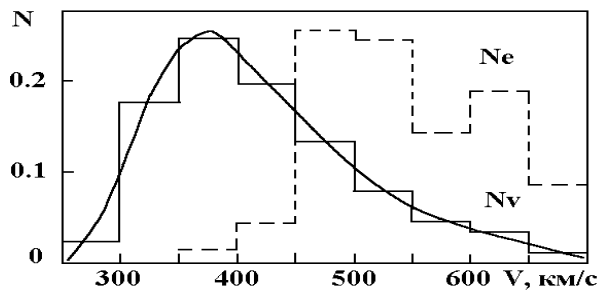


Рис. 6. Распределение числа суток (непрерывная линия) и числа всплесков интенсивности потока электронов ($E_e = 1-1.5$ МэВ) (штриховые линии) на $L = 6.6$ за период с 1977 по 1978 год, по среднесуточным значениям скорости солнечного ветра.

4 Обсуждения результатов эксперимента

Экспериментально обнаруженный эффект превышения потока вспыхивающих частиц по показанию регистрирующей аппаратуры на геостационарной орбите внутри магнитосферы над потоком вспыхивающих частиц вне магнитосферы, а также зависимость этого превышения от степени анизотропии СКЛ в межпланетной среде, можно объяснить эффектом изотропизации потоков СКЛ при их проникновении в магнитосферу. В случае полной анизотропии потока СКЛ в солнечном ветре (энергия которых достаточно велика для преодоления магнитного барьера), при их проникновении в магнитосферу и изотропизации, поток частиц СКЛ внутри магнитосферы будет так относиться к потоку вне, как отношение напряженности магнитного поля внутри магнитосферы к напряженности поля вне [26]. На геостационарной орбите ($L = 6.6$) напряженность магнитного поля составляет величину около 80 гамм, а в межпланетной среде около 5 гамм, следовательно, можно ожидать, что разница потоков СКЛ вне и внутри магнитосферы не будет превышать 16 и будет уменьшаться с уменьшением степени анизотропии потока СКЛ в межпланетной среде. Обнаруженная экспериментально разница в показаниях аппаратуры вне и внутри магнитосферы действительно не превышает эту величину и уменьшается с уменьшением степени анизотропии СКЛ в межпланетной среде. Такое хорошее согласие эксперимента и модели дает основание считать, что причиной различия показания приборов установленных вне и внутри магнитосферы при регистрации СКЛ может являться эффект изотропизации СКЛ при их проникновении в магнитосферу [26].

Как мы уже отмечали, модели РПЗ, использующие диффузионный механизм заполнения радиационных поясов Земли, встречались с рядом трудностей. В частности, для согласования результатов, полученных по этим моделям, с экспериментальными данными требовалось дополнительное предположение, что на границе магнитосферы находится источник электронов с энергиями порядка сотен кэВ. Трудности, связанные с обоснованием источника энергичных электронов на границе магнитосферы, явились в свое время причиной потери интереса к диффузионным моделям. Новая волна интереса к этим моделям появилась в связи с разработкой Бережко Е.Г. механизма фрикционного ускорения частиц в слое сдвигового течения плазмы [34,35].

Экспериментальные данные, полученные на геостационарном спутнике "Радуга" и "Прогноз", подтверждают предположение, что источник высокоэнергичных частиц радиационных поясов расположен на границе магнитосферы и его эффективность зависит от величины скорости солнечного ветра. Этот вывод основан на анализе 50 возрастных интенсивности потока высокоэнергичных электронов во внешнем РПЗ.

Существование диффузионного потока энергичных электронов с границы магнитосферы внутрь радиационного пояса подтверждается также наличием 13-месячных вариаций потока электронов в магнитосфере Земли [28,31].

Средняя энергия электронов, ускоренных на границе магнитосферы в слое сдвигового течения плазмы, по грубым оценкам может достигать величины 0.1 МэВ [29,30]. Максимальная энергия ускоренных частиц в слое будет значительно выше, чем ее среднее значение. Эффективность процесса фрикционного ускорения растет с увеличением скорости солнечного ветра, поскольку растет перепад скорости плазмы поперек слоя сдвигового течения. Следовательно, возрастание скорости солнечного ветра должно привести к увеличению интенсивности электронов на магнитопаузе, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными [29,30]. Из-за высокой мощности флуктуаций ММП в головной части потока плазмы солнечного ветра [36,37] будет происходить усиление диффузии энергичных электронов с границы магнитосферы внутрь радиационного пояса. Электроны, ускоренные вблизи магнитопаузы, благодаря рассеянию могут попадать в область квазизахвата в хвостовой части геомагнитосферы, где они будут участвовать в дрейфовом движении поперек хвоста и за счет диффузии проникать в область радиационных поясов. При сохранении первого и второго адиабатических инвариантов, частицы,двигающиеся внутрь магнитосферы, в процессе радиальной диффузии будут приобретать дополнительную энергию.

Возрастание скорости солнечного ветра должно привести к увеличению интенсивности электронов на магнитопаузе и в радиационном поясе, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными [29,30].

Следовательно, увеличение эффективности ускорения вблизи магнитопаузы и доускорение частиц в результате их радиальной диффузии с границы магнитосферы внутрь, при погружении магнитосферы в рекуррентные высокоскоростные потоки плазмы солнечного ветра, могут являться основной причиной наполнения радиационного пояса высокоэнергичными заряженными частицами.

Благодаря эксперименту "Радуга" удалось приблизиться к пониманию основных физических процессов и механизмов, ответственных за наполнение энергичными частицами радиационного пояса Земли. Поскольку результаты в этом эксперименте были получены для узкого диапазона L -оболочек и энергий частиц и были экстраполированы на весь радиационный пояс, естественно правомощность такой экстраполяции нуждалась в дополнительной проверке на других L - оболочках и в других диапазонах энергий. Такую проверку выполнили сразу несколько групп исследователей. Результаты, полученные этими исследователями, полностью подтвердили вывод о определяющей роли радиальной диффузии в формировании радиационного пояса. Так, в работах С.А. Воронова, А.М. Гальпера и др.[39,40] на основании эксперимента на орбитальном космическом комплексе "Союз-7-Союз-Т13-Космос-1669" с помощью сцинтилляционного времяпролетного магнитного спектрометра "Мария" показано, что в радиационном поясе поток электронов с энергией больше 30 МэВ в несколько раз превосходит поток позитронов тех же энергий. В то же время, поток позитронов под радиационным поясом в два раза выше потока электронов. В этих работах приведены экспериментальные данные о том, что радиационный пояс состоит в основном из электронов, а не из позитронов, и следовательно механизмы генерации электронов, связанные с взаимодействием протонов, предложенные в работах [41,42], для радиационного пояса не являются основными. Таким образом, автоматически отпала

альтернатива диффузионным механизмам заполнения релятивистскими электронами радиационных поясов [43].

Исследования динамики электронов в широком диапазоне L -оболочек выполненные сотрудниками НИИЯФ МГУ к.ф.-м.н. И.Н. Сенчура и к.ф.-м.н., П.И. Шавриным, подтвердили основные выводы, полученные в эксперименте "Радуга" [38]. Таким образом, в конце 20 века на качественном уровне была решена одна из наиболее важных проблем геофизики - проблема происхождения внешнего радиационного пояса Земли.

Вероятно, эти работы в дальнейшем послужат основой для создания математической модели описывающей количественные характеристики динамики радиационного пояса и связи этой динамики с состоянием межпланетной среды.

В заключении следует отметить, что решающую роль в проведении эксперимента "Радуга" сыграли: главный конструктор космических аппаратов, академик Михаил Федорович Решетнев и профессор Юрий Георгиевич Шафер. На протяжении всего эксперимента постоянную поддержку оказывали сотрудники ИКИ АН СССР к.ф.-м.н. Евгения Ивановна Морозова, д.ф.-м.н. Новомир Федорович Писаренко.

Список литературы

1. Van Allen J.A. et al.// Jet Propulsion. -1958. -V.28.-P.1
2. Van Allen J.A. //J.Geophys. Res. -1959.-V.64. -P.1683
3. Вернов С.Н.,Вакулов П.В., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. // Искусственные спутники Земли. -1958. -Т.2, -С.61
4. Вернов С.Н., Чудаков А.Е. // Успехи физ. Наук. -1960. -Т.70. -С.585
5. Хесс В. // Радиационный пояс и магнитосфера. Перев. с англ. М.: Атомиздат, -1972. - 352 с.
6. Беспалов П.А.,Вагнер Х.-У.,Графе А.,Трахтенгерц В.Ю. О формировании зазора в электронной компоненте радиационных поясов // Геомагнетизм и аэрономия. -1983. - Т.23, Вып.1, -С.68-74
7. Williams D.J.,ESSA Technical Report ERL 180-SOL 16,-1970.
8. Dessler A.J., Parker E.N., Hydromagnetic theory of geomagnetic storms, // J. Geophys. Res. 1959. -V.64. -С.2239-2242.
9. Frank L.A., On the extraterrestrial ring current during geomagnetic storm. // J. Geophys. Res. 1967. V.72. С.3753-3768.
10. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов. М.: Наука, -1968, -223с.
11. Тверской Б.А. Основные механизмы формирования радиационных поясов Земли. //Физика магнитосферы. Под ред. Д. Вильямса и Дж. Мида. М.: Мир, -1972. -С.278-291
12. Lyons L.R., Thorne R.M.,Kennel C.F. Pitch-Angle Diffusion of Radiation Belt Electrons within the Plasmasphere // J. Geophys. Res. -1972. -V.77. -P.3455-3474.
13. Беспалов П.А. Циклотронная неустойчивость магнитосферного пробкотрона //Исследование по геомагнетизму, аэрономии и физики Солнца. -1982. № 61. -С.92-104.
14. Вернов С.Н., Горчаков Е.В., Кузнецов С.Н., Сосновец Э.Н., Логачев Ю.И., Столповский В.Г. Потоки частиц во внешнем геомагнитном поле. //Физика магнитосферы. Под ред. Д. Вильямса и Дж. Мида. М.: Мир, -1972, -С.318-344.
15. Frank L.A. // J. Geophys. Res. -1965. -V.70. -P.3533
16. Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.I. Observations of Trapped Electrons at Low and Nigh Altitudes // J. Geophys. Res. -1968. -V.73. -P.5673

17. Емельянченко С.П., Кузнецов С.Н., Столповский В.Г. Исследование захваченной радиации на ИСЗ "Космос-428" // Космические исследования. -1977. -Т.15, -№1. -С.155
18. Злотин Г.Н., Лютенко В.Ф., Скрыбин Н.Г., Шафер Ю.Г., Ярыгин А.В. Опыт измерения космических лучей на патрульных искусственных спутниках Земли // Космические исследования. -1968. -Т.6, Вып.1. -С.90-99
19. Шафер Ю.Г., Болюнова А.Д., Гальперин Ю.И., Кулагин А.Г., Петрищева И.С. Измерения радиационных эффектов американского высотного термоядерного взрыва «Морская Звезда» на спутнике «Космос-6» // Космические исследования. -1968. -Т.6, Вып.6. -877-886.
20. Шафер Ю.Г., Гальперин Ю.И., Кулагин А.Г., Болюнова А.Д. Радиоактивность ИСЗ «Космос-6» и предлагаемые места набора радиоактивных осколков на высоте 300 – 350 км. // Геомагнетизм и аэрномия. -1969. -Т.9, №4. -С.608-612.
21. Шафер Ю.Г., Козлов В.И., Кириенко И.С., Болюнова А.Д., Саримзибаров Р.Б., Ощепков С.М. Измерения радиационных эффектов термоядерного взрыва в КНР 27.12.68 г. на ИСЗ "Космос-259" и "Космос-262" // Космические исследования. -1971. Т.9, Вып.4. С.558-564.
22. Козлов В.И., Шафер Ю.Г. О возможном механизме локализации осколков деления от термоядерного взрыва // Космические исследования. -1971. -Т.9, Вып.4. -С.630-631
23. Кесильман Е.Ш., Клименко В.В. и др. Предварительные результаты измерений потоков заряженных частиц на геостационарной орбите. // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1978. -Т.42, №5. С.1063 -1066.
24. Безродных И.П. "Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли" кандидатская диссертация, ИЗМИРАН, 1985 год.
25. Клименко В.В. "Экспериментальное исследование распространения потоков заряженных частиц в солнечной короне и межпланетной среде" кандидатская диссертация, Москва, 1983 год.
26. Bezrodnykh I.P., Klimenko V.V., Krymsky G.F., Romaschenko Yu.A., Shafer Yu.G. On possibility of isotropization of solar particle flux in process of their penetration into the Earth's magnetosphere. // Proc. 17-th ICRC. Paris. -1981. -V.3. -P.401-404.
27. Bezrodnykh I.P., Shafer Yu.G. Pulsations of Electron Flux Intensity with a Period 2-3 Hours at a Geosynchronous Orbit. // Proc.18-th ICRC. India. -1983. -V.3. -P.258-261.
28. Безродных И.П., Шафер Ю.Г. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью.// Изв. АН СССР. Сер. физ. -1983. -Т.47, №9. С.1684-1686.
29. Безродных И.П., Бережко Е.Г., Морозова Е.И., Писаренко Н.Ф., Плотников И.Я., Шафер Ю.Г. Всплески релятивистских электронов на магнитопаузе и во внешнем радиационном поясе. // Геомагнетизм и аэрномия. -1984. -Т.24. №5. -С.818-820.
30. Безродных И.П., Бережко Е.Г., Плотников И.Я., Шафер Ю.Г. Морозова Е.И., Писаренко Н.Ф., Потоки энергичных электронов вблизи магнитопаузы и на геостационарной орбите. Анализ экспериментальных результатов и механизм генерации. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. -Т.48, №11. -С.2165-2167
31. Безродных И.П., Морозова Е.И., Шафер Ю.Г., Вариации интенсивности потока релятивистских электронов на орбите геостационарного спутника. // Космические исследования. -1986. -Т.24, Вып.5. -С.762-769.

32. Безродных И.П., Морозова Е.И., Шафер Ю.Г., Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику релятивистских электронов внешнего радиационного пояса. // Космические исследования. -1987. Т.25, №1. С.64-73.
33. Bezrodnykh I.P., Berezhko E.G., Shafer Yu.G., Shtygashev I.E., Morozova E.I., Pissarenko N.F., Mineev Yu.V., Spirikova E.S., Shavrin P.I. Influence of Large-Scale Disturbances of Solar Wind on Dynamics of Energetic Electrons in the Outer Magnetosphere. // Proc.20-th ICRC. Moscow. -1987. -V.4. -P. 453-456.
34. Бережко Е.Г. Ускорение заряженных частиц в сдвиговых течениях космической плазмы. // Письма в ЖЭТФ. -1981. -Т.33, Вып.8. -С.416-419.
35. Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф. Кинетическое рассмотрение процесса ускорения заряженных частиц в сдвиговых течениях бесстолкновительной плазмы. // Письма в Астрон. ж. -1981. -Т.7, №10. -С.636-640.
36. Morozova E.I., Pissarenko N.F., Reidler W., Schwingenschuh K., Schelch G., Bezrodnykh I.P. Magnetic field turbulence near Interplanetary shock fronts // Preprint IWF 8406 - Austria: Space Research Institute. -1984. -41с.
37. Morozova E.I., Pissarenko N.F., Yeroshenko Ye.G., Reidler W., Schwingenschuh K., Schelch G., Bezrodnykh I.P. The Magnetic field turbulence near Interplanetary shock fronts // Twenty-Fifth Plenary Meeting Committee on Space Research. XXV COSPAR, Gras, Austria, 25 June-7 July -1984. -P.140-141.
38. Сенчура И.Н., Шаврин П.И. О связи вариаций релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли со скоростью солнечного ветра // Космические исследования. 1988. -Т.26, Вып.5. С.791-793.
39. Воронов С.А., Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Колдашов С.В., Попов А.В. Зарядовый состав потока высокоэнергичных электронов и позитронов радиационного пояса Земли. // Письма в ЖЭТФ. -1986. -Т.43. Вып.5. -С.240-241.
40. Воронов С.А., Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Колдашов С.В., Попов А.В. Высокоэнергичные электроны и позитроны в радиационном поясе Земли. // Геомагнетизм и аэрномия. -1987. -Т.27. №3. -С.492-494.
41. Григоров Н.Л. "Электроны высоких энергий в окрестности Земли". М.: Наука, 1985 г.
42. Гусев А.А., Пугачева Г.И. Формирование потоков электронов альбедо в геомагнитном поле. // Геомагнетизм и аэрномия. -1982. -Т.22. №.6. -С.912-918.
43. Дмитренко В.В., Комаров В.Б., Тверской Б.А. Роль радиальной диффузии в формировании стационарных потоков высокоэнергичных электронов во внутреннем радиационном поясе Земли. // Геомагнетизм и аэрномия. -1987. -Т.27. №3. -С.488-491.