На правах рукописи

БУЗУЛУКОВА Наталья Юрьевна

ДРЕЙФОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ ВО ВНУТРЕННЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ

Специальность 01.03.03 – Физика Солнца

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2003

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор $\boxed{\text{Ю.И.Гальперин}}$

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук (ИЗМИРАН) А.Е. Левитин
кандидат физико-математических наук (ИПГ Госкомгидромета) П.М. Свидский

Ведущая организация:
Институт физики Земли (ИФЗ РАН)

Защита диссертации состоится 20 июня 2003 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд N 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться
в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 19 мая 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.03,
кандидат физико-математических наук Т.М. Буринская

1 Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследования процессов генерации, переноса и диссипации плазмы в магнитосфере Земли прямыми методами со спутников и ракет привели к отождествлению характерных областей в магнитосфере (плазмосфера, плазменный слой, мантия, каспы, кольцевой ток, авроральная зона и др.). Физические процессы, происходящие в этих областях магнитосферы, привлекают внимание как экспериментаторов, так и теоретиков в течение последних тридцати лет. В связи с этим создание адекватных моделей и сравнение их с экспериментальными результатами достаточно актуально до сих пор, так как позволяет понять природу и динамику источников плазмы в магнитосфере. Такие модели необходимы для описания характерных особенностей явлений, таких, например, как суббури, высыпания частиц в авроральной зоне, диспергированные структуры инжекций горячей плазмы, "провалы" потока частиц в определенных диапазонах спектров и "носовые структуры" ионов в определенных секторах магнитосферы.

Наблюдения спектров ионов и электронов во внутренней магнитосфере содержат в себе информацию об электрических и магнитных полях, в которых дрейфовали частицы, об источниках горячей плазмы и их локализации. Но если магнитное поле во внутренней магнитосфере достаточно хорошо изучено, то экспериментальное определение и соответствующее модельное описание крупномасштабных электрических полей во внутренней магнитосфере Земли до настоящего времени является одной из ключевых задач физики магнитосферы.

В основных чертах явление крупномасштабной конвекции было описано, начиная с работ Данжи, 1961 г., Аксфорда и

Хайнса, 1961 г.

Одной из проблем, возникающих при измерениях стационарных электрических полей, является наличие значительных флуктуаций, накладывающихся на постоянную составляющую поля. Другая проблема - это то, что по данным, полученным с одного космического аппарата, достаточно сложно восстановить картину электрического поля во всей внутренней магнитосфере. Поэтому до сих пор ведутся споры о конкретных механизмах генерации поля конвекции, передачи его во внутреннюю магнитосферу и даже о самом существовании стационарного электрического поля во внутренней магнитосфере.

Хотя в настоящее время разработано множество моделей конвекции, многие из них построены на принципиально различных подходах и не всегда согласовываются друг с другом. Поэтому задача определения критериев, позволяющих установить, насколько та или иная модель конвекции внутренней магнитосферы описывает усредненные дрейфовые движения частиц за многие часы, предшествующие наблюдениям, является весьма важной.

Анализ прямых измерений так называемых "ионных спектральных провалов" (ИСП) – резких (по энергии) падений потоков ионов H^+ до уровня порога регистрации прибора в узком диапазоне энергий (несколько килоэлектронвольт в диапазоне $\sim$0,1 – $\sim$30 кэВ в зависимости от MLT и инвариантной широты) – позволяет решить эту задачу. Дело в том, что, как было впервые отмечено Мак-Илвайном, 1972, ионы H^+ определенных энергий имеют большое время дрейфа (десятки часов) от источника в ночной части магнитосферы до точки наблюдения. Это время дрейфа превосходит время жизни ионов H^+, определяемое перезарядкой с атомами геокороны, а также высыпаниями протонов при их движении в области диффузной авроральной зоны. Помимо эффекта потерь во время дрейфа на спектрах протонов во внутренней магнитосфере отражается существование “запретных зон траекторий” (Эджири, 1978; Шираи и др., 1997). Оба фактора, влияющие на образование ИСП, обсуждались в литературе, но по отдельности. Воспроизведение ИСП с помощью дрейфовых траекторий ионов H^+ будет “чувствительно” к электрическим и магнитным полям, принятым при моделировании. Полагая магнитное поле квазидипольным и меняя модели электрического поля, можно установить, насколько хорошо та или иная модель конвекции описывает наблюдаемые спектры ионов H^+ во внутренней магнитосфере. Задача определения модели электрического поля конвекции, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные, представляется весьма актуальной.

Как было показано Эджири, 1978, с существованием запретных зон траекторий связано формирование так называемых “носовых структур” протонов во внутренней магнитосфере. Наблюдение носовых структур до сих пор связывалось с наличием суббуревой активности, в то время как для моделирования носовых структур использовались стационарные электрические и магнитные поля. В то же время изучение носовых структур в спокойное время не проводилось. Задача исследования, являются ли носовые структуры свойством только суббуревых процессов или носовые структуры наблюдается также и в спокойной магнитосфере, представляется важной, так как позволяет лучше понять природу процессов, происходящих во внутренней магнитосфере как во время возмущенных периодов, так и в спокойное время.

Картина конвекции во внутренней магнитосфере во время магнитосферных суббурь имеет гораздо более сложную структуру, чем следует из моделей конвекции для спокойных периодов. Это, в частности, подтверждают наблюдения так называемого поляризационного джета (PJ) – узкой усиленной струи конвекции плазмы в вечернем секторе магнитосферы. Однако, хотя после открытия PJ прошло около 30 лет (Гальперин, 1973), до сих пор остаются дискуссионными механизмы его формирования. Так, например, наиболее часто цитируемый в литературе механизм формирования PJ – это разделение зарядов в инжекции частиц из плазменного слоя во внутреннюю магнитосферу (Саусвуд и Вульф, 1978). Однако, как было показано в работе Халипова и др., 2001, между вспышкой суббури и началом наблюдений PJ в предполуночном секторе на L=3 проходит время 5-10 мин. Это время, по современным представлением, гораздо меньше времени, необходимого для того, чтобы частицы из плазменного слоя проникли на L=3.

Таким образом, в настоящее время не существует численной модели, адекватно (в согласии с экспериментальными данными) описывающей процесс формирования PJ, поэтому работа в направлении развития таких моделей имеет большое значение для понимания физических процессов, происходящих во внутренней магнитосфере во время суббурь.

В целом, создание и тестирование моделей конвекции, изучение и численное моделирование особенностей спектров горячей плазмы во внутренней магнитосфере, а также сравнение модельных и экспериментальных результатов представляет большой интерес для физики магнитосферы, и это определяет актуальность выбранной темы.

Цель работы

Основная цель настоящей работы состоит в следующем:

• Анализ различных типов и классификация ИСП и протонных носовых структур по экспериментальным данным спутника ИНТЕРБОЛ-2 и сравнение наблюдаемых ИСП и носовых структур с результатами моделирования дрейфовых движений ионов в магнитосфере.

• Выбор на основе анализа наблюдений ИСП наиболее подходящей модели электрического крупномасштабного поля конвекции и модели источника частиц, позволяющих описать динамику сверхтепловой плазмы во внутренней магнитосфере в широком диапазоне инвариантных широт (Λ_0) и местного магнитного времени (MLT) для спокойных и средневозмущенных состояний магнитосферы.

• Разработка нового механизма генерации PJ и простой количественной модели, использующей в качестве источника зарядов в полосе PJ частицы внешнего радиационного пояса.

Научная новизна

1. На основе анализа экспериментальных данных и сравнения с модельными расчетами впервые разработана классификация типов ИСП и носовых структур. Результаты проведенных сопоставлений позволяют устранить ряд противоречий в механизмах формирования спектров сверхтепловых ионов в магнитосфере.

2. Моделирование дрейфовых движений ионов в магнитосфере и сравнение с экспериментальными данными позволили отождествить механизмы образования ИСП в различных секторах магнитосферы. Показано, что на модельные ИСП большое влияние оказывают принятые при вычислениях модели электрического поля конвекции и положения источника частиц.

3. Рассмотрение нового механизма генерации электрического поля во внутренней магнитосфере в полосе PJ частицами внешнего радиационного пояса позволило разработать

простую количественную модель поддержания электрического поля в полосе PJ.

Практическая ценность работы

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для отождествления физических процессов, происходящих в магнитосфере, в том числе процессов формирования кольцевого тока - основного фактора, определяющего магнитные и ионосферные вариации на средних широтах. Проведенные модельные расчеты и их сопоставление с уникальными экспериментальными данными спутников ИНТЕРБОЛ-2, POLAR, DMSP представляют интерес для практических приложений, в частности, для выработки критериев по прогнозу "космической погоды", для изучения заряда космических аппаратов потоками сверхтепловых частиц, для построения адекватных моделей внутренней магнитосферы.

Апробация работы

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах в ИКИ РАН в 1999-2001 гг., на семинаре Финского метеорологического института (Хельсинки, 2000), на XXIV, XXV, XXVI Генеральных Ассамблеях Европейского геофизического сообщества (Гаага, Нидерланды, 1999; Ницца, Франция, 2000; Ницца, Франция, 2001), на международных симпозиумах по проекту ИНТЕРБОЛ (Звенигород, Россия, 1999; Киев, Украина, 2000; София, Болгария, 2002), на 5-й Международной конференции по суббурям (С.-Петербург, Россия, 2000), на Международном симпозиуме памяти Ю.И.Гальперина (Москва, Россия, 2003).

Основные результаты диссертации опубликованы в семи научных работах в 1999-2003 гг.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации - 139 страниц, включая 39 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 107 названий.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что для магнитно-спокойных и средневозмущенных периодов, движения ионов H^+ с энергиями $0.1 \div 15$ кэВ во внутренней магнитосфере соответствуют представлениям о квазистационарной конвекции плазмы. Хотя наличие стационарной картины дрейфа частиц, усредненной по наблюдаемым значительным локальным флуктуациям электрического поля во внутренней магнитосфере, в ряде работ подвергается сомнению, сопоставление прямых измерений спектров частиц с моделированием их дрейфовых движений однозначно подтверждает существование такой усредненной картины конвекции на протяжении порядка десятка часов.

2. Установлено, что наличие во внутренней магнитосфере ионных спектральных провалов (ИСП) – резких падений интенсивности потоков ионов H^+ в диапазоне энергий $0.1 \div 15$ кэВ – определяется суперпозицией двух различных факторов: большим временем дрейфа ионов от источника до точки наблюдения (время жизни частиц с определенной энергией меньше, чем время дрейфа) и наличием "запретных областей" траекторий для ионов определенных

энергий, при моделировании не связанных с источником в ночной части магнитосферы.

3. Показано, что носовые структуры – области ограниченных по энергии потоков ионов H^+, проникающих во внутреннюю магнитосферу, – являются свойством не только суббуревых процессов, но и квазистационарных явлений в спокойной магнитосфере. С помощью моделирования дрейфовых траекторий протонов выявлено, что стационарные носовые структуры могут формироваться во всех секторах MLT, что подтверждается результатами эксперимента. В ночном и вечернем секторах магнитосферы такие структуры образованы ИСП, формирующимися вследствие существования "запретных областей" изолированных от источника замкнутых траекторий. В дневном и утреннем секторах носовые структуры расщепляются на две вследствие формирования ИСП из-за большого времени дрейфа.

4. Впервые предложен механизм поддержания электрического поля в полосе поляризационного джета PJ (узкой усиленной струи конвекции во внутренней магнитосфере, наблюдающейся во время суббурь) за счет частиц внешнего радиационного пояса. Показано, что электрическое поле PJ значительно искажает дрейфовые траектории ионов и электронов внешнего радиационного пояса. Это приводит к разделению зарядов, в результате чего возникает электрическое поле, которое может поддерживать исходное электрическое поле PJ. Полоса PJ в данном случае рассматривается как генератор напряжения и источник частиц, создающих ток, а ионосфера - как сопротивление. Рассмотренный механизм является самоподдерживающимся и может объяснить большое время

жизни PJ.

Личный вклад

Автором лично был проведен анализ экспериментальных данных по носовым структурам и ИСП, были выполнены многочисленные расчеты, сравнение с экспериментальными данными и получены все результаты, вошедшие в диссертацию.

2 Содержание работы

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертации, научная новизна, излагается краткое содержание и формулируется цель работы.

В Главе 1 описаны исследования картины конвекции горячей плазмы во внутренней магнитосфере по наблюдениям ИСП (ионных спектральных провалов) спектрометром ИОН спутника ИНТЕРБОЛ-2 (“Авроральный зонд”). Характерные значения потоков H^+ для диапазона 0,1 – 12 кэВ во внутренней магнитосфере $10^6 - 10^7$частиц ·кэВ$^{-1}$·см$^{-2}$·с$^{-1}$·ср$^{-1}$, порог регистрации прибора ИОН 10^4частиц ·кэВ$^{-1}$·см$^{-2}$·с$^{-1}$·ср$^{-1}$. Таким образом, падение потоков H^+ в ИСП на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 иногда составляет более 2 порядков величины.

Наблюдения ИСП впервые были описаны Мак-Илвайном, 1972, по данным геостационарного спутника ATS-5. Мак-Илвайном был предложен механизм формирования ИСП за счет потерь дрейфующих ионов: у ионов определенных энергий время дрейфа от источника на ночной стороне больше, чем время жизни, определяемое за счет перезарядки с атомами геокороны. Как показал Мак-Илвайн, время дрейфа ионов с энергиями 1 – 12 кэВ (в зависимости от MLT-сектора) может возрастать до $\sim$100 ч. Так как характерное время формирования ИСП – многие часы, то моделирование ИСП дает возможность проверять модели конвекции не по мгновенным локальным измерениям, а по усредненным в большой области пространства за некоторый достаточно большой промежуток времени.

Необходимо отметить, что в настоящее время существование стационарной конвекции во внутренней магнитосфере находится под вопросом. По измерениям электрического поля на спутнике EQUATOR-S было показано, что флуктуации электрического поля на расстояниях $5-6\mathrm{R_E}$ вблизи геомагнитного экватора в ночном секторе могут в несколько раз превышать стационарный компонент поля ($\sim$0.1 мВ/м). Это подвергает сомнению существование стационарной картины дрейфового движения частиц, усредненной по большим флуктуациям. Сравнение результатов численных экспериментов с наблюдениями ИСП, формирование которых возможно только в условиях длительных интервалов стационарной конвекции, позволяет получить ответ на вопрос, насколько применимы стационарные модели к описанию движения частиц в таких флуктуирующих полях. С этой целью были проанализированы наблюдения ИСП спектрометром ИОН в утреннем, дневном, вечернем и ночном секторах магнитосферы в умеренно спокойные периоды за 1996-1998 гг. Как оказалось, для каждого MLT-сектора существует определенная структура ИСП. Для моделирования и дальнейшего изучения был отобран ряд случаев, представляющих собой типичные структуры для каждого MLT-сектора.

Разработан алгоритм для трассирования положения ионных спектральных провалов на экватор и для моделирования ИСП с помощью дрейфовых траекторий ионов киловольтных энергий вблизи экваториальной плоскости магнитосферы.

Проведено изучение механизмов формирования ИСП в широком диапазоне MLT- и L-оболочек в спокойное и умеренно спокойное время. Проведен сравнительный анализ трех известных моделей глобальной конвекции во внутренней магнитосфере:

а) модель Мак-Илвайна, 1972 г. (McIlwain, 1972);

б) модель Мак-Илвайна, 1986 г. (McIlwain, 1986);

в) модель Волланда–Стерна (Volland, 1972; Stern, 1975).

Из полученных результатов следует, что, хотя качественно все три модели конвекции дают достаточно хорошее согласие с экспериментом, наилучшее согласие получается при использовании модели Мак-Илвайна, 1972 г. Показано, что ИСП, наблюдаемые спектрометром ИОН на спутнике ИНТЕРБОЛ–2, являются результатом суперпозиции двух описанных в литературе факторов. Первый фактор, предложенный Мак-Илвайном, – это потери за счет большого времени дрейфа и второй фактор - существование "запретных областей" дрейфовых траекторий, не соединяющихся с источником. Показано, что в ночном секторе магнитосферы наблюдаемые ИСП есть результат действия второго фактора (существования "запретных областей"), в то время как в утреннем, дневном и вечернем секторах наблюдаются ИСП, возникающие в результате совместного действия обоих факторов.

В первой главе также исследован вопрос о влиянии положения источника частиц на моделирование ИСП. Модель источника задавалась двумя вариантами:

а) "ближний источник", согласно модели Мак-Илвайна, – "injection boundary", эта модель источника была определена экспериментально, и, согласно Мак-Илвайну, соответствует вспышечному механизму инжекции;

б) "дальний источник" на радиальном расстоянии $R_B = 15R_E$ от центра Земли.

Первая модель источника больше соответствует случаю, когда источник имеет вспышечную природу, а вторая – предельная – источник находится достаточно далеко в хвостовой части. Будем далее называть траектории, не соединяющиеся с источником, – “замкнутыми изолированными траекториями”, а соединяющиеся – “незамкнутыми”. Модель дальнего источника $R_B = 15R_E$ интересно использовать для того, чтобы проанализировать возможную роль максимально большой области замкнутых изолированных траекторий на модельных ИСП: замкнутые изолированные траектории можно искусственно сделать незамкнутыми, если расположить гипотетический источник где-либо на пересечении с такими дрейфовыми траекториями. Из результатов вычислений видно, что положение источника значительно влияет на модельные расчеты, и, таким образом, можно оценить положение ближней границы источника, сравнивая наблюдения ИСП с модельными ИСП.

С другой стороны, можно ожидать, что реальный источник частиц расположен между двумя рассмотренными экстремальными вариантами. Для того чтобы оценить, где находится источник частиц, было выполнено трассирование на магнитный экватор границ высыпаний частиц, экспериментально наблюдаемых спутником DMSP (“b2i”, “b2e”, “b3a”, “b4s”). Проекции этих границ были рассмотрены в сравнении с “injection boundary” и “дальним источником” $R_B = 15R_E$. Показано, что бóльшая часть точек проекций границ находится между двумя принятыми в расчетах моделями источников частиц. Таким образом, подтверждается, что модельный источник частиц “injection boundary” представляет собой некоторую “внутреннюю” границу положения источника, а граница $R_B = 15R_E$ - некоторую “внешнюю” границу.

Далее проводится исследование эволюции поведения ИСП в условиях слабой геомагнитной активности. Для этой цели выбран интервал времени 26-29 декабря 1997 г., когда Kpиндекс на протяжении 4-х дней не превышал 1^+. Также не наблюдалось возмущений в AE-индексе. Изучение картины конвекции для таких случаев представляет большой интерес, так как, по-видимому, рассматриваемая ситуация соответствует стационарной магнитосфере. Проведены модельные расчеты ИСП, наблюдаемых в этот период. Просмотр магнитограмм сети IMAGE показал, что в рассматриваемом промежутке времени наблюдался ряд локальных возмущений амплитудой 50-100 нТл, соответствующих небольшим суббурям. По современным представлениям, суббуревая активность должна приводить к инжекциям частиц во внутреннюю магнитосферу. На спектрограммах наряду с ИСП на определенных пролетах спутника видны вариации спектров, хорошо совпадающие с модельными "следами" некоторых инжекций. Таким образом, в слабовозмущенное время может действовать дополнительный вспышечный источник частиц, накладывающийся на квазистационарную конвекцию частиц из плазменного слоя.

В Главе 2 исследуется вопрос, являются ли так называемые носовые структуры свойством только суббуревых процессов или же носовые структуры наблюдается также и в спокойной магнитосфере. Обсуждается взаимосвязь между носовыми структурами и ИСП (ионными спектральными провалами).

Термин "носовые структуры" был впервые введен Смитом и Хоффманом, 1972, для описания проникновения энергичных протонов (с энергиями ∼20-50 кэВ) во внутреннюю магнитосферу вплоть до L–оболочек 3 – 4 за плазмопаузу во время суббурь (по данным спутника EXPLORER-45). Было показано, что на энерго-временных спектрограммах протонов существует некая выделенная резонансная область энергии частиц, проникающих вглубь магнитосферы наиболее значительно. Смитом и Хоффманом дано качественное объяснение этого процесса как следствие адиабатического дрейфа частиц (с сохранением первых двух инвариантов) в электрическом поле конвекции, коротации, и магнитном поле. Изучение литературы показало, что, хотя носовые структуры изначально связывались с суббуревой активностью, при моделировании таких структур в большинстве случаев использовались стационарные электрические поля.

В Главе 2 проведен статистический анализ 452 носовых структур, наблюдаемых спектрометром ИОН спутника ИНТЕРБОЛ-2. Получено, что при текущем значении $\mathrm{Kp} = 0 - 1$ вероятность наблюдения носовых структур в ночном секторе $\sim 80\%$. Для дневного сектора наибольшая вероятность наблюдения ($\sim 75\%$ для Kp $= 0$ и $\sim 45\%$ для Kp $= 1$) найдена, если рассматривать вероятность наблюдения в зависимости от Kp-индекса, взятого с 6-часовым упреждением события по времени. Это, по-видимому, объясняется тем, что частицам требуется несколько часов, чтобы пройти путь от источника на ночной стороне до дневной магнитосферы. Таким образом, в спокойное время при малом Kp-индексе носовые структуры, не связанные с суббуревой активностью, наблюдаются с высокой вероятностью. Такие носовые структуры названы нами стационарными носовыми структурами.

Результаты статистического анализа были сравнены с модельными расчетами, которые показывают, что носовые структуры в стационарном случае могут формироваться во всех секторах MLT. Показано, что ИСП вследствие “запретных зон” должны наблюдаться одновременно со стационарными носовыми структурами. В ночном секторе формируются ИСП вследствие существования “запретных зон”, и, следовательно, стационарные носовые структуры, в которых, как и в суббуревых, присутствует выделенная энергия, частицы с которой проникают на более низкие L–оболочки. В утреннем, дневном и вечернем секторах на ИСП, формирующийся вследствие существования “запретных зон” накладывается ИСП вследствие большого времени дрейфа, что приводит к “расщеплению” стационарной носовой структуры на две. Факт возможного “расщепления” носовой структуры в литературе нигде не отмечался. Так как модельные ИСП вследствие “запретных зон” могут формироваться во всем диапазоне MLT, то стационарные носовые структуры в спокойное время также могут формироваться во всем диапазоне MLT, что подтверждается результатами наблюдений прибора ИОН.

В Главе 2 также рассмотрены два случая одновременного наблюдения носовых структур (в ночном секторе и в утреннем секторе) спутниками ИНТЕРБОЛ-2 и POLAR. Хорошее согласие данных различных экспериментов с модельными расчетами подтверждает достоверность схем расчетов и полученных результатов.

В Главе 3 подробно рассмотрено явление поляризационного джета (PJ), и предложен новый механизм для объяснения формирования PJ, где в качестве генератора электрического поля рассматриваются частицы внешнего радиационного пояса.

Поляризационный джет – это узкая по широте ($\sim 1 - 2^\circ$) полоса усиленного электрического поля во внутренней магнитосфере, обычно появляющаяся в вечернем секторе во время магнитосферных суббурь. Явление PJ было впервые описано Гальпериным (1973 г.), и с тех пор проводились многочисленные исследования PJ как по наземным измерениям, так и со спутников. Статистическое распределение PJ-событий показывает, что PJ обычно наблюдается на геомагнитных широтах $55 - 60^\circ$ (параметр $\mathrm{L} \sim 3 - 4$), вблизи границы диффузных высыпаний электронов, протяженность по MLT полосы PJ 2 – 3 ч, время жизни PJ – несколько часов. Скорость дрейфа плазмы в ионосфере в полосе PJ $\sim 1 - 5$км/с, это соответствует напряженности электрического поля в ионосфере $\sim 50 - 200$мВ/м и экваториальным значениям электрического поля $\sim 2 - 10$мВ/м.

Для объяснения механизма формирования PJ в литературе наиболее часто приводится следующий механизм: проникновение инжектированных энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу на более низкие широты (то есть на меньшие L-оболочки) и концентрация положительного заряда на экваториальной границе проникновения ионов. Это приводит к появлению электрического поля, направленного к полюсу, то есть к возникновению PJ. Данная идея была впервые предложена в работе Саусвуда и Вульфа, 1978 и в дальнейшем получила развитие в ряде более поздних работ.

В качестве источника энергии для поддержания сильного электрического поля в полосе PJ в этом механизме рассматривается "внешняя" инжектированная горячая плазма. В настоящей работе предлагается другая возможность генерации напряжения в полосе PJ – не за счет инжекции, а за счет "внутреннего" источника энергии – частиц внешнего радиационного пояса. Такой механизм генерации может быть самоподдерживающимся, и он может объяснять большое время жизни PJ. Возможно, что механизм "внешней" инжекции обеспечивает начальную фазу развития PJ, а далее включается механизм самогенерации электрического поля. Однако относительный вклад каждого из механизмов – "внешнего" и "внутреннего" – к настоящему моменту не прояснен, и работа в этом направлении представляет большой интерес для построения модели PJ, согласованной с ионосферными и спутниковыми измерениями.

Приведены количественные оценки числа частиц в секунду, стекающих в ионосферу в полосе PJ, и рассмотрены возможные источники частиц для формирования тока в полосе

PJ. Для этого оценены следующие источники частиц, которые могут обеспечить ток в полосе PJ:

• квазистационарный приток частиц во внутреннюю магнитосферу;

• единичная вспышечная инжекция;

• частицы внешнего радиационного пояса
на L-оболочках 3 - 4.

Получено, что в качестве источника частиц, создающих ток, все три механизма могут обеспечить поддержание электрического поля в полосе PJ.

Третий механизм исследован также с точки зрения возможности генерации напряжения в полосе PJ. Для этого разработана простая количественная модель, описывающая механизм генерации электрического поля в полосе PJ за счет частиц внешнего радиационного пояса. В модели рассматривается движение протонов и электронов в полосе PJ и определяется распределение нормированной плотности заряда в зависимости от L-параметра, MLT и времени. Для частиц с энергиями, характерными для внешнего радиационного пояса, скорость градиентного дрейфа в полосе PJ примерно равна скорости электрического дрейфа. Для ионов эти скорости в полосе PJ складываются, а для электронов вычитаются. В результате наличие PJ приводит к значительному искажению дрейфовых траекторий частиц внешнего радиационного пояса. Возникают разделение зарядов и электрическое поле, которое может поддерживать поле PJ. Такой механизм генерации позволяет объяснить, например, большое время жизни PJ даже в освещенной ионосфере.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. Проведен анализ экспериментального материала по наблюдениям ИСП и носовых структур со спутника

ИНТЕРБОЛ-2 в магнитно–спокойные и средневозмущенные периоды. Показано путем модельных расчетов и их сравнения с экспериментальными данными, что для магнитно–спокойного и средневозмущенного состояния магнитосферы движения ионов H^+ с энергиями $0.1 \div 15$ кэВ во внутренней магнитосфере соответствуют представлениям о квазистационарной конвекции плазмы. Наилучшее согласие экспериментальных данных с модельными расчетами получено для модели конвекции Мак-Илвайна, 1972 г. Трассирование границ высыпаний частиц, наблюдаемых спутником DMSP, показало, что в этих условиях источником горячей плазмы в диффузной авроральной зоне является главным образом предполуночный сектор хвоста магнитосферы на расстояниях $\sim 8 - 10\mathrm{R_E}$. В слабовозмущенных условиях во внутренней магнитосфере на квазистационарную конвекцию могут накладываться слабые инжекции частиц, не меняющие заметно общей картины конвекции. Этот вспышечный источник частиц соответствует авроральным активизациям и слабым суббурям на сжатом овале, и такие инжекции создают небольшие, но измеримые локализованные магнитные вариации в высоких широтах.

2. Из сопоставления результатов моделирования ИСП и носовых структур с данными наблюдений показано, что два механизма формирования ИСП, обсуждавшиеся в литературе как альтернативные, в действительности реализуются в разных условиях, но могут и налагаться друг на друга в определенных ситуациях. Эти два фактора следующие:

   • существование выделенной энергии, ионы с которой имеют большое время дрейфа от источника до точки наблюдения (время жизни частиц с определенной энергией меньше, чем время дрейфа);

• наличие запретных областей для ионов определенных энергий проходящих через эту область, чьи траектории изолированы от источника.

3. Выявлен определенный тип носовых структур, наблюдаемых на энергиях ~5-10 кэВ, которые формируются в результате дрейфа частиц H^+ в стационарных электрическом и магнитном поле и не связаны с развитием суббури. Такие носовые структуры образованы ИСП, формирующимися вследствие существования "запретных зон" изолированных от источника траекторий. Проведен статистический анализ носовых структур, наблюдаемых спектрометром ИОН спутника ИНТЕРБОЛ-2. Показано, что при значениях Kp-индекса $0-1$ носовые структуры наблюдаются с высокой вероятностью как в ночном секторе($\sim 80\%$ для текущего значения Kp-индекса $0-1$), так и в дневном ($\sim 75\%$ для Kp $= 0$, с упреждением по Kp-индексу на ~6-9 ч). Результаты статистического анализа обоснованы модельными расчетами, которые показывают, что носовые структуры в стационарном случае могут формироваться во всех секторах MLT. Носовые структуры в спокойное время имеют время формирования 3 – 10 ч, в отличие от суббуревых структур, которые формируются за время 0,5 – 2 ч после начала суббури.

4. Разработана простая количественная модель, описывающая механизм генерации электрического поля во внутренней магнитосфере в полосе PJ. В качестве генератора напряжения для образования электрического поля рассматриваются частицы внешнего радиационного пояса. Показано, что электрическое поле PJ значительно искажает траектории движения частиц внешнего радиационного

пояса и вызывает разделение зарядов в полосе PJ. Результирующее электрическое поле имеет два компонента - направленный к полюсу и восточный. Такое электрическое поле поддерживает начальное поле PJ. Рассмотренный механизм является самоподдерживающимся и может обеспечивать большое время жизни PJ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бузулукова Н. Ю. Тестирование моделей крупномасштабной конвекции по измерениям ионных провалов спектрометрическим комплексом ИОН спутника ИНТЕРБОЛ-2 в геомагнитно-спокойное время. Препринт ИКИ РАН. Пр-2009. 1999. 20 с.

2. Бузулукова Н. Ю. Ионные спектральные провалы как способ проверки существования стационарной крупномасштабной конвекции, ее моделей и локализации источника частиц во внутренней магнитосфере в спокойное время: наблюдения спектрометра ИОН со спутника ИНТЕРБОЛ - 2. // Космические исследования. 2000. Т. 38. С. 524.

3. Buzulukova N. Yu. Drifting energetic ions in the inner magnetosphere during long quiet intervals: A steady flow from a distant source or from multiple substorm-like burst injections? Proceedings of the 5th International Conference on Substorms. ESA SP-443. 2000. P. 381.

4. Stenuit H., Sauvaud J.-A., Delcourt D. C., Mukai T., Kokubun S., Fujimoto T., Buzulukova N. Yu., Kovrazhkin R. A., Lin R. P., Lepping R. P. A study of ion injections at the dawn and dusk polar edges of the auroral oval. // JGR.

2001. V. 106. N A12. P. 29619.

5. Buzulukova N. Yu., Galperin Yu.I., Kovrazhkin R.A., Glazunov A.L., Vladimirova G., Stenuit H., Sauvaud J.-A., Delcourt D.C. Two types of ion spectral gaps in the quiet inner magnetosphere: INTERBALL-2 observations and modelling. // Annales Geophysicae. 2002. V. 20. N 3. P. 349.

6. Бузулукова Н. Ю., Вовченко В. В. О возможном механизме поддержания электрического поля в полосе поляризационного джета. // Космические исследования. 2003. Т. 41. С. 5.

7. Бузулукова Н. Ю., Ковражкин Р. А., Глазунов А. Л., Сово Ж.-А., Ганюшкина Н. Ю., Пулккинен Т. И. Стационарные носовые структуры протонов во внутренней магнитосфере: наблюдения прибора ИОН на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 и моделирование. // Космические исследования. 2003. Т. 41. С. 108.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати .05.2003

Заказ Формат 70×108/32 Тираж 100 0,8 уч.-изд.л.