

На правах рукописи

ГРИГОРЕНКО Елена Евгеньевна

**Ускоренные ионные структуры в пограничной области  
пламенного слоя хвоста магнитосферы Земли.**

(Специальность 01.03.03 – Физика Солнца)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва

2010

Работа выполнена в Институте космических исследований  
Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук И.И. Алексеев (НИИЯФ МГУ)

доктор физ.-мат. наук Н.Г. Клейменова (ИФЗ РАН)

доктор физ.-мат. наук А.А. Нусинов (ИПГ РАН)

Ведущая организация:

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения  
радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН

Защита состоится 7 декабря 2010 г. в 11 часов на заседании  
Диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических  
исследований РАН по адресу: 117997 г. Москва, ул. Профсоюзная,  
84/32, 2-ой подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.03

кандидат физ.-мат. наук

Т. М. Буринская

Диссертация содержит результаты экспериментальных исследований структуры и динамики пограничного плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли, проведенных на основе наблюдений высокоапогейных российских и зарубежных космических аппаратов, сопутствующих наземных и межпланетных измерений, а также их теоретическую интерпретацию.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.**

### **Актуальность проблемы.**

Одной из актуальнейших проблем космической физики является проблема ускорения заряженных частиц до огромных энергий. Эти процессы тем более загадочны, что они нарушают привычное «классическое» представление об устройстве природы, согласно которому всё должно стремиться к равновесному состоянию хаоса, при котором любая упорядоченная структура внутри системы со временем разрушается. Однако, новейшие открытия, в том числе и в физике космической плазмы, часто выходят за рамки классических представлений. Не смотря на кажущуюся «экзотичность» упорядоченных структур, обладающих большой свободной энергией, подобные явления чрезвычайно распространены в космосе: это, в первую очередь, потоки высокоэнергичных заряженных частиц солнечных и галактических космических лучей, механизмы ускорения которых на Солнце и в звездах, сейчас активно изучаются. Однако, подобные процессы, к счастью, происходят и вблизи Земли – в земной магнитосфере, что существенно облегчает их прямое детальное исследование в спутниковых экспериментах. Ускорение заряженных частиц до энергий в десятки, а иногда и сотни раз превышающих их первоначальные значения происходит, в основном, в геомагнитном хвосте, который образуется на ночной стороне Земли за счет вытягивания силовых линий геомагнитного поля потоком солнечного ветра, обтекающим магнитосферу. Геомагнитный хвост представляет собой грандиозную самосогласованную магнитоплазменную конфигурацию, в которой происходит накопление и диссипация энергии, поступающей из солнечного ветра. При этом геомагнитный хвост представляет собой довольно упорядоченную и устойчивую систему, сохраняющую свою структуру вплоть до десятков миллионов километров от Земли.

Наиболее мощное выделение энергии, как правило, происходит при трансформация топологии магнитного поля - магнитном пересоединении, которое происходит, как в астрофизических объектах, так и в магнитосферах Земли и планет. В последнем случае это явление особенно интересно для физики плазмы, так как, во-первых, происходит в очень горячей бесстолкновительной разреженной плазме, которую трудно создать в

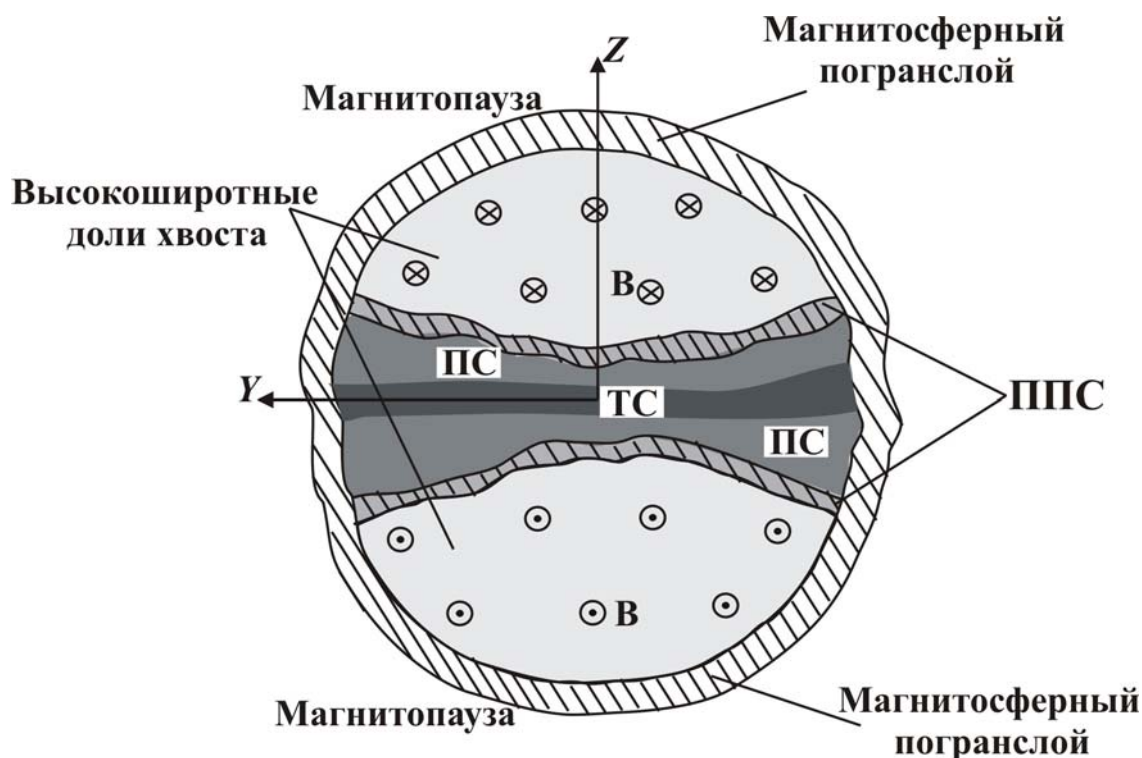
лабораторных установках, и, во-вторых, это явление доступно для детального изучения с помощью теперь уже многоспутниковых измерений. Магнитное пересоединение может происходить на разных временных и пространственных масштабах, иметь различную геометрию и мощность энерговыделения. Наиболее известны конфигурации с X и O – линиями, однако в природе магнитное пересоединение, конечно, может иметь и гораздо более сложную нерегулярную топологию, и такие малоизученные процессы представляют особый интерес как для экспериментальной космофизики, так и для физики плазмы в целом.

Ускорение и нагрев плазмы в хвосте земной магнитосферы происходят в его Токовом Слое (ТС), и, традиционно, эти процессы связывались с пересоединением магнитных силовых линий, которое, согласно спутниковым наблюдениям, может происходить на различных расстояниях от Земли (от ~ десятков тысяч до миллиона км). Заряженные частицы, ускоренные в ТС до энергий в десятки и сотни раз превышающие их начальные значения, быстро движутся к Земле, формируя «канал», называемый Пограничным Плазменным Слоем (ППС), по которому энергия и импульс плазмы переносятся из дальних областей хвоста к Земле.

Многочисленные спутниковые наблюдения в ППС, начало которым было положено экспериментами на спутниках IMP-7,8 в конце 70-х годов, были направлены, в первую очередь, на построение средней картины распределения плазмы и полей, хотя уже тогда отмечалась сложная динамика этой области. Движущиеся в ППС потоки и пучки ускоренных заряженных частиц достигают Земли, частично высыпаясь вблизи высокоширотной границы полярного овала, образуя сложные энерго-диспергированные структуры, часто наблюдаемые в ионных спектрограммах. Наряду с высыпанием имеет место и частичное отражение ускоренных заряженных частиц в сильном магнитном поле вблизи Земли, в результате чего эти частицы возвращаются в ППС, где формируют встречные, движущиеся от Земли, пучки или потоки. Ввиду существования в хвосте конвекции, обусловленной электрическим полем утро-вечер и направленной к экваториальной плоскости, отраженные потоки ускоренных частиц наблюдаются в ППС на более низких широтах, чем «прямые». По мере увеличения времени пролета ускоренных частиц за счет их многократных отражений в хвосте и вблизи Земли, частицы все более и более смещаются в сторону низких широт, постепенно изотропизуясь по скоростям, и, в конце концов, пополняя плазменный слой (ПС).

Таким образом, ППС является интерфейсом между горячей квази-изотропной плазмой центрального ПС, находящейся на замкнутых силовых линиях магнитного поля, и высокоширотной частью магнитосферного хвоста, где горячая плазма отсутствует, а

силовые линии магнитного поля «открыты», то есть одним концом связаны с межпланетным магнитным полем (ММП). Фактически ППС представляет собой окрестность магнитной сепаратрисы, разделяющей магнитные поля с топологически различными свойствами (рис.1). Поэтому, изучая структуру и характеристики функций распределения ускоренных заряженных частиц, движущихся в ППС, можно дистанционно исследовать некоторые свойства их источников, расположенных в удаленных от Земли областях ТС.



**Рис.1.** Схематическое изображение поперечного (в плоскости  $(YZ)_{GSM}$ ) сечения геомагнитного хвоста.

Несмотря на значительный прогресс в исследовании ионных и электронных распределений, наблюдаемых в ППС, многие проблемы, связанные с особенностями ускорения заряженных частиц в ТС хвоста, до сих пор оставались нерешенными. В первую очередь, открытым являлся вопрос о том, является ли магнитное пересоединение единственно возможным источником ускорения плазмы в хвосте или же эффективное ускорение плазмы возможно и вне области пересоединения. Эффективное ускорение заряженных частиц при их неадиабатическом взаимодействии с ТС дальнего хвоста в области, где существует достаточно малое, однако, ненулевое магнитное поле, рассматривалось в ряде теоретических работ, однако экспериментально такая возможность не была подтверждена. Также мнения исследователей разделились и по вопросу о характере такого ускорения: происходит ли оно в импульсном, или в

квазистационарном режиме. Эта проблема напрямую связана с определением пространственных и временных характеристик ускоренных плазменных структур, наблюдаемых в ППС, что невозможно было осуществить только на основе односпутниковых измерений.

Понимание механизмов накопления и диссипации энергии в системе с горячей бесстолкновительной плазмой, находящейся в магнитном поле со сложной топологией, сохраняющей свою глобальную конфигурацию на огромных временных и пространственных масштабах, безусловно, представляет существенный интерес для физики плазмы. Эта проблема может иметь и практическое значение в связи с созданием устойчивых магнитоплазменных конфигураций для удержания горячей плазмы. И хотя конкретные параметры лабораторной и космической плазмы могут различаться, величины основных безразмерных параметров, характеризующих условия трансформации энергии, оказываются близки, и таким образом, выводы, сделанные при анализе процессов в космической плазме могут быть применимы для некоторых приложений в лабораторной и даже в астрофизической плазме.

**Цель работы** состоит в детальном экспериментальном исследовании (по данным измерений на российских и зарубежных космических аппаратах, в том числе на многоспутниковой системе Cluster) ионных и электронных функций распределения, наблюдаемых в ППС геомагнитного хвоста на различных радиальных расстояниях от Земли. Основу исследований составили более 2000 пересечений ППС, происходивших на расстояниях от Земли от 15 до 220  $R_E$  (где  $R_E$  – радиус Земли, равный ~6380 км) на разных фазах геомагнитной активности и при различных условиях в межпланетной среде. При этом основное внимание было уделено:

1) анализу статистических распределений частоты наблюдения и энергий ускоренных ионных структур, регистрируемых в ППС различных секторов магнитосферного хвоста, в зависимости от уровня геомагнитной активности (величины  $AL$  индекса) и направления ММП;

2) выработке методики и определению пространственных и временных характеристик ускоренных ионных структур, наблюдаемых в ППС хвоста четырехспутниковой системой Cluster во время спокойных и возмущенных геомагнитных периодов, с целью выяснения механизмов их формирования;

3) выяснению вопроса о местоположении источников ускорения ионов в ТС хвоста, и о связи источников ускорения с областью магнитного пересоединения;

4) выяснению природы длинноволновых колебаний магнитных силовых трубок ППС и их возможной связи с потоками ускоренных ионов, движущихся в ППС вдоль силовых линий магнитного поля.

### **Новизна работы.**

Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми и получены автором диссертации (в ряде случаев с соавторами).

К ним относятся выводы о том, что:

- 1) во время спокойных и слабо возмущенных геомагнитных интервалов ( $|AL| < 300$  нТ) неадиабатическое ускорение ионов в дальних областях ТС хвоста может происходить одновременно в нескольких локализованных в пространстве источниках, называемых резонансами. Резонансы расположены в области уже замкнутых силовых линий магнитного поля, и не связаны непосредственно с магнитным пересоединением. В результате, в ППС хвоста формируются локализованные в физическом пространстве и в пространстве скоростей ионные пучки и потоки, движущиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Ширина функций распределения ионов по скоростям в таких структурах мала, и составляет:  $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} \sim 0.1$ ;
- 2) в спокойные и слабо возмущенные геомагнитные интервалы неадиабатическое ускорение ионов в ТС происходит в квазистационарном режиме, и длительность наблюдения ускоренных ионов в ППС хвоста может превышать 20 мин. Неадиабатическое ускорение ионов в ТС происходит за счет их перемещения вдоль направления квазистационарного электрического поля утро-вечер, обусловленного обтеканием магнитосферы потоком солнечного ветра;
- 3) во время спокойных или слабо-возмущенных геомагнитных интервалов потоки и пучки ускоренных ионов представляют собой пространственные структуры, размер которых в направлениях перпендикулярных силовым линиям магнитного поля не превышает 6000 км, в то время как их продольный размер соизмерим с длиной магнитной силовой трубки, вдоль которой распространяются ускоренные ионы;
- 4) во время очень спокойных геомагнитных периодов ( $|AL| < 100$  нТ) неадиабатическое ускорение ионов на замкнутых силовых линиях магнитного поля может происходить в удаленных областях ТС, находящихся на расстояниях от Земли более  $110 R_E$ ;

- 5) в результате неадиабатического ускорения ионов, одновременно происходящего в нескольких пространственно разнесённых источниках, в ионных распределениях по скоростям, регистрируемых в ППС, наблюдаются, по крайней мере, два четких и узких пика, энергии которых зависят от номера  $N$  соответствующего резонанса как:  $W_N \sim N^{4/3}$ . Эти результаты впервые экспериментально подтвердили концепцию резонансных режимов ускорения частиц в ТС магнитосферного хвоста;
- 6) во время возмущенных геомагнитных периодов ускорение ионов в ТС происходит вблизи магнитных X-линий, которые, в такие интервалы, могут находиться существенно ближе к Земле (на расстояниях  $\leq 80 R_E$ ). В результате в ППС наблюдаются более энергичные, чем в спокойные периоды, ионные пучки. Эти пучки также движутся вдоль силовых линий магнитного поля, однако имеют более широкие по параллельным скоростям функции распределения:  $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} > 0.3$ .

Также впервые на большой статистике наблюдений ускоренных ионных структур в ППС хвоста было показано, что:

- 1) ускоренные ионные структуры наблюдаются при любых уровнях геомагнитной активности, практически равновероятно по всех трех секторах хвоста, что является косвенным доказательством того, что процессы ускорения ионов постоянно происходят в ТС;
- 2) вероятность наблюдения потоков или пучков ускоренных ионов в ППС хвоста зависит от среднего часового угла ММП, усредненного как минимум за 1 час до наблюдения ускоренных ионов. Установлено, что квазистационарный режим неадиабатического ускорения ионов в пространственно-локализованных резонансах реализуется в хвосте, в основном, при направлениях ММП близких к азимутальным. При северном направлении ММП вероятность наблюдения таких ускоренных структур уменьшается, а при сильном южном ММП их нет совсем. Напротив, ускорение энергичных ионных пучков с широкими по параллельным скоростям распределениями дифференциального потока происходит, в основном, при южном направлении ММП и полностью отсутствует при северном ММП;
- 3) существует связь низкочастотных ( $f \sim 0.004 - 0.02$  Гц) поперечных колебаний Альвеновского типа магнитных силовых трубок ППС и высокоскоростных ( $V_{\parallel} > 2V_A$ , где  $V_A$  – локальная альвеновская скорость) потоков ионов, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля высокоширотной



границы ППС. Возможной причиной возникновения низкочастотных колебаний магнитных силовых трубок ППС является неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

### **Научная и практическая ценность работы.**

Представленные в диссертации результаты экспериментально доказывают существование особого режима диссипации энергии в «спокойном» геомагнитном хвосте, при котором высвобождение энергии, сопровождаемое ускорением ионов, происходит не в одном крупномасштабном источнике, который, как правило, формируется вблизи области магнитного пересоединения, а в нескольких локализованных и долгоживущих источниках - резонансах, находящихся на замкнутых силовых линиях магнитного поля с малой, но положительной компонентной магнитного поля, нормальной к ТС. Размер резонансных источников по порядку величины сравним с ларморовским радиусом ускоренных ионов.

Полученные экспериментальные доказательства пространственной локализации и достаточно большого времени жизни ускоренных ионных структур свидетельствуют об устойчивости резонансных источников ускорения и, тем самым дают стимул для разработки новых трехмерных самосогласованных моделей неадиабатического ускорения ионов в ТС.

### **Апробация работы.**

Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены в более чем 50 докладах на различных научных конференциях и семинарах в России и за рубежом.

- На ассамблеях и семинарах COSPAR (Генеральные ассамблеи: 2004 г., Париж; 2006 г., Пекин; 2008 г., Монреаль; 2010 г., Бремен; Семинары: Израиль 2004 г., 2006 г., 2008 г.).
- На ассамблеях Европейского Геофизического Союза (2000 – 2004 г.г., Ницца; 2005-2007 г.г., 2009 г. Вена).
- На 10-й ассамблее по геомагнетизму и аэрономии (IAGA) (2005 г., Тулуза, Франция).
- На 6-й ассамблее Геофизического Союза стран Азии и Океании (2009 г. Сингапур).
- На конференциях проекта Интербол (2000 г. Киев; 2001 г. Польша; 2002 г., Болгария).

- На конференциях проекта Cluster (2008 г., Тенериф, Испания; 2009 г. Венеция, Италия; 2009 г. Упсала, Швеция; 2010 г. Пояна-Брасов, Румыния).
  - На международных конференциях по суббурям (5-я конференция, г. Санкт-Петербург, 2000 г.; 6-я конференция, г. Сиэтл, США, 2002 г.).
  - на всероссийской конференции по физике солнечно-земных связей г. Иркутск, 2001
  - на Международном симпозиуме памяти проф. Ю. Гальперина, Москва, 2003 г.
  - NATO Advanced Research Workshop and COSPAR Colloquium, Прага, Чехия, 2003
  - на Международном симпозиуме “Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System”, Варна, Болгария, 2006 г.
  - на IV международной конференции «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений», с. Паратунка, п-ов Камчатка, 2007 г.
  - на 4-й Альвеновской конференции, г. Аркашон, Франция, 2007г.
  - на международной конференции, посвященной Международному гелиофизическому году, г. Звенигород, 2007 г.
  - на международной конференции «Плазменные явления в солнечной системе: открытия К.И. Грингауза - взгляд из XXI века». Москва, 2008 г.
  - 31-м и 32-м ежегодных Апатитских семинарах "Физика авроральных явлений", Апатиты, 2008, 2009 г.г.
  - на международной конференции “Plasma-wave processes in the Earth’s and planetary magnetospheres, ionospheres and atmospheres”, Нижний Новгород, 2009 г.
  - на 4-th International Sakharov Conference on Physics, Москва, 2009 г.
  - на конференциях по Программе ОФН, 2008, 2009 г.г.
- а также на семинарах ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ, семинарах университетов Токио и Киото, ISAS (Япония), университета Калабрии (Италия), CERN (Франция)

**Личный вклад автора.**

Практически во всех исследованиях, представленных в диссертации, автору принадлежат постановка научной задачи, разработка метода исследований, анализ данных и интерпретация результатов.

### **Краткое содержание диссертации.**

#### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы, содержит 300 страниц (включая 70 рисунков, 5 таблиц и библиографию из 250 наименований).

**Во введении** сформулированы проблематика, актуальность и цели исследования ППС геомагнитного хвоста Земли, дана общая характеристика работы. Также затронут вопрос об используемой в работе русскоязычной терминологии.

**В первой главе** приведен обзор истории исследований ППС и современного состояния знаний о его структуре и динамике. Кратко описаны существующие модели ускорения заряженных частиц, формирующих ППС, и их соответствие с наблюдениями.

**Во второй главе** описаны научные приборы на различных космических аппаратах, ставшие источниками экспериментальных данных, используемых в диссертации. Здесь также обсуждается методика идентификации ускоренных ионных структур, которые являются главным объектом исследований данной работы.

**Третья глава** посвящена обсуждению пространственно-временных характеристик ускоренных ионных структур, наблюдаемых в ППС, и методике их определения по данным четырехспутникового проекта Cluster. Ранее наблюдения в ППС осуществлялись либо одним спутником, либо, если даже спутников было два, расстояние между ними не позволяло надежно разделить временной и пространственный эффекты. Согласно одно-спутниковым наблюдениям длительность ускоренных ионных структур в ППС, как правило, не превышала 3 мин. Эти результаты можно было интерпретировать двояко: 1) как короткую длительность ускорительного процесса в источнике (т.н. временной эффект) или 2) как наличие колебательных движений магнитных силовых трубок ППС, вдоль которых распространяются ускоренные ионы, причем, даже если само ускорение носит длительный характер, спутник может выйти из силовой трубки раньше, чем прекратится процесс ускорения (пространственный эффект).

Многоспутниковые наблюдения Cluster дают возможность более точного разделения временного и пространственного эффектов в наблюдении ускоренных ионных структур. Расстояния между спутниками из года в год варьируют, и оптимальное разведение спутников для этой задачи, на наш взгляд, составляет ~2000 км. Такое

разведение имело место при пролетах хвоста в 2001-2002 г.г. и исследование, представленное в данной главе, основано на анализе пересечений ППС хвоста (на расстояниях от Земли 15 – 19  $R_E$ ) именно в этот период.

Методика оценки длительности и пространственных размеров ускоренных ионных структур основана на «слежении» за положением в пространстве скоростей максимума распределения дифференциального потока ускоренных ионов, регистрируемых на высокоширотной границе ППС, при ее поочередном пересечении спутниками Cluster. Так как высокоширотная граница ППС, по сути, разделяет высокоширотную долю хвоста, лишенную горячей плазмы, и внутреннюю область ППС, содержащую ускоренные и/или горячие ионы, силовые трубки высокоширотной границы непосредственно связаны с источником ускорения, расположенном в ТС хвоста вблизи магнитной сепаратриссы, разделяющей еще открытые и уже замкнутые силовые линии магнитного поля. Кроме того, ускоренные ионы, движущиеся вдоль высокоширотной границы ППС, имеют минимальные питч-углы, так как ионы с той же энергией, но с большими питч-углами, в процессе движения от источника, смещаются на более низкие широты за счет эффекта фильтрации по скоростям, обусловленного конвекцией плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях,  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , направленной к экватору (где  $\mathbf{E}$  – электрическое поле утро-вечер,  $\mathbf{B}$  – напряженность магнитного поля, которое, в высокоширотной части хвоста и в ППС направлено, практически, вдоль линии Земля-Солнце). Поэтому, положение максимума 1D среза распределения дифференциального потока  $f(V_{\parallel})$  ускоренных ионов вдоль магнитного поля, измеренного непосредственно перед выходом/входом спутника из ППС в высокоширотную долю хвоста, фактически, отражает энергетику источника ускорения.

Благодаря колебательным движениям силовых трубок ППС в результате осцилляций магнитосферного хвоста («флэппинг» в англоязычной литературе) или каких-либо других возмущений, силовые трубки высокоширотной границы периодически пересекают спутники Cluster. Если интервал между последовательными пересечениями высокоширотной границы разными спутниками не слишком велик (менее 3 мин, то есть меньше возможного периода импульсных инъекций ускоренных ионов), тогда, время, в течение которого, величина скорости ионов, определяемая по положению максимума  $f(V_{\parallel})$ , остается неизменной, можно считать минимальной длительностью ускорительного процесса.

Что касается пространственных размеров ускоренных ионных структур, то здесь, в первую очередь, нужно отметить, что размер пучков или потоков ускоренных ионов вдоль направления магнитного поля (продольный размер) не только превышает характерные

расстояния между спутниками Cluster, но и составляет, по нашим оценкам, от нескольких сотен до миллиона км. Это естественно, так как длительность процесса ускорения практически всегда превышает время пролета частиц с наблюдаемыми энергиями от источника к месту регистрации и, в результате, ускоренные ионы заполняют всю силовую трубку. Поэтому, говоря о пространственных размерах структур ускоренных ионов, мы будем иметь в виду размеры в направлениях перпендикулярных силовым линиям магнитного поля, а именно, размер вдоль нормали к поверхности ППС ( $\Delta Z$ ) и размер вдоль нормали к магнитной силовой трубке, тангенциальной к поверхности ППС ( $\Delta Y$ , в случае, если ускоренные ионы распространяются в трубке, а не в слое).

В предшествующих работах были получены оценки размера  $\Delta Z$  всего слоя ППС, которые составили 1 – 3  $R_E$ . Для определения размера  $\Delta Z$  всего слоя или отдельной ионной структуры (если таковую можно выделить) необходимо знать моменты пересечения высокоширотной и низкоширотной границ (слоя/структуры)  $t_1$ ,  $t_2$ , а также скорость движения силовых трубок ППС в направлении нормали к поверхности ППС ( $V_Z$ ). Проекция нормали на оси системы координат GSE вычислялись либо по задержкам в наблюдении спутниками Cluster депрессии магнитного поля, вызванной диамагнитным эффектом, при последовательных влетах спутников в ППС из высокоширотной доли хвоста, либо методом анализа направления минимальной вариации магнитного поля (MVA анализ в англоязычной литературе), измеряемого на одном спутнике. В обоих случаях высокоширотная поверхность ППС предполагалась плоской, по крайней мере, в области пространства, занимаемой квартетом Cluster.

Скорость движения магнитных силовых трубок ППС в направлении перпендикулярном направлению невозмущенного магнитного поля высокоширотной доли хвоста (т.е. в направлении  $Z$  или  $Y$ ) может быть оценена по скорости  $V_Z$  (или  $V_Y$ ) низкоэнергичной ионной компоненты, движущейся в высокоширотной доле хвоста от Земли, и состоящей, в основном, из ионов  $H^+$  и ионосферных ионов  $O^+$ . Обычно, эта компонента не регистрируется из-за слишком низких энергий ионов, которые отражаются от заряженного спутника. Однако, вблизи границы ППС, при движении его силовых трубок со скоростью  $V$  в направлении перпендикулярном невозмущенному магнитному полю  $B$ , низкоэнергичная плазма также приходит в движение под действием электрического поля  $E = V \times B$  и приобретает скорость  $V_{\perp} = \frac{(V \times B) \times B}{B^2}$ . В результате, энергия низкоэнергичных ионов в ППС, и в прилегающей к нему высокоширотной доле хвоста, может возрасти до 1 - 2 кэВ, что обеспечивает их надежную регистрацию. Тогда,

ввиду того, что скорость  $V_Z$  не является постоянной, размер структуры ускоренных ионов

$$\Delta Z \text{ можно оценить как: } \Delta Z = \int_{t_1}^{t_2} V_Z(t) dt.$$

Эффект фильтрации ионов по скоростям при их движении в ППС из области ускорения к точке наблюдения, позволяет спроецировать их траектории по силовым линиям магнитного поля назад в хвост до пересечения с экваториальной плоскостью. Тем самым, можно определить, выходят ли частицы из одного источника ускорения в ТС, или же они ускоряются в нескольких разнесенных в пространстве, но одновременно функционирующих источниках. Как будет показано ниже, такая ситуация наблюдалась в ~30 % пересечений ППС спутниками Cluster.

Для статистического исследования пространственных и временных характеристик ускоренных ионов, интервалы пересечений ППС спутниками Cluster должны отвечать следующим критериям:

1) высокоэнергичные ионы, движущиеся вдоль силовых линий магнитного поля, должны наблюдаться в ППС;

2) спутники должны пересекать всю область ППС вплоть до входа в ПС;

3) измеряемая плотность низкоэнергичных ионов должна быть достаточной для достоверного определения их скорости (как правило, эта величина должна быть более  $0.01 \text{ см}^{-3}$ );

4) диамагнитные депрессии магнитного поля должны быть достаточно выраженными для определения нормали к поверхности ППС либо с помощью метода таймирования, либо с помощью MVA анализа.

5) должны иметь место несколько периодических пересечений высокоширотной границы ППС спутниками Cluster, причем временной интервал между последовательными пересечениями высокоширотной границы ППС спутниками Cluster не должен превышать 3 мин.

В период 2001-2002 г.г. было найдено 138 пересечений ППС спутниками Cluster, отвечавших этим условиям. В результате было установлено, что в большинстве случаев, длительность наблюдения ускоренных ионов в ППС превышала 3 мин, а в ряде событий - 10 мин. Пространственный размер  $\Delta Z$  ускоренных ионных структур во всех пересечениях ППС не превышал  $1 R_E$ . В тех случаях, когда в ППС удавалось выделить ионные пучки или потоки, ускоренные в разных источниках, размер  $\Delta Z$  отдельной ионной структуры не превышал 3000 км.

В данном статистическом исследовании интервалы пересечения ППС не разделялись согласно уровню геомагнитной активности. Разброс скоростей движения ускоренных

ионов, регистрируемых в ППС был довольно значителен: от 800 км/с до более чем 2500 км/с. Как показало данное исследование, в большинстве случаев, длительность наблюдения высокоскоростных ионов ( $V_{\parallel} > 2000$  км/с) не превышала 5 мин, тогда как длительность наблюдения ионов, движущихся с меньшими скоростями, в некоторых случаях достигала 25 мин. В следующих главах будет сделана попытка выяснить причины разнообразия энергетических, временных и пространственных характеристик структур ускоренных ионов, наблюдаемых в ППС.

Оценка размера пучка или потока высокоскоростных ионов вдоль направления  $Y$  является более сложной задачей. Прежде всего, для возможности такой оценки, размер структуры ускоренных ионов  $\Delta Y$  должен быть сравним с характерным расстоянием между спутниками квартета Cluster. Кроме того, движение магнитных силовых трубок ППС, содержащих ускоренные ионы, должно иметь составляющую вдоль  $Y$ , то есть происходить в плоскостях  $(XY)$  или  $(YZ)$ . Такое движение магнитных силовых трубок ППС возможно, например, в результате их возмущения, обусловленного прохождением самого высокоскоростного потока. Из 138 пресечений ППС в 10 случаях удалось определить размер  $\Delta Y$  магнитной силовой трубки, по которой распространяются ускоренные ионы. Во всех случаях он не превышал  $0.5 R_E$ . Все 10 событий наблюдались при очень спокойных геомагнитных условиях (абсолютная величина  $AL$  индекса была менее 100 нТ и оставалась постоянной в течение нескольких часов до, во время, и после анализируемого интервала).

Методика исследования, описанная в данной главе, будет использована в дальнейшем при анализе пространственных и временных характеристик ускоренных ионных структур наблюдавшихся в ППС в различные периоды геомагнитной активности.

**В четвёртой главе** рассмотрено влияние внешних условий (направления ММП) на эффективность ускорительных процессов в ТС геомагнитного хвоста. Также обсуждаются зависимости вероятности наблюдений в ППС ускоренных ионных структур, их энергий, и пространственного распределения источников ускорения в направлении утро-вечер, от уровня геомагнитной активности (часового индекса геомагнитной активности  $AL$ ).

ММП оказывает доминирующее влияние на картину глобальной конвекции в геомагнитном хвосте. Оно также является важнейшим фактором, определяющим мощность поступления энергии из солнечного ветра в магнитосферу. Эта энергия накапливается в форме магнитной энергии в геомагнитном хвосте, и её последующая диссипация происходит на различных пространственных и временных масштабах, и сопровождается ускорением и нагревом плазмы. При южном направлении ММП, согласно

классической модели Данжи, происходит пересоединение силовых линий ММП и геомагнитного поля на дневной стороне магнитопаузы. Новые силовые линии, один конец которых связан с Землей, а другой находится в солнечном ветре, сносятся потоком солнечного ветра на ночную сторону, что ведет к накоплению магнитного потока в хвосте. Электрическое поле солнечного ветра  $\mathbf{E} = \mathbf{V} \times \mathbf{B}$  (где  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{B}$  – соответственно скорость солнечного ветра и напряженность ММП) проникает в магнитосферу, за счет чего в её хвосте существует электрическое поле направленное поперек хвоста с утра на вечер с напряженностью  $\sim 0.1 - 0.3$  мВ/м. Внешняя магнитосфера вовлекается в процесс конвекции, транспортирующий пересоединенные силовые линии магнитного поля сначала в хвост, затем, к экваториальной плоскости, где они еще раз пересоединяются с противоположно направленными силовыми линиями, конвектирующими к экватору из другой полусферы. При пересоединении образуются две новых пары силовых линий магнитного поля: замкнутые линии, оба конца которых связаны с Землей, и которые, в конце концов, конвектируют к Земле и возвращаются на дневную сторону и открытые силовые линии, которые уносятся от Земли потоком солнечного ветра. При северном ММП картина конвекции в магнитосфере изменяется: область пересоединения сдвигается на более высокие широты. При этом, важную роль в генерации поперечного электрического поля может играть квазивязкое взаимодействие плазмы солнечного ветра и плазмы низкоширотного пограничного слоя на флангах магнитосферы. Однако, напряженность такого электрического поля существенно меньше, чем при южном ММП.

Согласно современным представлениям низкоэнергичные ионы, поступающие в хвост из мантии и/или из ионосферы, неадиабатически взаимодействуют с ТС в тех его областях, где магнитное поле достаточно мало, чтобы «размагнитить» заряженные частицы. В процессе взаимодействия, частицы набирают энергию, в зависимости от расстояния, проходимого ими поперек хвоста. Оказалось, что величина этой энергии пропорциональна квадрату напряженности электрического поля (в стационарном случае это поле утро-вечер) и обратно пропорциональна квадрату напряженности локального магнитного поля в ТС. Обычно области неадиабатического взаимодействия находятся в дальних областях ТС, где магнитное поле достаточно слабое. Однако они могут формироваться и в ближнем хвосте, в окрестности ближней X-линии. В процессе неадиабатического взаимодействия с ТС и, в зависимости от локальных условий ускорения, ионы могут либо захватываться внутри ПС, либо инжектироваться в ППС, где они образуют движущиеся вдоль магнитного поля пучки или потоки. Так как электрическое поле утро-вечер является одним из факторов, определяющих энергию ускоренных ионов, наблюдаемых в ППС, можно предположить, что при северном



направлении ММП неадиабатическое ускорения ионов в хвосте магнитосферы должно быть менее эффективным, чем при южном, или совсем отсутствовать.

В этой связи представляет интерес выяснение вопроса о том, является ли появление в ППС потоков и пучков ускоренных ионов следствием высвобождения избыточной энергии, поступившей извне и накопленной в хвосте, иначе говоря, связано ли их появление с какой-то определенной предысторией в межпланетной среде (в частности с каким-либо определенным направлением ММП) или же это внутренняя реакция системы, направленная на ликвидацию дисбаланса между притоком плазмы из плазменной мантии и ионосферы, и потерями частиц, в результате их выхода из магнитосферы через фланги, или высыпания в авроральной области? На этот вопрос до сих пор нет определенного ответа.

Также интересен вопрос о связи ускорительных процессов в хвосте с геомагнитной активностью. Первоначально, считалось, что появление ускоренных плазменных структур на границе плазменного слоя связано с развитием суббури, то есть ППС существует только во время геомагнитно-активных периодов. Позднее, благодаря многочисленным наблюдениям, выполненным в хвосте космическими аппаратами IMP-7,8 и ISEE-1,2 была замечена неоднозначность связи явлений в ППС с наземными проявлениями геомагнитной активности. Так, некоторые авторы на основе анализа 20 пересечений ППС отмечали, что большинство ускоренных потоков наблюдалось во время фазы восстановления, в то время как в других работах сообщалось о том, что ППС существует и во время длительных спокойных периодов. В то же время были сообщения о том, что во время восстановления ПС, ускоренных пучков в ППС может вообще не наблюдаться и спутник, влетая в эту область из высокоширотных долей хвоста, сразу регистрировал изотропное по скоростям распределение горячей плазмы, практически не отличавшееся от распределений, характерных для ПС. Для разрешения этих противоречий необходимы многоточечные измерения в ППС, а также статистические исследования гораздо большего числа пересечений ППС.

Статистические исследования, представленные в данной главе, были выполнены на основе анализа ионных функций распределений, наблюдавшихся в 2147 пересечениях ППС спутниками Интербол-1 (1995-1998 г.г.), Geotail (1993-1995 г.г.) и Cluster (2001-2002 г.г.), на радиальных расстояниях от Земли  $-15 - -220 R_E$ , и в диапазоне координат  $Y_{GSM} = -26 - 26 R_E$  ( $R_E$  – радиус Земли) в различные геомагнитные интервалы и при различных направлениях ММП. Использовались измерения ММП с космических аппаратов IMP, Wind и ACE. Для каждого пересечения высокоширотной границы ППС (независимо от того, наблюдались ли в это время пучки или потоки ускоренных ионов) определялось

среднее направление ММП (часовой угол  $\theta$ ), усредненное за 2 часа, 1 час, 1.5 часа, 30 мин и 15 мин до момента пересечения (с учетом времени распространения солнечного ветра от спутника, находившегося в межпланетной среде до дальних областей хвоста  $\sim 100 R_E$ ).

Установлено, что вероятность наблюдения потоков или пучков ускоренных ионов в ППС хвоста зависит от среднего часового угла ММП, усредненного как минимум за 1 час до наблюдения ускоренных ионов. При усреднениях за меньшие интервалы времени какая-либо зависимость вероятности появления в ППС ускоренных ионов от часового угла исчезала. По-видимому, существует интегральный эффект влияния направления ММП на ускорительные процессы в ТС. При северном направлении ММП вероятность наблюдения в ППС ускоренных ионов уменьшается. В полуночном секторе ускоренные ионы практически равновероятно наблюдаются при всех (кроме северного) направлениях ММП. На флангах вероятность появления ускоренных ионных пучков или потоков резко возрастает, когда ММП имеет значительный азимутальный компонент.

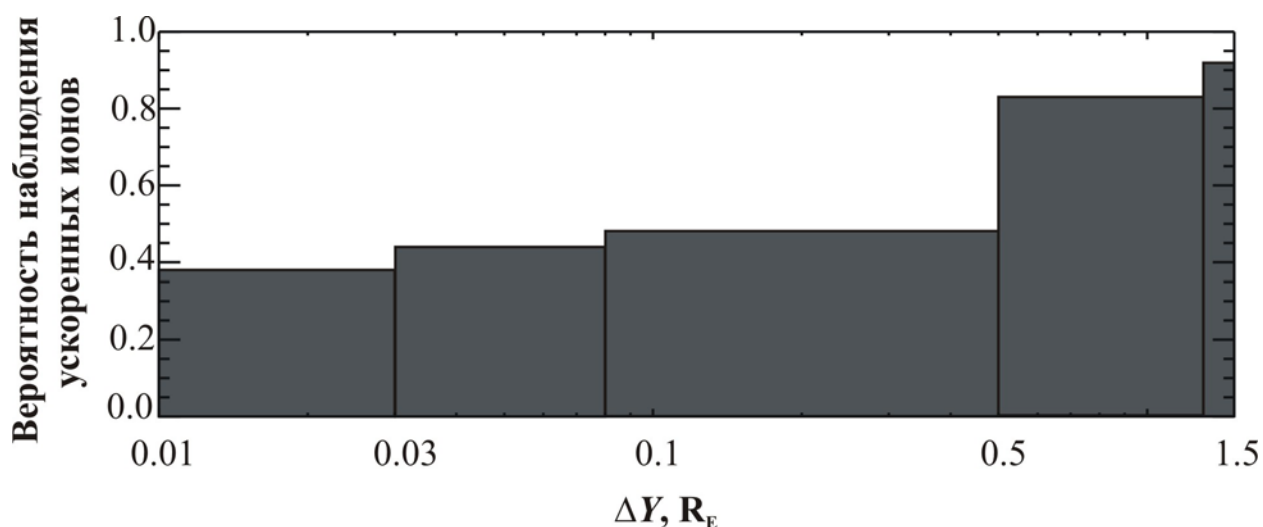
Статистические исследования зависимости вероятности наблюдения в ППС ускоренных ионов от фазы геомагнитной активности и от величины часового геомагнитного индекса  $AL$  производились на том же статистическом материале (2147 пересечений ППС). Также исследовалась зависимость вероятности отсутствия в ППС ускоренных ионов, о которых сообщалось ранее, с целью выяснения действительно ли существует определенная фаза геомагнитной активности, когда ускорения ионов в ТС не происходит.

В результате установлено, что пучки или потоки ускоренных ионов (равно как их отсутствие) наблюдаются в ППС при любых значениях  $AL$  индекса (и соответственно на всех фазах геомагнитной активности). Вероятность наблюдения ускоренных ионов в ППС несколько выше на фазе восстановления. Средняя энергия ускоренных ионов наблюдаемых в ППС растет с ростом  $AL$  индекса, и наибольшие энергии наблюдаются во время взрывной фазы суббури.

Практически равновероятное наблюдение пучков или потоков ускоренных ионов при всех возможных значениях  $AL$  и практически при всех направлениях ММП (даже при северном направлении, хоть и в меньшей степени), косвенно указывает на то, что, скорее всего, неадиабатическое ускорение ионов постоянно происходит в ТС геомагнитного хвоста, хотя и с разной эффективностью. Отсутствие наблюдений ускоренных ионов в ППС может быть связано не с отсутствием ускорения, а с пространственной локализацией ускоренных ионных структур в направлении утро-вечер, о которой шла речь в предыдущей главе. Существование такой локализации удалось доказать для нескольких событий наблюдавшихся во время спокойных геомагнитных условий. Во время

возмущенных геомагнитных периодов размер ионных структур в направлении утро-вечер может быть значительно больше. Соответственно, вероятность «попадания» спутника в пучок или поток ускоренных ионов должна возрастать во время активных периодов и уменьшаться при спокойных условиях, что и наблюдается в действительности.

В разные годы расстояния между спутниками квартета Cluster изменялись от  $\sim 0.1 R_E$  до нескольких  $R_E$ . Статистический анализ одновременных измерений ионных распределений спутниками Cluster, находившимися на близких широтах (на близких  $Z$ ), но разведенных в  $Y$  направлении, позволяет исследовать влияние пространственной локализации ускоренных ионных структур на вероятность их наблюдения в ППС. **На рис. 2** показано распределение вероятности наблюдения ускоренных ионных пучков или потоков в зависимости от расстояния  $\Delta Y$  между спутниками Cluster, находившимися на близких широтах. При увеличении  $\Delta Y$  вероятность наблюдения структуры ускоренных ионов хотя бы одним спутником возрастает. Резкое увеличение вероятности наблюдается при разведении спутников более чем на  $0.5 R_E$ . По-видимому, этот пространственный размер характерен не только для ширины ионных потоков в вертикальном направлении (по  $Z$ ), но и для поперечной ширины (по  $Y$ ) магнитных силовых трубок, связанных с областями ускорения ионов в ТС.



**Рис. 2.** Зависимость вероятности наблюдения в ППС ускоренных ионных пучков или потоков хотя бы одним спутником Cluster в зависимости от расстояния между спутниками  $\Delta Y$  (GSE).

Также в главе 4 были исследованы пространственные распределения вероятности наблюдения в ППС ускоренных ионных структур (и их отсутствия) в направлении утро-вечер (для  $Y_{GSM}$  - координат в диапазоне от  $-26$  до  $26 R_E$ , где  $R_E$  – радиус Земли) для разных фаз геомагнитной активности. Для всех фаз, кроме спокойной, никакой

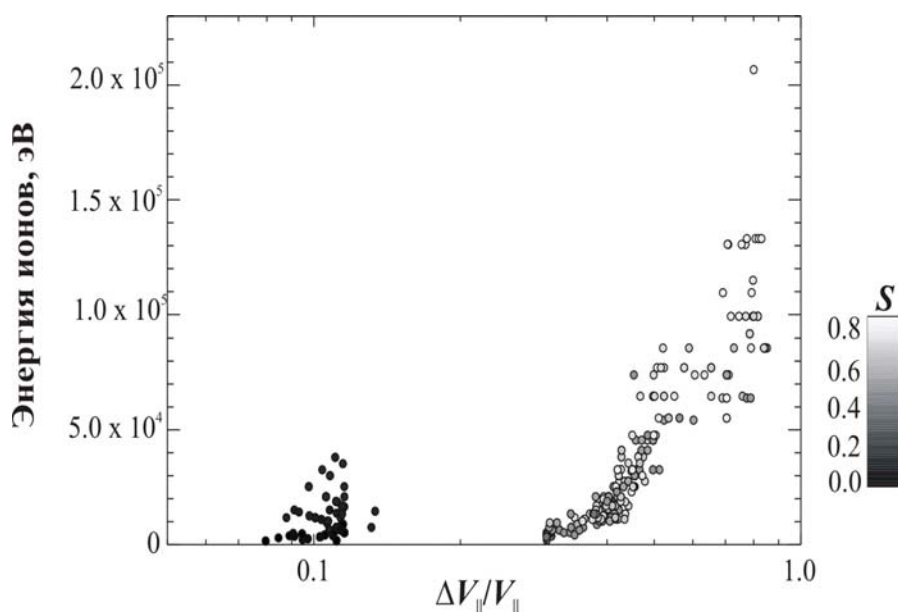
зависимости от  $Y$  выявлено не было: пучки или потоки ускоренных ионов, равно как интервалы их отсутствия, практически равновероятно распределены по всему диапазону  $Y$ -координат. Это означает две вещи: 1) в ТС хвоста нет выделенных областей, где происходит ускорение, то есть источники равномерно распределены в направлении утро-вечер и 2) ускорение ионов в активные геомагнитные периоды происходит не только и, возможно не столько за счет ускорения квазистационарным полем утро-вечер, но и за счет индукционных электрических полей. Последнее объясняет появление энергичных ионов и на утреннем фланге. Во время спокойных условий вероятность наблюдения ускоренных ионов возрастает в направлении вечернего фланга, а на утреннем фланге ускоренных ионов не наблюдается совсем. Такая тенденция должна иметь место при неадиабатическом ускорении ионов квазистационарным электрическим полем утро-вечер. Действительно, чтобы набрать энергии, наблюдаемые в ППС в такие периоды ( $\sim 10$  кэВ), ионы должны пройти в ТС расстояние  $\sim 15 R_E$ . Таким образом, ионы, влетевшие в ТС даже на краю утреннего фланга, выйдут из ТС уже вблизи полуночного сектора.

Таким образом, статистические исследования, представленные в данной главе, косвенно указывают на то, что ускоренные ионы всегда наблюдаются в ППС хвоста. Однако, их энергетические характеристики и особенности ускорения в ТС (за счет квазистационарных или индукционных электрических полей) различны во время спокойных и возмущенных геомагнитных периодов. Поэтому встает вопрос о том, обусловлены ли эти различия близостью источников ускорения к области магнитного пересоединения в ТС и сказываются ли они на характеристиках функций распределений дифференциального потока ускоренных ионов. Для ответа на этот вопрос были исследованы ширины в пространстве скоростей,  $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel}$ , функций распределения дифференциального потока ускоренных ионов, измеренных на высокоширотной границе ППС, и степень анизотропии электронных функций распределения по скоростям, наблюдаемых вблизи и на высокоширотной границе ППС одновременно с ускоренными ионами. В качестве параметра, характеризующего симметричность 1D срезов электронных функций распределения вдоль магнитного поля, использовался параметр асимметрии  $S$ , (skewness, в англоязычной литературе).

В результате было выделено два класса ускоренных ионных структур: 1) коллимированные по энергиям и питч-углам структуры ускоренных ионов, ширина распределений которых в пространстве скоростей  $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} \leq 0.15$ , а энергии, в большинстве случаев не превышают 20 кэВ; 2) структуры ускоренных ионов также коллимированных по питч-углам, однако имеющих широкие распределения в пространстве скоростей:  $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} > 0.3$  и, энергии, которых достигают 140 кэВ (**рис.3**). Электроны, регистрируемые

одновременно с ионными структурами первого типа на высокоширотной границе ППС и в прилегающей к ППС высокоширотной части хвоста, имели почти изотропные по скоростям функции распределения. Напротив, электроны, наблюдаемые на высокоширотной границе ППС одновременно с ускоренными ионными структурами второго типа, имели существенно асимметричные вдоль магнитного поля распределения по скоростям. Эта асимметрия возникала за счет того, что в направлении к источнику ускорения двигались только низкоэнергичные электроны, в то время как сильно ускоренные электроны двигались в том же направлении, что и ускоренные ионы, т.е. из источника. Анизотропия электронных распределений вдоль магнитного поля указывает на пересечение спутником магнитной сепаратриссы, разделяющей еще открытые (не пересоединенные) силовые линии магнитного поля и уже замкнутые (пересоединенные силовые линии). Одновременное наблюдение ускоренных ионов и анизотропных электронов указывает, что в таких случаях, источник ускорения ионов должен находиться вблизи области магнитного пересоединения в хвосте.

Для статистического исследования геомагнитных условий, при которых в ППС наблюдается тот или иной тип ускоренных ионных структур были использованы данные наблюдений в ППС спутников Geotail (462 случая наблюдений) и данные квартета Cluster (364 случая наблюдений). Установлено, что 80% ускоренных ионных структур первого типа наблюдаются исключительно при спокойных геомагнитных условиях, когда абсолютная величина  $AL$  индекса не превышала 100 нТ, напротив, более 70 % ускоренных ионных структур второго типа наблюдались при  $|AL| > 300$  нТ. При высоких значениях  $AL$  индекса ( $\geq 500$  нТ), в ППС наблюдались только ускоренные ионные структуры второго типа.

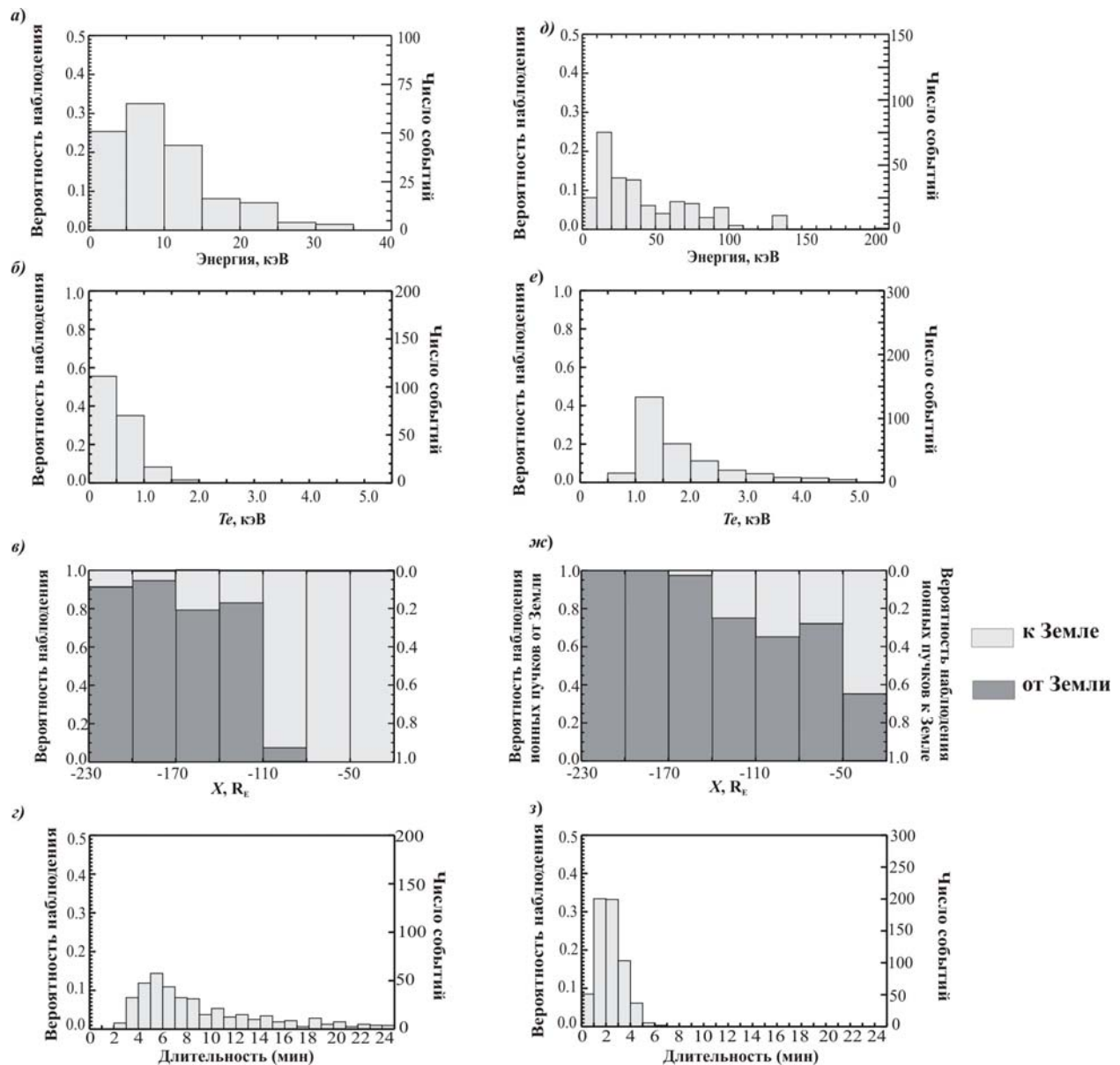


**Рис.3.** Зависимость энергии, соответствующей максимуму распределения дифференциального потока в ускоренных ионных пучках или потоках от соответствующей ширины распределения дифференциального потока  $\Delta V_{||}/V_{||}$ , регистрируемой в ППС хвоста. Степень асимметрии,  $S$ , функций распределения электронов, наблюдаемых вблизи высокоширотной границы ППС одновременно с ускоренными ионами, показана оттенками серого цвета, согласно шкале, приведенной в правой части рисунка.

В двух последующих главах будут подробно рассмотрены характеристики ионных и электронных распределений в ППС, пространственно-временные характеристики образовавшихся структур, а также и локализация источников их ускорения в геомагнитном хвосте, присущие, соответственно, спокойным и геомагнитно-активным интервалам.

В **пятой главе** выполнены исследования структуры ионных и электронных распределений в ППС во время длительных ( $\sim$  нескольких часов) спокойных и слабо-возмущенных геомагнитных условий ( $|AL| < 300$  нТ). Для данных геомагнитных условий наша база данных содержит 193 пролета хвоста спутником Geotail в диапазоне расстояний от Земли  $20 - 220 R_E$  и 129 пересечений ППС квартетом Cluster на расстояниях от Земли  $15 - 19 R_E$ . Во всех случаях ускоренные ионные структуры (с характерными энергиями  $\sim 10 - 20$  кэВ, **рис.4а**), зарегистрированные вблизи высокоширотной границы ППС, характеризовались высокой коллимацией по pitch-углам и энергиям ( $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} \leq 0.15$ ). Причем, коллимация по энергиям, сохранялась в пределах всего ППС, то есть даже будучи проинтегрированной по всей толщине ППС, ширина распределений дифференциального потока ускоренных ионов  $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel}$  была менее 0.3. Во всех случаях электроны, наблюдаемые в ППС вместе с высокоскоростными ионами (и даже на более высоких широтах), имели практически изотропные функции распределения по скоростям и температуры  $\sim$  нескольких сот эВ (**рис.4б**) (то есть, существенно ниже значений, типичных для ПС). Электронная температура очень медленно возрастала в направлении к центральному ПС, то есть электроны практически не ускорялись в дальнем хвосте. Их направленная скорость в ППС была существенно меньше тепловой и сравнима по величине и направлению со скоростью ионов, что обеспечивало отсутствие или очень малую величину плотности продольных электрических токов ( $j_{\parallel} < 2$  нА/м<sup>2</sup>).

Таким образом, во всех случаях «спокойного» ППС, структуры ускоренных ионов были «вложены» в слой изотропных электронов. Это означает, что ускорительные процессы, ответственные за появления в ППС высокоскоростных ионов ( $V_{\parallel} \geq 800$  км/с), разыгрывались в области уже замкнутых силовых линий магнитного поля. Медленное ускорение электронов, захваченных внутри ПС, в такие интервалы происходит за счет бетатронного механизма при их конвекции в области с более сильным магнитным полем вблизи Земли.



**Рис.4.** Левая колонка (а-г), сверху вниз: распределения вероятности наблюдения квазистационарных, коллимированных по энергиям ионных структур, ускоренных в ТС в области замкнутых силовых линий магнитного поля, в зависимости от их энергии (а); от температуры электронов, регистрируемых одновременно с ускоренными ионами (б); от направления движения ускоренных ионов (к Земле/от Земли) вдоль высокоширотной границы ППС (в); от длительности наблюдения ускоренных ионов (г). Правая колонка (д-з), сверху вниз: аналогичные распределения вероятности наблюдения в ППС энергичных ионных пучков с широкими по продольным скоростям распределениями дифференциального потока, ускоренных вблизи магнитных X-линий.

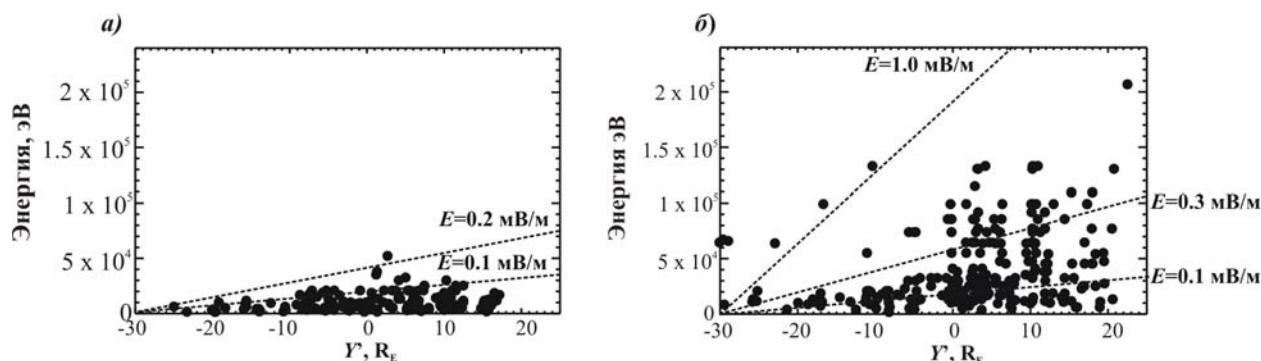
Статистический анализ направлений движения ускоренных ионов вдоль высокоширотной границы ППС, зарегистрированных спутником Geotail на разных расстояниях от Земли, позволил оценить положение источников их ускорения. Оказалось, что ионы были ускорены в ТС дальнего хвоста, так как даже на расстояниях  $X = -110 R_E$  более 80% ионов двигалось к Земле.

Для 10 случаев пересечений ППС спутниками Cluster во время очень спокойных геомагнитных условий (энергия ионов не превышала 10 кэВ), впервые удалось экспериментально определить характерные поперечные размеры магнитных силовых трубок ППС вдоль которых распространялись ускоренные ионы. Установлено, что пространственная локализация имеет место не только в направлении нормали к поверхности ППС (что было известно и в более ранних исследованиях), но и в направлении нормали тангенциальной поверхности ППС. Площадь сечения магнитных силовых трубок, содержащих ускоренные ионы может быть  $\leq 0.3 R_E^2$ . Пространственная локализация этих структур позволяет понять, почему в спокойные интервалы, при расстояниях между спутниками Cluster менее  $0.5 R_E$ , ускоренные ионы наблюдались менее чем в половине случаев пересечений ППС.

Минимальные длительности наблюдений ускоренных ионных структур оцененные как по данным Geotail, так и по многоточечным измерениям Cluster превышали 3 мин и в некоторых случаях достигали 25 мин (рис.4в). Данный результат указывает скорее на квазистационарный, чем на импульсный характер ускорения ионов в хвосте во время спокойных геомагнитных периодов. Квазистационарный характер ускорения подтверждается также статистическим распределением энергий ионов в направлении утро-вечер. Если  $E_Y$  – величина напряженности электрического поля утро-вечер и  $\Delta Y_{\max}$  – расстояние в направлении  $E_Y$ , которое неадиабатические ионы проходят в ТС от края утреннего фланга до  $Y$ -координаты точки наблюдения, тогда для верхней оценки энергии, приобретаемой ионами в результате такого ускорения, можно получить:

$$W_{\max} = E_Y \cdot \Delta Y_{\max}$$

Как видно из рис.5а, в большинстве случаев, даже при  $E_Y = 0.1$  мВ/м энергии ионов, наблюдаемые в ППС при данном  $Y$  – положении спутника, были ниже соответствующей верхней оценки.



**Рис.5.** Распределения энергий ускоренных ионных структур вдоль направления утро-вечер: (а) квазистационарных коллимированных по энергиям ионов, ускоренных в ТС на замкнутых силовых линиях магнитного поля; (б) энергичных ионных пучков ускоренных вблизи X-линии.



Статистическое исследование зависимости вероятности наблюдения ускоренных ионных структур данного типа от направления ММП, показало, что подобный режим ускорения ионов реализуется в хвосте, в основном, при направлениях ММП близких к азимутальным. При северном направлении ММП вероятность наблюдения таких ускоренных структур уменьшается, а при сильном южном ММП их нет совсем.

Движение «размагниченных» частиц в ТС имеет две составляющих: медленное квази-ларморовское вращение в плоскости ТС вокруг слабого магнитного поля, перпендикулярного слою, и быстрые осцилляции в области обращения магнитного поля, перпендикулярные плоскости ТС. В конце 80-х годов, на основе кинетического анализа траекторий движения неадиабатических ионов в ТС хвоста, была создана резонансная теория, согласно которой характер движения неадиабатических ионов и приобретаемые ими энергии зависят от локальных условий в области взаимодействия. А именно, от величины отношения частоты быстрых осцилляций к частоте медленного квази-ларморовского вращения,  $N$ . Если, в зависимости от локальных условий,  $N$  оказывается целым числом, то ионы, практически без рассеяния, инжектируются из ТС в ППС. Такие области ТС были названы резонансными, а число  $N$  – номером данного резонанса. В других областях ТС, где  $N$  – дробное число, неадиабатически движущиеся ионы испытывают сильное рассеяние и захватываются в ТС. При этом, набранная ими кинетическая энергия, фактически, становится тепловой. В результате такого резонансного взаимодействия энергия, приобретенная ионами, переходит в кинетическую энергию их направленного движения вдоль силовых линий магнитного поля. Резонансная теория предсказывала некоторые характерные особенности ускорения ионов и их распределений в ППС, а именно:

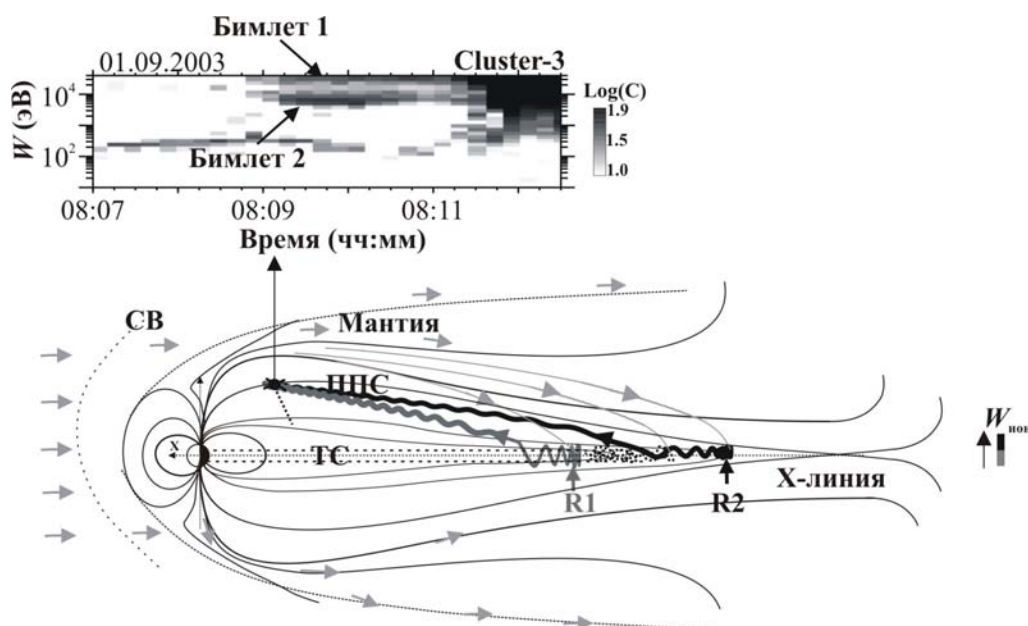
- 1) пространственную локализацию ускоренных ионных структур вследствие локальности их источников ускорения;
- 2) высокую коллимацию ионов по скоростям ( $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} \sim 0.1$ );
- 3) возможность одновременного существования в ТС нескольких областей резонансного ускорения;
- 4) зависимость энергии ионов, ускоренных в  $N$ -ом резонансе,  $W_N$ , от номера резонанса:  $W_N \sim N^{4/3}$  (где  $N$  – целое число), и, как следствие, возникающую «дискретность» энергетических спектров ускоренных ионов в ППС.

Однако, до сих пор, перечисленные выше особенности ускоренных ионных пучков не удавалось подтвердить экспериментально. В данной диссертации, наряду с упомянутыми выше исследованиями, подтвердившими, для спокойных геомагнитных условий, пространственную локализацию и коллимацию ускоренных ионов по скоростям,

впервые за весь период экспериментальных наблюдений в хвосте магнитосферы, удалось экспериментально доказать факт одновременного существования в ТС, по крайней мере, двух областей резонансного ускорения ионов. На основе анализа ионных данных, полученных спутниками Cluster с высоким временным (и пространственным) разрешением, установлено, что очень часто в распределениях ионного дифференциального потока наблюдаются два статистически достоверных максимума, четко обособленных в пространстве скоростей. Эти максимумы образуются двумя ионными пучками (**рис.6**), ускоренными вдоль магнитного поля, и движущимися к Земле с существенно разными продольными скоростями (величины которых могут различаться в 2 и более раз). Из-за присутствия в хвосте конвекции  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ , направленной к экватору, два ионных пучка, движущиеся со столь различными скоростями, не могут наблюдаться вблизи Земли на одинаковых  $Z$ , если только они не были ускорены в двух пространственно разнесенных (по  $X$ ) источниках. Статистический анализ, выполненный на основе 120 случаев наблюдения таких распределений, показал, что отношения величин продольных скоростей двух пучков, образующих два характерных пика функций распределения, хорошо описываются скейлингом, предсказанным теорией резонансного ускорения ионов в ТС:

$$V_{\parallel 1}/V_{\parallel 2} \approx [N/(N+2)]^{2/3},$$

где  $V_{\parallel 1}$  - скорость более низкоскоростного пучка,  $V_{\parallel 2}$  - скорость высокоскоростного пучка в каждом двухпиковом распределении,  $N$  - целое число, соответствующее номеру резонансного источника ускорения.



**Рис.6.** Одновременное наблюдение спутниками Cluster двух бимлетов, ускоренных в различных резонансных источниках (R1 и R2), и имеющих, таким образом, существенно разные энергии ( $W$ ).

Таким образом, результаты данной главы позволяют утверждать, что во время спокойных геомагнитных периодов, ускорение ионов хоть и происходит в ТС дальних областей хвоста, но источники ускорения остаются, при этом, в области замкнутых силовых линий магнитного поля, и само ускорение носит резонансный характер. Несмотря на столь «тонкие» кинетические эффекты взаимодействия частиц с ТС, приводящие к появлению резонансных областей ускорения, это явление носит достаточно устойчивый характер, и его продолжительность может достигать десятков минут. По-видимому, это обеспечивается медленной изменчивостью состояния хвоста во время длительных спокойных периодов.

В **шестой главе** обсуждаются структуры ионных и электронных функций распределения в ППС, характерные для более возмущенных геомагнитных условий ( $|AL| > 300$  нТ), чем рассмотренные в предыдущей главе. Соответствующая база данных включала 269 пересечений ППС спутником Geotail в диапазоне расстояний от Земли 20 – 220  $R_E$  и 237 пролетов ППС кватретом Cluster (на расстояниях 15 – 19  $R_E$  от Земли). Во время этих интервалов, в ППС наблюдались ионные пучки, которые оставались коллимированными по питч-углам, но имели более высокие энергии (**рис.4d**) и более широкий разброс функций распределения дифференциального потока по параллельным скоростям, чем в спокойные периоды ( $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} > 0.3$ ). При интегрировании по всей толщине ППС, величина  $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel}$  приближалась к 1.0.

Электроны, наблюдаемые на высокоширотной границе ППС одновременно с энергичными ионными пучками, имели анизотропные функции распределений по скоростям вдоль магнитного поля. Анизотропия их функций распределения была связана: 1) со сравнительно холодными ( $\sim$  нескольких сот эВ) электронами, движущимися преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля в направлении источника ускорения ионов и 2) ускоренными электронами с энергиями  $\sim$  нескольких кэВ, движущимися из источника ускорения, в том же направлении, что и ускоренные ионные пучки. Холодные электронные пучки, могут быть образованы либо ускоренными электронами, вытягиваемыми из высокоширотной ионосферы, либо электронами солнечного ветра, нагретыми при торможении солнечного ветра на головной ударной волне.

Температура электронов в ППС оказывалась, сравнима по величине с электронной температурой в центральном ПС ( $\geq 1$  кэВ, **рис.4e**). Анизотропия электронных функций распределения указывала на пересечение спутником магнитной сепаратриссы, разделяющей еще открытые силовые линии высокоширотных долей хвоста, вдоль

которых двигались холодные (еще неускоренные в ТС) электроны и уже пересоединенные силовые линии магнитного поля, вдоль которых из источника распространялись ускоренные электроны. Одновременное наблюдение энергичных ионных пучков и анизотропных электронных распределений позволяет предположить, что в такие периоды, источники ускорения ионов находились достаточно близко к области магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы.

Для оценки возможных положений источников ускорения ионов в хвосте в геомагнитно-возмущенные интервалы был выполнен статистический анализ направлений движений ускоренных ионов, регистрируемых спутником Geotail на различных радиальных расстояниях от Земли в момент пересечения высокоширотной границы ППС (т.е. силовой линии, проецирующейся непосредственно в самый дальний источник ускорения). Установлено, что уже на расстояниях 50 - 80  $R_E$  от Земли около 70 % ионных пучков двигались от Земли в сторону хвоста. Из них, около 30 % пучков были ускорены в источниках, расположенных еще ближе к Земле, на расстояниях  $\sim 20 - 50 R_E$  (рис.4ж). Это означает, что источники их ускорения, а значит, и магнитная X-линия, в рассматриваемые периоды были расположены в ближних к Земле областях хвоста. Согласно оценкам, выполненным как по данным спутника Geotail, так и по измерениям квартета Cluster, в большинстве случаев длительности наблюдений ускоренных ионных структур в такие периоды не превышали 4 мин (рис.4з).

Статистическое исследование зависимости вероятности наблюдения подобных плазменных структур от направления ММП показало, что при северном ММП ионных пучков данного типа вообще не наблюдалось. Вероятность их наблюдения в ППС возрастала при повороте ММП к южному направлению и достигала максимума при, почти чисто, южных направлениях ММП.

Еще одним косвенным указанием на формирование в хвосте магнитной X-линии является наблюдение в ППС Холловской системы продольных электрических токов. Такая система токов образуется в результате пространственного разделения зарядов вблизи области магнитного пересоединения из-за различной глубины проникновения ионов и электронов в эту область. На основе четырехточечных измерений магнитного поля спутниковым квартетом Cluster были определены плотности и направления продольных токов по методу курлометра ( $j = \text{rot}(\mathbf{B})$ ) для тех интервалов пересечений ППС из нашей базы данных, во время которых все четыре спутника одновременно находились внутри ППС, и величина отношения  $\text{div}(\mathbf{B})/\text{rot}(\mathbf{B})$ , характеризующая ошибку определения плотности тока, не превышала 0.2. Как и ожидалось, в тех случаях, когда на высокоширотной границе ППС наблюдалась высокая анизотропия электронных функций

распределения, в ППС были зарегистрированы довольно сильные продольные токи, плотность которых достигала, а в некоторых случаях превышала  $10 \text{ нА/м}^2$ . При этом, продольные токи в ППС обладали пространственной структурой, состоящей из тока, текущего к Земле вдоль высокоширотной границы ППС, и тока текущего от Земли на более низких широтах, что характерно для Холловской системы токов. Переносчиками как высокоширотного, так и низкоширотного продольных токов были движущиеся вдоль магнитного поля электроны. Многоспутниковые измерения Cluster позволили для 11 пересечений ППС определить поперечный пространственный размер ( $\Delta Z$ ) продольных токов, наблюдаемых на высокоширотной границе ППС. Оказалось, что этот размер сравним по величине с инерционной длиной ионов,  $c/\omega_{pi}$  (где  $\omega_{pi}$  – плазменная ионная частота,  $c$  – скорость света).

Результаты этих исследований согласуются со сценарием пространственного разделения зарядов и формированием холловской системы токов в области магнитного пересоединения. Длительность наблюдения Холловской системы токов была в большинстве случаев сравнима с длительностью наблюдения ускоренных ионных пучков и составляла 1 - 4 мин. Таким образом, результаты измерений продольных токов в анализируемых пересечениях ППС, подтверждают, что энергичные ионные пучки с широкими по параллельным скоростям функциями распределения, ускорялись вблизи магнитных X-линий, которые в большинстве случаев были расположены на расстояниях от Земли менее  $80 R_E$ .

Статистическое исследование распределения энергий ускоренных ионных пучков, наблюдаемых в ППС во время возмущенных геомагнитных условий, было выполнено так же как в предыдущей главе. Установлено, что в ряде случаев энергичные ионные пучки (с энергиями более 50 кэВ наблюдались в ППС даже на краю утреннего фланга хвоста (**рис.5б**). В полуночном и вечернем секторах хвоста также наблюдались ионные пучки, ускоренные до энергий, существенно превышающих максимальный предел, который может обеспечить механизм неадиабатического ускорения ионов квазистационарным электрическим полем утро-вечер, созданным за счет обтекания хвоста потоком солнечного ветра. Ускорение ионов до столь высоких энергий требует существования в ТС хвоста электрических полей с существенно бóльшей напряженностью ( $\geq 1 \text{ мВ/м}$ ). Генерация таких полей возможна при нестационарных процессах магнитного пересоединения и/или в областях с сильной магнитной турбулентностью.

Исследования, представленные в данной главе, показали, что в возмущенные геомагнитные периоды пучки энергичных ионов, наблюдаемые в ППС хвоста, формируются за счет их ускорения вблизи области магнитного пересоединения, которое

может иметь нестационарный характер. Значительная ширина ионных пучков по энергиям, возможно, объясняется существованием сильного пространственного градиента магнитного поля вблизи X-линии. Стоит отметить, что при приближении X-линии к Земле, сопровождающимся увеличением градиента магнитного поля, должно происходить слияние пространственно-локализованных резонансных источников и образование в окрестности X-линии «общей» области ускорения. Таким образом, это дает возможность переходу между двумя режимами ускорения, описанному в главах 5 и 6.

В **седьмой главе** обсуждается связь между низкочастотными ( $\omega \ll \Omega_p$ , где  $\Omega_p$  – локальная ионная циклотронная частота) электромагнитными колебаниями Альвеновского типа, наблюдаемыми спутниками Cluster вблизи высокоширотной границы ППС, возрастаниями энергии низкоэнергичных ионосферных ионов, движущихся от Земли в высокоширотной доле хвоста, и распространением в ППС вдоль силовых линий магнитного поля высокоскоростного потока плазмы, скорость которого в два и более раз превышала локальную альвеновскую скорость.

Результаты исследований, представленные в предыдущих главах, показали, что продольные электрические токи далеко не всегда наблюдаются в ППС, и таким образом, они не являются единственной причиной возникновения столь низкочастотных колебаний его силовых трубок, как предполагалось до сих пор. Гораздо более частым явлением, наблюдаемым в ППС, являются потоки или пучки высокоскоростных ионов, движущиеся вдоль силовых линий магнитного поля. При рассмотрении механизмов возникновения низкочастотных альвеновских возмущений важно установить, можно ли считать высокоскоростные ионы, движущиеся вдоль высокоширотной границы ППС, пучком или частью плазменного потока. В плазменном потоке ионы и электроны движутся с одинаковыми скоростями и продольный электрический ток должен быть равен нулю, или, по крайней мере, быть значительно меньше, чем продольный ток, создаваемый только ионами. В этом случае крупномасштабные (с длиной волны много больше толщины потока) альвеновские возмущения могут быть вызваны неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца (К-Г), возникающей на границе между высокоскоростной и малоподвижной плазмой.

Еще одно явление, часто наблюдаемое на ионных спектрограммах, измеренных вблизи высокоширотной границы ППС – это транзиентные возрастания энергии холодных ионосферных ионов, движущихся в высокоширотных долях хвоста от Земли в хвост. Анализ 3D функций распределений холодных ионов позволил установить, что наблюдаемые возрастания энергии происходят за счет увеличения компонента их скорости перпендикулярного магнитному полю (до нескольких сотен км/с).

Статистические исследования, представленные в данной главе, были выполнены на основе визуального анализа функций распределений дифференциального потока ионов, наблюдаемых в 170 пересечениях высокоширотной границы ППС хвоста спутниками Cluster на расстояниях от Земли  $\sim 15 - 19 R_E$  (в 2001-2002г.г.). Из них, в 90 случаях на высокоширотной границе ППС наблюдались ускоренные, движущиеся к Земле ионы.

Одной из задач исследований являлась проверка, действительно ли низкочастотные колебания магнитных силовых линий высокоширотной области ППС распространяются преимущественно вдоль магнитного поля. Для этого, анализ вариаций магнитного и электрического полей производился в новой системе координат  $X'Y'Z'$ , в которой ось  $X'$  была направлена вдоль направления невозмущенного магнитного поля в прилегающей к ППС высокоширотной части хвоста. Направления осей новой системы координат определялись индивидуально для каждого пересечения ППС.

Для каждого из 90 интервалов пересечений ППС, когда на его высокоширотной границе наблюдались движущиеся к Земле высокоскоростные ионы, были определены коэффициенты корреляции между компонентами перпендикулярной скорости высокоэнергичной ( $> 5$  кэВ) и низкоэнергичной ( $< 2$  кэВ) ионных компонент, а также коэффициенты корреляции между  $Y'$  и  $Z'$  компонентами электрического и магнитного полей ( $k_{BY'-EZ'}$  и  $k_{BZ'-EY'}$ ). Ввиду отсутствия для большинства интервалов измерений всех трех компонент электрического поля, его величина вычислялась по данным измерений магнитного поля  $\mathbf{B}$  и скорости  $\mathbf{V}$  низкоэнергичных ионов  $O^+$ :  $\mathbf{E} = \mathbf{V} \times \mathbf{B}$ .

Установлено, что в 65 интервалах пересечений ППС, когда наблюдалась высокая (по крайней мере, более 0.7) корреляция между компонентами перпендикулярной скорости высокоэнергичной и низкоэнергичной ионных компонент, одновременно наблюдалась и высокая корреляция между взаимно ортогональными компонентами электрического и магнитного полей. Это свидетельствует о том, что транзиентные возрастания энергии низкоэнергичных ионов, наблюдаемые вблизи высокоширотной границы ППС, действительно были связаны с движениями магнитных силовых трубок ППС в направлении перпендикулярном силовым линиям невозмущенного магнитного поля.

Чтобы выяснить являются ли перпендикулярные движения магнитных силовых трубок ППС, наблюдаемые в этих 65 интервалах, распространяющимися к Земле альвеновскими волнами, для каждого момента измерений в каждом интервале пересечения ППС ( $\sim 2300$  моментов измерения) были рассчитаны величины отношений  $E_{Y'}/B_{Z'}$  или  $E_{Z'}/B_{Y'}$ . Оказалось, что величины этих отношений варьируются в пределах от  $0.5 \cdot V_A$  до  $1.5 \cdot V_A$ , где  $V_A$  - локальная альвеновская скорость, рассчитанная для каждого пересечения ППС по магнитным и плазменным параметрам. Таким образом, имеется

достаточно оснований считать, что низкочастотные поперечные колебания магнитных силовых трубок высокоширотного ППС представляют собой распространяющиеся к Земле альвеновские волны.

Статистические распределения периодов  $T$  и длин волн  $L$  альвеновских колебаний, наблюдаемых вблизи высокоширотной границы ППС, показали, что в большинстве случаев альвеновские колебания имели периоды от 1 до 4 мин, а длины волн составляли: 5 – 20  $R_E$ . Было также установлено, что наиболее длинноволновые колебания (с периодами более 90 сек) имели линейную поляризацию, тогда как более коротковолновые колебания имели эллиптическую поляризацию. Линейная поляризация длинноволновых альвеновских волн может быть обусловлена тем, что при частотах много меньше локальной ионной циклотронной частоты лево- и право-поляризованные ветви электромагнитных волн имеют практически совпадающие законы дисперсии, так что, возникающая в результате их суперпозиции волна, также распространяется с альвеновской скоростью.

Возможным источником низкочастотных альвеновских колебаний магнитных силовых трубок ППС может быть неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (К-Г), которая обычно возникает на границе высокоскоростного плазменного потока с малоподвижной плазмой, если скорость потока  $V$  вдвое превышает локальную альвеновскую скорость  $V_A$ . Теоретический анализ показал, что в случае сжимаемой неоднородной плазмы, имеющей слоистую структуру, подобную интерфейсу: высокоширотная доля хвоста – ППС - ПС, неустойчивость К-Г возбуждается в ограниченном диапазоне длин волн:  $\sim 1 - 15 R_E$ . Согласно результатам, полученным в нашем исследовании, длины волн низкочастотных альвеновских колебаний, наблюдаемых вблизи высокоширотной границы ППС, хорошо согласуются с этой теоретической оценкой.

Далее в работе было проверено, являются ли высокоскоростные ионы, наблюдаемые на высокоширотной границе ППС, частью плазменного потока. В случае плазменного потока продольный ток на высокоширотной границе ППС должен быть значительно меньше продольного тока, создаваемого высокоскоростными ионами. Для каждого пересечения ППС, в которых наблюдались низкочастотные альвеновские колебания, были определены плотности продольных токов, как по методу курлометра:  $J_{\parallel}^{\text{curl}} = (\nabla \times \mathbf{B})_{\parallel}$ , так и по измерениям плотности и скорости высокоскоростных ионов:  $J_{\parallel \text{ion}} = e \cdot n \cdot V_{\parallel}$ . Оказалось, что в большинстве случаев, когда вблизи высокоширотной границы ППС наблюдались низкочастотные альвеновские колебания, вдоль этой границы распространялись высокоскоростные ионы ( $V_{\parallel} > 2V_A$ ), и плотность создаваемого ими продольного тока, существенно превышала плотность полного продольного тока:  $|J_{\parallel}^{\text{curl}}/J_{\parallel}^{\text{ion}}| < 0.5$ . В таких



случаях, высокоскоростные ионы, наблюдаемые на высокоширотной границе ППС, представляли собой часть плазменного потока.

Для всех случаев наблюдений ускоренных ионов в ППС из нашей базы данных (90 пересечений), независимо от того наблюдались ли при этом низкочастотные альвеновские колебания магнитных силовых трубок, было проверено выполнение критерия возбуждения неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (скорость высокоскоростных ионов  $V_{\parallel} \geq 2V_A$ , где  $V_A$  – локальная альвеновская скорость в высокоширотной части ППС). Было установлено, что практически во всех интервалах пересечений ППС, во время которых наблюдалась хорошая ( $>0.7$ ) корреляция между перпендикулярными скоростями высокоэнергичных и низкоэнергичных ионов, скорость высокоэнергичных ионов вдоль силовых линий магнитного поля была сравнима по величине или превышала двойную величину локальной альвеновской скорости. В те интервалы времени, когда в ППС наблюдалась плохая ( $<0.7$ ) корреляция между перпендикулярными скоростями высокоэнергичных и низкоэнергичных ионов, либо скорость высокоэнергичных ионов  $V_{\parallel}$ , была меньше, чем  $2V_A$ , либо плотность низкоэнергичных ионов была слишком низкой ( $< 0.01 \text{ см}^{-3}$ ) для надежного измерения их скорости.

Выполненный анализ показал, что в большинстве анализируемых интервалов, в которых скорость ионов, движущихся вдоль силовых линий магнитного поля в высокоширотной части ППС, была сравнима по величине или превышала двойную величину локальной альвеновской скорости, в ППС наблюдались волновые возмущения магнитных силовых трубок, распространяющиеся к Земле вдоль направления невозмущенного магнитного поля с локальной альвеновской скоростью (65 случаев). Эти возмущения, в свою очередь, обуславливали движения как низкоэнергичной, так и высокоэнергичной компонент плазмы в направлении перпендикулярном направлению магнитного поля, и, как следствие - возрастания энергии низкоэнергичных ионов, наблюдаемые на ионных спектрограммах.

Типичные величины потока электромагнитной энергии,  $S$ , переносимой низкочастотными альвеновскими волнами в ППС хвоста, на расстояниях  $-15 - -19 R_E$ , не превышали  $10^{-5} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$  и лишь в нескольких случаях величина  $S$  достигала  $8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ . Однако, даже такие высокие значения потока электромагнитной энергии составляли не более нескольких процентов от величины потока кинетической энергии высокоскоростных ионов, что позволяет сделать вывод о том, что потери энергии ускоренных ионов на возбуждение низкочастотных колебаний магнитных силовых трубок ППС не должны заметно влиять на характеристики ионных функций распределения в высокоширотном ППС.

Таким образом, в данной главе, на основе анализа 170 пересечений высокоширотной части ППС геомагнитного хвоста спутниками Cluster, экспериментально установлено, что в те интервалы времени, когда вдоль высокоширотной границы ППС распространялись потоки высокоскоростных ионов (скорость которых превышала локальную альвеновскую скорость в 2 и более раз), наблюдались низкочастотные ( $f = 0.004 - 0.02$  Гц) волновые возмущения магнитных силовых трубок высокоширотной части ППС, распространяющиеся к Земле с локальной альвеновской скоростью и имеющие длины волн  $\sim 5 - 20 R_E$ . Электрическое поле этих альвеновских волн вызывает увеличение дрейфовой скорости низкоэнергичных ионов в прилегающей к ППС высокоширотной доле хвоста. Так как в большинстве случаев, плотности полных продольных токов в ППС были существенно меньше плотностей продольных токов, переносимых высокоскоростными ионами, наиболее вероятным механизмом возбуждения этих длинноволновых электромагнитных колебаний являлась неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

В **заключении** сформулированы основные результаты исследований и результаты, выносимые на защиту.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- 1) На основе как статистического анализа, так и детального исследования отдельных случаев наблюдения ионных и электронных распределений, регистрируемых в Пограничном Плазменном Слое (ППС) геомагнитного хвоста спутниками Интербол-1, Cluster и Geotail, установлено, что неадиабатическое ускорение ионов в Токовом Слое (ТС) хвоста является постоянно идущим процессом, но происходит с существенными различиями в геомагнитно - спокойные и активные периоды;
- 2) Экспериментально установлено, что во время спокойных и слабо-возмущенных геомагнитных периодов ( $|AL| < 300$  нТ) неадиабатическое ускорение ионов в дальних областях ТС хвоста может одновременно происходить в нескольких локализованных в пространстве источниках (резонансах). Резонансные источники ускорения расположены на замкнутых силовых линиях магнитного поля, и непосредственно не связаны с областями магнитного пересоединения. В результате, в ППС хвоста наблюдаются локализованные в физическом пространстве и в пространстве скоростей ионные пучки (бимлеты), движущиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Ширина функций распределения ионов по скоростям в таких структурах мала и составляет:  $\Delta V_{\parallel} / V_{\parallel} \sim 0.1$ .
- 3) Установлено, что в спокойные и слабо-возмущенные геомагнитные периоды неадиабатическое ускорение ионов в ТС происходит в квазистационарном режиме,

и длительность наблюдения ускоренных ионов в ППС хвоста может превышать 20 мин. Основную роль в ускорении ионов играет электрическое поле утро-вечер.

- 4) Многоточечные измерения спутниковым квартетом Cluster позволили установить, что во время спокойных или слабо-возмущенных геомагнитных интервалов бимлеты представляют собой пространственные структуры, размер которых в направлении перпендикулярном силовым линиям магнитного поля составляет менее  $1 R_E$ . Продольный размер этих структур соизмерим с длиной магнитной силовой трубки, вдоль которой распространяются ускоренные ионы.
- 5) По данным измерений спутника Geotail в дальних от Земли областях геомагнитного хвоста установлено, что в особо спокойные геомагнитные периоды ( $|AL| \leq 100$  нТ) неадиабатическое ускорение ионов на замкнутых силовых линиях магнитного поля может происходить в источниках удаленных от Земли на расстояния более  $110 R_E$ .
- 6) Установлено, что в результате неадиабатического ускорения ионов в нескольких пространственно разнесённых резонансных источниках, в ионных распределениях по скоростям, регистрируемых в ППС, наблюдаются, по крайней мере, два четко выраженных узких пика, энергии которых, хорошо описываются теоретически предсказанным универсальным скейлингом:  $W_N \sim N^{4/3}$ , где  $N$  – номер соответствующего резонанса.
- 7) Экспериментально доказано, что во время возмущенных геомагнитных периодов ( $|AL| > 300$  нТ) ускорение ионов в ТС происходит непосредственно вблизи магнитной X-линии, то есть вблизи сепаратриссы, разделяющей еще открытые и уже замкнутые силовые линии магнитного поля. В такие интервалы магнитная X-линия может находиться существенно ближе к Земле (на расстояниях  $\leq 80 R_E$ ). В результате в ППС наблюдаются более энергичные ионные пучки, чем в спокойные периоды. Эти пучки также движутся вдоль силовых линий магнитного поля, однако, имеют более широкие по параллельным скоростям функции распределения ( $\Delta V_{\parallel}/V_{\parallel} > 0.3$ ). В ускорении ионных пучков до наблюдаемых энергий существенную роль играют индукционные электрические поля.
- 8) В отличие от известных случаев наблюдения значительных продольных токов при ускорении заряженных частиц вблизи магнитных X-линий, квазистационарное ускорение ионов в пространственно локализованных резонансах, расположенных в ТС на замкнутых силовых линиях магнитного поля не сопровождается протеканием заметных продольных электрических токов ( $j_{\parallel} < 2$  нА/м<sup>2</sup>)..

- 9) Установлено, что вероятность наблюдения потоков или пучков ускоренных ионов в ППС хвоста зависит от среднего часового угла ММП, усредненного как минимум за 1 час до наблюдения ускоренных ионов. Квазистационарный режим неадиабатического ускорения ионов в пространственно-локализованных резонансах реализуется в хвосте, в основном, при направлениях ММП близких к азимутальным. При северном направлении ММП вероятность наблюдения таких ускоренных структур уменьшается, а при сильном южном ММП их нет совсем. Напротив, ускорение энергичных ионных пучков с широкими по параллельным скоростям распределениями дифференциального потока происходит, в основном, при южном направлении ММП и полностью отсутствует при северном ММП.
- 10) Статистически доказана связь низкочастотных ( $f \sim 0.004 - 0.02$  Гц) поперечных колебаний Альвеновского типа магнитных силовых трубок ППС и высокоскоростных ( $V_{\parallel} > 2V_A$ ) потоков ионов, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля высокоширотной границы ППС. Возможной причиной возникновения низкочастотных колебаний магнитных силовых трубок ППС является неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

Основные результаты данной работы изложены в 24 публикациях в отечественной и зарубежной литературе, список которых приводится ниже.

1. Grigorenko E.E., A.O. Fedorov, L.A. Avanov and L.M. Zelenyi. Transient intermittent structures in the plasma sheet-tail lobes interface, Proceedings of the Vth International Conference on Substorms, ESA SP-443. 2000. P.493-498.
2. E.E. Grigorenko, A.O. Fedorov, L.M. Zelenyi. Statistical properties of beamlets in the Earth's magnetotail.// *Adv. Space Res.* 2002. V.30. N.7. P.1809-1816.
3. E.E. Grigorenko, A.O. Fedorov, L.M. Zelenyi. Statistical study of transient plasma structures in magnetotail lobes and plasma sheet boundary layer: Interball-1 observations.// *Annaly Geophysicae.* 2002. V.20. P.329-340.
4. E.E. Grigorenko, A.O. Fedorov, J.A. Sauvaud, L.M. Zelenyi. Beamlet-like non-dispersed PSBL plasma structures and their signatures in auroral region (statistical analysis of Interball-1 and -2 observations). Proceedings of VI International Conference on Substorms. 2002. P.346-351.
5. E.E. Grigorenko, A.O. Fedorov, L.M. Zelenyi, J.-A. Sauvaud. Coupling of transient plasma structures observed in the plasma sheet boundary layer and in the auroral region.// *Adv. Space Res.* 2003. V. 31. N.5. P.1271-1276.
6. Зеленый Л.М., Е.Е. Григоренко, А.О. Федоров. Пространственно-временные ионные структуры в хвосте магнитосферы Земли: бимлеты как результат

- неадиабатического импульсного ускорения плазмы.// *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т.80. №10. С.771-783.
7. Григоренко Е.Е., Л.М. Зеленый, А.О. Федоров, Ж.-А. Саво. Влияние глобальной компоненты межпланетного магнитного поля на свойства импульсных ускорительных процессов в дальних областях хвоста магнитосферы Земли.// *Физика плазмы*. 2005. Т.31. №3. С.1-18.
8. Grigorenko E.E., A.O. Fedorov E.Yu. Budnik, J.-A. Sauvaud, L.M. Zelenyi, H. Reme, M.W. Danlop, E. Penou. The spatial structure of beamlets according to CLUSTER observations.// *Planetary and Space Sci.* 2005. V.53. N.1-3. С. 245-254.
9. Зеленый Л.М. и Григоренко Е.Е. Миссия “Cluster”, восставшая из огня подобно Фениксу.// *Природа*. 2005. №5. С.46-53.
10. Зеленый Л.М. и Григоренко Е.Е. Квартет “Cluster” исследует тайны магнитосферы. // *Природа*. 2005. №6. С.31-40.
11. Grigorenko E.E., L.M.Zelenyi, A.O.Fedorov, J.-A.Sauvaud. Imprints of non-adiabatic ion acceleration in the earth’s magnetotail: Interball observations and statistical analysis.// *Advances in Space Res.* 2006. Т.38. N.1. P.37-46.
12. Zelenyi L.M., E.E. Grigorenko, J.-A. Sauvaud, R. Maggiolo. Multiplet structure of acceleration processes in the distant magnetotail.// *Geophys. Res. Lett.* 2006. Т.33. L06105, doi:10.1029/2005GL024901.
13. Maggiolo R, J.A. Sauvaud, D. Fontaine, A. Teste, E. Grigorenko, A. Balogh, A. Fazakerley, G. Paschmann, D. Delcourt, H. Rème. A Multi-satellite Study of Accelerated Ionospheric Ion Beams Above The Polar Cap.// *Annales Geophysicae*. 2006. Т.24. N.6. P. 1665-1684.
14. E.E. Grigorenko, J.-A. Sauvaud, L.M. Zelenyi. Spatial-Temporal characteristics of ion beamlets in the plasma sheet boundary layer of magnetotail.// *J. Geophys. Res.* 2007. Т.112. A05218. P. doi:10.1029/2006JA011986.
15. Л.М.Зеленый, М.С. Долгоносков, Е.Е. Григоренко, Ж.-А. Саво. Универсальные закономерности неадиабатического ускорения ионов в токовых слоях.// *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т.85, №4. С.225-231.
16. Долгоносков М.С., Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е., Саво Ж.-А. Транзиентные свойства пространственных структур в пограничной области плазменного слоя.// *Космические Исследования*. 2007. Т.46. №6. С. 563-571.
17. S. Sharma, R. Nakamura, A. Runov, E. E. Grigorenko, H. Hasegawa, M. Hoshino, P. Louarn, C. J. Owen, A. Petrukovich, J.-A. Sauvaud, V. S. Semenov, V. A. Sergeev, J. A. Slavin, B. U. Ö. Sonnerup, L. M. Zelenyi, G. Fruit, S. Haaland, H. Malova, and K. Snekvik. Transient and Localized Processes in the Magnetotail: A Review.// *Annales Geophysicae*. 2008. Т.26. P. 955–1006.

18. Grigorenko, E. E., M. Hoshino, M. Hirai, T. Mukai, and L. M. Zelenyi. "Geography" of ion acceleration in the magnetotail: X-line versus current sheet effects.// *J. Geophys. Res.* 2009. T. 114. A03203, doi:10.1029/2008JA013811.
19. Grigorenko E.E., L.M. Zelenyi, M.S. Dolgonosov, J.-A. Sauvaud, Spatial and temporal structures in the vicinity of the Earth's tail magnetic separatrix. Cluster observations.// *Astrophysics and Space Science Proceedings*.Eds. H. Laakso, M. Taylor, C.P.Escoubet. 2009. P.435-453.
20. O. Chugunova, V. Pilipenko, E. Grigorenko, V. Martines, J.-A. Sauvaud. Ground and ionospheric response to a beamlet in the magnetotail, "Physics of Auroral Phenomena". *Proceedings of XXXI Annual Seminar*. 2008. P. 97-100.
21. L.M. Zelenyi, M.Dolgonosov, E.E. Grigorenko, J.-A. Sauvaud. Peculiarities of the non-adiabatic ion acceleration in the current sheet of the Earth magnetotail. in *Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations* edited by M. Hirahara, I. Shinohara, Y. Miyoshi, N. Terada, and T. Mukai, American Institute of Physics. 2009. P.5-14.
22. E. Grogorenko, R. Koleva. Variability of discrete plasma structures in the lobe-plasma sheet interface.// *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.* 2009. V.62. N.11. P.1449-1454.
23. Grigorenko, E. E., Burinskaya, T. M., Shevelev, M., Sauvaud, J.-A., and Zelenyi, L. M. Large-scale fluctuations of PSBL magnetic flux tubes induced by the field-aligned motion of highly accelerated ions.// *Annales. Geophysicae*. 2010. V.28. P.1273-1288.
24. Григоренко Е.Е., Колева Р., Зеленый Л.М. и Согово Ж.-А. Ускоренные ионы, наблюдаемые в пограничном плазменном слое: пучки или потоки?// *Геомагнетизм и Аэронаутика*. 2010. №6.