

На правах рукописи

**САВИН Сергей Петрович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ПЛАЗМЫ В  
КРИТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ НА ГРАНИЦЕ МАГНИТОСФЕРЫ**

Специальность 01.03.03 – Физика Солнца

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва - 2005

Работа выполнена в Институте космических исследований  
Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук К.Г. Иванов,  
Институт земного магнетизма, ионосферы и  
распространения радиоволн Российской академии наук  
(ИЗМИРАН);

- доктор физико-математических наук Н.Г. Клейменова,  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН);

- доктор физико-математических наук П.А. Беспалов,  
Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН).

Ведущая организация: - Научно-исследовательский институт  
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
МГУ им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ).

Защита состоится «21» апреля 2005 г. в 11 часов  
на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 Института  
космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва,  
Профсоюзная улица, 84/32, 2-й подъезд, конференц - зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан « » февраля 2005 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

Т.М. Буринская

Диссертация содержит результаты экспериментальных исследований динамики и процессов переноса на границе магнитосферы Земли, проведенных на основе данных высокоапогейных спутников, сопутствующих наземных измерений и наблюдений солнечного ветра. Приводятся как оригинальные данные отечественных космических экспериментов, так и результаты исследований в рамках кампаний, организованных четырьмя ведущими мировыми космическими агентствами (РКА, NASA, ESA, ISAS). Эти данные сопоставляются с теоретическими моделями нелинейных взаимодействий волна - частица, а также с результатами газодинамического, магнитно-гидродинамического и кинетического моделирования обтекания плазмой магнитосферного препятствия и нелинейной динамики тонких токовых слоев. Обосновывается важность коллективных процессов для описания нестационарного взаимодействия потока бесстолкновительной плазмы со стоячими нелинейными волнами в погранслое.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность проблемы**

Проблематика физики преобразования энергии и переноса массы в турбулентной среде, включая бесстолкновительную плазму, привлекает в последнее время пристальный интерес исследователей. Решение ряда практических задач, таких как изучение космической погоды, удержание лабораторной, в том числе термоядерной, плазмы, повышение надежности радиосвязи и др., невозможно без углубления нашего понимания гелиосферы и ее взаимодействия с магнитосферой Земли.

Изучение турбулентных процессов, включающих образование когерентных структур, является одним из злободневных направлений современной физики и прикладных исследований. Многоточечные комплексные экспериментальные исследования особенно важны для плазмы, которая имеет

большое количество внутренних степеней свободы, что осложняет построение теоретических и численных нелинейных моделей. Как известно, при высокой стабильности общего потока солнечной энергии корпускулярное излучение Солнца - солнечный ветер - значительно варьируется в зависимости от структуры и динамики солнечной короны и ее магнитного поля. Солнечный ветер взаимодействует с магнитным полем Земли, образуя земную магнитосферу. В целом магнитосфера сохраняет форму искаженного диполя с вытянутым в антисолнечном направлении магнитным хвостом, однако локальная форма границы и топология пограничных слоев может критически зависеть от направления межпланетного магнитного поля (ММП) и наклона геомагнитного диполя по отношению к набегающему потоку. На определение структуры перехода от ламинарного потока к стабильной плазме внутри магнитосферной ловушки через турбулентный погранслой и были направлены основные усилия при исследованиях.

Процесс пересоединения на границе магнитосферы, где образуется конфигурация с противоположно направленными магнитными полями, протекает спорадически и далеко не всегда определяется динамическим давлением солнечного ветра и ММП: существует, например, необъясненная периодичность исследуемых в данной работе явлений с частотой 1-10 мГц, определяемая процессами в пограничной области магнитосферы. Хотя нарушение вмороженности плазмы и изменение топологии геомагнитного поля (т.е. пересоединение вмороженных в плазму магнитных силовых линий) очевидны из наличия пограничных слоев и особенно полярного каспа в области бифуркации магнитного поля над полюсами, вопрос о последовательности преобразования энергии потока солнечной плазмы за головной ударной волной (и, соответственно, о механизмах проникновения плазмы внутрь геомагнитной ловушки) остается открытым. Господствовавшая последние 20 лет точка зрения о доминировании процессов аннигиляции энергии сжатого у границы магнитосферы магнитного поля в

ходе пересоединения подвергается в настоящее время обоснованному сомнению - взаимодействие с горловиной каспа и с отраженными от магнитопаузы волнами способно вызвать сначала хаотизацию кинетической энергии потока, а потом, при достижении каскадом нелинейных возмущений масштабов ионного гирорадиуса, - вторичное пересоединение. Решение этой актуальной задачи, которой уделяется значительное место в диссертации, должно помочь также ответить на вопрос: где же основная часть плазмы проникает внутрь магнитосферы - в области полярных каспов или в области ламинарного пересоединения магнитных полей, направленных противоположно на гладкой магнитопаузе.

Околоземная и межпланетная среда являются уникальной природной лабораторией, где доступно непосредственное изучение бесстолкновительной плазмы, в условиях, которые не достижимы на Земле, но характерны для многих астрофизических объектов. На основе локальных измерений, выполняемых на космических аппаратах, возможно изучение физических механизмов ускорения и нагрева частиц, конверсии магнитной энергии, а также самоорганизации сложных систем, включающих плазму и магнитное поле. Знание динамики магнитосферы и механизмов ее взаимодействия с солнечным ветром и ММП позволит проводить прогноз космической погоды и принимать необходимые защитные меры.

Ввиду недостаточного понимания процессов турбулентного нестационарного переноса плазмы через границы природных и лабораторных магнитных ловушек актуальным остается экспериментальное исследование в нескольких пространственных точках на границе земной магнитосферы.

**Цель работы** состоит в экспериментальном изучении (по данным измерений на космических аппаратах) физики нелинейных процессов и переноса плазмы на границе магнитосферы Земли (дневная сторона и ближний геомагнитный хвост). При этом основное внимание уделяется

нестационарным волновым взаимодействиям, и, в частности, исследованию:

1) топологии и энергетики турбулентного погранслоя (ТПС);

2) природы и роли отраженных и нарастающих в потоке волн в хаотизации набегающего потока и в нагреве частиц;

3) зависимости характера процессов в погранслое от параметров солнечного ветра и ММП, а также свойств, им внутренне присущих;

4) диффузии плазмы за счет турбулентности и просачивания сквозь структурированную границу по сравнению с проникновением в результате ламинарного пересоединения магнитных полей.

### **Новизна работы**

В диссертации обобщены результаты, полученные автором в процессе экспериментальных исследований в период с 1980 по 2004 год. Основная их часть отвечает критерию новизны. К ним относятся выводы:

1) о заполнении дневной магнитосферы солнечной плазмой за счет диффузии в ТПС и просачивания плазмы сквозь структурированную границу на основе статистических данных по возмущениям в ТПС;

2) о разной топологии горловины каспа для положительного (к Солнцу) и отрицательного наклонов геомагнитного диполя;

3) об одновременном пересоединении силовых линий на дневной магнитопаузе на глобальных масштабах вдали от каспа и на средних масштабах в горловине каспа в местах антипараллельных полей, а также о микропересоединении по всему ТПС;

4) о доминировании в ТПС каскадов кинетических альвеновских волн с двумя характерными наклонами в спектре мощности;

5) об ускорении магнитозвуковых струй в магнитослое механизмом типа Ферми за счет инерционного дрейфа

налетающих частиц в электрическом поле волновых пакетов на границе замедленного потока в погранслое;

6) о возможности деформации границы ускоренными магнитозвуковыми струями и последующего вынужденного пересоединения деформированных магнитных полей;

7) о термализации потока в ТПС не только в горловине каспа, но и вниз по потоку за ним.

Также впервые были обнаружены и изучены:

1) динамический нестационарный режим обтекания ламинарным потоком погранслоя с большим тепловым давлением ионов, в котором в магнитослое образуются ускоренные до магнитозвуковой скорости струи и замедленные альвеновские течения;

2) свойства перемежаемости флуктуаций в ТПС;

3) возмущения в ТПС на масштабах электронного гирорадиуса и инерционной длины.

### **Практическая и научная ценность работы**

Разработанный подход к взаимодействию магнитослоя и магнитосферы как к сложной многомасштабной нелинейной системе позволяет направить будущие исследования в новое русло, связанное с созданием нелинейных моделей турбулентного погранслоя и всего дневного магнитослоя для адекватного предсказания их поведения. Для предсказаний важно учесть динамическую реакцию течения в магнитослое на такие возмущения, как разрывы в солнечном ветре и взаимодействие с отраженными волнами на внешней границе магнитослоя. Это можно сделать, например, введением соответствующих модельных цепей задержки в будущих интегрированных количественных моделях космической погоды.

Большое динамическое давление в магнитозвуковых струях способно привести к изменению локальной формы магнитного препятствия, а также к вынужденному пересоединению на деформированной границе. Это свидетельствует о необходимости переосмысления случаев регистрации ускоренных плазменных струй у границы

препятствия: при плотности кинетической энергии струи, превышающей плотность магнитной энергии в месте потенциального пересоединения силовых линий, пересоединение, по всей видимости, должно рассматриваться как вынужденное, т.е. энергия направленного движения потока не накапливается в сжатом магнитном поле, а концентрируется в струях с помощью предложенного в диссертации механизма.

В астрофизических объектах, наблюдаемых только дистанционными методами, возможна диагностика процесса обтекания по вторичным излучениям в ускоренных магнитозвуковых струях, особенно в случае достижения частицами релятивистских скоростей.

Для описания состояния системы поток - препятствие может оказаться полезным формализм, описывающий явление механизмом мазерного типа: переход такой системы в устойчивое состояние с альвеновским течением, обладающим минимумом полной энергии, после излучения когерентного магнитозвукового пакета - магнитозвуковой струи.

В будущем возможно создание генераторов мощных ускоренных струй плазмы, основанных на обнаруженном эффекте. Такие пункты, как исследование переноса в турбулентной среде и отождествление турбулентного пограничного слоя с эффективным препятствием, представляются полезными для изучения турбулентности не только в космической плазме, но и в других средах.

К практическим результатам можно отнести полученные в ходе работы автором (в соавторстве с С. И. Климовым, В.Е. Корепановым и др. коллегами) авторские свидетельства на анализаторы спектра (Климов и др., 1981, Корепанов и др., 1991, 1991а), а также использование опыта создания высокочувствительных волновых приборов для контроля и совершенствования служебных и измерительных спутниковых систем (Безруких и др., 2003).

**Достоверность результатов**, прежде всего, подтверждается их воспроизводимостью по данным разных

экспериментов на таких спутниках, как «Прогноз-8,10», «Интербол-1», Polar, Geotail и Cluster. Надежному выделению закономерностей способствует также использование современных методов анализа данных, таких как вэйвлетный спектральный и биспектральный анализ и исследование статистических свойств турбулентных полей, а также сопоставление данных с самыми современными численными моделями обтекания магнитосферы и кинетических токовых слоев.

### **Апробация работы**

Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены более чем в 100 докладах на различных научных конференциях и семинарах внутри страны и за рубежом:

- на III и IV Международных симпозиумах по физике ионосферы и магнитосферы Земли и солнечного ветра, Цахкадзор, 1981, и ИКИ АН СССР, 1983;

- на VI и VII семинарах по ОНЧ- излучениям, Звенигород, 1983 и Якутск, 1985;

- на ассамблеях COSPAR (26-й, Тулуза, Франция, 1986; 31-й, 1996; 32-й в Нагое, Япония, 1998; 33-й в Варшаве, Польша, 2000; 34-й в Хьюстоне, США, 2002; 35-й в Париже, Франция, 2004);

- на ассамблеях EGS (23-й в Ницце, Франция, 1998; 24-й в Гааге, Нидерланды, 1999; с 25-й по 28-ю в Ницце, Франция, 2000-2003); на 1-й ассамблее EGU в Ницце, Франция, 2004;

- на конференциях IAGA (Прага, Чехословакия, 1985; Ханой, Вьетнам, 2001; Саппоро, Япония, 2003);

- на Международном семинаре Space Plasma Physics Investigation by Cluster and Regatta (Грац, Австрия, 1990);

- на конференциях проекта «Интербол» (в Тулузе, Франция, 1997; в Хельсинки, Финляндия, 1998; в Кошице, Словакия, 1998; в Звенигороде, Россия, 1999; в Киеве, Украина, 2000; в Варшаве, Польша, 2001); в Софии (Болгария, 2002), в Праге (Чехия, 2003);

- на международных конференциях по суббурям (3-й в Версале, Франция, 1996, и 4-й, Япония, 1998);
  - на XXIV Генеральной ассамблее URSI (Киото, Япония, 1993);
  - на Чепменовской конференции по физике магнитопаузы (Сан-Диего, США, 1994);
  - на 2-й Альвеновской конференции (в Стокгольме, Швеция, 1995);
  - на ежегодных конференциях Американского геофизического союза 1998, 2000, 2001 года;
  - на конференции S-RAMP (в Саппоро, Япония, 2000);
- а также на некоторых других и на семинарах ИКИ РАН, UCLA, U. Iowa, U. Boston, SSL/ Brekeley, GDCF, U. Mass./Lowell, U. Michigan (США), IWF (Австрия), MPE (Германия), IRFU (Швеция), ISAS (Япония), IFSI и U. Calabria (Италия), LPCE (Франция), Rutherford Lab. (Англия), CBK (Польша).

Результаты опубликованы более чем в 50 отрецензированных научных статьях.

#### **Личный вклад автора**

Космические проекты проводятся большими, в основном международными, коллективами. Отдавая должное вкладу большого количества специалистов в подготовку и ведение проектов, необходимо отметить, что автор принимал непосредственное участие в разработке методики и аппаратуры, ее настройке и испытаниях, проведении и обработке данных волновых экспериментов на спутниках «Прогноз-8» (ведущий по волновому комплексу), «Прогноз-10», «Вега», «Фобос», «Интербол-1» (соруководитель экспериментов по электромагнитному полю и флуктуациям тока ОПЕРА и ФГМ-И), «Магион-4», а также в подготовке и обработке данных электрического эксперимента на Cluster. Координация измерений и отбор характерных событий в 1996-2000 гг. проводились автором в рамках Кампании 2 по изучению процессов на тонких границах магнитосферы Межагентской рабочей группы в качестве представителя РКА. В 2000-2002 гг.

окончательный отбор данных с шести основных спутников, МГД-моделирование и интерпретация данных координировались автором в рамках международной рабочей группы по многоточечным измерениям на границе магнитосферы под эгидой International Space Science Institution, Bern.

Практически во всех исследованиях, представленных в диссертации, ему принадлежат постановка научной задачи и метода исследований, проведение обработки данных, анализ результатов, их обобщение и интерпретация.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы, содержит 378 страниц (включая 202 рисунка, пять таблиц и библиографию из 484 наименований).

Во **введении** сформулированы проблематика, актуальность и цели исследований взаимодействия плазмы с магнитосферой, дана общая характеристика работы.

В **первой главе** приведен обзор современного состояния знаний о процессах взаимодействия плазмы с дневной магнитопаузой и переноса плазмы внутрь магнитосферы Земли и их зависимости от межпланетного магнитного поля. Описаны источники экспериментальных данных, обсуждены особенности методов измерений и ряд современных методов анализа наблюдений, использованных в диссертации. Дана также классификация изучаемых областей на границе магнитосферы.

**Во второй главе** рассмотрены общие свойства возмущений у высокоширотной магнитопаузы и в турбулентном погранслое (ТПС) на примерах данных КА «Прогноз-8, 10», «Фобос-2», «Вега-1,2», «Интербол-1» и Cluster-2.

Одной из критических областей магнитосферы является внешняя граница каспа, где переход от регулярно текущего магнитослоя к магнитосфере происходит через несколько сложных погранслоев. Они показаны на вставке в правой части рис. 1: внешний и внутренний каспы, внешняя горловина каспа

(ОТ) и турбулентный пограничный слой (ТПС - TBL). ОТ находится вне магнитопаузы (MP, жирная белая линия), внешний касп - внутри магнитопаузы, и внутренний касп – более глубоко в магнитосфере.

На рис. 1 мы приводим пример входа «Интербола-1» 16-17 марта 1998 г. из солнечного ветра (SW) в магнитосферу, включая: ударную волну (BS), магнитослой (MSH) и MP на входе и на выходе. На верхней панели – модуль магнитного поля,  $|B|$ , на нижней - размах амплитуды магнитных флуктуаций в диапазоне 0,05-1 Гц. На ударной волне флуктуации имеют узкий максимум, а снаружи MP видна широкая зона более интенсивных волн - ТПС, содержащий провалы  $|B|$  ниже уровня SW - "диамагнитные полости" (ДП).

Одной из главных особенностей данных с «Прогноза-8, 10» и с «Интербола-1», наряду с низкочастотными волнами, являются интенсивные электрические флуктуации около ионно-циклотронной частоты, заполняющие пробел в предыдущих данных (рис. 2а) и обеспечивающие существенную диффузию плазмы. Всплески волн могут иметь на порядок большую амплитуду, чем на рис. 2а, как и волны в нижнегибридном диапазоне (НГВ, 1-30 Гц). НГВ коррелируют с ускоренными вдоль силовых линий электронами и с волнами на частотах между нижнегибридной и электронно-циклотронной (ВПЧ).

Сравнение характера торможения ионов на MP и в токовых слоях в ТПС, электронных токов, градиентов магнитного поля и всплесков электрических полей амплитудой до 30 мВ/м позволили еще в 1983 г. сделать вывод о возможности существования поверхностного заряда на MP, создающего скачок потенциала в несколько сот вольт (см. "барьер ~ 0,6 кВ" на вставке в правом верхнем углу рис. 2а); причем, как ранние оценки его масштаба, так и последующие данные с «Интербола-1» и его субспутника «Магиона-4» дают величину, сравнимую с гирорадиусом ионов из MSH, т.е. мелкомасштабные перпендикулярные электрические поля способны останавливать

набегающие ионы или ускорять их, что является специфичным случаем взаимодействия волна - частица.

Сравнимая плотность плазмы в магнитослое и каспе позволяет регистрируемым электронным токам компенсировать ионный заряд и поддерживать поверхностные заряды. Оценка масштабов электронных токов показывает наличие структур порядка гирорадиуса электронов ( $\sim 3$  км, см. правую верхнюю вставку на рис. 2а), которые коррелируют с наиболее мощными НГВ и ВПЧ.

По данным «Интербола-1» в 1995-2000 гг. (651 ТПС-событие примерно на 400 пересечениях МР) ТПС присутствует  $\sim$  в 80% случаев высокоширотных пересечений МР (со средней амплитудой  $\sim 20$  нТ). Самые интенсивные события могут быть аппроксимированы эффективным диском с диаметром  $6 R_E$  (радиусов Земли) над дневными каспами со средним значением максимумов  $\sim 22$  нТ и характерным порогом  $> 10$  нТ. Большинство низкоширотных событий с порогом флуктуаций 7 нТ наблюдаются в ближнем хвосте или соответствуют возмущениям в SW. Летний ТПС (наклон магнитного диполя в сторону Солнца) и МР имеют прогиб над каспом, глубиной  $\sim 1-3 R_E$ .

Зависимость положения ТПС от динамического давления SW хорошо описывается нормировкой радиус-вектора на отношение динамических давлений в степени  $-1/6$ . Очевидных зависимостей положения ТПС от  $B_z$ - компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) не обнаружено.

Диаманитные полости распределены подобно ТПС, при балансе теплового и магнитного давлений, средний нагрев плазмы в ДП - на 216-430 эВ - хорошо согласуется с ростом в 1,5-3 раза температуры MSH- ионов в ТПС (см. Главы 2-5 и 7). Среднее магнитное поле внутри ДП примерно в 8,3 раза слабее, чем снаружи. Большинство событий с дисперсией  $> (15 \text{ нТ})^2$  и нагревом  $> 3100 \text{ эВ/см}^3$  наблюдается при  $|Z| > 4 R_E$ , с

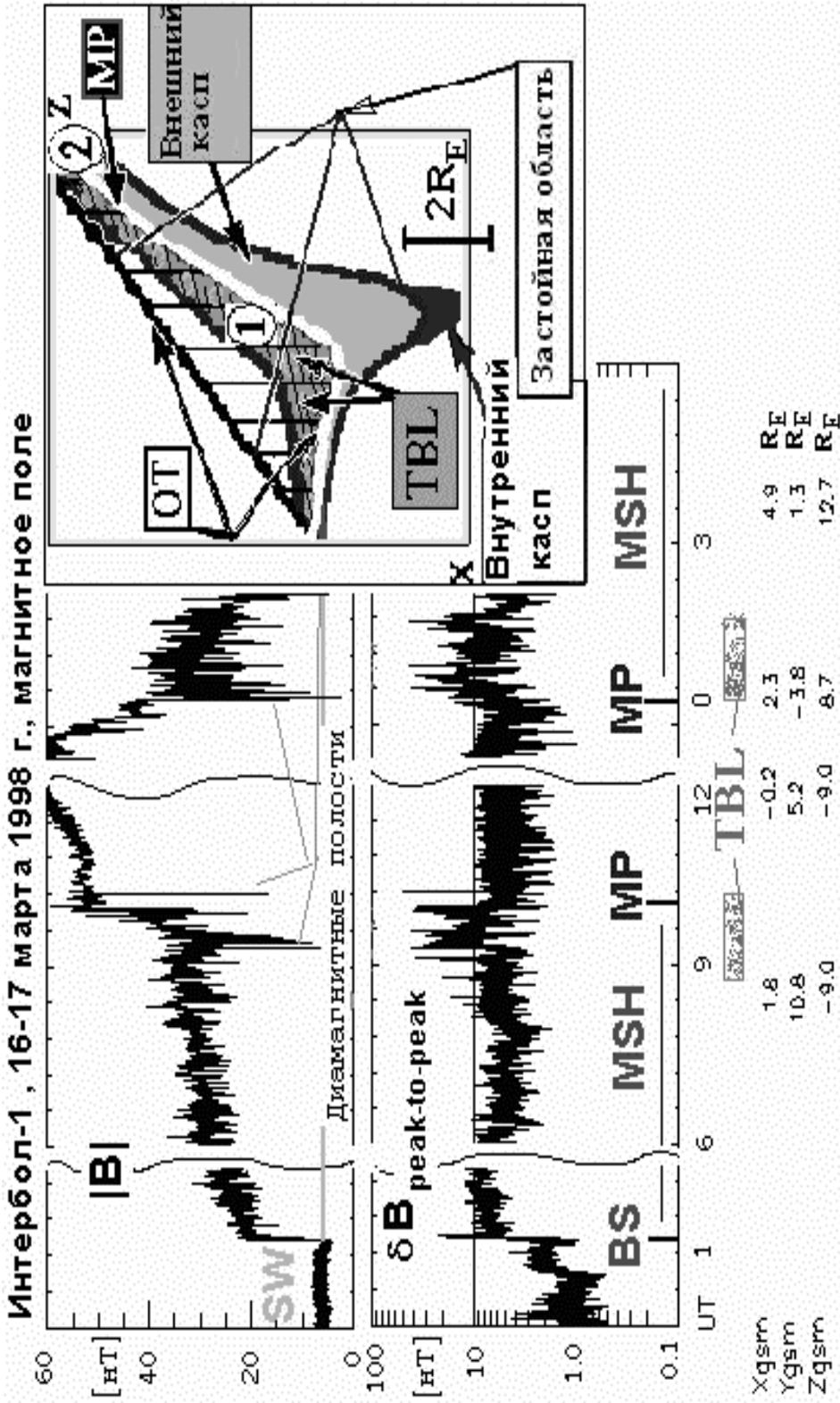
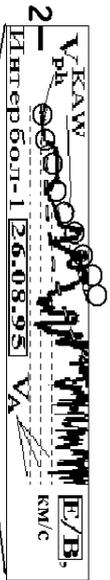


Рис. 1. Пересечения магнитосферы КА «Интербол-1» 16-17 марта 1998 г. от головной ударной волны (BS) до магнитопаузы (MP) и обратно (см. текст). Верхняя левая панель: модуль магнитного поля,  $|B|$ ; нижняя левая панель: размах флуктуаций магнитного поля,  $\delta B$ . Вставка справа вверху: погранслои на границе магнитосферы в районе полярного каспа (см. текст).



22

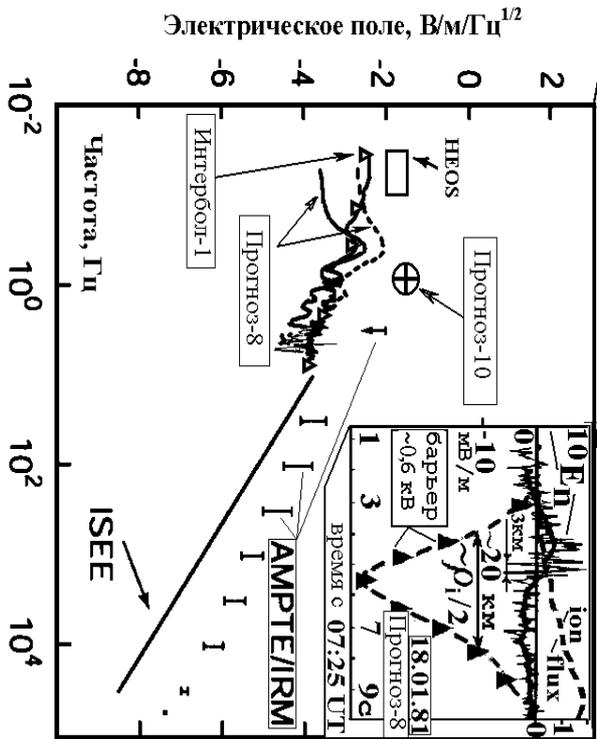
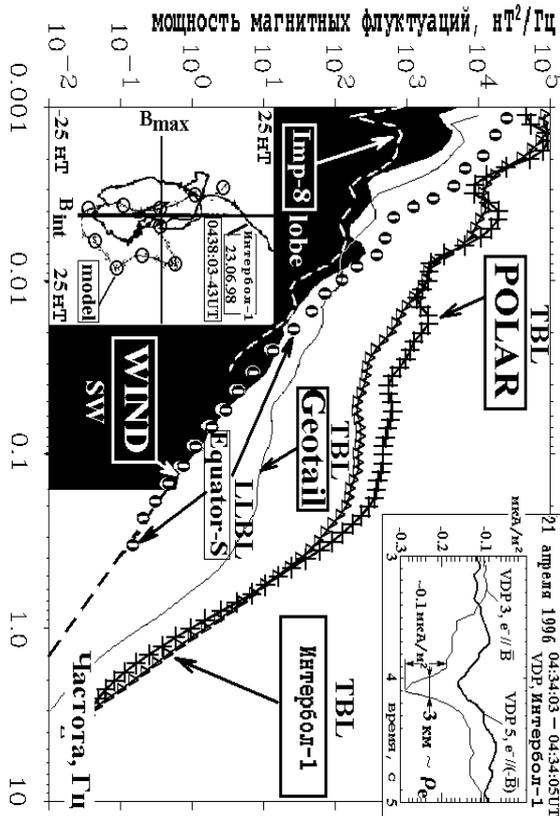


Рис. 2 а. Спектры электрического поля вблизи магнитоспаузы Земли с разных КА (в центре, см. текст). Вставка слева вверху: оглошение амплитуд электрических и магнитных флуктуаций ( $E/B$ ) 28.08.1995, «Интербол-1»; кружки и пунктир – оглошение для кинематических альвеновских волн ( $V_{ph}^{kin}$ ). Вставка справа вверху: выход из магнитосферы «Протнова-8» 18.01.1981; электрическое поле ( $E_n$ , уредненное дано жирной линией), поток ионов (ion flux, пунктир) и потенциалный барьер ( $\sim 0,6$  кВ, треугольнички);  $\rho_4$  – гирорадиус ионов.

23 апреля 1998 г. 22:30-23:00 UT



26

Рис. 2 б. 23.04.1998, 22:30-23:00 UT. Спектры мощности магнитного поля с разных КА (в центре, см. текст). Вставка слева внизу: годограф магнитного поля 23.06.1998 («Интербол-1», вблизи магнитоспаузы) и в численной кинематической модели (кружки, модел) при пересечении трехмерного вихря виртуальным спутником. Вставка справа вверху: токовый слой размером  $\sim \rho_e$  (гирорадиус электронов) в ТПС по данным цилиндров Фарадея (VDF) на «Интерболе-1» 21.04.1996.

максимумом над каспом. Интенсивный нагрев в высокоширотном хвосте виден до  $X = -6 R_E$ . Несмотря на наличие ДП, исследование по всему массиву данных «Интербола-1» показывает строгое доминирование поперечных возмущений у МР, что для высоких широт статистически установлено впервые.

Для выяснения природы волн в ТПС оценена их фазовая скорость по отношению электрических и магнитных амплитуд,  $E/B$ , показанному в верхнем левом углу рис. 2а, где кружками и пунктиром даны ожидаемые зависимости  $E/B$  от наблюдаемой частоты ( $\omega$ ) при пересечении спутником стоячих кинетических альвеновских волн (КАВ) со скоростью движения МР и потока в MSH, соответственно (см. также спектр с треугольниками в центре рис. 2а):

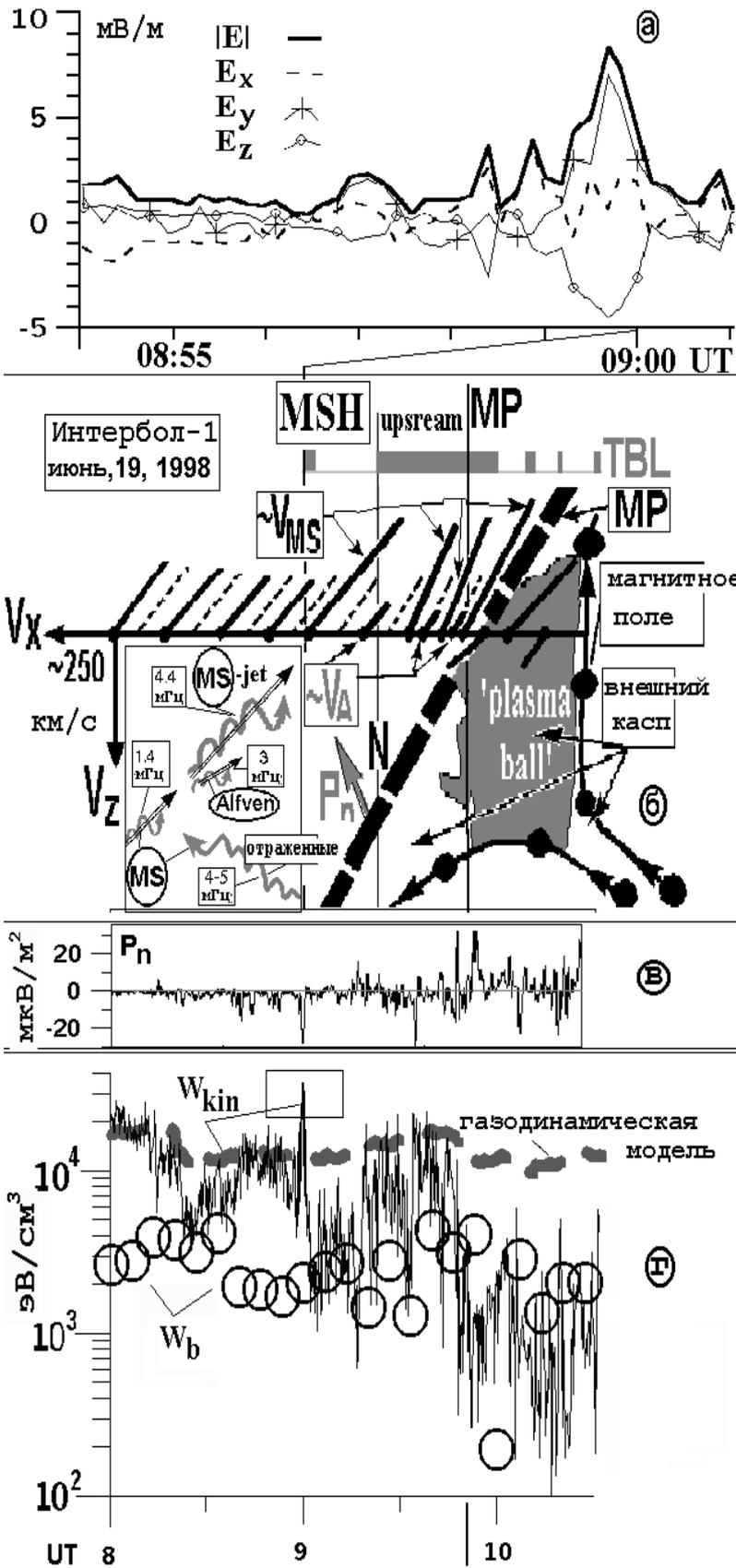
$$(E/B)^2 \sim V_A^2 (1 + (\rho_i \omega/V)^2) .$$

На низких частотах фазовая скорость близка к альвеновской ( $V_A$ , разброс ее дан горизонтальными пунктирами), далее она повышается из-за поправки на конечный гирорадиус ионов ( $\rho_i$ ). Явная смена тенденции у инноциклотронного максимума электрического поля впервые отождествлена со сменой характерной скорости возмущений по данным двух спутников, остальные черты КАВ соответствуют примерам измерений на КА Polar и Cluster (см. также Главу 4).

В третьей главе рассмотрена топология перехода магнитослой - касп и ее влияние на проникновение солнечной плазмы в магнитосферу.

Данные «Интербола-1» на высоких широтах при наклоне оси магнитного диполя к Солнцу показывают регулярное наблюдение застойной плазмы в горловине каспа над вогнутой МР, что соответствует предсказаниям [Haerendel // J. Atmosph. Terr. Phys. 1978. V. 40. P. 343] о взаимодействии потока плазмы в MSH с открытой горловиной каспа с образованием ТПС (см. вставку в правой части рис. 1).

19 июня 1998 г. КА Polar несколько часов находился над северным каспом (угол наклона диполя  $+20^\circ$ ) в застойной зоне



**Рис. 3.**  
 19.06.1998,  
 «Интербол-1».  
 а) Электрическое поле в системе потока около ускоренной магнитозвуковой струи (см. текст).  
 б) Вектора скорости плазмы вдоль орбиты спутника Интербол-1 в плоскости XZ GSE (пунктир - модельные значения),  $N$  - нормаль к МР (МР показана толстой разрывной линией), магнитное поле - кривые с кружками; серые волнистые стрелки показывают направления распространения характерных волн.  
 в) Проекция вектора Пойнтинга на нормаль к МР ( $P_n$ ).  
 г) Плотности энергии  $W_{kin}$  (пунктир - модель, см. текст) и  $W_b$  (кружки) в  $[\text{эВ}/\text{см}^3]$ , первая ускоренная струя выделена прямоугольником

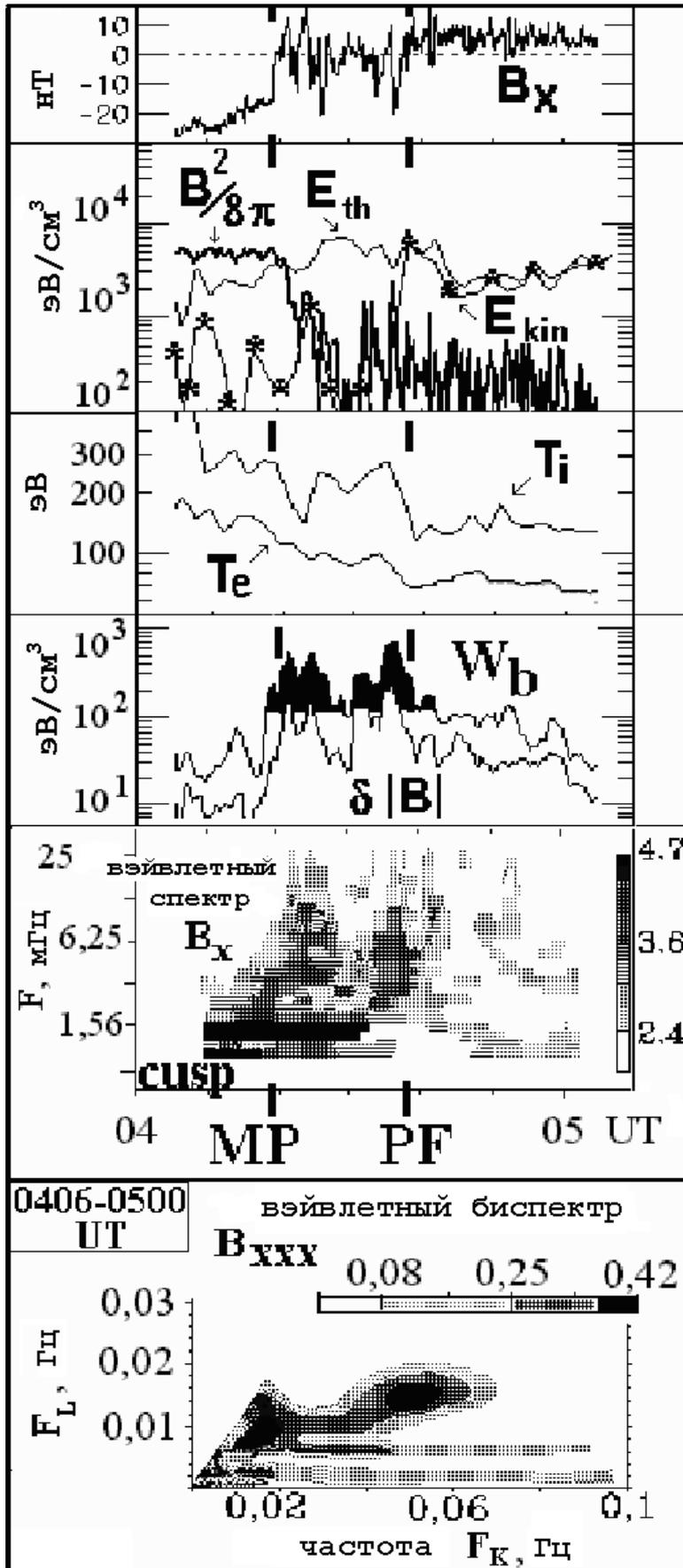


Рис. 4.

02.06.1998.

«Интербол-1».

Выход из каспа в MSH (см.

подробности в

тексте). Сверху

вниз: (1)  $B_x$ -

компонента

магнитного поля;

(2) плотности

энергии ионов ( $E_{th}$ - тепловая,  $E_{kin}$  -

кинетическая) и

магнитного поля

 $(B^2/8\pi)$ ;

(3) температура

ионов ( $T_i$ ) иэлектронов ( $T_e$ );

(4) мощность

магнитных

флуктуаций;

(5) вейвлетный

спектр  $B_x$ ;(6) вейвлетный  
би-спектр  $B_x$

вне МР (см. вставку справа на рис. 1), «Интербол-1» регистрировал подобную плазму в диамагнитной полости внутри МР. Это видно на рис. 3г: кинетическая энергия ионов ( $W_{kin}$ ) отличается от газодинамической модели после 09:55 UT. Резкое падение магнитного давления ( $W_b$ , кружки) под МР соответствует диамагнитной полости (в несколько  $R_E$ ), названной "плазменным облаком" (ПО - "plasma ball" на рис. 3 б); плавная МР закрывает здесь горловину каспа.

Разная топология перехода магнитослой - касп определяется углом наклона диполя. Энергичные частицы подтверждают, что ПО соответствуют закрытой топологии (в 63% для углов между  $-15$  и  $-25^0$ ); не обнаружено зависимости ПО от угла поворота магнитного поля на МР; для  $> 65\%$  случаев из числа 54 ПО - ММП  $B_z > 0$ ; высокое  $\beta_i$  ( $\sim 2-15$ ) и прямое взаимодействие плазмы ПО с набегающими потоками MSH представляют собой отличие ПО от остального внешнего каспа. Исследуются характеристики возмущений при взаимодействии плазмы MSH и ПО в условиях малости магнитных полей, когда только электрические поля на границах и нелинейные волны вызывают хаотизацию и отклонение сверхальвеновского дозвукового потока вокруг МР. Это взаимодействие типа плазма - плазма отличается от взаимодействия плазма - магнитный барьер на низких широтах появлением замедленных до альвеновской ( $A$ ) и ускоренных до магнитозвуковой ( $MS$ ) скорости струй (обозначено  $\sim V_{MS}$  на рис. 3 б) задолго до МР; причем замедленные течения релаксируют за 10-20 мин к номинальным значениям. На рис. 3г  $A$ -течения видны из  $W_{kin} \sim W_b$  (выделены также  $\sim V_A$  на рис. 3 б), первое - как результат реакции на понижение динамического давления SW (ср. толстый пунктир), второе - взаимодействия с отраженными волнами, которые впервые надежно выделены по положительным (от МР) импульсам вектора Пойнтинга ( $P_n$  на рис. 3в). Трехволновое взаимодействие (см. Главы 4 и 7) флуктуаций потока с отраженными волнами усиливает флуктуации за счет кинетической энергии ионов, что приводит к

импульсному сбросу энергии вниз по потоку (отрицательные  $P_n$ ). Хаотизация направленной энергии достигает 30-40%, а тепловой ~ 10-15%.

В первой MS-струе в 09 UT (рис. 3г)  $W_{kin}$  в 2,5 раза больше равновесного значения, альвеновское число Маха  $> 3$ ,  $P_n < 0$ , что не согласуется с ускорением за счет пересоединения магнитных силовых линий (Глава 7). Динамическое давление MS-струй превышает магнитное давление у МП (рис. 3г), что может приводить к изменению формы МР и к вынужденному пересоединению. Данные Polar в другом полушарии демонстрируют черты вынужденного пересоединения, не связанного с возмущениями в SW; энергетические параметры струй и спектральные свойства, связанные с их повторяемостью (Глава 4), соответствуют измерениям «Интербола-1» в ТПС у МР.

**Четвертая глава** посвящена более подробному исследованию когерентных процессов вблизи околоземной магнитопаузы на разных масштабах.

Рассмотрены в деталях примеры пересечения высокоширотных погранслоев с упором на когерентные структуры, спектральный и биспектральный анализ, выявлено разделение по масштабам на: (i) макромасштабы (порядка  $1 R_E$  и более) с размерами порядка диаметра внешней горловины каспа; (ii) средние (от сотен до тысяч километров), включающие локальные градиенты на границе каспа и МГД- волны; (iii) микромасштабы, от гирорадиуса MSH- ионов до электронной инерционной длины.

На макроуровне рассмотрен пример вихря скорости в ТПС со средней скоростью (20,-45) км/с в плоскости максимальных вариаций и радиусом ~ 50 км/с, что согласуется с представлениями о ТПС Haerendel (1978). Пример среднемасштабного магнитного вихря 23 июня 1998 г. показан на левой нижней вставке рис. 2 б: в плоскости минимальных-средних вариаций после основного поворота поля следует вихревая дорожка (петля), которую мы сравниваем в Главе 7 с

модельным трехмерным вихрем (кружки). Другие структуры, с масштабом порядка гирорадиуса ионов, включают ДП и магнитные барьеры с захваченными внутри ионами и с давлением, сравнимым с давлением плазмы в MSH.

Мелкомасштабная структура размером порядка электронной инерционной длины в ТПС 21 апреля 1996 г., приведена на верхней правой вставке рис. 2 б, впервые ее масштаб оценен двумя методами (по задержке спутник - субспутник и из уравнения Максвелла, связывающего возмущения тока и магнитного поля) с точностью до множителя "2". До сих пор подобные оценки делаются только по порядку величины: или из уравнений, или с применением среднемасштабной скорости к микромасштабам (включая Главу 2 и данные КА Polar и Cluster). Уникальность - в измерении электронных токов цилиндрами Фарадея с опросом 16 Гц, которые на «Интерболе-1» почти всегда работали в режиме измерения ионов. Регистрация таких масштабов показывает нарушение в замороженности электронов, что совместимо с наличием в ТПС микропересоединения флуктуирующих полей.

Сравнение данных шести спутников в каспе с МГД-моделированием обтекания магнитосферы 29 мая 1996 г. демонстрирует одновременное действие процессов на всех трех масштабах. Суммарно приведенные примеры и статистические данные свидетельствуют о вторичном пересоединении флуктуирующих магнитных полей как об одном из основных механизмов заполнения каспа. Это пересоединение представляет собой необходимое мелкомасштабное звено в каскадах преобразования энергии и переноса плазмы в ТПС (см. Главу 7), что соответствует подходу Сыровацкого (ЖЭТФ. 1971. Т. 33. С. 933-940) к пересоединению как нестационарному процессу преобразования магнитной энергии в динамических тонких токовых слоях. Продемонстрирована также возможность одновременного пересоединения антипараллельных полей в горловине каспа на средних и глобальных масштабах (как правило, вдали от каспа). Глобальное пересоединение влияет

на положение горловины каспа и ТПС и является одним из источников флуктуаций в нем, как и среднемасштабное пересоединение.

В последней части главы исследуется влияние солнечного ветра и MSH на процессы в ТПС и выделяются спектральные свойства, присущие ТПС. На рис. 2 б даны спектры мощности  $B_y$  с шести КА в возмущенный период 24.04.1998 в 22:30-23:00 UT («Интербол-1», Polar и Geotail были в ТПС, Wind - в SW, Imp-8 - в северной лобной доле, Equator-S - в низкоширотном погранслое, LLBL): на Polar и «Интербол-1» (дневной ТПС) спектры плоские на 30- 100 мГц, на Geotail (GSM  $Z = 10 R_E$ ,  $X = -17 R_E$ ) наклон близок к -1 (что характерно для дневного ТПС в спокойных условиях); на высоких частотах в ТПС наклон  $\sim -3$ , что отличается от остальных спектров, включая SW. На 4 мГц в ТПС виден характерный максимум, на 1-2 мГц спектральные максимумы определяются SW, в ТПС и LLBL наблюдается усиление его амплитуды. В спокойных условиях волны в ТПС характеризуются степенными спектрами мощности магнитного поля с отрицательными наклонами  $\sim -1$  (3-70 мГц) и  $\sim -2.2$  (0,1-4 Гц). Длина корреляции флуктуаций в ТПС вдоль MP - меньше  $5 R_E$ .

В **пятой главе** обсуждаются возмущения и проникновение плазмы на границе ближнего хвоста магнитосферы.

Сопоставляется МГД- моделирование и данные КА «Интербол-1», «Магион-4», Wind, Polar, Geotail и DMSP F13 12.01.1997 при доминирующем ММП  $B_y > 0$ , когда область минимума магнитного поля начинается над северным каспом и тянется в хвост магнитосферы через вечерний сектор, достигая экватора примерно при  $X = -30 R_E$ ; проходит далее через нейтральный слой на утренний фланг магнитосферы и возвращается к южному каспу. В проекции на плоскость YZ область минимума магнитного поля имеет форму буквы "S" (т.н. «Sash»).

КА «Интербол-1» и «Магион-4» скользили вдоль MP от каспа в хвост, наблюдая ускоренные в хвост ионы, что

соответствует предсказанию модели о расположении X -линии пересоединения в «Sash». КА Polar около 19 MLT регистрировал  $\text{He}^{++}$  ионы из MSH, когда модель предсказывала прохождение соответствующей силовой линии через минимум  $|B|$  в «Sash» у MP; DMSP F13 измерял частицы из MSH в северной ионосфере в 17:00 MLT, что согласуется с проникновением плазмы через «Sash». Geotail в хвосте на  $X = -30 R_E$  (почти в 00 MLT) также наблюдал частицы из MSH, что непонятно из моделирования. Аналогично Главе 4, наблюдения говорят об одновременных макро- и микропроцессах: о наличии микропересоединений свидетельствуют всплески потоков плазмы к Солнцу по данным КА «Магион-4», DMSP F13 и Geotail. Регистрация более 1/3 ТПС-событий (Глава 2), вопреки предсказаниям модели по  $B_y$ , также говорит о независимой роли микропроцессов.

Измерения 27.01.1997 на КА «Интербол-1,2», «Магион-4», Wind, Polar и Geotail тоже поддерживают предсказания «Sash» и выделяют роль микропроцессов при взаимодействии хвоста с межпланетными возмущениями. Данные КА «Интербол-1» и «Магион-4» позволяют оценить глубину ТПС в хвосте в  $2 R_E$ . Сравнение отношения кинетической и тепловой энергии ионов снаружи MP на «Интерболе-1» и Geotail (за вычетом разгона плазмы вдоль хвоста согласно газодинамической модели обтекания) показывает уменьшение его за каспом в 4 раза относительно экваториальной плоскости, что соответствует диссипации кинетической энергии в высокоширотном ТПС вниз по потоку за каспом. Это - важный результат многоточечных измерений, указывающий на необходимость учета взаимодействия SW с горловиной каспа в будущих моделях обтекания.

В завершающей части Главы 5 обсуждаются экспериментальные аспекты проникновения плазмы в хвост магнитосферы через MP у нейтрального слоя, где, как и на границе каспа, плазма взаимодействует с плазмой, а также проникновение плазмы на средних широтах при возмущенном SW. На средних широтах при взаимодействии хвоста с

"магнитным облаком" 18 октября 1995 г., как и в случае 17 апреля 1996 г. при прохождении двух последовательных вращательных разрывов в SW, появляются возмущения в месте антипараллельных полей, не отличимые от ТПС. Причем, вторичное пересоединение также вносит вклад в перенос массы (см. Главы 4 и 7).

Из 54 случаев по данным КА «Интербол-1», Geotail и «Магион-4» глубокого (до  $10 R_E$ ) проникновения SW- плазмы в плазменный слой, в 37 % случаев MSH- ионы могут инициировать суббури за счет предложенного механизма самофокусировки возмущений при их распространении к центру хвоста из-за увеличения альвеновской скорости на краях плазменного слоя, самофокусировка обеспечивает сжатие в вертикальном направлении. Аналогично объясняется захват MSH- плазмы внутрь хвоста за счет большей скорости волны разрежения в лобных долях при расширении магнитосферы, включая взрывные фазы суббури. Найдено 20 случаев, в которых холодная плазма может участвовать в сжатии центрального хвоста, но 16 из них можно рассматривать и как независимые последствия взаимодействий на дневной стороне. В 15 случаях холодная плазма могла проникнуть в плазменный слой из-за расширения магнитосферы во время суббури, в 4 из них МР движется наружу в фазе расширения суббури без соответствующих возмущений в SW. Выходы в MSH из глубокого хвоста на несколько минут в 18 случаях не коррелируют с суббуриями.

В шестой главе обсуждаются механизмы генерации и роль волн на частотах от ионно- до электронно-циклотронной в процессах переноса массы и энергии у МР. Особое внимание уделяется электрическим флуктуациям на 0,1-20 Гц, которые, по-видимому, лучше всего измерялись у МР на КА «Прогноз-8, 10» и «Интербол-1». На рис. 2а приведены характерные спектры в ТПС с «Прогноза-8» и «Интербола-1» (треугольники), на которых выделяются максимумы ионно-циклотронных волн (ИЦВ), а также активность в диапазоне нижегибридных волн

(НГВ); кружок - амплитуда ИЦВ в ТПС с «Прогноза-10» (Глава 2). Вблизи высокоширотной МР из 34 высокоопросных интервалов «Прогноза-8, 10» только в 7 не было зарегистрировано развитых ИЦВ- пакетов. Характерная амплитуда ИЦВ - 3-10 мВ/м и 2-5 нТ, максимальная - 25 мВ/м и 10 нТ. Интенсивные ИЦВ и НГВ коррелируют с градиентами скорости, плотности и магнитного поля. Обсуждаются новые примеры измерений и приведенные выше данные.

Далее излагаются результаты оригинального исследования устойчивости потока плазмы вдоль магнитного поля (по оси  $z$ ) с поперечным градиентом скорости для произвольного  $\beta$ , а также и с градиентом плотности - для малого  $\beta$ . Сравнение с низкочастотными волнами показывает, что только в случае  $\beta \gg 1$  они обладают меньшим порогом, однако при любом  $\beta$  при превышении порога быстрее будут нарастать коротковолновые ИЦВ. Их характерный инкремент:

$$\gamma \sim (k_z \rho_i dV_z/dx \Omega_i)^{1/2} / 2\pi^{1/4} \sim 0,1 \Omega_i ,$$

где  $k_z$  - волновой вектор вдоль поля,  $\Omega_i$  - ионно-циклотронная частота,  $dV_z/dx$  - поперечный градиент скорости. Интересным результатом является то, что при одновременном наличии сдвига скорости и градиента плотности всегда найдутся волны с такими  $k_y$  и  $k_z$ , что порог неустойчивости понижается при одновременном действии двух факторов. Это отличается от классической неустойчивости Кельвина - Гельмгольца, для которой наблюдается стабилизация градиентом плотности. Эти результаты качественно согласуются с вычислениями других авторов в последние несколько лет.

Оценка коэффициента диффузии поперек магнитного поля за счет резонансного циклотронного взаимодействия ионов с электростатическими ИЦВ дает величину до  $D \sim E^2 (B_0)^{-3} \sim \sim 10^{10} \text{ м}^2/\text{с}$  при средних амплитудах в ТПС, что может обеспечить наполнение каспа и LLBL через ТПС над полярными каспами; этот результат показывает необходимость учета взаимодействия с ИЦВ как одного из основных механизмов проникновения плазмы в магнитосферу (локальные всплески

дают на порядок больший  $D$ , см. Главу 2). Отмечается, что максимальный сигнал с «Прогноза-10» на рис. 2а дает меньший  $D$  из-за его зависимости от постоянного поля  $B_0$  в степени "-3", что и определяет  $D$  в ТПС даже при электрических полях, сравнимых с таковыми на низких широтах (ср. рис. 3 и 4).

Далее рассматриваются более высокочастотные НГВ (1-30 Гц) и ВПЧ (30-100 Гц) по данным «Прогноза-8» 26-27 июля 1981 г. и 21 сентября 1995 г. по данным «Интербола-1», и сравниваются с приведенными ранее примерами, что дает возможность заключить: (i) максимальная активность НГВ и ВПЧ коррелирует с пересечениями у МР плазменных струй, где максимальны градиенты скорости и плотности ионов и магнитного поля; (ii) типичные амплитуды НГВ – 1-4 мВ/м, ВПЧ – 0,1-0,4 мВ/м; НГВ- и ВПЧ- активность коррелирует с появлением надтепловых электронов. Общая схема для МР выглядит следующим образом: (1) генерация НГВ за счет энергии ионов и/ или неоднородных токов; (2) ускорение НГВ надтепловых электронов вдоль магнитного поля; (3) генерация ВПЧ за счет "веерной" неустойчивости потоков электронов.

Как и для BS, из квазилинейного уравнения взаимодействия волн с электронами получается оценка зависимости характерной энергии надтепловых электронов:

$$W_e \sim L_{\parallel}^{2/5} n_0^{-2/5} E^{4/5} H_0^{2/5},$$

где  $L_{\parallel}$ ,  $E$ ,  $H_0$  и  $n_0$  - продольный размер области ускорения, электрическое и магнитное поля и плотность плазмы. Для амплитуды НГВ у МР  $\sim 3$  мВ/м характерная энергия ускоренных электронов должна быть  $\sim 250$  эВ, что согласуется с приведенными в работе данными.

Приводится краткое описание "веерной" неустойчивости, ее предсказания сопоставляются с данными измерений, например, характерной частоты  $\omega \sim (1/3-1/6) \omega_{ce}$ , где  $\omega_{ce}$  - электронно-циклотронная частота.

Сравнение волновых данных с характеристиками потоков электронов свидетельствует о том, что за счет "веерной" неустойчивости продольных потоков электронов в погранслоях

плазменный слой может пополняться перпендикулярными потоками электронов. В качестве механизма генерации НГВ рассматриваются дрейфовая токовая и потоковая неустойчивости, а также нелинейный каскад волн в сторону высоких частот и/или мелких масштабов. Так, при  $dV_z/dx > \Omega_i$  возможно возбуждение НГВ прямо за счет свободной кинетической энергии обтекающего потока. Одновременное действие градиента плотности понижает порог неустойчивости. Предложенные механизмы находятся в согласии с приведенными данными. Хотя НГВ не играют у МР непосредственной роли в переносе плазмы, они влияют на образование внутри МР мелкомасштабных структур. В областях шириной в несколько  $\rho_e$  или  $c/\omega_{pe}$  НГВ способны инициировать пересоединение за счет локально большого коэффициента диффузии.

Кроме сопоставления с теоретическими работами по линейной неустойчивости НГВ, проводится краткое сравнение с результатами кинетического моделирования тонких токовых слоев на нелинейной стадии их развития. И в данных, и в модели отмечается появление интенсивных электрических НГВ с электронными масштабами и общей динамикой с характерным временем  $\sim 2\pi / \Omega_i$ .

В **седьмой главе** рассматриваются физические аспекты взаимодействия потока плазмы с магнитосферным препятствием, включая подробное сопоставление данных с теорией и численным моделированием. Здесь также сформулирован общий подход к этому взаимодействию как сложной нелинейной системе. Обобщаются результаты измерений на высоких широтах с упором на волновые аспекты взаимодействия и роль ТПС.

Набегающий поток взаимодействует с ПО посредством отраженных волн, что вызывает хаотизацию до 40% кинетической энергии MSH. Особенность взаимодействия - появление магнитозвуковых струй, ускоренных до альвеновских чисел Маха  $\sim 3$ , после чего следуют замедленные альвеновские

потоки. В таком нестационарном процессе баланс импульса сохраняется только на временных масштабах, характерных для альвеновских потоков ( $1/f_A \sim 12$  мин). Волновые пакеты на частоте  $f_A \sim 1,3-1,4$  мГц синхронизируют взаимодействия во внешних и внутренних погранслоях.

Далее исследуются статистические свойства возмущений в ТПС, в частности, функция распределения угла вращения вектора магнитного поля в плоскости максимальных магнитных вариаций в ТПС 19.06.1995 (данные «Интербола-1»). Свидетельством негауссовской статистики на высоких углах вращения является то, что функция распределения на больших углах аппроксимируется симметричной функцией Леви с характерным индексом  $\alpha \sim 1,17$  (для Гауссова распределения  $\alpha = 2$ ). Проводится сравнение динамики вэйвлетных спектров в ТПС с переходом к хаосу через перемежаемость на примере нелинейной модели Лоренца. В областях наиболее интенсивных флуктуаций (рис. 3) измеренный спектр имеет основную черту, схожую с турбулентной фазой в модели Лоренца: появляется один доминирующий временной масштаб в промежутке между двумя максимумами в "ламинарной" области (ср. вторую снизу панель рис. 4). Совместно с сильной нелинейностью, высокими значениями бикогерентности (см. нижнюю панель рис. 4) и аномальной статистикой углов поворота поля - это говорит о необходимости рассмотрения динамики ТПС как сложной нелинейной системы, для адекватного понимания его поведения и природы.

В результате многомасштабного перемешивания и пересоединения силовые линии оказываются связанными через ТПС в статистическом смысле, без возможности проследить индивидуальные силовые линии в неоднородной неравновесной среде с двумя фазовыми состояниями: одна "фаза" является замороженной в "MHD" плазме, а другая представлена почти ненамагниченными "диамагнитными полостями", "вложенными" в нелинейные токовые слои и вихри. Именно эта "фаза" (в статистическом смысле) обеспечивает спектры мощности с

наклоном  $\sim -1$ , который подразумевает специальный тип трансляционной симметрии колебаний.

Сравнение с кинетическим моделированием тонких токовых слоев показывает, что общие спектральные и биспектральные свойства колебаний в ТПС воспроизводятся моделированием. Данные виртуального спутника воспроизводят, например, S-образные магнитные годограммы, считавшиеся ранее атрибутом промежуточных ударных волн, а также разветвленные вихревые дорожки. На левой нижней вставке рис. 2 б кружками показан годограф магнитного поля на виртуальном спутнике, пересекающем трехмерный нелинейный вихрь; введением небольшого фонового поля его можно практически совместить с наблюдаемым годографом (Глава 4).

Следующий раздел посвящен переносу и нагреву частиц в ТПС над каспом в случае вогнутой МР (вставка на рис. 1). На рис. 4 показан типичный выход «Интербола-1» в MSH 2 апреля 1996 г. (см. также Главы 2-5). МР видна по переходу  $V_x$  от больших отрицательных значений к малым и по доминированию тепловой энергии ионов  $E_{th}$  над магнитным давлением  $B^2/8\pi$  в ТПС (TBL) и MSH. Переход к обтекающему потоку (PF), где  $E_{th} \sim \sim E_{kin}$  (плотность кинетической энергии), от МР отделен ТПС (черная заливка энергии флуктуаций магнитного поля  $W_b$ ). Для энергии флуктуаций модуля магнитного поля  $\delta|B|$ :  $W_b \sim 3,5 \delta|B| \sim 0,1 E_{th}$  (т.е. доминируют поперечные колебания). Температура ионов  $T_i$  возрастает в ТПС в 2,2 и электронов  $T_e$  - в 1,3 раза, провалы  $B^2/8\pi$  - ДП; меньший нагрев электронов - признак диссипации энергии в области гирорадиуса ионов. Вэйвлетная спектрограмма на второй снизу панели рис. 4 демонстрирует каскадообразные возмущения в ТПС: спектральные максимумы, связанные между собой, появляются на нескольких частотах. Максимум на частоте  $\sim 1,5$  МГц виден в ТПС, MSH и каспе; судя по интенсивности, он возникает в ТПС около МР. Каскадам соответствует наклон спектра мощности  $V_x - 1,18$  (характерен для токового слоя в состоянии критической самоорганизации) на частотах 1-45 МГц, для 0,05-0,4 Гц наклон - 2,4.

В ТПС выделяются трехволновые процессы, удовлетворяющие условию:  $f = f_L + f_K$ ; на нижней панели рис. 4 произведения трех амплитуд (бикогерентность) дают максимумы до 40 % для частот  $f_L \sim 1,5; 5$  и  $15$  мГц и для  $f_K$  в диапазоне  $1,5 - 80$  мГц, т.е. структуры с выделенными  $f_L$  распадаются в широком диапазоне  $f_K$  и  $f$ . Неоднородности в потоке при взаимодействии с МР генерируют КАВ, часть из которых отражается назад, фокусируется вогнутой МР и взаимодействует с набегающим потоком. В результате самосогласованным образом возникает ряд каскадов, синхронизированных на выделенных частотах  $f_L$ . Масштаб на  $1,5$  мГц  $L \sim V_A/f_L \sim 3-7 R_E$ , что сравнимо с протяженностью ТПС (см. рис. 1) и толщиной MSH на дневной стороне.

Нагрев ионов в ТПС по соотношениям Рэнкина-Гюгонио на ударной волне по магнитозвуковому числу Маха в MSH, альвеновскому числу и нормальной к PF проекции скорости ( $M_M \sim M_{An} \sim 1,2$ ) и по полной скорости ( $M_A \sim 3,5$ ) составляет  $1,6$  и  $5$ , соответственно. Наблюдаемый нагрев ионов в ТПС (в  $2,2$  раза) выше, чем на косоударной волне, и меньше максимально возможного. Таким образом, преобразование энергии отличается от ударной волны: вся возмущенная область - это единое целое с "дальнодействующими" каскадами КАВ, вихревыми дорожками и когерентными структурами.

В ТПС происходит пересоединение флуктуирующих полей (см. Главу 4), что позволяет плазме проникать внутрь МР и обеспечивает перенос магнитного потока с дневной стороны магнитосферы на ночную. Однако значительный вклад в процесс переноса дает просачивание (percolation) плазмы сквозь структурированную границу с коэффициентом диффузии:

$$D_p \sim 0,66 (\delta V/B_0) \rho_i^2 \Omega_i \sim (5-10) 10^9 \text{ м}^2/\text{с} .$$

Это дает поток  $(1-2) 10^{27}$  частиц /с через северный и южный ТПС, которого достаточно для заполнения магнитосферы солнечной плазмой. Схожую оценку коэффициента диффузии можно получить и для кинетических альвеновских волн, и для электростатических протонно-

циклотронных волн (Глава 6). Совместно эти оценки усиливают тезис о возможности заполнения дневной магнитосферы через высокоширотный ТПС. Таким образом, исследование роли и свойств турбулентности в критической точке геомагнитной ловушки – ТПС – выявляет ключевое значение турбулентных микропроцессов во взаимодействии потоков плазмы с магнитными препятствиями - будь то поля планет, звезд, "черных дыр" или лабораторных ловушек, и показывает реальные механизмы преобразования энергии в бесстолкновительной плазме.

В последней части обсуждаются механизмы ускорения струй в MSH при взаимодействии типа плазма - плазма. На рис. 3 б показан переход от равновесного потока к нестационарному ТПС: вектора скорости плазмы вдоль орбиты «Интербола-1», схематично показаны основные волны. На рис. 3в представлена проекция на нормаль к МР (N) вектора Пойнтинга  $P_n$ , положительные всплески распространяются от МР к SW. Сопоставление спектрограмм плотности и скорости ионов совместно с  $P_n$  позволило определить тип волн (см. рис. 3 б): отраженные MS- волны на 4-5 мГц взаимодействуют с MS-волной в набегающем потоке на 1,4 мГц, что приводит к усилению колебаний и генерации MS-струи в 09 UT (на рис. 3 б показано как распад на MS- jet и альвеновскую волну на 3 мГц, Alfvén). "Развал" стационарного потока на нестационарные MS/A- струи связан с наблюдаемым максимумом в бикогерентности: 1,4 мГц + 3 мГц = 4,4 мГц с амплитудой ~ 85%, причем каждая из вторичных волн содержит потоки, движущиеся с соответствующей характерной скоростью распространения.

Наличие ускоренной плазмы в погранлоях рассматривалось как свидетельство трансформации энергии, накопленной в магнитном поле, сжатом внешним потоком, в процессе пересоединения магнитных полей, когда ускорение до  $V_A$  должно достигаться за счет натяжения силовых линий. Однако альвеновское число Маха в MS-струях может превышать 3, что вместе со средним  $\beta_i > 2$  исключает локальное

пересоединение как источник ускорения; пересоединение же на МР должно было бы давать  $P_n > 0$  (ср. рис. 3в). Поскольку динамическое давление в струях может превышать динамическое давление SW и многократно - магнитное давление внутри препятствия, такие струи могут деформировать границу и проникать внутрь нее, т.е. оказывать существенное влияние на картину обтекания и на локальную форму препятствия. Это согласуется с данными КА Polar (Глава 4).

Рассматривается альтернативный пересоединению механизм ускорения плазмы, основанный на прямой трансформации энергии потока без промежуточного накопления энергии в деформированном магнитном поле. Этот механизм – структуризация нелинейных колебаний - противоположен термализации потока на ударной волне в части увеличения скорости MS-струи за счет ее тепловой энергии. Плазме оказывается энергетически выгодно "сбросить" избыток импульса вниз по потоку за счет ускорения небольшой ее части и перейти к замедленному альвеновскому потоку ближе к МР. Для описания процесса в будущем может оказаться полезным формализм, описывающий образование магнитозвуковых волновых пакетов механизмом мазерного типа: система переходит в устойчивое состояние с бессильным альвеновским течением, излучив при этом когерентный магнитозвуковой пакет (MS- струю). Наши данные свидетельствуют о превращении ламинарного потока за ударной волной в нестационарные магнитозвуковые струи и замедленные альвеновские течения, составляющие единую синхронизованную картину взаимодействия во внешнем погранслое, толщина которого оценивается в 1-2 радиуса Земли при расстоянии от МР до Земли  $\sim$  в 10 радиусов. Характерная ("синхронизирующая") частота  $\sim$  1,4 мГц может быть связана с резонансными колебаниями плазмы между дневной магнитопаузой и ударной волной.

Частоты  $f_l$  и  $f_k$  (1,4 и 3 мГц на рис. 3 б) относятся к временной области в системе МР, поскольку соответствующие

максимумы стабильны при значительных изменениях скорости потока. Пренебрегая частотой колебания MS-струи по сравнению с доплеровским сдвигом, из правила суммирования частот в биспектрах получаем условие черенковского резонанса для струи и биений флуктуаций набегающего потока и погранслоя:

$$f_l + f_k = (\mathbf{kV}) / 2\pi, \quad (1)$$

где  $V$  - средняя скорость невозмущенной плазмы в системе МР, в которой происходит взаимодействие,  $\mathbf{k}$  - волновой вектор. Тогда характерный размер MS-струи вдоль потока может быть оценен как  $L = |\mathbf{V}| / (f_l + f_k) \sim 5 R_E$ , что согласуется с данными наблюдений.

Количественно ускорение плазмы в неоднородном внешнем поперечном электрическом поле на границе погранслоя описывается в приближении инерционного дрейфа, который происходит со скоростью:

$$\mathbf{V}_d^{(1)} = 1/(M\omega_H^2) d\mathbf{F} / dt = Ze/(M\omega_H^2) d\mathbf{E}/dt, \quad (2)$$

где  $M$ ,  $\omega_H$ ,  $Ze$  - масса, циклотронная частота и заряд частиц,  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{E}$  - поперечная сила и электрическое поле. На рис. 3а для средней скорости плазмы  $V \sim (-170, -70, -80)$  км/с вычислено электрическое поле в системе отсчета плазмы. В 08:55-08:56 UT электрическое поле мало, далее возмущения нарастают до 8 мВ/м, что соответствует MS-струе.

Приращение энергии при инерционном дрейфе определяется как

$$\delta W_{kin} \sim \delta(Mn(\mathbf{V}_d^{(0)})^2/2) \sim 30 \text{ кэВ/см}^3,$$

где скорость градиентного дрейфа в случае электрического поля  $\mathbf{V}_d^{(0)} = c[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$ ,  $c$  - скорость света,  $\mathbf{B}$  - вектор магнитного поля. При измеренных параметрах это согласуется с максимальной плотностью кинетической энергии струи  $W_{max} \sim 35 \text{ кэВ/см}^3$  и средним значением  $W_{kin} \sim 7 \text{ кэВ/см}^3$  перед струей. Из формулы (2) следует, что ионы и электроны дрейфуют в разных направлениях, что объясняет появление "перемежаемых" токовых слоев с аномально большой статистикой больших углов поворота магнитного поля в ТПС.

Формирование и предварительное ускорение струй также сравнивается с ускорением части набегающей плазмы механизмом типа Ферми - движущейся "стенкой" (границей альвеновского потока). Полагается, что возникновение электрического поля, как на рис. 3а, также синхронизовано с биениями флуктуаций набегающего потока и погранслоя, что подтверждается спектрами и бикогерентностью электрического поля. 2-3 упругих отражения струи от границы могут ускорить ее до наблюдаемых энергий, что также согласуется с оценкой продольного размера струи из формулы (1) черенковского резонанса. Далее проводится сравнение концепции ТПС как эффективного препятствия для набегающего потока с моделированием турбулентного погранслоя. Модель, использующая наши данные для описания спектральной формы магнитных флуктуаций, показывает, что при уровне относительных флуктуаций  $\delta B/B_0 > 1,5$  (ср. рис. 4), ~ 80% отраженных частиц дают количественную оценку того, что ТПС с развитыми нелинейными флуктуациями действительно может являться, в нулевом приближении, эффективным препятствием, а в первом приближении - обеспечивать обмен ~ 10 % ионов между обтекающим потоком и "plasma ball" (рис. 3 б).

Раздел заканчивается кратким рассмотрением еще трех примеров ускоренных струй, свидетельствующих о том, что предложенный механизм ускорения плазменных потоков у магнитопаузы может иметь широкое распространение. Это говорит о необходимости проведения статистического анализа ускоренных струй у МР с учетом возможного вынужденного пересоединения магнитных силовых линий, деформированных ускоренными струями. Отмечается также регулярное появление дискретных излучений у границы магнитосферы и на авроральных наземных станциях, которые рассматриваются в контексте возбуждения стоячих резонансных волн в МГД-полости - между ударной волной и областью отражения быстрых магнитозвуковых волн (между плазмопаузой и МР).

Глава завершается формулировкой нового подхода к взаимодействию магнитослоя с внешней магнитосферой как к сложной нелинейной системе. Это означает качественное отличие от традиционного подхода, в котором такое взаимодействие рассматривается как линейная суперпозиция реакций магнитосферы на возмущения в SW или MSH. Обращается также внимание, что длиннопериодная корреляция является характерной для неравновесных систем вблизи критической точки. Спектры с изломом в ТПС с характерными наклонами сравниваются со спектрами в околоземном нейтральном слое в критическом состоянии самоорганизации. Полностью подход сформулирован в Положении 8, выносимом на защиту.

В заклучении сформулированы основные результаты исследований и приведены положения, выносимые на защиту.

#### Положения, выносимые на защиту

1. В результате систематического изучения возмущений на высокоширотной границе магнитосферы обнаружено **регулярное присутствие зоны флуктуаций** на 0,002-1 Гц с наклонами спектров -1 и -2,2 - турбулентный погранслои (ТПС). Нелинейное взаимодействие флуктуаций потока с волнами, отраженными от препятствия, является главным процессом, синхронизирующим каскады волн в ТПС. **Наличие ТПС** приводит к турбулентному просачиванию плазмы с коэффициентом диффузии  $D_p \sim (5-10) 10^9 \text{ м}^2/\text{с}$ , что позволяет потoku солнечной плазмы заполнить дневные погранслои.

2. **Термализация потока плазмы в ТПС** носит **многомасштабный каскадный характер** (от тысяч километров до ионного гирорадиуса), включая каскады кинетических альвеновских и магнитозвуковых волн и «диамагнитные полости» (50-5000 км). **Наблюдаемый нагрев ионов** в горловине каспа и в хвосте за ней **~ в 2,5 раза выше**, чем возможен **на косо́й тонкой ударной волне**, и **меньше максимально возможного** на перпендикулярной ударной

волне. Малая часть ионов ускоряется до сотен, электронов - до десятков килоэлектронвольт.

3. **Экспериментально подтверждено наличие в ТПС возмущений на масштабах электронного гирорадиуса и инерционной длины, что свидетельствует о вторичном пересоединении флуктуирующих магнитных полей, составляющем мелкомасштабное звено в каскаде возмущений, которое обеспечивает перенос плазмы.** Продемонстрирована также возможность одновременного пересоединения антипараллельных полей на глобальных масштабах вдали от каспа и среднемасштабного - в его горловине. Постоянное наличие каспа говорит о **преимущественном вкладе локальных многомасштабных процессов в перенос плазмы**, по сравнению с нестационарным глобальным пересоединением вдали от каспа.

4. **Измеренные электрические ионно-циклотронные волны в ТПС могут обеспечить приток плазмы в магнитосферу, сравнимый с просачиванием плазмы (п. 1).** Эти волны - результат дрейфовых неустойчивостей на границах с градиентами скорости, давления и тока, которые также объясняют генерацию **колебаний в нижнегибридном диапазоне** у магнитопаузы. Интенсивность последних достаточна для продольного нагрева электронов из магнитослоя до наблюдаемых энергий и усиления структуризации токовых слоев, но она мала для существенной диффузии. **«Веерная» неустойчивость** продольных электронов способствует заполнению ими плазменного слоя.

5. Кинетическое моделирование токовых слоев воспроизводит как основные черты возмущений в ТПС (включая обмен  $\sim 10\%$  ионов), так и выполнение ТПС функции **эффективного препятствия** для потока плазмы. МГД-моделирование и многоспутниковые измерения подтверждают **прямое проникновение солнечной плазмы в районе минимума магнитного поля у каспа и «sash»** - продолжения каспа в хвост магнитосферы при поперечном межпланетном

магнитном поле. Глубокое проникновение солнечной плазмы в плазменный слой - вплоть до полуночного сектора - происходит на границе нейтрального слоя в геомагнитном хвосте также при малом магнитном поле.

6. **Найдена критическая зависимость топологии высокоширотного погранслоя от угла наклона геомагнитного диполя:** (i) при наклоне диполя к Солнцу горловина каспа открыта для прямого взаимодействия потока плазмы с вогнутой магнитопаузой; (ii) при наклоне от Солнца - горловина каспа закрыта, в 25% случаев в ней встречаются «плазменные облака» размером до нескольких  $R_E$  - резервуары почти размагниченной солнечной плазмы в магнитосфере.

7. При исследовании взаимодействия потока с внешней границей каспа открыт динамический режим обтекания, в котором вместо ламинарного течения в магнитослое образуются ускоренные до магнитозвуковой скорости струи, несущие до 40% импульса потока, и замедленные альвеновские течения. Струи ускоряются за счет инерционного дрейфа в неоднородных электрических полях на границе погранслоя, их динамическое давление - больше магнитного на магнитопаузе, деформация которой струями ведет ко вторичному пересоединению. Импульсный «сброс» кинетической энергии обтекающим потоком в струях составляет альтернативу ламинарному обтеканию препятствий плазмой.

8. На основании пп. 6-7 и 1-3 предложен новый подход к взаимодействию магнитослоя и магнитосферы, в котором основные процессы взаимосвязаны и глобально синхронизированы колебаниями ТПС и магнитослоя как целого. Они модулируют как течение плазмы в погранслоях, так и пересоединение полей на магнитопаузе. Таким образом, мы имеем дело не со следствием аддитивных реакций на возмущения в солнечном ветре и переходной области, а со сложной многомасштабной нелинейной системой, что

**качественно меняет ее поведение:** вызывает «катастрофическую» перестройку течения и магнитной топологии, приводит к зависимости от предыстории и к появлению **аномальных корреляций на больших масштабах (перемежаемости)** и образованию **когерентных структур**, обеспечивающих эффективное преобразование энергии и перенос плазмы.

Основные результаты работы изложены в **59 публикациях** в отечественной и зарубежной литературе, список которых приводится ниже:

1. **Savin S.P.**, Zeleyi L.M. and Prokhorenko V.I. Specific tasks of multiple scale plasma measurements in Regatta-Cluster system // Proc. Int. Workshop on Space Plasma Physics Investigations by Cluster and Regatta, Graz, Austria, 20-22 February 1990 / ESA **SP-306**. 1990. P. 7-16.

2. **Savin S. P.**, Balan O., Borodkova N., Budnik E. et al. Interball Magnetotail Boundary Case Studies // Adv. Space Res. 1997. V. 19. P. 993.

3. **Savin S. P.**, Romanov S. A., Fedorov A. O., Zelenyi L.M., Klimov S. I. et al. The cusp/magnetosheath interface on May 29, 1996: Integball-1 and Polar observations // Geoph. Res. Lett. 1998a. V. 25. P. 2963-2966.

4. **Savin S. P.**, Borodkova N. L., Budnik E. Yu, Fedorov A. O., Klimov S. I. et al. Interball tail probe measurements in outer cusp and boundary layers // Geospace Mass and Energy Flow: Results from the International Solar-Terrestrial Physics Program /Ed. by J.L. Horwitz, D.L. Gallagher and W.K. Peterson // Geophysical Monograph. AGU, Washington D.C. 1998b. V. 104. P. 25-44.

5. **Savin S.**, Zelenyi L., Budnik E., Borodkova N., Fedorov A. et al. Manifestations of Boundary Layer Dynamics in Substorm Activity. Multi Spacecraft Study // SUBSTORM-4, International Conference on Substorms-4', Japan: March 9-13, 1998 / Ed. by S. Kokubun and Y. Kamide. Terra Scientific Publ. Co., Tokyo. 1998c. P. 125-130.

6. **Savin S.**, Budnik E., Nozdrachev M., Romanov V., Yermolaev Yu. et al. On the plasma turbulence and transport at the polar cusp outer border // Czech. J. Phys. 1999. V. 49. N 4a. P. 679-694.

7. **Savin S.**, Maynard N., Sandahl I. et al. IACG boundary layer campaign: current status and CLUSTER-II perspectives // Proceedings of Cluster II Workshop. Multiscale/Multipoint Plasma Measurements. Imperial College, London, Sept. 22-24, 1999. ESA/SP-499. 2000. P. 335-338.

8. **Savin S.**, Skalsky A., Romanov S., Budnik E., Borodkova N. et al. Outer cusp boundary layer: summer/winter asymmetry // Proceedings of Intern. Symposium "From solar corona through interplanetary space into Earth magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites and ground-based observations". Kyiv, Ukraine. 2000. P. 229-232.

9. **Савин С.П.**, Зеленый Л.М., Романов С.А., Скальский А.А., Климов С.И. и др. Турбулентный погранслои на границе геомагнитной ловушки // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. С. 620-624.

10. **Savin S.**, Zelenyi L., Maynard N., Sandahl I., Kawano H. et al. Multi-spacecraft Tracing of Turbulent Boundary Layer // Adv. Space Res. 2002a. V. 30. N 12. P. 2821-2830.

11. **Savin S.**, Buechner J., Consolini G., Nikutowski B., Zelenyi L. et al. On the properties of turbulent boundary layer over polar cusps // Nonlinear Processes in Geophysics. 2002b. V. 9. P. 443-451.

12. **Savin S.**, Blecki J., Pissarenko N., Lutsenko V., Kirpichev I. et al. Accelerated particles from turbulent boundary layer // Proc. COSPAR-ESA Coll. Acceleration and Heating in the Magnetosphere, 6-10 February 2001, Konstancin-Jeziorna, Poland // Adv. Space Res. 2002c. V. 30. N 7. P. 1723-1730.

13. **Савин, С. П.**, Л. М. Зеленый, Э. Амата, Й. Бюхнер и др. Динамическое взаимодействие потока плазмы с горячим погранслоем геомагнитной ловушки // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. С. 542-546.

14. **Savin S.**, Zelenyi L., Romanov S., Sandahl I. et al. Magnetosheath - Cusp Interface // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 183-212.

15. **Savin S.**, Skalsky A., Zelenyi L., Song P., Fritz T.A. et al. Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause // *Surveys in Geophys.* 2005. V. 26. N. 1-3. C. 105.

16. **Savin S.**, Zelenyi L., Amata E., Buechner J. et al. Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause: dynamic flow chaotization // *Planet. Space Sci.* 2005. V. 53. P. 133-140.

17. Maynard N.C., **Savin S.**, Erickson G.A., Kawano H., Nemecek Z. et al. Observation of the magnetospheric "sash" and its implications relative to solar-wind/magnetospheric coupling: A multisatellite event analysis // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. N A4. P. 6097-6122. DOI: 10.1029/2000JA003004.

18. Romanov V., **Savin S.**, Klimov S., Romanov V., Yermolaev Yu. et al. Magnetic turbulence at the magnetopause, plasma penetration. // *Polish J. Tech. Phys.* 1999. V. 40. P. 329-332.

19. Romanov V., **Savin S.**, Romanov S., Klimov S., Blecki J. et al. Turbulent boundary layer statistics from Interball-1 data // *Proceedings of Intern. Symposium "From solar corona through interplanetary space into Earth magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites and ground-based observations"*, Kyiv, Ukraine. 2000. P. 225-227.

20. Blecki J., **Savin S.**, Cornilleau-Wehrin N. et al. Fine Structure of the Polar Cusp as Deduced from the Plasma Wave and Plasma Measurements // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32. N 3. 315-321.

21. Blecki J., **Savin S.**, Cornilleau-Wehrin N., Parrot M. et al. The low-frequency plasma waves in the outer polar cusp: review of observations from Prognoz-8, Interball-1, Magion-4 and Cluster satellites // *Survey in Geophysics.* 2005. N 1-3. C. 132.

22. Бленцки Я., **Савин С.** и др. Роль взаимодействия волна-частица в динамике плазмы полярного каспа // *Космические исследования.* 2003. Т. 41. С. 356-363.

23. Kawano H., **Savin S.**, Lui A.T.Y., Fujimoto M., Kokubun S. et al. Solar wind discontinuity - magnetosphere interactions observed by Interball-1 and Geotail: IACG Campaign #2 // *Adv. Space Res.* 2000. V. 25. N 7-8. P. 1405-1409.

24. Вайсберг О. Л., Галеев А. А., Зеленый Л.М., Застенкер Г. Н., Омельченко А. Н., Климов С. И., **Савин С. П.**, Ермолаев Ю. И., Смирнов В. Н., Ноздрачев М. Н. Тонкая структура магнитопаузы по измерениям на спутниках Прогноз-7 и Прогноз-8 // *Космич. исслед.* 1983. Т. 21. С. 57-63.

25. Алексевич Я. Н., Афанасьев Ю. В., Балебанов В. М., Баскаков В.Е., Бобков Ю.Н., Бородин Н.Ф., Вайсберг О.Л., Войта Я., Горобей В.Н., Карачевский В.Н., Климов С.И., Корепанов В.Е., Кравчик З., Назаров Н.И., Наместник С.Г., Новак К., Новакевич В., Ноздрачев М.Н., Оберц П., Певзнер А.М., Песоцкий Л.В., Порфиоров В.П., **Савин С.П.**, Сикорски З. и др. Комплексный волновой эксперимент на спутнике "Прогноз-8". // *Космич. исслед.* 1983. Т. 21, № 5. С. 718-724.

26. Dubinin E., Skalsky A., Song P., **Savin S.**, Kozyra J. et al. Polar-Interball coordinated observations of plasma characteristics in the region of the northern and southern distant cusps // *J. Geophys Res.* 2002. V. 107. N A5. P. 1053. DOI:10.1029/2001JA900068

27. Климов С.И., Ноздрачев М.Н., Триска П., Войта Я., Галеев А.А., Алексевич Я. Н., Афанасьев Ю. В., Баскаков В.Е., Бобков Ю.Н., Дунец Р. Б., Жданов А.М., Корепанов В.Е., Романов С.А., **Савин С.П.**, Соколов А.Ю., Шмелев В.С. Исследование плазменных волн с помощью комплекса комбинированной волновой диагностики БУДВАР (Прогноз-10-Интеркосмос). // *Космич. исслед.* 1986. Т. 24. С.177.

28. Klimov S., Romanov S., Amata E., Blecki J., Buechner J., Juchniewicz J., Rustenbach J., Triska P., Woolliscroft L.J.C., **Savin S.**, Afanas'yev Yu. et al. ASPI Experiment: Measurements of Fields and Waves Onboard the INTERBALL-1 Spacecraft // *Ann. Geophys.* 1997. V. 15. P. 514-527.

29. Gustafsson G., Andre M., Carozzi T., Eriksson A.I., Falthammar C-G., Grard R., Holmgren G., Holtet J.A., Ivchenko N.,

Karlsson T., Khotyaintsev Y., Klimov S., Laakso H., Lindqvist P-A., Lybekk B., Marklund G., Mozer F., Mursula K., Pedersen A., Popielawska B., **Savin S.**, Stasiewicz K. et al. First results of electric field and density observations by Cluster EFW based on initial months of operation // *Annal. Geophys.* 2001. V. 19. P. 1219-1240.

30. Blecki J., Kossacki K., Klimov S.I., Nozdrachev M.N., Omelchenko A.N., **Savin S.P.**, Sokolov A.Yu. ELF/ULF plasma waves observed on Prognoz-8 near the Earth magnetopause.

// *Artificial Satellites, Space Physics.* N 7. 1987. V. 22. N 4. P. 5-16.

31. Белова Е. В., Бленцки Я., Денис М., Зеленый Л.М. и **Савин С. П.** Возбуждение ионно-циклотронных волн на границе магнитосферы // *Физика плазмы.* 1991. Т. 17. С. 555.

32. Klimov S., Romanow S., **Savin S.**, Nikolaeva N., Skalsky A. et al. Interball tail probe. Magnetospheric plasma boundaries study. // *Plasma 97, Warszawa.* 1997. V.1 P. 375-378.

33. Blecki J., Juchnievicz J., Kossacki K., Wronowski R., **Savin S.**, Romanov S. et al. Electrostatic and electromagnetic component of the plasma waves observed in the polar cusp onboard Prognoz-8 & Magion-4 satellites // *Plasma 97, Warszawa.* 1997. V. 1. P. 355-358.

34. Blecki J., Rothkael H., Kossacki K., Wronowski R., Klos Z., Juchnievicz J., **Savin S.**, Romanov S. et al. ULF-ELF-VLF-HF plasma wave observations in the polar cusp onboard high and low altitude satellites // *Physica Scripta.* 1998. V. 75. P. 259-263.

35. Blecki J., Kossacki K., Wronowski R., Nemecek Z., Safrankova J., **Savin S.** et al. // *Adv. Space Res.* 1999. V. 23. P. 1765.

36. Blecki J., **Savin S.**, Rothkaehl H., Stasiewicz K. et al. Wave- particle interaction in the polar cusp // *Proceedings of "Sheffield Space Plasma Meeting: Multipoint Measurements versus Theory"*, 24-26 April 2001, Sheffield, UK, ESA SP-492. 2001. P. 87-92.

37. Nikutowski B., Buechner J., Wiechen H., Auster U., Fornacon K.H., Rustenbach J., Klimov S. and **Savin S.** A high-

latitude boundary layer crossing - Interball measurements and MHD model results // *Adv. Space Res.* 1998. V. 22. N 1. P. 161-165.

38. Merka J., Safrankova J., Nemecek Z., Fedorov A., Borodkova N., **Savin S.**, Skalsky A. High altitude cusp: Interball observations // *Adv. Space Res.* 2000. V. 25. N 7-8. P. 1425-1434.

39. Stenuit H., Fujimoto M., Fuselier S.A., Sauvaud J.-A., Wing S., Fedorov A., Budnik E., **Savin S.P.**, Trattner K.J. et al. Multi-spacecraft study on the dynamics of the dusk-flank magnetosphere under northward IMF: January 10-11, 1997 // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. N A10. P. 1333. DOI: 10.1029/2002JA009246.

40. Nemecek Z., Safrankova J., Prech L., Simunek J., Sauvaud J.-A., Fedorov A., Stenuit H., Fuselier S.A., **Savin S.**, Zelenyi L., Berchem J. Structure of the outer cusp and sources of the cusp precipitation during intervals of a horizontal IMF // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. N A12. P. 1420. DOI:10.1029/2003JA009916.

41. Ivchenko N., Blecki J., Kossacki K., **Savin S.** Generation mechanism of the ELF-ULF waves related to the flux transfer events // *Adv. Space Res.* 1997. V. 19. N 12. P. 1933-1937.

42. Klimov S., Romanov S., Amata E., Blecki J., Buechner J., Juchniewicz J., Rustenbach J., Triska P., Woolliscroft L.J.C., **Savin S.**, Afanas'yev Yu. et al. ASPI experiment: Measurements of fields and waves onboard of the INTERBALL-TAIL mission // *Interball mission and payload.* IKI-CNES. 1995. P. 128.

43. Sandahl I., Popielavska B., Budnick E.Yu., Fedorov A., **Savin S.**, Safrankova J., Nemecek Z. The cusp as seen from Interball // *Proceedings of 'Cluster II Workshop. Multiscale/Multipoint Plasma Measurements,* Imperial College, London, Sept. 22-24, 1999, ESA/ SP-499. 2000. P. 39-45.

44. Романов С.А., Климов С.И., **Савин С.П.**, Ермолаев Ю.И., Бородкова Н.Л., Верхоглядова О.П., Юхневич Ю. Наблюдения вихревой структуры в потоках плазмы вблизи магнитосферы Земли // *Космические исследования.* 2000. Т. 38. С. 494-506.

45. Blecki J., Gadomski S., Juchniewicz J., Korepanov V., Krawczyk Z., **Savin S.**, Slominski J. et al. SAS wave experiment on board Magion 4 // *Ann. Geophys.* 1997. V. 15. N 5. P. 528-532.

46. Blecki J., Kossacki K., Popielawska B., Romanov S.A., **Savin S.P.** ELF plasma turbulence observed by Prognoz-8 in plasma jets in the magnetospheric tail // *ESA. Proc. of Int. School and Workshop on Reconnection in Space Plasma.* 1989. V. 2. P. 259-262.

47. Urquhart A.L., Reiff P.H., Toffoletto F.R., Hill T.W., Konkel T.R., Russell C.T., Le G., **Savin S.P.**, Romanov S.A. Magnetic field models: Polar May 29, 1996 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 17323-17332.

48. Zelenyi L.M., Galperin Yu.I., Veselov M.V., **Savin S.P.** et al. Methods of small scale multi-satellite measurements for project ROY // *Proceedings of Cluster II Workshop. Multiscale/Multipoint Plasma Measurements, Imperial College, London, Sept. 22-24, 1999.* ESA/SP-499. 2000. P. 249-256.

49. Klimov S.I., Romanov S.A., Nozdrachev M.N., **Savin S.P.**, Sokolov A.Iu. Comparative study of plasma wave activity in the plasma sheet boundary and near earth plasma sheet // *Advances in Space Research.* 1986. V. 6. N. 1. P. 153-158.

50. Buechner J., Wiechen H., Nikutowski B., Auster U., Fornacon K.-H., Rustenbach J., Klimov S., Romanov S., **Savin S.** and Otto A. Interball-1 plasma sheet encounters and three-dimensional MHD modeling results // *Adv. Space Res.* 1998. V. 22. N 1. P. 155-160.

51. Buechner J., Kuska J.P., Nikutowski B., Wiechen H., Rustenbach J., Auster U., Fornacon K.H., Klimov S., Petrukovich A., **Savin S.** Three-dimensional reconnection in the Earth's magnetotail: simulations and observations // *Geospace Mass and Energy Flow: Results from the International Solar-Terrestrial Physics Program* /Ed. by J.L. Horwitz, D.L. Gallagher and W.K. Peterson // *Geophysical Monograph.* AGU, Washington D.C. 1998. V. 104. P. 313-325.

52. Nikutovski B., Buechner J., Klimov S., Romanov S., Petrukovich A., **Savin S.** Long periods of the UFF wave activity in Earth magnetotail lobes // *Adv. Space Res.* 1996. V. 18. P. 55-58.

53. Nikutovski B., Buechner J., Klimov S., Petrukovich A., Romanov S., **Savin S.** Interball observations of field aligned current signatures due to collisionless reconnection. // VII International Conference on Plasma Astrophysics and Space Physics/ Eds. Buechner J., Axford I., Marsch E., Vasyliunas V. Kluwer AP, Dordrecht. 1999. P. 687-692.

54. Blecki J., **Savin S.**, Cornilleau-Wehrlin N., Kossacki K., Parrot M. et al. Filamentary structure of the magnetospheric plasma // *Proc. of Conf. on Auroral Phenomena & Solar-Terr. Relations* (Int. Symp. in memory of Prof. Yu. Galperin), CAWSES Handbook-1, Boulder. 2004. P. 350-354.

55. Khotyaintsev Y., Buchert S., Stasiewicz K., Vaivads A., **Savin S.** et al. Transient reconnection in the cusp during strongly negative IMF  $B_y$  // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N A4. P. 4204. DOI: 10.1029/2003JA009908.

56. Безруких В.В., Бородкова Н.Л., Климов С.И., Котова Г.А., Лежен Л., Петрукович А.А., **Савин С.П.** Вариации потенциала космического аппарата на высокоэллиптических орбитах // *Космонавтика и ракетостроение.* 2003. Т. 1. № 30. С. 109-115.

57. Климов С. И., Корепанов В. Е., Кравчик З., Ноздрачев М.Н., **Савин С. П.** Анализатор спектра // А/с № 836601, Бюл. И. 1981. № 21.

59. Корепанов В.Е., Климов С.И., Звариюк С.Л., Кравчик З., Новак К., **Савин С.П.**, Симоненко Г.Б. Анализатор спектра // А/с № 1633366, Бюл. И. 1991. № 9.

59. Корепанов В.Е., Симоненко Г.Б., Климов С.И., **Савин С.П.**, Кравчик З., Дудзиньски К., Новак К., Юхневич Ю.. Анализатор спектра. // А/с № 1659896, Бюл. И. 1991а. № 24.

**Работа над диссертацией поддержана грантами РФФИ 98-02-17402 и 02-02-17160.**

055(02)2

Ротап rint ИКИ РАН,  
Москва, 117997, Профсоюзная 84/32

---

Подписано к печати .02.2005

---

Заказ Формат 70x108/32 Тираж 100 2 уч.-изд.л.