

на правах рукописи

ШЕВЫРЕВ Николай Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ИСТОЧНИКОВ ВАРИАЦИЙ  
ПЛАЗМЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАГНИТОСЛОЕ ЗЕМЛИ

Специальность 01.03.03 – Физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2005

Работа выполнена в Институте космических исследований  
Российской академии наук

Научный руководитель: д.ф.-м.н. - Г.Н. Застенкер (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук	И.С. Веселовский (НИИЯФ МГУ)
доктор физ.-мат. наук	А.Е. Левитин (ИЗМИРАН)

Ведущая организация - Институт физики Земли (ИФЗ РАН)

Защита диссертации состоится 27 октября 2005 г. в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд № 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 26 сентября 2005 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 002.113.03,  
кандидат физико-математических наук

Т.М. Буринская

# 1. Общая характеристика работы

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию вариаций параметров плазмы солнечного ветра и магнитного поля в области магнитослоя и сопоставлению этих вариаций с вариациями в невозмущенном солнечном ветре и форшоке.

## Актуальность темы

Проблема воздействия солнечного ветра на магнитосферу Земли является ключевой в изучении солнечно-земных связей и представляет большой научный и практический интерес для задач, объединенных в теме "Космическая погода". В настоящее время, при рассмотрении этих задач, в качестве исходных параметров для моделей, описывающих процессы внутри магнитосферы и на ее границе, как правило, используются данные аппаратов, находящихся на значительном удалении от Земли (например, в точке либрации L1), т.е. измерения невозмущенного солнечного ветра. При этом никак не учитываются процессы, происходящие в области форшока, на ударной волне, а также в магнитослое. Однако достаточно очевидно, что на границу магнитосферы воздействует не невозмущенный солнечный ветер, а модифицированный в этих областях (и главным образом в магнитослое) поток плазмы. Этим и объясняется важность и актуальность как экспериментального, так и теоретического изучения области магнитослоя в наши дни, даже спустя свыше 40 лет после публикации первых работ по его наблюдениям, выполненным на спутнике Pioneer 1 (1958 г.). В этих работах магнитослой из-за наблюдавшихся больших вариаций был описан как область с "возмущениями типа серий ударных волн, с резкими и быстрыми изменениями направления магнитного поля".

В настоящее время существует значительное количество публикаций по изучению магнитослоя, содержащих как прямые измере-

ния, так и теоретические модели. Однако недавние и более ранние работы, в основном, были посвящены изучению глобальной структуры магнитослоя, а также численному газодинамическому или МГД-моделированию течения в нем. Анализ спутниковых измерений параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое ограничивался низкочастотной областью (преимущественно с частотами  $f < 0,02$  Гц) вследствие низкого временного разрешения данных. Систематический анализ более высокочастотных вариаций с частотами 0,01-1 Гц был невозможен вследствие низкого временного разрешения данных измерений плазменных параметров и ограничивался измерениями магнитного поля. Лишь для отдельных единичных событий были доступны измерения потока плазмы с более высоким разрешением вплоть до  $1/50$  с (как, например, на спутнике ПРОГНОЗ-8). Эти измерения показывали, что именно в областях частот 0,01-1 Гц и наблюдаются интенсивные вариации параметров плазмы и магнитного поля, очень сильно отличающиеся по своей структуре от вариаций в невозмущенном солнечном ветре.

Запуск в 1995 г. российского спутника ИНТЕРБОЛ-1 позволил сделать большой шаг вперед в изучении солнечно-земных связей. Это стало возможным благодаря уникальному комплексу научных приборов, функционировавших на борту этого спутника и обладавших рекордным временным разрешением, а также благодаря тесной кооперации с экспериментами на других космических аппаратах. Это сотрудничество опиралось на одновременное функционирование в солнечном ветре и магнитосфере целой флотилии аппаратов, выполнявших общую задачу по исследованию солнечно-земных связей и глобальной структуры магнитосферы.

В данной работе основной упор был сделан на исследование быстрых вариаций потока ионов и магнитного поля в диапазоне частот 0,02-1 Гц (мелкомасштабные вариации) на основе богатой экспериментальной базы, обеспеченной успешным и весьма плодотворным функционированием спутника ИНТЕРБОЛ-1. Проводилось

сопоставление свойств мелкомасштабных вариаций со свойствами среднемасштабных вариаций в диапазоне частот 0,02-0,0005 Гц. Систематические измерения на протяжении почти пяти лет потока ионов (прибор VDP) и магнитного поля (прибор FM-3) с временным разрешением вплоть до 1/16 с обеспечили успешное выполнение поставленной задачи. Тем самым впервые удалось систематически наблюдать столь быстрые процессы не только в магнитном поле, но и в плазме, и приблизиться к проблеме возникновения сильной турбулентности в магнитослое. Были статистически исследованы особенности быстрых вариаций в магнитослое, проведено их сопоставление с вариациями в невозмущенном солнечном ветре и форшоке, а также изучено поведение вариаций на различных временных масштабах, что дало возможность судить о свойствах течения плазмы в магнитослое.

Магнитослой является уникальной природной лабораторией, в которой возможно непосредственное изучение процессов в бесстолкновительной плазме за фронтом ударной волны. Подобные условия невозможно воспроизвести в лабораторных условиях на Земле, поэтому исследование магнитослоя позволит улучшить представления о процессах, происходящих за внешней границей гелиосферы (гелиопаузой), а также во многих астрофизических объектах типа расширяющихся оболочек сверхновых звезд, звездных систем и галактик, когда происходит сверхзвуковое обтекание какой-либо среды бесстолкновительной плазмой.

## Цель работы

Цель диссертационной работы - исследовать средне- и мелкомасштабные вариации потока ионов и межпланетного магнитного поля в области магнитослоя на основе анализа высокоопросных данных измерений потока ионов солнечного ветра и межпланетного

магнитного поля (временное разрешение не хуже 1 с), полученных спутником ИНТЕРБОЛ-1 в период с 1995 по 2000 г., а именно:

- исследовать статистические свойства средне- и мелкомасштабных вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое и сравнить их со свойствами вариаций в невозмущенном солнечном ветре и в форшоке;
- изучить пространственное распределение этих вариаций внутри магнитослоя для понимания роли границ в генерировании наблюдаемых колебаний;
- установить вероятные источники вариаций в магнитослое, используя данные многоспутниковых измерений (ИНТЕРБОЛ-1, WIND, ACE, GEOTAIL, IMP-8 и MAGION-4), а также оценить длины пространственной корреляции среднемасштабных структур магнитослоя;
- сравнивая данные спутника ИНТЕРБОЛ-1 и мониторов солнечного ветра изучить влияние внешних условий, в частности, ориентации межпланетного магнитного поля на амплитудные и частотные характеристики вариаций в магнитослое;
- исследовать отдельные волновые моды колебаний потока ионов и магнитного поля в магнитослое, установить их природу и условия, приводящие к их генерации.

## Научная новизна работы

В работе представлены новые результаты, полученные в ходе анализа систематических измерений на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 с высоким временным разрешением (1 с и выше) потока ионов и магнитного поля в областях солнечного ветра, форшока, а также в различных частях магнитослоя - от близких к подсолнечным до далеких фланговых областей. В частности:

1. Впервые проведено детальное сравнительное статистическое исследование вариаций параметров в различных областях околоземного пространства - получены распределения относительных амплитуд вариаций в двух диапазонах частот в магнитослое, форшоке и невозмущенном солнечном ветре. Для среднемасштабных вариаций на основе одновременных измерений проведено исследование зависимости вариаций в магнитослое от вариаций в невозмущенном солнечном ветре.
2. Впервые проведено детальное сопоставление данных спутниковых измерений потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое с результатами численного моделирования (газодинамическая модель Спрайтера и 3-D МГД-модель Карталева).
3. Впервые на основе сопоставления измерений параметров в магнитослое на нескольких аппаратах, одновременно находившихся в магнитослое и разнесенных на расстояния от  $\sim 0,6 R_E$  до  $\sim 30 R_E$ , показано подобие вариаций этих параметров даже на больших расстояниях вдоль линии тока в магнитослое.
4. На основе оригинальной методики впервые проведено исследование пространственного распределения вариаций потока ионов и модуля магнитного поля поперек магнитослоя для двух его флангов.
5. Впервые проведено систематическое исследование (как статистически, так и на примере отдельных событий) влияния ориентации межпланетного магнитного поля к околоземной ударной волне (угол  $\Theta_{Bn}$ ) на амплитуду мелкомасштабных вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое Земли. Разработана оригинальная методика опреде-

ления угла  $\Theta_{Bn}$  для тех событий, когда спутник находится в магнитослое.

6. Обнаружены волны зеркальной моды не только в подсолнечной области магнитослоя, но и на его флангах.

## Научная и практическая ценность работы

Изучение факторов, влияющих на возникновение средне- и мелкомасштабных вариаций плазмы и межпланетного магнитного поля в магнитослое, а также анализ природы этих вариаций исключительно важны для понимания процессов взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и той роли, которую играет магнитослой в этих процессах. Магнитослой является интерфейсом между солнечным ветром и магнитосферой Земли, и именно модифицированная в магнитослое плазма и межпланетное магнитное поле взаимодействуют с магнитосферой, а не невозмущенный солнечный ветер.

В работе получены статистически обоснованные сведения о свойствах и зависимостях амплитуд и спектров вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в солнечном ветре, форшоке и в магнитослое.

Для интерпретации результатов наблюдений разработаны различные методики анализа данных, в частности, на основе существующих эмпирических и численных моделей магнитослоя и его границ предложена методика определения ориентации ударной волны к направлению межпланетного магнитного поля (угла  $\Theta_{Bn}$ ) по данным удаленного монитора солнечного ветра. Эта методика применима как в случаях, когда исследуется область перед фронтом ударной волны, так и за ней, т.е. в магнитослое, и была проверена как на отдельных событиях, так и на большом статистическом материале.

Полученные в ходе работы над диссертацией результаты могут быть применены для построения новых и уточнения уже существующих теорий возникновения и распространения средне- и мелко-масштабных возмущений плазмы и магнитного поля в магнитослое и их последующего взаимодействия с магнитосферой, теоретических и модельных исследований в области солнечно-земных связей, некоторых астрофизических задач, а также для совершенствования прогнозов "космической погоды".

Достоверность полученных в работе результатов обусловлена использованием и сопоставлением данных разнообразных спутниковых наблюдений, хорошим согласием экспериментальных данных и численных расчетов, обеспечивается строгостью используемых методов исследования и адекватностью рассмотренных физических моделей.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Область магнитослоя характеризуется интенсивными вариациями потока ионов и модуля магнитного поля в широком диапазоне временных масштабов (от долей секунды до часов). Амплитуда колебаний, в среднем, составляет около 10%, а в отдельных событиях может достигать величин порядка среднего значения параметра, т.е. колебания имеют преимущественно нелинейный характер.
2. Амплитуда вариаций плазмы и магнитного поля в магнитослое в диапазоне частот 0,02-1 Гц, в среднем, в 2-3 раза выше, чем в невозмущенном солнечном ветре, и растет с ростом вариаций в солнечном ветре. При этом, однако, вариации в магнитослое могут быть достаточно интенсивны даже на фоне совсем спокойного солнечного ветра. Таким обра-

зом, вариации параметров в магнитослое вовсе не являются простым усилением вариаций параметров солнечного ветра, напротив, в первую очередь они - проявление собственных процессов в магнитослое и на его границах, в частности, на ударной волне.

3. Существующие газодинамические и МГД-модели могут дать удовлетворительное описание положения магнитопаузы и ударной волны в зависимости от параметров межпланетной среды, а также среднего распределения параметров в магнитослое, однако они не позволяют предсказать наблюдаемые вариации этих параметров.
4. Уровень вариаций потока ионов примерно постоянен поперек магнитослоя на обоих его флангах. При этом наблюдается асимметрия распределения вариаций: вариации на утреннем фланге, в среднем, более интенсивны, чем на вечернем. Это обусловлено преобладанием в ориентации межпланетного магнитного поля направления вдоль спирали Паркера, вследствие чего ударная волна на утреннем фланге большую часть времени является квазипараллельной.
5. Ориентация межпланетного магнитного поля к околоземной ударной волне сильно воздействует на амплитудные и частотные характеристики турбулентности плазмы в магнитослое. При квазипараллельной ориентации наблюдаются интенсивные высокочастотные колебания потока ионов и модуля магнитного поля в диапазоне 0,02-1 Гц, в среднем, на уровне около 15%. Эти вариации примерно вдвое превышают вариации в магнитослое за квазиперпендикулярной ударной волной.

6. В соответствии с представленными данными одним из основных источников вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое в диапазоне частот 0,02-1 Гц является ударная волна, о чем свидетельствует, в частности, что:
- амплитуда флуктуаций сильно зависит от ориентации межпланетного магнитного поля к околоземной ударной волне;
  - спектральные свойства флуктуаций в магнитослое сильно отличаются по своим особенностям от спектров в солнечном ветре и форшоке, а также наблюдается существенное различие в спектрах вариаций за квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударными волнами.
7. За квазиперпендикулярной ударной волной при определенных условиях наблюдаются волны зеркальной моды, характеризующиеся, в частности, высоким уровнем вариаций магнитного поля вдоль его среднего направления. Эти волны присутствуют не только в подсолнечной области, но и на флангах магнитослоя.

## Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены автором на ряде научных конференций как внутри страны, так и за рубежом:

- 1) Международной конференции студентов и аспирантов WDS'00 (Прага, Чешская Республика, 2000 г.);
- 2) Международной конференции: COSPAR Colloquium "Plasma processes in the near-Earth space: INTERBALL and beyond" (г. София, Болгария, 2002 г.);
- 3) 27-ой Ассамблее Европейского геофизического союза EGS (г. Ницца, Франция, 2002 г.);

- 4) Ассамблее Американского геофизического союза AGU, (Сан-Франциско, США, 2002 г.);
- 5) Международном симпозиуме памяти профессора Ю.И. Гальперина "Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations" (Москва, 2003 г.);
- 6) Международной конференции "Magnetospheric Response to Solar Activity" (Карлов Университет, Прага, Чешская Республика, 2003 г.);
- 7) 5-ой международной конференции "Problems of Geocosmos" (Санкт-Петербург, 2004 г.);
- 8) 35-ой научной ассамблее COSPAR (Париж, Франция, 2004 г.);
- 9) Международной конференции по физике солнечно-земных связей (г. Иркутск, 2004 г.),

а также на семинарах в ИКИ РАН, СПбГУ, ИМЕХ (Болгария), MIT (США), CSSAR (Китай). Результаты опубликованы в 9 статьях в различных российских и зарубежных журналах.

### Личный вклад автора

Автором лично была разработана методика исследования, выполнены многочисленные расчеты и анализ экспериментальных данных по вариациям параметров в магнитосфере, а также проведено сравнение с теоретическими моделями. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены при определяющем участии диссертанта.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения. Общий объем диссертационной работы составляет 114 страниц, включая 41 рисунок, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 82 наименований.

## 2. Содержание работы

Во Введении сформулирована тема диссертации, обоснована ее актуальность, обозначены цели работы и направления исследований, описана структура диссертации, а также сделан краткий обзор уже имеющихся результатов в публикациях по теме исследования.

В первой главе диссертации представлено краткое описание проекта ИНТЕРБОЛ, данные которого легли в основу диссертации, - изложены особенности орбиты аппаратов, задачи проекта, дано краткое описание комплекса разнообразных приборов, позволявших проводить измерения магнитного поля, электронной и ионной компонент плазмы, определение потоков энергичных заряженных частиц в нескольких диапазонах энергий, исследование спектральных свойств осцилляций электрических и магнитных полей.

Дано подробное описание прибора ВДП – всенаправленного датчика плазмы, предназначенного для измерения величины интегрального потока ионов и состоявшего из шести цилиндров Фарадея, ориентированных в различных направлениях. Дано описание конструкции цилиндра Фарадея, его физических характеристик, особенностей измерения с его помощью потока ионов, а также методики обработки полученных данных. Именно измерения прибора ВДП и легли в основу решения задач данной диссертации.

Также приводится описание прибора ФМ-ЗИ – феррозондового магнитометра для измерения трех компонент вектора магнитного поля в космической плазме. Данные этого прибора также активно использовались в настоящей работе.

Приведены также краткие описания методики измерения на спутниках WIND, GEOTAIL и IMP-8. В этой главе также рассмотрен ряд методов анализа данных и решения поставленной задачи.

Вторая глава диссертации посвящена изложению результатов сравнительного анализа статистических свойств средне- и мелкомасштабных вариаций потока ионов солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в областях невозмущенного солнечного ветра, форшока и магнитослоя Земли.

Показано, что в магнитослое наблюдаются интенсивные и достаточно хаотичные вариации потока ионов и модуля магнитного поля в широком диапазоне частот даже на фоне спокойных условий в невозмущенном солнечном ветре.

Проведен статистический анализ 230 пересечений магнитослоя в период 1997-1999 гг. (около 1900 ч наблюдений), а также наблюдений в солнечном ветре в период 1996-1999 гг. (около 9000 ч наблюдений). На их основе получены оценки относительных амплитуд (величин относительного стандартного отклонения) среднемасштабных (0,0005-0,02 Гц) и мелкомасштабных (0,02-1 Гц) вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в этих областях. Показано, что на обоих масштабах вариации в магнитослое, в среднем, вдвое интенсивнее, чем в невозмущенном солнечном ветре.

Был также проведен анализ среднемасштабных вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое по данным спутника ИНТЕРБОЛ-1 в сравнении с вариациями в солнечном ветре по данным одновременных измерений на аппарате WIND (сдвинутых на время распространения потока плазмы от одного аппарата к другому). Показано, что вариации в магнитослое возрастают с ростом вариаций в солнечном ветре и всегда превышают их по величине, а также могут быть чрезвычайно интенсивными даже на тех интервалах, где солнечный ветер возмущен очень слабо. Таким образом, доказано, что значительная часть вариаций плазмы и магнитного поля в магнитослое не является просто усилением вариаций межпланетной среды, а рождается внутри этой области, либо на ее границах.

Было также проведено сопоставление данных спутниковых измерений потока ионов и модуля магнитного поля с результатами численных моделей. Для сопоставления с результатами широко известной модели Спрайтера была разработана оригинальная методика определения положения спутника в магнитослое относительно его границ в зависимости от условий в солнечном ветре – значений скорости и плотности плазмы, а также величины и знака  $V_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля. Эта методика позволила получать модельные профили параметров плазмы и магнитного поля для реальных пересечений магнитослоя спутником ИНТЕРБОЛ-1. Сопоставление измеренных параметров и их профилей вдоль траектории аппарата, предсказанных по модели Спрайтера, продемонстрировало качественное сходство в их поведении – спад потока ионов и рост модуля магнитного поля по направлению от ударной волны к магнитопаузе. В то же время в магнитослое наблюдаются достаточно интенсивные колебания, поведение которых никак не отражается в модельных расчетах, т.е. их происхождение не обусловлено простым лишь усилением вариаций в солнечном ветре и не описывается в рамках газодинамической теории.

Для более надежного сопоставления была также рассмотрена более современная трехмерная модель Карталева, включающая ряд магнитных эффектов. В этой модели, для заданных условий в солнечном ветре, распределение параметров внутри магнитослоя и положение его границ – магнитопаузы и ударной волны – получаются самосогласованным образом как часть решения. Модель позволила достаточно точно вычислить моменты пересечения границ магнитослоя, а также предсказать с хорошей точностью средние величины параметров и структуру течения плазмы в магнитослое. Однако значительная часть наблюдаемых в магнитослое колебаний оказалась проявлением процессов, которые никак не учитываются этой моделью.

Таким образом, показано, что существующие модели позволяют описать лишь основные характеристики течения плазмы в магнитослое: положения его границ и средние значения параметров. Модели также позволяют описывать отклик магнитослоя на резкие изменения в солнечном ветре: скачки плотности и скорости, приводящие как к аналогичному изменению этих параметров в магнитослое, так и к движению магнитослоя как целого относительно спутника. Однако собственные вариации параметров в магнитослое и модификация вариаций солнечного ветра на ударной волне остаются за рамками их возможностей, главным образом, вследствие неучета ряда принципиальных процессов на ударной волне и внутри магнитослоя, таких как кинетические эффекты, динамика потенциального барьера на ударной волне в зависимости от внешних условий, анизотропия функций распределения частиц, и других процессов.

Было также проведено сопоставление данных измерений параметров плазмы и магнитного поля в солнечном ветре с результатами одновременных измерений в магнитослое, причем сразу на нескольких космических аппаратах, разнесенных на расстояния от 0,6 до 30 радиусов Земли. Такое сопоставление позволяет изучить динамику прохождения плазмы из области невозмущенного солнечного ветра в магнитослой, модификацию характера ее течения на ударной волне и в ходе дальнейшего распространения внутри магнитослоя. Было показано, что резкие и большие по амплитуде скачки (такие, как на величину свыше 30%) потока ионов солнечного ветра и модуля межпланетного магнитного поля также наблюдаются и в магнитослое, причем имеют схожие фронты. Однако, как правило, на эти изменения накладываются собственные колебания параметров в магнитослое на самых различных пространственных и временных масштабах. Причем эти колебания могут появляться даже на фоне спокойных условий в солнечном ветре, и в отдельных

событиях их амплитуда достигает величин свыше 50%. Они сносятся течением плазмы и могут быть достаточно долгоживущими в зависимости от пространственного масштаба этих колебаний. При этом течение плазмы носит преимущественно турбулентный характер.

Во второй главе было также изучено пространственное распределение мелкомасштабных вариаций внутри магнитослоя. При помощи разработанной методики определения положения аппарата относительно границ магнитослоя в зависимости от поведения параметров межпланетной среды удалось получить радиальные профили вариаций потока ионов по направлению от ударной волны к магнитопаузе, причем отдельно для утреннего и вечернего флангов магнитослоя. Показано, что амплитуда колебаний примерно постоянна поперек магнитослоя и несколько выше на утреннем фланге, чем на вечернем. Таким образом, мелкомасштабные вариации либо рождаются внутри самого магнитослоя более или менее однородно по всей области, либо возникают на ударной волне и затем сносятся вниз по потоку без заметного затухания. В пользу последней гипотезы служит факт некоторого возрастания уровня вариаций на утреннем фланге по направлению к ударной волне и его более высокое значение (~15%) по сравнению с уровнем вариаций на вечернем фланге, так как в солнечном ветре единственным источником, способным внести асимметрию в распределение вариаций на двух флангах магнитослоя, является ориентация межпланетного магнитного поля, вектор которого на орбите Земли наклонен, в среднем, на угол около  $45^{\circ}$  к линии Земля - Солнце.

В третьей главе приведены результаты исследования зависимости мелкомасштабных вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое от внешних условий, в частности, от угла  $\Theta_{Вп}$ , т.е. от угла между вектором межпланетного магнитного поля

и нормалью к околосолнечной ударной волне. При этом области ударной волны, где угол  $\Theta_{Вн} > 45^{\circ}$  или  $\Theta_{Вн} < 45^{\circ}$ , называются, соответственно, квазиперпендикулярными или квазипараллельными.

Ориентация межпланетного магнитного поля к ударной волне оказывает существенное влияние на кинетические процессы на ее фронте, а также определяет наличие области форшока, где взаимодействие отраженных от ударной волны частиц солнечного ветра с набегающим потоком солнечного ветра приводит к возбуждению интенсивных УНЧ-колебаний плотности ионов и магнитного поля. Однако влияние ориентации межпланетного магнитного поля распространяется и на область за фронтом ударной волны, т.е. на магнитослой.

Одна из серьезных трудностей при исследовании этого вопроса заключается в том, что для нахождения угла  $\Theta_{Вн}$ , при произвольном положении спутника внутри магнитослоя, необходимо искать нормаль к ударной волне в той ее точке, которая связана с положением спутника линией тока плазмы в магнитослое, т.е. где соответствующий объем плазмы, войдя в магнитослой, достигает затем спутника. Для этого была разработана специальная методика: на основе измерений параметров невозмущенного солнечного ветра находилось положение спутника в магнитослое по модели Спрайттера и затем, при помощи модельных расчетов распределения линий тока плазмы внутри магнитослоя, находилась соответствующая точка модельной ударной волны и определялся вектор нормали к ней. После этого, на основе измерений направления вектора межпланетного магнитного поля, вычислялся угол  $\Theta_{Вн}$  между этим вектором и нормалью к ударной волне в указанной точке. Эта методика позволила определять изменение угла  $\Theta_{Вн}$  вдоль траектории спутника внутри магнитослоя.

В первой части этой главы было рассмотрено влияние угла  $\Theta_{Вн}$  на вариации потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое

на примере двух его пересечений спутником ИНТЕРБОЛ-1. При этом в обоих случаях измерения также затрагивали области невозмущенного солнечного ветра и форшока. В обоих рассмотренных примерах наблюдается хорошее согласие расчетов угла  $\Theta_{Вп}$  (по измерениям аппаратов WIND или ACE) и поведения потока ионов и модуля магнитного поля в солнечном ветре и в магнитослое. Это проявляется в том, что смена ориентации ударной волны на тех интервалах, когда аппарат был перед ударной волной, хорошо совпадает с моментами появления и исчезновения области форшока, в которой наблюдаются значительно более интенсивные (с амплитудами  $\sim 10-30\%$ ), чем в невозмущенном солнечном ветре, и коррелированные (с коэффициентами корреляции  $R(F/B) > 0,8$ ) вариации потока ионов и магнитного поля в диапазоне частот 0,005-1 Гц. Это, в целом, свидетельствует о применимости измерений удаленных мониторов при расчетах различных параметров вблизи ударной волны. Один из примеров содержит также одновременные измерения с аппарата IMP-8, находившегося на протяжении всего рассмотренного интервала сравнительно недалеко от спутника ИНТЕРБОЛ-1. Измерения магнитного поля на спутнике IMP-8 подтвердили расчеты угла  $\Theta_{Вп}$  по данным WIND и ACE – даже после пересечения ударной волны спутником ИНТЕРБОЛ-1, аппарат IMP-8 продолжал находиться в форшоке, о чем свидетельствовали интенсивные колебания магнитного поля. Момент исчезновения этих колебаний на IMP-8 совпал с расчетным изменением угла  $\Theta_{Вп}$  по данным ACE. Все эти изменения ориентации ударной волны сопровождались изменениями характера колебаний параметров в магнитослое – при переходе от квазипараллельной ориентации к квазиперпендикулярной наблюдался резкий спад (в 2-3 раза) амплитуды колебаний потока ионов и модуля магнитного поля, а также изменялись их спектральные характеристики. Коэффициенты кросс-корреляции этих параметров также показали явную зависимость от углов  $\Theta_{Вп}$  – за квази-

параллельной ударной волной коэффициент  $R(F/B)$  составлял  $\sim 0,3$ , тогда как за квазиперпендикулярной –  $R(F/B)$  становился отрицательным или был близок к нулю.

Были также проведены статистический анализ влияния угла  $\Theta_{Bn}$  на вариации в магнитослое, а также сопоставление этих вариаций с вариациями в невозмущенном солнечном ветре и форшоке. Для этого к результатам статистического анализа, изложенным во второй главе, были добавлены около 220 ч измерений в форшоке, а измерения в магнитослое были отселектированы в зависимости от угла  $\Theta_{Bn}$ . ( $>45^\circ$  или  $<45^\circ$ ), вычисляемого по данным аппаратов WIND и ACE. Как и в предыдущей главе, для оценки уровня этих вариаций проводился расчет величин относительного стандартного отклонения на 1-минутных интервалах по измерениям с разрешением 1с.

Гистограммы распределений вариаций потока ионов в солнечном ветре, форшоке и магнитослое (отдельно за квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударными волнами) показали, что относительные мелкомасштабные вариации потока в невозмущенном солнечном ветре, в среднем, находятся на уровне  $\sim 3\%$  и почти в 5 раз ниже, чем в области форшока. Вариации потока в магнитослое за квазиперпендикулярной ударной волной, в среднем, составляют около 7% и почти в 1,5 раза ниже, чем за квазипараллельной ( $\sim 11\%$ ).

Кривые зависимости величин потока ионов и модуля магнитного поля и их мелкомасштабных вариаций от угла  $\Theta_{Bn}$  продемонстрировали быстрый спад уровня относительных вариаций с ростом этого угла. При этом вариации и потока ионов, и модуля магнитного поля при  $\Theta_{Bn} \sim 0^\circ$  (т.е., за чисто квазипараллельной ударной волной) оказались вдвое выше, чем при  $\Theta_{Bn} \sim 90^\circ$  (т.е., за чисто квазиперпендикулярной). Так, для потока ионов их величины составили 12 и 6% соответственно, а для модуля магнитного поля – 30 и 12%.

Кроме того, была обнаружена слабая зависимость самой величины потока ионов от угла  $\Theta_{Вп}$  – величина потока монотонно возрастает на величину  $\sim 20\%$  с ростом угла от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Это косвенно свидетельствует об отражении части ионного потока от фронта квазипараллельной ударной волны, либо о перестройке крупномасштабной структуры магнитослоя в зависимости от величины угла  $\Theta_{Вп}$ .

Приведены результаты анализа спектров мощности быстрых вариаций потока ионов и модуля магнитного поля (на масштабах 1-1000 с) в солнечном ветре, форшоке и магнитослое (отдельно за квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударными волнами). Спектры мощности в невозмущенном солнечном ветре имеют наклон около  $k \sim -1,0$ , т.е. здесь мелкомасштабные вариации находятся практически на уровне аппаратных шумов прибора, связанных главным образом с величиной квантования на выходе аналогоцифрового преобразователя, а единственный значимый пик на частоте  $f \sim 0,01$  Гц на спектре вариаций магнитного поля обусловлен модуляцией измерений вращением аппарата вокруг своей оси. Спектры мощности вариаций в форшоке, квазипараллельном и квазиперпендикулярном магнитослое выглядят достаточно однородно без явно выраженных отдельных пиков, однако, и это очень существенно, они сильно отличаются друг от друга наклонами и мощностью вариаций.

В форшоке наклоны спектров очень крутые, причем наклон спектра вариаций потока ( $k_F = -3,0$ ) больше, чем модуля магнитного поля ( $k_B = -2,4$ ). В этой области доминируют быстрые магнитозвуковые волны (о чем свидетельствуют, в частности, высокие положительные значения корреляции вариаций потока ионов и модуля магнитного поля). В квазиперпендикулярном магнитослое спектры также крутые, однако здесь наклон спектра вариаций потока ионов ( $k_F = -2,1$ ), наоборот, меньше, чем у магнитного поля ( $k_B = -2,6$ ). В ква-

зипараллельном магнитослое наклоны спектров близки друг к другу и практически совпадают с колмогоровским с  $k=-1,8 \div -2,0$ .

Таким образом, течение плазмы в магнитослое сильно возмущено, причем в квазипараллельном магнитослое преобладает развитая турбулентность без каких-либо отдельно выраженных волновых мод. Спектральные и корреляционные характеристики вариаций параметров за квазипараллельной ударной волной сильно отличаются от этих характеристик в области форшока, т.е., вопреки довольно распространенному мнению, они не являются лишь усиленными вариациями форшока, а генерируются на ударной волне и затем сносятся течением плазмы вниз по потоку. Течение плазмы в магнитослое за квазиперпендикулярной волной также турбулентно, однако при определенных условиях, как будет показано ниже, здесь могут быть хорошо выражены отдельные волновые моды.

В четвертой главе приведены результаты исследования колебаний магнитного поля большой амплитуды и колебаний плазмы в магнитослое за квазиперпендикулярной ударной волной. Как было показано на ряде примеров и на большой статистике, в среднем, колебания плазмы и магнитного поля в квазиперпендикулярном магнитослое сравнительно малы. Однако в ряде событий в таком магнитослое наблюдаются весьма интенсивные вариации магнитного поля. Изучались волновые свойства этих колебаний, в том числе поляризация, спектральные особенности, корреляция колебаний магнитного поля с вариациями потока, волновые векторы и др.

Для проведения этого анализа были рассмотрены около 50 пересечений магнитослая за квазиперпендикулярной ударной волной спутником ИНТЕРБОЛ-1, на которых наблюдались достаточно интенсивные колебания магнитного поля. В результате было отобрано несколько типичных примеров.

Для одного из наиболее “четких” событий был проведен детальный анализ измерений потока ионов и магнитного поля в магнитослое на спутнике ИНТЕРБОЛ-1. Это событие выгодно отличается от других тем, что условия в солнечном ветре оставались практически неизменными на протяжении всего пересечения магнитослоя. В качестве монитора невозмущенного солнечного ветра использованы данные аппарата Geotail, находившегося недалеко перед фронтом ударной волны и обеспечивавшего все необходимые параметры для сопоставления с измерениями в магнитослое и для надежного определения угла  $\Theta_{Вп}$ . Эти измерения показывают, что ИНТЕРБОЛ-1 на протяжении всего пересечения магнитослоя находился за квазиперпендикулярной ударной волной с  $\Theta_{Вп} \sim 70^\circ$ . Коэффициент кросс-корреляции вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в диапазоне 1-300 с был отрицательным и изменялся на протяжении всего пересечения от  $R(F/B) = -0,3$  вблизи ударной волны до  $R(F/B) = -0,9$  вблизи магнитопаузы. Вариации потока ионов находились в среднем на уровне 5-7%, что характерно для квазиперпендикулярного магнитослоя, однако вариации модуля магнитного поля достигали 30-50%, при этом направление магнитного поля держалось достаточно стабильно. Расчет вариаций в направлении вдоль среднего магнитного поля и поперек ему показал, что сразу после пересечения ударной волны в магнитослое доминировали волны сжатия – продольные колебания магнитного поля вдвое превышали поперечные. По мере приближения к магнитопаузе это доминирование усиливалось – вблизи магнитопаузы амплитуда продольных колебаний превышала амплитуду поперечных в 7 раз, т.е. колебания стали почти чисто волнами сжатия.

Для более глубокого анализа были рассмотрены несколько коротких (~10 мин.) интервалов на этом пересечении. Исследование этих интервалов с применением метода наименьших вариаций показало, что наблюдаемые колебания магнитного поля являются ли-

нейно-поляризованными волнами с вектором максимальных вариаций направленным почти вдоль направления среднего магнитного поля и наклоненным к нему под углом  $\Theta_{KB} \sim 10^\circ$ .

Спектры мощности вариаций потока ионов, а также продольной и поперечной компонент магнитного поля показали, что в области частот  $f < 0,1$  Гц мощность продольных вариаций почти на порядок превышает мощность поперечных и лишь в высокочастотной области (0,1-1 Гц) их мощности почти сравниваются. Наклоны спектров мощности продольных колебаний магнитного поля составляли  $k_{Bpar} \sim -3,4 \div -4,1$ , наклоны поперечных  $k_{Bper} \sim -2,2 \div -3,1$ , для потока ионов:  $k_F \sim -2,3 \div -3,1$ , причем во всех рассмотренных случаях наклоны спектров поперечных вариаций магнитного поля и потока ионов совпадали. Таким образом, в рассмотренном случае условия в плазме были неустойчивы для возбуждения линейно поляризованных волн сжатия на частотах ниже 0,1 Гц, отрицательно коррелирующих с колебаниями потока ионов. Волновые векторы этих волн лежат в плоскости, практически перпендикулярной (с углами  $\Theta_{KB} \sim 5-15^\circ$ ) к среднему направлению магнитного поля. По совокупности всех этих признаков данные волны соответствуют волнам зеркальной моды.

Аналогичные результаты получены при анализе данных ряда других пересечений магнитослоя, в том числе и на его фланге. На отдельных интервалах этих пересечений регистрировались колебания, которые по совокупности свойств идентичны тем, что наблюдались в описанном выше случае, и также могут характеризоваться как волны зеркальной моды. Весьма существенно, что волны зеркальной моды обнаруживались не только в подсолнечной области, но и на флангах магнитослоя (например, при  $X_{SE} = -1 R_E$ ). При этом не наблюдалось заметной разницы в амплитуде и других свойствах этих волн в зависимости от положения спутника в магнитослое.

Вопрос об условиях возникновения волн зеркальной моды не так прост. В публикациях по теории этих волн критерием их возбуж-

дения является наличие достаточной анизотропии ионов в плазме:  $T_{\perp}/T_{\parallel} > 1 + 1/\beta_{\perp}$ , и максимум степени роста зеркальной неустойчивости достигается при конечных значениях  $k_{\perp}\rho_i \leq 1$ . Однако в реальных условиях наблюдения набор имеющихся данных довольно ограничен и не всегда позволяет оценить все требуемые параметры, а колебания магнитного поля никогда не бывают “чистыми”, а всегда оказываются совокупностью нескольких видов волн. Поэтому получить надежные сведения о причинах раскачки тех или иных видов колебаний весьма затруднительно.

В Заключении подведены итоги, сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. В области магнитослоя наблюдаются интенсивные вариации различных параметров (потока ионов, величины и ориентации магнитного поля) в широком диапазоне временных масштабов. В среднем, амплитуда мелко- и среднemasштабных вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое в 2-3 раза выше, чем в невозмущенном солнечном ветре.
2. Вариации в магнитослое возрастают с ростом вариаций в солнечном ветре, однако они могут быть достаточно интенсивны даже на фоне абсолютно спокойных условий в солнечном ветре. Таким образом, все сильные возмущения солнечного ветра находят свое проявление в магнитослое, однако далеко не все вариации параметров в магнитослое имеют своим источником вариации в солнечном ветре.
3. Существующие численные модели позволяют предсказать средние значения потока ионов в магнитослое, в зависимости от условий в солнечном ветре, а также могут в ряде случаев обеспечить удовлетворительный расчет положений магнитопаузы и ударной волны, однако они не позволяют описать наблюдаемые вариации параметров – как мелко-, так и средне-

масштабные. Значительная часть вариаций является отражением процессов, не учитываемых современными газодинамическими, а также магнитогидродинамическими моделями.

4. Как на мелких, так и на средних масштабах вариации в магнитослое сохраняются сравнительно неизменными лишь тогда, когда характерное время возмущения больше или порядка времени распространения плазмы от одной исследуемой точки внутри магнитослоя к другой. Возмущения на масштабах времени, меньших времени распространения плазмы, никак не коррелируют друг с другом. Таким образом, течение плазмы в магнитослое носит преимущественно турбулентный характер и характер турбулентности не связан с турбулентностью в солнечном ветре.
5. Вариации потока ионов примерно постоянны поперек магнитослоя на обоих его флангах. При этом наблюдается асимметрия распределений вариаций: вариации на утреннем фланге немного более интенсивны, чем на вечернем. Это, вероятнее всего, обусловлено преобладанием в ориентации межпланетного магнитного поля направления вдоль спирали Паркера, вследствие чего ударная волна на утреннем фланге большую часть времени является квазипараллельной.
6. Как следует из анализа отдельных событий и достаточно большой статистики, ориентация межпланетного магнитного поля к околоземной ударной волне сильно воздействует на характер турбулентности плазмы в магнитослое. При квазипараллельной ориентации наблюдаются интенсивные высокочастотные колебания потока ионов и модуля магнитного поля в диапазоне 0,02-1 Гц в среднем на уровне около 15%. Эти вариации вдвое превышают вариации в магнитослое за квазиперпендикулярной ударной волной.

7. В соответствии с представленными данными одним из основных источников вариаций потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое в диапазоне частот 0,02-1 Гц является ударная волна, поскольку:
- амплитуда флуктуаций в магнитослое сразу же после пересечения ударной волны в несколько раз превосходит амплитуду флуктуаций в невозмущенном солнечном ветре;
  - амплитуда флуктуаций сильно зависит от ориентации межпланетного магнитного поля к околоземной ударной волне;
  - спектральные свойства флуктуаций в магнитослое сильно отличаются по своим особенностям от спектров в солнечном ветре или форшоке, т.е. эти флуктуации являются проявлением собственных процессов в магнитослое и на его границах, в частности, на ударной волне.
8. Во многих пересечениях магнитослоя спутником ИНТЕРБОЛ-1 наблюдались интервалы с интенсивными колебаниями модуля магнитного поля за квазиперпендикулярной ударной волной. Было обнаружено, что в ряде случаев эти колебания обладают следующими свойствами:
- вариации модуля магнитного поля находятся в противофазе с вариациями потока ионов;
  - в низкочастотной области при  $f < 0,1$  Гц волны имеют линейную поляризацию и являются волнами сжатия, т.е. вариации в направлении вдоль среднего магнитного поля значительно превышают вариации в поперечном направлении;
  - наклоны спектров мощности продольных колебаний магнитного поля значительно превышают колмогоровский и составляют  $k_{\text{par}} \sim -3,4 \div -4,1$ , а наклоны спектров поперечных колебаний совпадают с наклонами спектров потока ионов и составляют  $k_F \sim -2,3 \div -2,8$ .

Эти колебания наблюдаются в различных областях магнитослоя, как близких к подсолнечным, так и на флангах, и являются проявлением волн зеркальной моды.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Shevyrev N.N., Zastenker G.N., Safrankova J., Nemecek Z., Pisoft P. Statistical study of the fast ion flux variations in the magnetosheath and solar wind // Proceedings of contributed papers. WDS'00. part 2 / Ed. by J. Safrankova. Prague. MFF UK. 2000. P.208-213.
2. Застенкер Г.Н., Шевырев Н.Н., Ноздрачев М.Н. О больших вариациях плазмы и магнитного поля в магнитослое, как возможном источнике магнитосферных возмущений // Сборник "Солнечно-земная физика". Иркутск. 2002. Вып.2 (115). С.187-189.
3. Шевырев Н.Н., Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З., Гайош М., Ричардсон Дж.Д. Большие и быстрые изменения параметров в магнитослое: 3. Амплитуды и поперечные профили низкочастотных и высокочастотных вариаций плазмы и магнитного поля // Космические исследования. 2002. Т.40. №4. С.361-373.
4. Shevyrev, N.N., Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., Němeček Z., Šafránková J., Richardson J.D. High and low frequency large amplitude variations of plasma and magnetic field in the magnetosheath: radial profile and some features // Advances in Space Research. 2003. V.31/5. P.1389.
5. Shevyrev N.N., Eiges P.E., Zastenker G.N., Richardson J.D. Comparison of ULF Plasma and Magnetic Field Waves Inside the Fore-shock and Magnetosheath // Proceedings of the conference in memory of Yuri Galperin "Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations". CAWSES Handbook-1. Boulder. 2004. С.242-246.

6. Shevyrev N.N., Zastenker G.N., Eiges P.E. Magnetosheath Low-Frequency Waves Observed by INTERBALL-1 // Proceedings of the 5-th International Conference "Problems of Geocosmos". St. Petersburg. 2004. C.158-161.
7. Shevyrev N.N., Zastenker G.N. Some Features of the Plasma Flow in the Magnetosheath Behind Quasi-Parallel and Quasi-Perpendicular Bow Shocks // Planetary and Space Science. 2005. V.53. P.95-102.
8. Dobрева P.S., Kartalev M.D., Shevyrev N.N., Zastenker G.N., Comparison of a New Magnetosphere - Magnetosheath Model with Interball-1 Magnetosheath Plasma Measurements // Planetary and Space Science. 2005. V.53. P.117-125.
9. Шевырев Н.Н. Волны зеркальной моды в магнитослое Земли по наблюдениям на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 // Космические исследования. 2005. Т.43. №4. С.306-313.

055(02)2

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

---

Подписано к печати 18.08.2005

---

Заказ

Формат 70x108/32 Тираж 100 1,2 уч.-изд.л.