

На правах рукописи

ПЕТРУКОВИЧ Анатолий Алексеевич

Динамика и структура магнитного хвоста
Земли в зависимости от межпланетного
магнитного поля

(Специальность 01.03.03 – Физика Солнца)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва

2003

Работа выполнена в Институте космических исследований
Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук Ю.И.Зецер (ИДГ РАН),

доктор физ.-мат. наук М.И.Панасюк (НИИЯФ МГУ),

доктор физ.-мат. наук А.С.Потапов (ИСЗФ СО РАН).

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт физики СПбГУ им.
В.А. Фока

Защита состоится 20 июня 2003 г. в 11 часов на заседании
Диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических
исследований РАН по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная
ул., 84/32, 2-ой подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан " __ " _____ 2003 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.03

кандидат физ.-мат. наук

Т.М.Буринская

Диссертация содержит результаты экспериментальных исследований структуры и динамики геомагнитного хвоста Земли, проведенных на основе наблюдений высокоапогейных спутников, сопутствующих наземных измерений и данных мониторинга солнечного ветра.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Проблематика физики солнечно-земных связей привлекает в последнее время пристальный интерес исследователей. С развитием космической техники и космического эксперимента количество и качество наблюдений, выполненных непосредственно в околоземной плазме, значительно возросли, создав надежную основу для углубления нашего понимания гелиосферы и магнитосферы Земли.

Как известно, при высокой стабильности общего потока солнечной энергии, корпускулярное излучение Солнца - солнечный ветер, а также коротковолновое ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, значительно варьируют как в среднем, в ходе 11-летнего цикла солнечной активности, так и на более малых масштабах времени в зависимости от структуры и динамики солнечного магнитного поля.

Солнечный ветер взаимодействует с магнитным полем Земли, образуя земную магнитосферу. В целом магнитосфера сохраняет форму искаженного диполя с вытянутым в анτισолнечном направлении магнитным хвостом, а ее размер и очертания в первом приближении определяются балансом давлений солнечного ветра и геомагнитного поля. Однако, наиболее заметные по энергетике явления в магнитосфере, такие как магнитные суббури и бури, связаны с воздействием на нее межпла-

нетного магнитного поля (ММП), энергия которого составляет всего лишь около 2% динамической энергии солнечного ветра.

В частности, когда ММП антипараллельно геомагнитному полю в приэкваториальной части магнитосферы (т.н. "южное" ММП) происходит пересоединение (аннигиляция) силовых линий ММП и геомагнитного поля вблизи подсолнечной части магнитопаузы. Это приводит к эрозии магнитосферы на дневной стороне и накоплению магнитного потока в геомагнитном хвосте. При описании крупномасштабных процессов здесь можно использовать понятие о силовых линиях магнитного поля, так как в бесстолкновительной плазме в целом справедливо приближение магнитогидродинамики.

Процесс пересоединения в хвосте магнитосферы, где также образуется конфигурация с противоположно направленными магнитными полями, протекает спорадически, проходя через периодические интервалы накопления и сброса - геомагнитные суббури. Периодичность суббурь определяется, в первую очередь, случайной вариабельностью направления ММП. Альтернативным суббурям режимом динамики геомагнитного хвоста при южном ММП, является постоянная диссипация энергии - усиленная конвекция, которая не будет рассматриваться в данной диссертации. При южном ММП внешняя магнитосфера вовлекается в процесс конвекции, транспортирующий пересоединенный поток сначала в хвост, а затем возвращающий его к Земле и на дневную сторону магнитосферы. Магнитные бури - катастрофические явления в магнитосфере, вызываются аномальными усилениями солнечного ветра и ММП. При северном ММП структура пересоединения в магнитосфере изменяется, сдвигаясь на более высокие широты, а динамика геомагнитного хвоста становится более спокойной.

В динамической открытой магнитосфере Земли, геомагнит-

ный хвосте играет центральную роль в процессах накопления, преобразования и диссипации энергии Солнца. Поэтому структура хвоста и его динамика, в частности, во время суббурь, вызывают значительный интерес в рамках гелио-геофизических исследований.

Околоземная и межпланетная среда являются единственной природной лабораторией, в которой возможно непосредственное изучение бесстолкновительной плазмы, в условиях, которые недостижимы 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.

Помимо чисто научного интереса, проблематика солнечно-земных связей представляет и практический интерес, в настоящее время обобщаемый под понятием "космическая погода". Сфера обитания современного человека постепенно расширяется, включая в себя и околоземный космос. Проявления солнечной активности, воздействуя на магнитосферу Земли, приводят к увеличению радиационного воздействия на спутники и космонавтов, нарушениям в системах космической связи и навигации, наводкам в системах электроснабжения, воздействуют на климат и здоровье людей. Знание динамики магнитосферы и механизмов ее взаимодействия с солнечным ветром и ММП позволит проводить прогноз космической погоды и принимать необходимые защитные меры.

Цель работы состоит в экспериментальном изучении (по данным измерений на космических аппаратах) физики и динамики процессов в хвосте магнитосферы Земли (на расстояниях 70 000–250 000 км от Земли). При этом основное внимание уде-

лено выработке количественного подхода к описанию событий, и, в частности, изучению:

- 1) динамики геомагнитного хвоста во время геомагнитных суббурь;
- 2) зависимости геомагнитной активности от параметров солнечного ветра и ММП;
- 3) проблемы расположения зоны внезапного начала суббури;
- 4) структуры конвекции в геомагнитном хвосте.

Новизна работы

В диссертации приведены результаты, полученные автором в период с 1995 по 2002 год. Большая часть их до сих пор отвечает критерию новизны.

К ним относятся выводы о:

- 1) сходстве динамики и характеристик суббурь на сжатом овале с обычными суббурями и их связи с ММП азимутальной ориентации;
- 2) различиях в длительности фазы накопления суббурь в широком диапазоне их амплитуд, в частности, постоянстве времени накопления у очень больших суббурь, и возможных объяснениях наблюдаемых закономерностей;
- 3) форме зависимости геомагнитного индекса AL от электрического поля и динамического давления солнечного ветра;
- 4) степени применимости измерений солнечного ветра в удаленной от Земли точке для количественного анализа суббурь;
- 5) пространственно-временной локализации внезапного начала суббури в ближнем хвосте магнитосферы за 1–2 минуты до его наземных проявлений;
- 6) Различиях во временном ходе полного давления, измеренного в долях хвоста и в плазменном слое во время суббурь.

Также, впервые были экспериментально обнаружены и изу-

чены:

- 1) вертикальная стационарная конвекция плазмы в плазменном слое;
- 2) тонкие вертикальные токовые слои в плазменном слое при северном ММП;
- 3) Эффект нагрева плазменного слоя в ходе фазы накопления суббури.

Практическая и научная ценность работы

Введенные в общедоступный научный оборот сведения о характеристиках суббурь, процессах и структурах в плазменном слое геомагнитного хвоста позволяют уточнить роль различных физических механизмов, определяющих динамику плазмы магнитосферы Земли. Выработанный комплексный подход к анализу этой динамики делает возможным переход к построению количественных моделей индивидуальных суббурь и проведению сравнительного анализа.

Выявленная картина самоорганизации магнитного поля и плазмы в сложной системе магнитосферы может быть использована для уточнения представлений о строении астрофизических объектов, наблюдаемых только дистанционными методами.

К практическим важным результатам относятся выводы о степени достоверности измерений ММП удаленным от Земли спутником, а также уточнение вида функции связи солнечного ветра и состояния магнитосферы. Они могут быть непосредственно применены для увеличения надежности краткосрочного прогноза космической погоды. Частично эти наработки уже реализованы в системе прогноза космической погоды ИКИ РАН (Адрес в Интернете: <http://www.iki.rssi.ru/forecast>).

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены

в более чем 60 докладах на различных научных конференциях и семинарах внутри страны и за рубежом:

- на ассамблеях COSPAR (32-й в Нагое, Япония, 1998; 33-й в Варшаве, Польша, 2000; 34-й в Хьюстоне, США, 2002);
- на ассамблеях EGS (23-й в Ницце, Франция, 1998; 24-й в Гааге, Нидерланды, 1999; 26-й в Ницце, Франция, 2001; 27-й в Ницце, Франция, 2002; 28-й в Ницце, Франция, 2003);
- на конференции Геокосмос (С.Петербург, 1998);
- 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);
- на конференциях Американского геофизического союза (в Канадзаве, Япония, 1996; в Лонавале, Индия, 2001);
- на международных конференциях по суббурям (4-ой в Хамана-ко, Япония, 1998; 5-ой в Санкт-Петербурге, Россия, 2000);
- на ежегодных конференциях Американского геофизического союза 1996, 1998, 1999 года;
- на всероссийской конференции по физике солнечно-земных связей, Иркутск, 2001;
- на третьей российско-китайской конференции по космической погоде, Иркутск, 2003;

а также на некоторых других и на семинарах ИКИ РАН, СПбГУ, UCLA (США), IWF (Австрия), MPE (Германия), FMI (Финляндия), ISAS (Япония).

Личный вклад автора

Космические проекты проводятся большими, часто международными, коллективами. Отдавая должное вкладу большого количества специалистов в подготовку и проведение проектов, необходимо отметить, что автор принимал непосредственное участие в создании наземного математического обеспечения для обработки информационного потока экспериментов. 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, 7 глав, заключения и списка литературы, содержит 200 страниц (включая 52 рисунка, 7 таблиц и библиографию из 150 наименований).

Во введении сформулированы проблематика, актуальность и цели исследований геомагнитного хвоста Земли, дана общая характеристика работы.

В первой главе приведен обзор современного состояния знаний о структуре хвоста магнитосферы Земли и зависимости его динамики от межпланетного магнитного поля. Описаны используемые в диссертации источники экспериментальных данных, обсуждены некоторые особенности различных методов измерений и возможные способы сопоставления наблюдений. Также, затронут вопрос о русскоязычной терминологии, применяемой в тексте диссертации.

Во второй главе рассмотрены проблемы достоверности измерений различных характеристик солнечного ветра и их влияния на динамику магнитосферы. Доминирующая роль

межпланетной среды в управлении геомагнитной активностью была установлена в еще в самом начале космических исследований. Тем не менее, несмотря на общее понимание проблемы, до сих пор не существует ответов на многие конкретные вопросы.

В частности, из-за естественной изменчивости солнечного ветра, его характеристики, измеренные в удаленной от Земли точке, могут отличаться от характеристик в зоне взаимодействия с магнитосферой Земли. Результаты корреляционного анализа, выполненного в предыдущих исследованиях, не позволяют сделать заключение о том, насколько зарегистрированные различия важны с точки зрения их влияния на геомагнитную обстановку. В этой связи, целесообразно оперировать при сравнении функцией параметров солнечного ветра и ММП, которая могла бы служить еще и характеристикой воздействия солнечного ветра на магнитосферу (т.н. функцией связи). Совокупности всех требований наиболее полно, на наш взгляд, удовлетворяет эpsilon-параметр, рассчитываемый как вектор Пойнтинга электромагнитной энергии, попадающей в магнитосферу.

Для проведения статистического анализа были отобраны интервалы (в течение 1995–1999 гг.), во время которых одновременно с измерениями солнечного ветра на КА ИНТЕРБОЛ-1, имелись также данные КА WIND (всего более 5240 ч наблюдений). Для каждой пары одновременных значений эpsilon-параметра, проинтегрированного по 90-минутным интервалам (имеющих размерность энергии), вычислялась их относительная разница R . Измерения на двух спутниках считались совпадающими, если $R < 0,15$.

В диапазоне энергий от 10^{14} до $5 \cdot 10^{15}$ Дж (характерных для суббурь) доля совпадающих наблюдений возрастает с 30 до 80%. При энергии 10^{15} Дж вероятность того, что $R > 0,5$ все

еще достаточно велика - 5%, а в 25% случаев регистрируется умеренная ошибка в 15–30%. На уровне энергий, соответствующих магнитной буре (10^{16} Дж), данные практически всех измерений совпадают. Такая зависимость доли различающихся измерений от величины энергии имеет естественное объяснение: большие энергии соответствуют магнитным бурям, которые вызываются крупномасштабными структурами солнечного ветра с размерами намного большими, чем возможные расстояния между спутниками. Структуры солнечного ветра, вызывающие суббури, в основном связаны с мелкомасштабными альфвеновскими вариациями.

Далее проведен выбор оптимальной для исследований геомагнитного хвоста функции связи солнечного ветра. Набор данных включает часовые геомагнитные индексы AL и параметры солнечного ветра из базы данных OMNI за период 1966–1974 гг. и 1977–1988 гг. (всего чуть более 100 000 точек). В предыдущих исследованиях для выбора функции связи использовались только методы регрессии. Примененный нами более сложный метод позволяет обнаружить зависимости, не выявленные ранее. Средние значения AL вычислялись в 13 логарифмически распределенных интервалах величины функции связи отдельно для различных значений какого-либо другого параметра солнечного ветра. Если средние не совпадали, то подбиралась новая форма функции связи (включающая новый параметр), при которой они максимально сближались.

В дополнение к основному широко известному параметру $V B_s$ оказались достаточно важны следующие факторы:

- 1) Дополнительный аддитивный вклад скорости солнечного ветра $\alpha V^2 \cdot \sin^{1/2} \theta / 2$ ($\alpha = 4.4 \cdot 10^{-6}$ (мВ/м)/(км/с)²).
- 2) Предыстория солнечного ветра за два предыдущих часа.
- 3) Предыдущее значение индекса AL .

Здесь и ниже используется гео-солнечно-магнитосферная система координат. B обозначает ММП, V - скорость солнечного ветра, θ - часовой угол ММП.

Было обнаружено также незначительное влияние на индекс: - ММП B_Y , необходимого для правильного учета слабой геомагнитной активности;

- низкого динамического давления; индекс нечувствителен к изменению давления выше среднего (2 нПа);

- значительных флуктуаций ММП;

После выявления и учета всех возможных закономерностей и влияний, зависимость AL от параметров солнечного ветра сохраняет значительный разброс (до 30–50%) по отношению к средним значениям. Поэтому включение второстепенных уточняющих коэффициентов в выражение для функции связи практически не приводит к улучшению ее статистических характеристик. Оптимальное выражение для функции связи солнечного ветра и индекса геомагнитной активности AL имеет следующий вид (в единицах электрического поля мВ/м):

$$V \sqrt{B_Y^2/2 + B_Z^2} \sin^4 (\theta/2) + \alpha V^2 \sin^{0.5} (\theta/2) \quad (1)$$

Ожидаемая величина индекса AL может быть вычислена как значение полинома четвертой степени (с подобранными статистически коэффициентами) от логарифма функции связи.

Выводы данной главы о степени достоверности измерений солнечного ветра и ММП спутником - удаленным монитором и о выборе оптимального вида функции связи создают основу для формирования целостного и надежного подхода к задаче количественного исследования динамики магнитного хвоста под воздействием межпланетной среды.

В третьей главе рассмотрена глобальная картина конвек-

ции плазмы в магнитном хвосте. До запуска КА ИНТЕРБОЛ-1 анализ конвекции (средних течений) плазмы в хвосте магнитосферы был выполнен только для X и Y направлений вблизи экваториальной плоскости. Уникальная конструкция прибора "Коралл" и конфигурация самого спутника позволили впервые надежно измерить (вертикальную) Z -компоненту потоков плазмы. Используемый набор измерений плазменного слоя за 1995–1998 гг. насчитывает около 32000 точек. Вычисления средней скорости были сделаны отдельно для интервалов северного и южного ММП.

При зарегистрированных характеристиках ММП и скорости солнечного ветра среднее крупномасштабное электрическое поле в хвосте должно составлять 0,16–0,22 мВ/м (10–15% от межпланетного поля). Экспериментально найденная скорость конвекции ~ 7 км/с при южном ММП с учетом средней величины локального магнитного поля $|B_X| \sim 13$ нТл соответствует электрическому полю $\sim 0,09$ мВ/м (вдвое меньше ожидаемого). При северном ММП скорость конвекции близка к нулю, что соответствует модельным представлениям. Разница между измеренной и ожидаемой конвекцией при южном ММП может быть объяснена действием нескольких факторов физического и методического характера. В любом случае можно сделать вывод о том, что межпланетное электрическое поле проникает в плазменный слой хвоста в среднем с 50% эффективностью.

Интересным неожиданным результатом нашего анализа является присутствие средней небольшой направленной к зениту конвекции $\sim 7,9 \pm 3,8$ км/с, появляющейся только при южном ММП. В течение зимнего сезона (в северном полушарии) плазменный слой изогнут и сдвинут вниз относительно орбиты Земли, что может приводить к существованию малой эффективной северной компоненты в направленных к Земле спора-

дических быстрых потоках плазмы, которые усиливаются при южном ММП.

Во второй части главы решена проблема, возникшая при исследовании быстрых спорадических плазменных потоков. А именно, при расчетах переноса магнитного потока в подобных структурах использовалась только скорость плазмы, хотя необходимо учитывать еще и угол между векторами скорости и магнитного поля, определяющий эффективность переноса. Это дало повод ряду авторов высказать гипотезу о несущественной роли таких потоков в процессе глобальной конвекции.

Для исследования этого вопроса были использованы измерения КА GEOTAIL в магнитном хвосте с октября 1994 по апрель 1998 года (1 127 425 точек) и данные КА AMPTE/IRM (270 000 точек). Для каждого случая измерения направленной к Земле и большей, чем 100 км/с, скорости потока был рассчитан угол между вектором скорости и вектором магнитного поля.

В областях с низким β_i (отношением теплового давления ионов плазмы к магнитному давлению) во внешнем плазменном слое, пограничной зоне плазменного слоя, долях хвоста большинство потоков было направлено вдоль поля (средний угол 20–30°). Во внутреннем плазменном слое ($\beta_i > 1$) углы в среднем увеличиваются с ростом β_i до $\sim 50^\circ$. Эти результаты практически не зависят от удаления точки измерений от Земли и величины пороговой скорости (100 или 400 км/с).

Таким образом, наш анализ подтверждает, что конвективные потоки фактически доминируют во внутреннем плазменном слое. Конвективная часть потока меньше его полной величины на коэффициент $\sim 0,7$.

В четвертой главе рассмотрены новые экспериментальные данные, позволившие определить общую конфигурацию

плазменного слоя и выявить его ранее неизвестную тонкую структуру при северном ММП.

Когда ММП принимает северное направление (B_Z больше нуля и больше чем $|B_Y|$), зона пересоединения на магнитопаузе смещается из ее дневной части в высокоширотную. Соответственно изменяется и вся структура магнитосферной конвекции, а плазменный слой расширяется в вертикальном направлении.

По данным КА CLUSTER от 14 сентября 2001 года (после 20-часового интервала северного ММП) плазменный слой был заполнен плотной ($2-3 \text{ см}^{-3}$) и холодной ($500-1500 \text{ эВ}$) плазмой. Магнитное поле имело значительную нормальную компоненту $B_Z \sim 5-10 \text{ нТл}$. Наблюдавшиеся необычные для такой конфигурации плазменного слоя быстрые изменения направления компоненты B_X были объяснены как пересечения практически вертикальных токовых слоев толщиной $1000-3000 \text{ км}$, причем компонента магнитного поля, нормальная к слою, была близка к нулю.

На основе представления о данном явлении, полученного по данным проекта CLUSTER, был проведен поиск похожих наблюдений. В частности, яркий пример был зарегистрирован одновременно на КА ИНТЕРБОЛ-1 и GEOTAIL 8 ноября 1998 года. Оба спутника были почти на одном магнитном меридиане и разделены расстоянием по $X \sim 10 R_E$ (радиусов Земли, $1 R_E = 6371 \text{ км}$). Изменение полярности B_X компоненты коррелировало с изменениями в скорости плазмы V_Y , что свидетельствует о горизонтальном движении вертикального слоя толщиной $\sim 3000 \text{ км}$. Метод такого определения толщины слоя по данным измерений на одном спутнике рассмотрен в отдельном параграфе.

Подобные аномальные вертикальные токовые слои в плаз-

менном слое могут быть проинтерпретированы как границы между соседними (по локальному времени) магнитными трубками, часть которых сдвинута вертикально относительно экваториальной плоскости хвоста и подвержена горизонтальному колебательному движению поперек геомагнитного хвоста. При таком сдвиге в некоторой области плазменного слоя части "нормальных" трубок с направленным к Земле магнитным полем соприкасаются по Y со частями "сдвинутых" трубок с направленным в хвост магнитным полем.

Можно предложить два возможных сценария образования вертикальных токовых слоев и сдвинутых магнитных трубок. При северном ММП плазменный слой расширяется в вертикальном направлении, следуя за эрозией долей хвоста, происходящей спорадически и независимо в северной и южной частях. В ходе такого расширения структура слоя может стать нерегулярной и некоторые магнитные трубки могут сдвинуться в вертикальном направлении относительно своих соседей. Другой сценарий предполагает внешнее происхождение аномальных смещенных трубок. Данные спутниковых наблюдений свидетельствуют о существенном притоке плазмы через фланги магнитосферы в хвост. Если некоторые новые замкнутые линии присоединяются к плазменному слою вместе с плазмой со стороны пограничного слоя, их геометрия может отличаться от стандартной конфигурации магнитного поля в плазменном слое.

Известны наблюдения во время северного ММП в зоне полярной шапки меридиональных дуг дискретных полярных сияний. Образования в плазменном слое, ответственные за их происхождение, до сих пор были неизвестны. Обнаружение тонких токовых слоев позволяет предположить, что их ионосферные проекции могут формировать меридиональные дуги.

В пятой главе исследована крупномасштабная динамика магнитного хвоста во время магнитных суббурь. Известно, что постепенное увеличение и (после начала суббури) уменьшение магнитного поля (магнитного давления) в долях хвоста характеризует глобальный процесс накопления и сброса избыточного магнитного потока во время магнитных суббурь. Этот же процесс отражает величина B_Z компоненты поля, изменения которой следуют в противофазе за изменениями давления.

На первом этапе проверена степень надежности характеристики давления как глобального параметра путем сравнения результатов его одновременных измерений в долях хвоста и приэкваториальном плазменном слое. На статистике из 30 суббурь показано, что, хотя в целом динамика давления в обеих областях хвоста одинакова, только давление в долях всегда отражает глобальные изменения, а профиль давления в плазменном слое может содержать множество максимумов (до 30–50% избыточного давления), связанных с локальной активностью. После взрывной фазы во многих суббурях формируется провал экваториального давления, длящийся десятки минут и объясняемый формированием "искривленной" магнитной конфигурации со значительным вкладом магнитного натяжения.

Далее была исследована возможность использования измерений давления для сравнения различных событий, то есть, степени универсальности критерия. Хотя для "средней" суббури его применимость достаточно очевидна, существуют классы событий, для которых сформировалось мнение о наличии принципиальных отличий.

Суббури малой амплитуды (суббури на сжатом овале) привлекают особое внимание потому, что они часто происходят при положительном ММП B_Z в отличие от суббурь "нормального размера", связанных с южным (отрицательным) ММП B_Z .

В этой связи создается впечатление, что механизм и динамика малых суббурь отличаются от свойств нормальных суббурь. Для того чтобы прояснить данный вопрос, во втором параграфе была проанализирована статистика 66 таких суббурь, зарегистрированных в течение зимних сезонов 1996–1997 гг. и 1997–1998 гг.

Оказалось возможно выделить фазу накопления по набору давления в хвосте примерно в половине случаев. Уменьшение давления и/или диполяризация после начала суббури были обнаружены в 38 случаях, плазмоиды - в течение пяти суббурь. В целом динамика хвоста была аналогична изменениям, наблюдаемым во время нормальных суббурь, за исключением того, что амплитуда изменений была меньше. Для всех событий усредненная в течение фазы накопления величина ММП B_Y была больше, чем ММП B_Z , или B_Y , и отрицательное B_Z были очень малы. Случаев с выраженной северной ориентацией ММП (то есть, когда B_Z был положителен и больше, чем B_Y) не было выявлено. Таким образом, суббури на сжатом овале соответствуют не северному, а азимутальному ММП (хотя B_Z может быть положительным), при котором схема конвекции в магнитосфере в целом сходна с конвекцией при южном ММП, за исключением несколько пониженной эффективности.

На другом конце спектра интенсивности - во время магнитных бурь, по некоторым данным, суббури уступают место интервалам усиленной конвекции. В связи с относительно малой долей магнитных бурь в общей статистике магнитосферной активности выбор интервалов для анализа с учетом наличия спутниковых измерений в хвосте достаточно ограничен. Тем не менее, в имеющихся наблюдениях отчетливо выделяются максимумы магнитного давления (минимумы B_Z) в долях хвоста, соответствующие накоплению и сбросу энергии во время суббурь

и совпадающие с наземными геомагнитными интенсификациями. В интервалах между суббурями зарегистрированы участки усиленной конвекции с характерным стабильным профилем наземных магнитограмм.

Примеры суббурь, рассмотренные в данной главе, а также анализ статистики показывают, что изменение давления и B_Z в долях магнитного хвоста являются характерными для всех размеров и типов суббурь и могут использоваться для выделения их отдельных стадий.

В шестой главе исследования, описанные в предыдущих главах, использованы для анализа статистического материала по 110 суббурям: к 66 малым суббурям добавлены 19 больших (ММП $B_Z < -5$ нТл в течение фазы накопления) и 25 средних суббурь. Рассмотрена глобальная динамика магнитного хвоста во время фазы накопления суббурь.

Для всех суббурь были определены средняя величина электрического поля солнечного ветра во время фазы накопления (вычисленная по формуле функции связи, полученной во второй главе), длительность этой фазы T_{gr} и вовлеченный магнитный поток (оцененный, как произведение функции связи на время). Были выявлены следующие характерные особенности:

- 1) Магнитный поток у малых суббурь как минимум в два раза меньше, чем у средних суббурь, несмотря на существенно (до трех часов) большее T_{gr} .
- 2) Для средних суббурь (величина функции связи $1 \div 3$ мВ/м), T_{gr} изменяется так, что величина потока остается неизменной.
- 3) При значениях функции связи выше 4 мВ/м, T_{gr} перестает уменьшаться и стабилизируется вокруг величины порядка 1 часа. Величина потока при этом возрастает.
- 4) Существует некоторый разброс T_{gr} для событий с близкой амплитудой функции связи.

Прежде чем рассмотреть возможные объяснения вышеприведенных результатов, полезно обратиться к вопросу о стабильности плазменного слоя. Как правило, эта проблема рассматривается в связи с проблемой механизма внезапного начала суббури: в большинстве моделей предполагается, что при прогрессирующем из-за набора давления сжатии слоя, в нем, по достижении некоторого порога (по толщине, градиенту или плотности тока) развивается плазменная неустойчивость, приводящая к началу взрывной фазы. Однако, согласно нашим данным не существует никакой универсальной предельной величины увеличения давления (или магнитного потока) в геомагнитном хвосте перед началом суббури.

В действительности, "добавочное" давление, набираемое при больших суббурях, не приводит к прогрессирующему утоньшению плазменного слоя — рост давления компенсируется ростом температуры ионов плазмы. Удалось и непосредственно наблюдать возрастание температуры в ходе фазы накопления. В ходе фазы накопления возрастание давления сначала сопровождалось сжатием довольно холодного плазменного слоя (увеличением плотности), продолжавшимся до тех пор пока B_Z не уменьшилось до ~ 1 нТл, и сменившимся во второй половине фазы процессом нагрева ионов от 1000 до 3000 эВ. Толщина слоя и нормальная компонента магнитного поля в слое при этом оставались постоянными. Работающий здесь механизм нагрева ионов основан на ускорении в крупномасштабном электрическом поле относительно медленных частиц, попадающих в области с достаточно малым магнитным полем. Возможность "включения" подобных механизмов нагрева плазмы создает ресурс динамической стабильности хвоста, позволяющий плазменному слою адаптироваться к накоплению значительного магнитного потока без потери устойчивости.

Можно предложить простую схему развития фазы накопления, объясняющую наблюдаемую статистику ее длительности наличием некоторой постоянной времени конвекции в хвосте магнитосферы. Она может быть представлена как сумма времени переноса пересоединенной на дневной стороне силовой линии к дальней нейтральной линии на расстояние $\sim 100 R_E$, и времени конвекции вторично пересоединенной линии к Земле в плазменном слое. Несмотря на существенный разброс экспериментальных точек, такая модель предсказывает качественно правильную продолжительность фазы накопления для суббурь всех размеров.

Таким образом, величина магнитного давления в хвосте и связанные с ней толщина плазменного слоя и плотность поперечного тока хвоста, не могут служить критерием устойчивости системы. Момент начала суббури может определяться развитием процесса конвекции в плазменном слое.

В седьмой главе с целью локализации внезапного начала суббури в геомагнитном хвосте рассмотрено несколько примеров многоточечных спутниковых и наземных измерений. Исследование подобных отдельных наблюдений во время удачного взаимного расположения спутников, наземных станций и самого события, позволяет выявить тонкую пространственно-временную структуру изменений в момент начала суббури, обычно усредняемую или игнорируемую при статистической обработке.

Во время аврорального онсета 28 ноября 1995 г. спутники ИНТЕРБОЛ-1 и GEOTAIL, находившиеся вблизи нейтрального слоя и почти на одном магнитном меридиане, зарегистрировали признаки всплеска пересоединения: течение плазмы к земле и магнитную диполяризацию по данным ИНТЕРБОЛ-1, находившегося на расстоянии $12 R_E$ от Земли и плазмоид по

данным GEOTAIL ($28 R_E$). Показано, что всплеск произошел между спутниками на расстоянии $15 R_E$ от Земли и затронул только замкнутые силовые линии сильно вытянутого плазменного слоя. Авроральный онсет был зарегистрирован на Земле примерно одной минутой позже всплеска пересоединения. В такой же благоприятной по магнитному сопряжению спутника GEOTAIL и сети наземных станций CANOPUS ситуации 30 августа 1996 г. был зарегистрирован всплеск пересоединения, распространявшийся по вытянутому плазменному слою в ближней зоне геомагнитного хвоста ($11-12 R_E$).

Некоторые наиболее известные модели внезапного начала суббури предлагают прямо противоположные пространственные сценарии динамики геомагнитного хвоста. Модель "околоземной нейтральной линии" предполагает, что первичным процессом является магнитное пересоединение, происходящее (и регистрируемое) в среднем на удалении $25 R_E$ от Земли, и вызывающее позже магнитную диполяризацию в ближнем хвосте. Модель "разрушения тока" отдает приоритет сведениям о том, что суббуря начинается, согласно наземным авроральным наблюдениям, на расстоянии $8-12 R_E$ от Земли, и предполагает, что первичным процессом является развитие токовой неустойчивости на границе токового слоя хвоста, в то время как магнитное пересоединение вторично и инициируется позже и дальше от Земли. В настоящее время, однако, нет прямых экспериментальных доказательств реальности таких сценариев двухступенчатого развития.

Как следует из наших данных, всплеск пересоединения является наиболее ранним проявлением начала суббури в хвосте, происходит значительно ближе к Земле, чем следует из выводов общего статистического анализа и находится в зоне, соответствующей проекции аврорального всплеска по наземным

наблюдениям. Сразу же после инициации пересоединения его зона начинает смещаться от Земли, оставляя после себя диполяризованную конфигурацию и становясь более заметной для спутниковых наблюдений. Такая схема начала суббури является более простой, чем обе вышеупомянутые модели, и удовлетворяет всем имеющимся наблюдательным данным.

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

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Установлено, что различия между измеряемой на удаленном от Земли спутнике геомагнитной эффективностью (функцией связи) солнечного ветра, и ее величиной около Земли, определяемые естественной изменчивостью и/или неоднородностью ветра, в среднем заметно уменьшаются с ростом значения функции связи. Во время магнитных бурь все различия находятся в пределах 15%, а во время суббурь доля больших, чем 15%, различий составляет 30%. Достаточная достоверность удаленных наблюдений солнечного ветра создает основу для количественного изучения динамики геомагнитного хвоста и надежного прогноза космической погоды.
2. Статистически оптимальное выражение для функции связи солнечного ветра с индексом геомагнитной активности AL определяется формулой: $V \sqrt{B_Y^2/2 + B_Z^2} \sin^4(\theta/2) + 4.4 \cdot 10^{-6} V^2 \sin^{0.5}(\theta/2)$ с доминирующим влиянием электрического поля солнечного ветра.
3. Малые суббури (часто называемые суббурями на сжатом овале) связаны со слабым азимутальным ММП ($|B_Y| > |B_Z|$), а их динамика схожа с динамикой обычных

суббурь. Таким образом, не обнаружено проявлений каких-либо альтернативных механизмов динамики суббурь, не связанных с процессом пересоединения ММП и геомагнитного поля.

4. Впервые экспериментально обнаружена вертикальная конвекция в плазменном слое, направленная к экваториальной плоскости при южном ММП. Вторая компонента вертикальной конвекции, направленная к зениту, является следствием смещения силовых линий плазменного слоя относительно Земли в зимний сезон. Вблизи экваториальной плоскости ход конвекции замыкается быстрыми спорадическими потоками плазмы, ответственными за большую часть переноса плазмы и магнитного потока к Земле.
5. Показано, что давление в долях геомагнитного хвоста является надежным и универсальным параметром, пригодным для описания глобальной динамики во время суббурь. Полное давление в плазменном слое может сильно отличаться от давления в долях при отклонения конфигурации слоя от плоскостной.
6. Сравнение характеристик суббурь в широком диапазоне их амплитуд выявило принципиальное сходство глобальной динамики, а также отсутствие какого-либо порога накопления магнитного потока в геомагнитном хвосте при превышении которого инициируется внезапное начало суббури. Во время больших суббурь более значительный рост магнитного давления в хвосте не приводит к прогрессирующему сжатию плазменного слоя, а компенсируется ростом температуры ионов.
7. На основе многоточечных наблюдений с высоким времен-

ным разрешением проведена пространственная и временная локализация внезапного начала суббури в ближнем хвосте магнитосферы за 1-2 минуты до его проявления в ионосфере. Предложенная схема развития суббури с началом пересоединения в ближнем хвосте позволяет устранить противоречия в некоторых современных моделях суббурь.

8. Показано, что при северном ММП плазменный слой геомагнитного хвоста на удалениях 100–200 тысяч километров от Земли однородно (без выраженного градиента, направленного к Земле) заполнен холодной плотной плазмой и магнитным полем с большой нормальной компонентой. Из-за неоднородности процесса высокоширотного пересоединения отдельные магнитные трубки плазменного слоя могут быть смещены в вертикальной плоскости, образуя на границах смещения тонкие вертикальные токовые слои.

Основные результаты работы изложены в 38 публикациях в отечественной и зарубежной литературе, список которых приводится ниже.

1. Zelenyi L.M., Triska P., Petrukovich A.A. INTERBALL — Dual Probe and Dual Mission. // *Adv. Space Res.* 1997. V.20. P.549–557.
2. Klimov S., Romanov S., Amata E., Blecki J., Büchner J., Juchniewicz J., Rustenbach J., Triska P., Woolliscroft L.J.C., Savin S., Afanas'yev Yu., de Angelis U., Auster U., Bellucci G., Best A., Farnik F., Formisano V., Gough P., Grard R., Grushin V., Haerendel G., Ivchenko V., Korepanov V., Lehmann H., Nikutowski B., Nozdrachev M., Orsini S., Parrot M., Petrukovich A., Rauch J.L., Sauer K., Skalsky A., Slominski

- J., Trotignon J.G., Vojta J., Wronowski R. ASPI Experiment: Measurements of Fields and Waves Onboard the INTERBALL-1 Spacecraft. // *Annales Geophys.* 1997. V.15. P.514–527.
3. Petrukovich A.A., Sergeev V.A., Zelenyi L.M., Mukai.T, Yamamoto T., Kokubun S., Shiokawa K., Deehr C.S., Budnick E.Y., Buchner J., Fedorov A.O., Grigorieva V.P., Hughes T.J., Pissarenko N.F., Romanov S.A., Sandahl I. Two spacecraft observations of a reconnection pulse during an auroral breakup. // *J. Geophys. Res.* 1998. V.103. P.47–59.
 4. Sergeev V.A., Kamide Y., Kokubun S., Nakamura R., Deehr C.S., Hughes T.J., Lepping R.P., Mukai.T., Petrukovich A.A., Shue J.H., Shiokawa K., Troshichev A., Yumoto K. Short duration convection bays and localized IMF structures on November 28, 1995. // *J. Geophys. Res.* 1998. V.103. P.23593–23609.
 5. Büchner J., Kuska J.-P., Nikutowski B., Wiechen H., Rustenbach J., Auster U., Formaçon K.-H., Klimov S., Petrukovich A., Savin S. Three-Dimensional Reconnection in the Earth's Magnetotail: Simulations and Observations, in *Geospace Mass and Energy Flow: Results from the International Solar-Terrestrial Physics Program*, edited by J.L. Horwitz, D.L. Gallagher and W.K. Peterson, Geophysical Monograph 104, American Geophysical Union, Washington D.C. 1998. P.313–325.
 6. Petrukovich A.A., Wanliss J., Mukai T., Yamamoto T., Kokubun S. Small-amplitude bipolar flows in the near-earth tail. In: *International Conference on Substorms-4*, edited by S.Kokubun and Y.Kamide, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998. P.207–210.

7. Petrukovich A.A., Romanov S.A., Zelenyi L.M., Mukai T., Saito Y., Yamamoto T., Kokubun S., Troshichev O.A. Substorm-associated pressure variations in the magnetotail. In: International Conference on Substorms-4, edited by S.Kokubun and Y.Kamide, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998. P.199–202.
8. Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Budnick E.Y., Romanov S.A., Sergeev V.A., Mukai T., Yamamoto T., Kokubun S., Shiokawa K., Deehr C.S., Buchner J., Sandahl I. Substorm onset models and observations. In: International Conference on Substorms-4, edited by S.Kokubun and Y.Kamide, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998. P.327–330.
9. Baumjohann W., Nagai T., Petrukovich A.A., Mukai T., Yamamoto T., Kokubun S. Substorm signatures between 11 and 31 Earth radii. In: International Conference on Substorms-4, edited by S.Kokubun and Y.Kamide, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998. P.203–206.
10. Perroomian V., Ashour-Abdalla M., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A. The influence of convection on the magnetotail variability. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Coordinated Studies of the Solar Wind-Magnetosphere-Ionosphere Interaction: Interball in the ISTP program, Kosice, Slovakia, September 7-11, 1998, edited by D.G.Sibeck and K.Kudela, NATO Science Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 537, Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 1999. P.171–186.
11. Nikutovski B., Buechner J., Klimov S., Petrukovich A., Romanov S., Savin S. INTERBALL observations of field aligned current signatures due to collisionless reconnection.

In: VII th International Conference on Plasma Astrophysics and Space physics. Eds. J.Buchner, I.Axford, E.Marsch, V.Vasyliunas, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1999. P.687–692.

12. Yermolaev Yu.I., Sergeev V.A., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Sauvaud J.-A., Mukai T., Kokubun S. Two spacecraft observation of plasma sheet convection jet during continuous external driving. // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V.26. P.177–180.
13. Petrukovich A.A., Mukai T., Kokubun S., Romanov S.A., Saito V., Yamamoto T., Zelenyi L.M. Substorm-associated pressure variations in the magnetotail plasma sheet and lobe. // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. P.4501–4514.
14. Yermolaev Yu.I., Zelenyi L.M., Borodkova N.L., Kovrazhkin R.A., Lutsenko V.N., Petrukovich A.A., Savin S.P., Skalsky A.A., Sergeev V.A., Mukai T., Kokubun S., Liou K., Meng C.-I., Parks G., Sauvaud J.-A. Global substorm effect and convection jet under the conditions of continuous external driving: Multi-spacecraft observations on December 22-23, 1996. // *Czech. J. Phys.* 1999. V.49. P.625–640.
15. Nakamura R., Bargatze L.F., Mukai T., Nagai T., Baker K.B., Hairston M.R., Reiff P.H., Petrukovich A.A., Nozdrachev M., Troshichev O.A. Response of the midtail electric field to enhanced solar wind energy input. // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. P.17299–17310.
16. Petrukovich A.A., Wanliss J., Mukai T., Kokubun S., Yamamoto T. Small-amplitude bipolar flows in the near-Earth tail. // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V.26. P.2909–2912.

17. Baumjohann W., Hesse M., Kokubun S., Nagai T., Mukai T., Petrukovich A.A. Substorm dipolarization and recovery. // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. P.24995.
18. Шевченко М.И., Белова И.Э., Боярский М.Н., Назиров Р.Р., Петрукович А.А. Архив данных проекта Интербол. // *Космич. Исслед.* 1999. Т37. С563–568.
19. Zastenker G.N., Dalin P.A., Petrukovich A.A., Nozdrachev M.N., Romanov S.A., Paularena R.I., Richardson J.D., Lazarus A.J., Lepping R.P., Szabo A. Solar wind structure dynamics by multipoint observations. // *Phys. Chem. Earth (C)*. 2000. V.25. P.137–140.
20. Baumjohann W., Nagai T., Petrukovich A.A., Mukai T., Yamamoto T., Kokubun S. Substorm signatures between 11 and 30 Earth radii. // *Adv. Space Res.* 2000. V.25. P.1663–1666.
21. Yermolaev Yu.I., Zelenyi L.M., Mukai T., Sergeev V.A., Borodkova N.L., Kokubun S., Kovrazhkin R.A., Liou K., Meng C.-I., Parks G., Petrukovich A.A., Sauvaud J.-A. Multi-spacecraft observations of series of substorms on December 22-23, 1996. // *Adv. Space Res.* 2000. V.25. P.1697–1701.
22. Ермолаев Ю.И, Петрукович А.А., Зеленый Л.М., Антонова Е.Е., Овчинников И.Л., Сергеев И.Л. Исследование структуры и динамики плазменного слоя в эксперименте КО-РАЛЛ проекта Интербол. // *Космич. Исслед.* 2000. Т38. N1. С16–22.
23. Petrukovich A.A., Baumjohann W., Nakamura R., Mukai T., Troshichev O.A. Small substorms: solar wind input and

magnetotail dynamics. // *J. Geophys. Res.* 2000. V.105. P.21109–21118.

24. Петрукович А.А., Климов С.И. Использование измерений солнечного ветра для анализа и прогноза геомагнитной активности. // *Космические исследования.* 2000. Т38. N5. С463–468.
25. Petrukovich A.A. The growth phase: comparison of small and large substorms. Proceedings of the Fifth International Conference on Substorms, ESA SP-443. 2000. P.9–14.
26. Petrukovich A.A., Kallio E.I., Pulkkinen T.I., Koskinen H.I.J. Solar wind energy input and magnetospheric substorm activity compared. Proceedings of the Fifth International Conference on Substorms, ESA SP-443. 2000. P.67–70.
27. Perroomian V., Ashour-Abdalla M., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A. Intrinsic self-adjustment and variability of the magnetotail. Proceedings of the Fifth International Conference on Substorms, ESA SP-443. 2000. P.121–126.
28. Yermolaev Yu.I. Petrukovich A.A., Zelenyi L.M. Ion flow fluctuations in the plasma sheet. Proceedings of Int. Symposium "From solar corona through interplanetary space into Earth's magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites and ground-based observations", February 1-4, Kyiv, Ukraine. 2000. P.55–57.
29. Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Pulkkinen T., Sharma A., Malova H.V. Thin current sheets in the quasi-adiabatic model and observations. Proceedings of Int. Symposium "From solar corona through interplanetary space into Earth's magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites and

- ground-based observations", February 1-4, Kyiv, Ukraine. 2000. P.61–64.
30. Petrukovich A.A., Zastenker G.N., Klimov S.I., Lazarus A., Lepping R.P. The scheme of space weather forecast with the use of real-time solar wind measurements. Proceedings of Int. Symposium "From solar corona through interplanetary space into Earth's magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites and ground-based observations", February 1-4, Kyiv, Ukraine. 2000. P.345–348.
 31. Yermolaev Y.I., Petrukovich A.A. Structure and dynamics of the Earth's plasma sheet: The Interball observations. In: proceedings of 9th annual conference of doctoral students, WDS'00. Charles University, Prague, June 13-16, Matfyzpress, Praha. 2000. P.203–207.
 32. Petrukovich A.A., Lazarus A., Lepping R.P., Klimov S.I. Comparison of the solar wind energy input to the magnetosphere measured by Wind and Interball-1. // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2001. V.63/15. P.1643–1647.
 33. Petrukovich A.A., Baumjohann W., Nakamura R., Schoedel R., Mukai T. Are earthward bursty bulk flows convective or field-aligned? // *J. Geophys. Res.* 2001. V.106. P.21211–21216.
 34. Petrukovich A.A., Yermolaev Yu.I. Vertical Ion flows in the plasma sheet:INTERBALL-Tail observations. *Ann. Geophys.* 2002. V.20. P.321–327.
 35. Petrukovich A.A. The magnetotail heating and convection before a substorm. // *Adv. Space Res.* 2002. V.30. P.1801–1804.

36. Петрукович А.А. Динамика магнитосферы во время суббурь различной амплитуды. Труды конференции по физике солнечно-земных связей, Иркутск, 24-29 сентября 2001г. // *Солнечно-земная физика*. 2002. Вып. 2 (115), Иркутск, 173–175.
37. Yermolaev Yu.I., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M. Interball statistical study of ion flow fluctuations in the plasma sheet. // *Adv. Space Res.* 2002. V.30. P.2695–2700.
38. Zelenyi L., Zastenker G. Petrukovich A., Chesalin L., Dalin P., Riazantseva M., Ryazanova E., Lakutina E. Implications of the INTERBALL studies for Space Weather, Proc. of the COSPAR Colloquium on Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment (STMASE), NAOC, Beijing, China, Sept 10-12, 2001. Eds. Huaning Wang and Ronglan Xu, Pergamon. 2002. P.333-343.

055(02)2

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

Подписано к печати

Заказ

Формат 70×108/32

Тираж 100

уч.-изд.л.