

На правах рукописи

РОССОЛЕНКО Светлана Сергеевна

**БАЛАНС ДАВЛЕНИЯ НА МАГНИТОПАУЗЕ И
ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОШИРОТНОГО
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2009 г.

Работа выполнена на Кафедре физики космоса физического факультета
Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Антонова Елизавета Евгеньевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Клейменова Наталья Георгиевна

доктор физико-математических наук,
Савин Сергей Петрович

Ведущая организация: **Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн имени Н.В.Пушкова
Российской Академии наук**

Защита диссертации состоится «24» июня 2009г. в 15 час. на заседании
совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.45 при
Московском Государственном Университете имени М. В. Ломоносова по
адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19-й корпус,
аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 19 » мая 2009 г.

Учёный секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д501.001.45
кандидат физико-математических наук

Вохник О.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Магнитосфера Земли представляет собой гигантскую космическую лабораторию, в которой удается проводить наблюдения, не внося существенных возмущений в измеряемые параметры, что часто не удается сделать в лабораторных условиях. В 1950х-1970х годах прошел период основных открытий в области физики магнитосферы, впервые были идентифицированы основные области и границы в магнитосфере Земли. Полученный за последние годы экспериментальный материал привел к перестройке многих основных представлений в физике магнитосферы. Все большее внимание уделяется изучению магнитосферной турбулентности, проблемам формирования и устойчивости распределения горячей плазмы. Решение многих проблем приобрело практический интерес, появилось понятие космической погоды. Предсказание космической погоды потребовало, в частности, проведения подробных исследований процессов проникновения плазмы солнечного ветра внутрь магнитосферы, формирования магнитосферных погранслоев.

При переходе через околосемную ударную волну происходит существенная модификация параметров плазмы солнечного ветра, возникает турбулентный магнитослой. Проникновение плазмы магнитослоя через магнитопаузу внутрь магнитосферы приводит к заполнению магнитосферы частицами солнечного ветра. На высоких широтах образуется плазменная мантия, на низких – низкоширотный погранслой. Ниже в целях сокращения записи для обозначения низкоширотного погранслоя, как правило, используется английская аббревиатура LLBL (LLBL – Low Latitude Boundary Layer). Изучение LLBL позволяет прояснить процессы передачи массы, импульса и энергии из магнитослоя внутрь магнитосферы, и тем самым, определить характер взаимодействия плазмы солнечного ветра и магнитосферы Земли. В LLBL происходит перемешивание плазмы магнитослоя с плазмой плазменного слоя и его продолжения в дневные часы. Как правило, при наблюдениях спектров частиц в LLBL удается выделить отдельные популяции. Проникновение частиц магнитослоя внутрь магнитосферы может влиять на геомагнитную обстановку. Поэтому вопрос о формировании LLBL может рассматриваться в качестве важной части исследований по программам космической погоды. Решение данной проблемы требует проведения подробного анализа данных экспериментальных наблюдений и разработки новых теоретических подходов.

Пограничные слои магнитосферы Земли исследуются начиная с 1972 г. Однако, низкоширотный погранслой в настоящее время является сравнительно плохо изученной

областью магнитосферы. Многие проблемы, связанные со структурой и особенностями формирования LLBL остаются пока нерешенными

Было предложено несколько теорий проникновения плазмы в LLBL, основанных на анализе данных усовершенствованных приборов, установленных на спутниках, пересекавших LLBL. Большой вклад внесли многоспутниковые наблюдения пограничных слоев на аппаратах проектов ИНТЕРБОЛ и CLUSTER [Савин, 2008; Panov et al., 2008]. Определенные возможности открылись перед исследователями низкоширотного пограничного слоя в связи с полетами пяти аппаратов проекта THEMIS, все орбиты которых впервые лежат практически в экваториальной плоскости.

Теория формирования LLBL в результате пересоединения силовых линий магнитного поля при ламинарном течении плазмы встретила с определенными трудностями. Так, например, не удавалось объяснить экспериментально измеренную зависимость толщины LLBL [Mitchell et al, 1987] от компоненты B_z межпланетного магнитного поля [Sandahl, 1999].

Картина поведения параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое существенно отличается от картины распределения поля и плазмы вблизи магнитопаузы, постулируемой в моделях пересоединения на магнитопаузе. Магнитослой является чрезвычайно активной областью, наполненной различными волновыми модами, свойства которых содержат информацию о набегающем потоке солнечного ветра и которые ответственны за перенос и перераспределение энергии и импульса внутри магнитослоя. Вариации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое могут достигать значительных величин и наблюдаются в широком диапазоне временных масштабов ([Sibeck et al., 2000], [Застенкер, 2008]) . Поэтому существование таких флуктуаций необходимо учитывать при рассмотрении процессов формирования магнитопаузы.

В диссертации приведены результаты исследований анизотропии давления плазмы в LLBL, баланса давлений на магнитопаузе. Анализируется уровень турбулентных флуктуаций в магнитослое и их роль в балансе давления на магнитопаузе. Обсуждена возможность локального нарушения баланса давления на магнитопаузе при высоком уровне флуктуаций магнитного поля. Такой процесс может привести к проникновению плазмы внутрь магнитосферы и формированию LLBL. Проведен анализ зависимости толщины LLBL от VB_z (электрического поля) в солнечном ветре (где V -скорость солнечного ветра, B_z – Z-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП)), компоненты ММП B_z , уровня флуктуаций параметров плазмы и магнитного поля в солнечном ветре и в магнитослое.

В ходе исследования использованы результаты наблюдений на спутниках проектов THEMIS и ИНТЕРБОЛ, спутниках WIND и Geotail.

Цель и задачи работы

Целью работы является исследование степени влияния параметров плазмы и магнитного поля солнечного ветра, магнитослоя и их флуктуаций на процессы проникновения плазмы в низкоширотную магнитосферу и формирования LLBL.

В процессе исследования решались следующие **задачи**:

1. Анализ данных наблюдений потоков частиц с энергиями 01-22 кэВ и низкочастотного магнитного поля с целью выделения участков траекторий, на которых высокоапогейные спутники проектов ИНТЕРБОЛ и THEMIS пересекали LLBL.
2. Определение давления плазмы и степени его анизотропии вдоль орбиты спутника Интербол/Хвостовой зонд при пересечении спутником LLBL.
3. Вычисление распределений суммарного давления магнитного поля и плазмы с учетом анизотропии давления вблизи подсолнечной точки с целью изучения баланса давлений на магнитопаузе.
4. Расчет распределения магнитного поля вдоль дневных силовых линий и определение минимальных значений поля с целью их сравнения с амплитудами флуктуаций магнитного поля в магнитослое.
5. Сравнение параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое с параметрами плазмы и магнитного поля внутри магнитосферы.
6. Определение времени пересечения LLBL и скорости плазмы с целью оценки толщины слоя.
7. Определение параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в моменты наблюдений LLBL с целью определения влияния солнечного ветра на формирование LLBL.
8. Изучение ориентации ММП относительно головной ударной волны с целью определения влияния уровня флуктуаций в магнитослое на формирование LLBL.
9. Проведение сравнений полученных экспериментальных результатов с предсказаниями существующих теорий формирования LLBL.

Практическая ценность работы

Работа может представлять интерес при исследовании процессов проникновения плазмы солнечного ветра внутрь магнитосферы Земли и формировании пограничных

слоев магнитосферы. Представлен новый подход, учитывающий наблюдаемые турбулентные флуктуации в магнитослое.

Практическая значимость работы состоит в разработке методов анализа влияния флуктуаций параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое и солнечном ветре на формирование LLBL.

Предложен метод исследования процесса формирования LLBL с учетом наблюдаемых флуктуаций параметров плазмы, магнитного поля и давления на магнитопаузе.

Личный вклад автора

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором при поддержке научного руководителя и других соавторов публикаций. Автором работы проведен отбор и анализ данных спутниковых наблюдений спутников проектов ИНТЕРБОЛ и THEMIS с использованием данных наблюдений на спутниках Geotail и Wind. Был поставлен ряд задач по определению характеристик низкоширотного погранслоя и их зависимости от параметров солнечного ветра и магнитослоя. Создан комплекс программ для исследования баланса давлений на магнитопаузе и распределения давления в приграничных областях магнитосферы.

Достоверность результатов обеспечивается использованными методиками анализа данных спутниковых наблюдений и отсутствием противоречий между полученными результатами и результатами других исследовательских групп, приведенными в цитируемой литературе.

Апробация работы

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

- 1) Научная ассамблея COSPAR (2004, 2007, 2008).
- 2) Международная молодежная конференция «Week of Doctoral Students» (2005, 2007, Прага, Чехия).
- 3) Международная конференция «International Heliophysical Year» (2007, Звенигород) .
- 4) Международная конференция «Conference on Problems of Geocosmos» (Санкт-Петербург, 2006, 2008).
- 5) Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования» (2006, 2007, 2008, ИКИ РАН).
- 6) Конференция «Ломоносовские чтения» - МГУ им. М.В.Ломоносов (2005, 2006, 2007, 2008).

- 7) Международная конференция “Plasma Phenomena in the Solar System: Discoveries of Prof. K.I.Grignauz – a view from the XXI century” (2008, ИКИ, Москва).
- 8) Молодежная научная школа «Экспериментальной и Теоретической Физики» (2005, Кабардино-Балкария).
- 9) Международная научная школа «Heliosphere and Galaxy» (2007, Румыния),
- 10) Международная школа и рабочий семинар “School and Workshop on Space Plasma Physics” (2008, Созополь, Болгария).
- 11) Международный семинар “Physics of Auroral Phenomenon” (2007, 2008, 2009, Апатиты).
- 12) Международная конференция EGU (2008, Вена)
- 13) Международная конференция The Non-Linear Magnetosphere, January 19-23, 2009, Vina del Mar, Chile
- 14) Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 17-20 февраля 2009 Г., ИКИ РАН

а также на семинарах в НИИЯФ МГУ.

Публикации

Результаты опубликованы в 4 статьях в российских и зарубежных журналах, в 9 трудах российских и международных конференций, представлены в 13 тезисах различных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 130 наименований. Диссертация изложена на 146 страницах, содержит 5 таблиц и 86 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследований. Приводятся положения, выносимые на защиту. Отмечается практическая ценность работы и личный вклад автора. Приводится список научных конференций, на которых были представлены результаты, вошедшие в диссертацию, а также список публикаций автора по теме диссертации.

В **первой главе** приведен обзор результатов исследований низкоширотного погранслоя, турбулентности магнитослоя, теоретические подходы, описывающие проникновение плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы и особенности измерений параметров плазмы и магнитного поля в проектах ИНТЕРБОЛ и THEMIS. Так же в первой

главе описана структура магнитосферных доменов и локализация LLBL в магнитосфере Земли.

Вторая глава посвящена балансу давлений на магнитопаузе.

В **разделе 2.1.** описывается традиционный подход к исследованию баланса давлений вблизи магнитопаузы, использующий аппроксимацию Ньютона. Описаны первые результаты по экспериментальному изучению баланса давлений с учетом измерений динамического давления в эксперименте CLUSTER [Panov et al., 2008]. Указывается, что анализ результатов работы [Panov et al., 2008] по изучению баланса давлений демонстрирует отклонение от условия баланса давлений. Можно выделить ряд причин, приведших к данному результату. Прежде всего, магнитопауза довольно быстро двигалась, что является прямым следствием дисбаланса давлений. Во вторых, не была учтена анизотропия давления плазмы как в магнитослое, так и внутри магнитосферы. Кроме того, возникает вопрос о применимости МГД условий баланса к бесстолкновительной турбулентной плазме. Поэтому требовалось с одной стороны оценить возможную ошибку, связанную с анизотропией давления и, во-вторых, постараться проследить изменение давления поперек магнитопаузы в максимально благоприятных для такой проверки условиях. Первая задача решается в данной главе с использованием измерений на спутнике ИНТЕРБОЛ/Хвостовой зонд при пересечениях спутником LLBL на магнитосферном фланге. Вторая – по измерениям на спутниках проекта THEMIS вблизи подсолнечной точки. Так же проведен анализ роли флуктуаций магнитного поля магнитослоя в балансе давлений на магнитопаузе.

В **разделе 2.2** второй главы проводится анализ анизотропии давления на фланге магнитосферы вблизи экваториальной плоскости по результатам измерений в проекте Интербол/Хвостовой зонд: событие 21 сентября 1995 г с 00:30 до 03:30 UT. Была определена анизотропия давления $A = (p_{\perp} / p_{\parallel}) - 1$ в низкоширотном погранслое. Анизотропия для рассмотренного события составляла $\sim (-0.2) - (-0.8)$. Проведенный анализ показал, что анизотропия давления является существенным фактором в низкоширотном погранслое, а, следовательно, ее необходимо учитывать при анализе баланса давлений на магнитопаузе со стороны магнитосфера. Давление вдоль поля может в несколько раз превышать давление поперек поля.

В **разделе 2.3.** анализируется баланс давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки по данным трех спутников проекта THEMIS для события 18 июля 2007 года от 02:30 до 03:50 UT при очень спокойных геомагнитных (амплитуды авроральных индексов в течении суток не превышали 80 нТл, Dst=-7 нТл) и межпланетных условиях. Корреляция между движением магнитопаузы и изменением давления солнечного ветра и компонент

ММП обнаружена не была. Рассматриваются компоненты полного давления, давления ионов и электронов. Условие баланса давлений при пересечении МГД разрыва с учетом анизотропии давлений плазмы имеет вид (см.[Lynn,1967])

$$\left\{n_p m_p v_p^2 + n_e m_e v_e^2\right\} + \left\{p_{\perp} + \frac{B_t^2}{2\mu_0}\right\} + B_n^2 \left\{\frac{p_{\parallel} - p_{\perp}}{B^2}\right\} = 0, \quad (1)$$

где фигурные скобки означают разность величин до и после разрыва, индекс p означает протоны (ионы), e - электроны; n - концентрация, v - гидродинамическая скорость, m_p - масса протона, m_e - масса электрона, p_{\perp} и p_{\parallel} - тепловые давление плазмы поперек и вдоль магнитного поля, B_n и B_t - компоненты магнитного поля перпендикулярно и параллельно плоскости разрыва, μ_0 - магнитная проницаемость вакуума. В исследуемых случаях на магнитопаузе $B_n=0$, $B_t=B$, где B - полное поле, и поток плазмы через магнитопаузу проходит через нуль. Поэтому вблизи магнитопаузы соотношение (1) принимает вид

$$\left\{p_{\perp} + \frac{B_t^2}{2\mu_0}\right\} = 0. \quad (2)$$

В работе анализируются значения полного давления поперек магнитопаузы вблизи «носовой» точке, рассчитанные по данным приборов спутников проекта THEMIS. Для расчета использовались перпендикулярные к магнитопаузе составляющие скорости ионов и электронов в магнитослое v_{\perp} . Динамическое давление ионов и электронов принималось во внимание только для измерений в магнитослое. В ходе анализа продемонстрирована необходимость учета анизотропии давления в магнитослое.

В ходе анализа было показано, что для пересечения магнитопаузы 03:09-03:13 на внешней и внутренней границах магнитопаузы давления практически совпадали, а на внешней границе давление частиц почти изотропно.

В работе рассматривались магнитные давления по данным трех спутников при пересечении магнитопаузы. Флуктуации магнитного давления в магнитослое сравнивались со значением полного давления в магнитослое. Было выявлено, что флуктуации магнитного давления в магнитослое составляют ~7% от уровня полного давления и не вносят значительного вклада в баланс давления на магнитопаузе в подсолнечной точке.

Были проанализированы 18 пересечений магнитопаузы спутниками проекта THEMIS. Анализировалась разность усредненных давлений в магнитослое и магнитосфере на удалении 6-15 с от магнитопаузы. Интервал времени усреднения выбирался по масштабу области, характерной для магнитопаузы с повышенным или пониженным давлением в тех случаях, где ее удалось обнаружить. Во всех остальных

случаях, она считалась равной 15с. Для такой методики определения разности давления, разность давлений составляла 0.04 – 0.20 нПа (4-16 %), когда давление в магнитослое превышало давление в магнитосфере. Если же давление в магнитосфере превышает давление в магнитослое, то разность давлений для таких случаев составила -0,012 – 0 нПа (0 - 9,7 %). Разность давлений была рассчитана также в двух ближайших к магнитопаузе точках. В этом случае, разность давлений для случаев, когда давление в магнитослое превышало давление в магнитосфере, составляла 0,03 – 0,21 нПа (2-16 %). Для случаев, когда давление в магнитосфере было больше давления в магнитослое, усредненная по таким событиям разность давлений составляла 0,07 – 0,25 нПа (7-27 %).

В целом регистрируется совпадение давления в магнитослое и магнитосфере с точностью до ~20 %, что подтверждает возможность, несмотря на отсутствие в плазме столкновений, использование МГД подхода при изучении процесса формирования магнитопаузы.

В **разделе 2.4.** проводится анализ влияния флуктуации магнитного поля в магнитослое на баланс давлений на магнитопаузе. Хорошо известно, что на дневных силовых линиях минимальные значения магнитного поля имеют место не на экваторе, а на высоких широтах. Поэтому в этом разделе сравнивались амплитуды флуктуаций магнитного поля в магнитослое и магнитное поле на дневных силовых линиях.

Был проведен подробный анализ флуктуации магнитного поля в магнитослое и баланс давлений на магнитопаузе на примере события 8 ноября 2007 года. Сравнение результатов наблюдений на спутниках THEMIS- А и -С, проводивших одновременные измерения на близком расстоянии один внутри магнитосферы, а другой в магнитослое, показывает, что амплитуду флуктуаций магнитного поля в магнитослое значительно превышали магнитное поле внутри магнитосферы на магнитосферном фланге. Таким образом, было показано, что при анализе баланса давлений магнитное поле в магнитослое является важным фактором. Сравнивались измерения в магнитослое и положение минимумов магнитного поля построенных по модели Цыганенко-1996. Показано, что амплитуды флуктуаций магнитного поля в магнитослое сравнимы со значениями магнитного поля и областях минимумов поля на дневных силовых линиях. Таким образом, приведенный анализ говорит о том, что флуктуации магнитного поля магнитослоя могут играть существенную роль в балансе давлений на магнитопаузе как в дневные часы на высоких широтах, так и на магнитосферных флангах.

Далее проводится анализ флангового пролета спутников проекта THEMIS 17 ноября 2007 г. Событие интересно тем, что два спутника проекта THEMIS проводили одновременные измерения в магнитослое. При сравнении данных спутников было

показано, что характер вариаций отличается для двух точек магнитослоя. При этом, амплитуды флуктуаций компонент магнитного поля регистрируемых на спутнике THEMIS-B, который находился ближе к ударной волне, составляют от 7 до 20 нТл, а на спутнике THEMIS-C, находившемся вблизи магнитопаузы, от 2 до 15 нТл. В солнечном ветре по данным спутника Wind наблюдались высокочастотные вариации ММП (с периодом менее 30 с) с амплитудами в основном не более 1 нТл. Периоду наблюдений соответствовали сравнительно спокойные условия в солнечном ветре. Из проведенного анализа можно заключить, что характер вариаций магнитного поля отличается в двух достаточно удаленных ($\sim 12 R_E$) друг от друга точках магнитослоя. Сравнивая флуктуации компонент магнитного поля в двух точках магнитослоя и компонент ММП можно заключить, что при малых вариациях ММП (достаточно спокойных условиях) наблюдается турбулентный магнитослой, в котором амплитуды флуктуаций компонент магнитного поля в 2-20 раз превышают амплитуды флуктуаций этих компонент в ММП. Рассматривалась конфигурация магнитного поля в дневные часы на меридиане полдень-полночь в соответствии с моделью Цыганенко-1996 для события 17 ноября 2007 г. Показано, что амплитуды флуктуаций магнитного поля в магнитослое сравнимы со значением магнитного поля внутри магнитосферы на высоких широтах, что подтверждает необходимость учета магнитного поля магнитослоя при анализе баланса давлений на магнитопаузе.

Проведен подробный анализ события 2 марта 1996. Приведены результаты анализа флуктуаций магнитного поля в магнитослое и распределения магнитного поля вдоль дневных силовых линий по данным спутников Интербол/Хвостовой зонд, Geotail и WIND. Сравнивались значения магнитного поля в магнитослое, учитывались данные многочисленных измерений магнитного поля внутри магнитосферы на прикаспенных магнитных силовых линиях и результаты моделирования конфигурации магнитных силовых линий в плоскости меридиана полдень-полночь в соответствии с моделью Цыганенко-1996. Было показано, что амплитуда флуктуаций магнитного поля в магнитослое превышает значение магнитного поля в прикаспенных областях и в LLBL на магнитосферных флангах. Положение магнитопаузы, как известно, определяется из условия баланса давления плазмы и магнитного поля вне и внутри магнитосферы. В ходе анализа наблюдений показано, что когда значение магнитного поля под магнитопаузой сравнимо со значением магнитного поля вне магнитопаузы, магнитное поле в магнитослое и его флуктуации, являются важным фактором, определяющим условия проникновения плазмы внутрь магнитосферы.

Рассмотрено событие 6 февраля 1997 года, интервал времени 13:30-16:00 UT, во время которого спутники Интербол/Хвостовой Зонд и Магион-4 проекта ИНТЕРБОЛ летели из магнитослоя внутрь магнитосферы, пересекая LLBL. Спутники находились на расстоянии в 130 км. Было показано, что в двух близких точках магнитослоя флуктуации магнитного поля сильно отличаются, а амплитуды флуктуаций усиливаются при приближении спутников к магнитопаузе.

Проведен анализ роли флуктуаций параметров магнитослоя в балансе давлений на магнитопаузе. Подчеркивается, что

1) Проведенный анализ данных наблюдений на спутниках проектов THEMIS, ИНТЕРБОЛ, спутников Wind и Geotail позволяет выделить турбулентные флуктуации плазмы магнитослоя в качестве одного из основных факторов, определяющих динамику магнитопаузы.

2) Амплитуда флуктуаций магнитного поля в турбулентном магнитослое часто превышает величину магнитного поля под магнитопаузой.

3) Продемонстрировано соблюдение условия баланса давлений на магнитопаузе в отдельном событии с точностью $\sim 3\%$ и статистически с точностью $\sim 20\%$. Возможность нарушения баланса давления в связи с сильными флуктуациями магнитного поля возникает в точках, удаленных от подсолнечной, в прикаспенных областях. Это означает, что флуктуации магнитного поля и магнитного давления не вносят существенного вклада в баланс давления в подсолнечной точке и могут приводить к нарушению баланса давления в прикаспенных областях.

Третья глава посвящена анализу зависимости толщины LLBL от межпланетных параметров, их флуктуаций и флуктуаций магнитного поля в магнитослое.

В **части 3.1.** проводится обзор результатов исследований толщины LLBL и ее зависимости от различных факторов. Выделены результаты наблюдений показывающие, что толщина LLBL увеличивается с удалением от подсолнечной точки, утренняя сторона LLBL толще, чем вечерняя [Newell et al., 2003], при южной ориентации ММП наблюдается тонкий LLBL при северном ММП – LLBL толстый [Sckorke et al, 1981; Mitchell et al., 1987]. Подчеркнуто, что определение зависимости толщины LLBL от параметров солнечного ветра может иметь существенное значение для решения проблемы проникновения плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы. Поэтому в третьей главе приведены результаты определения этих зависимостей по данным Интербол/Хвостовой зонд и THEMIS. Было отобрано 32 случая пересечения LLBL спутником ИНТЕРБОЛ/Хвостовой Зонд и 73 – спутниками THEMIS. Толщина LLBL для этих

событий была посчитана с помощью средней скорости плазмы, перпендикулярной магнитопаузе (\sim скорости магнитопаузы) и времени пролета спутника в слое.

В **разделе 3.2.** представлены зависимости толщины LLBL от локализации в магнитосфере Земли, от компоненты B_Z ММП и VB_Z , где V - скорость солнечного ветра. В этом разделе приведены таблицы с параметрами отобранных пролетов спутников в LLBL, описана методика определения толщины слоя. Отдельно проводился анализ для $X>0$ (дневные часы) и $X<0$ (хвост магнитосферы). На рисунках в работе приведены результаты фитирования полученной зависимости. Наблюдается тенденция увеличения толщины слоя при росте параметров ММП. В работе приведены зависимости толщины LLBL от VB_Z при $Y>0$ и $Y<0$ и зависимости при $Z>0$ и $Z<0$. Зависимость от знака Y может отражать асимметрию утро-вечер. Несмотря на большой разброс точек, можно выделить тенденцию к асимметрии толщины LLBL в направлении утро-вечер, что подтверждает результаты работ [Mitchell et al., 1987 и др.]. Таким образом, в результате проведенного анализа подтверждены обнаруженная ранее зависимости толщины слоя от B_Z и асимметрия утро-вечер. Выявлена слабая зависимость толщины LLBL от VB_Z в солнечном ветре. Однако разброс точек очень велик. При северном ММП наблюдается как тонкий, так и толстый LLBL, в отличие от указанных в работе [Mitchell et al., 1987] пересечений преимущественно толстого LLBL при северном ММП. Проанализированные закономерности согласуются с постоянно наблюдаемым высоким уровнем турбулентности в магнитослое и полученными в Главе 2 выводами о роли флуктуаций параметров магнитослоя в проникновении плазмы внутрь магнитосферы, так как при таком проникновении толщина LLBL должна сильно флуктуировать.

В **разделе 3.3.** представлен анализ зависимости толщины LLBL от уровня флуктуаций компоненты B_Z ММП, VB_Z и скорости солнечного ветра. Уровень флуктуаций анализировался на трех интервалах времени: 30с, 120с и 5 мин. Анализ свидетельствует в пользу отсутствия какой либо ярко выраженной зависимости толщины LLBL от уровня флуктуаций в солнечном ветре.

В **разделе 3.4.** анализируется зависимость толщины LLBL от угла между нормалью к ударной волне и направлением магнитного поля в солнечном ветре (угол Θ_{Bn}). Известно, что вариации потока ионов и модуля магнитного поля в магнитослое падают с ростом угла Θ_{Bn} . Разделяют участки ударной волны с углом $\Theta_{Bn} > 45^\circ$, их называют квазиперпендикулярными, и участки квазипараллельные, угол $\Theta_{Bn} < 45^\circ$. Вариации потока ионов и магнитного поля в магнитослое падают с ростом угла Θ_{Bn} . При квазипараллельной ударной волне ($\Theta_{Bn} < 45^\circ$) флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое превышают флуктуации за квазиперпендикулярной

ударной волной ($\Theta_{\text{Вн}} > 45^\circ$). Для проверки предположения о зависимости толщины LLBL от типа ударной волны вверх по потоку была построена зависимость толщины LLBL от угла $\Theta_{\text{Вн}}$. Толщина слоя рассчитывалась для пролетов спутника ИНТЕРБОЛ/Хвостовой Зонд. Использована модель Спрайтера течения плазмы в магнитослое. Было продемонстрировано отсутствие ожидаемой тенденции роста толщины LLBL при уменьшении угла $\theta_{\text{Вн}}$. Предложен ряд объяснений отсутствия предполагаемой зависимости. Среди возможных объяснений выделена доминирующая роль внутримангнитосферных процессов в формировании толщины LLBL.

В **разделе 3.5** проведено сравнение результатов исследований толщины LLBL с теоретическим анализом, проведенным в работе [Antonova, 2005]. В соответствии с результатами данной работы высокий уровень турбулентности LLBL может обеспечивать интенсивный транспорт квазидиффузионного типа в направлении, перпендикулярном слою. Наряду с квазидиффузионным транспортом частиц также учитывался также конвективный транспорт. Развитый подход позволяет объяснить зависимость толщины слоя от направления ММП и асимметрию толщины утро-вечер. Показано, что результаты теоретического анализа, проведенные в работе [Antonova, 2005] согласуются с полученными результатами экспериментальных наблюдений.

В **заключении** приводятся объяснения полученных результатов, выводы и научная новизна работы.

Новыми являются результаты, полученные в ходе одновременных наблюдения LLBL, солнечного ветра и магнитослоя:

1. Проведен анализ распределения давления в низкоширотном погранслое.
 - Впервые получены значения давления и анизотропии давления в LLBL с учетом вкладов частиц до энергий ~ 800 кэВ.
 - Показано, что наблюдаемую анизотропию давления необходимо учитывать в процессе анализа баланса давлений. В LLBL она составляет более 50%.
2. Проведен анализ баланса давлений в подсолнечной точке магнитопаузы в условиях спокойной магнитносферы и высокого уровня турбулентности в магнитослое.
 - Впервые учтена анизотропия давления плазмы в магнитослое.
 - Показано, что МГД подход к описанию тангенциальных разрывов в анизотропной плазме позволяет описывать баланс давлений на магнитопаузе.
3. Проведено сравнение характеристик турбулентных флуктуаций параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое с магнитным полем внутри магнитосферы.

Впервые показано, что

- Амплитуды флуктуаций магнитного поля могут превышать величину магнитного поля в областях минимальных значений поля на дневных силовых линиях в магнитосфере.
- Флуктуации магнитного поля могут играть существенную роль в балансе давлений на магнитопаузе.

4. Изучено 105 пересечений низкоширотного пограничного слоя спутниками проекта THEMIS и Интербол/Хвостовой Зонд.

- Получена зависимость толщины LLBL от параметра VB_z (электрического поля в солнечном ветре). На большем статистическом материале подтверждены результаты работы [Mitchell et al., 1987], полученные с использованием другой методики определения толщины слоя, о росте толщины слоя при северной ориентации межпланетного магнитного поля.
- Показано, что толщина слоя практически не зависит от уровня флуктуаций скорости и магнитного поля в солнечном ветре.

5. Впервые исследована зависимость толщины LLBL от типа головной ударной волны вверх по потоку в связи с проверкой гипотезы о роли уровня флуктуаций магнитного поля в магнитослое в формировании толщины LLBL.

Получены следующие результаты:

- На имеющемся экспериментальном материале предполагаемая зависимость не обнаружена.
- Показано, что результаты наблюдений можно объяснить с учетом роли внутримангнитосферных процессов в формировании LLBL.

Можно выделить следующие **основные положения, выносимые на защиту**:

1. Давление плазмы в низкоширотном погранслое анизотропно. Давление вдоль магнитного поля может превышать давление поперек поля на 20-80%, что необходимо учитывать при анализе баланса давлений.
2. Условие баланса давлений с учетом анизотропии давления плазмы в магнитослое описывает изменение полного давления при пересечениях магнитопаузы в подсолнечной точке в магнитоспокойных условиях при северной ориентации межпланетного магнитного поля.
3. Амплитуды флуктуаций магнитного поля в магнитослое могут превышать значения магнитного поля на дневных силовых линиях в высоких широтах, что необходимо учитывать при анализе баланса давлений и решении проблемы проникновения частиц внутрь магнитосферы.

4. В ходе анализа 105 пересечений низкоширотного погранслоя получена зависимость толщины низкоширотного погранслоя от V_{Bz} (электрического поля) в солнечном ветре. Показано, что толщина низкоширотного погранслоя слабо растет с ростом V_{Bz} . Подтвержден на почти вдвое большем статистическом материале полученный ранее вывод о росте толщины LLBL при северной ориентации ММП.
5. Толщина низкоширотного погранслоя практически не зависит от уровня флуктуаций в солнечном ветре и магнитослое, что согласуется с определяющим влиянием на толщину слоя внутримангнитосферных процессов.

Список работ автора по теме диссертации

1. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, V.N. Lutsenko, N.L. Borodkova, Plasma sheet and magnetosheath plasma mixing in LLBL: Case study, *Advances in Space Research*, v. 38(8), p. 1744-1749, 2006.
2. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, M.I. Verigin, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Low latitude boundary layer (LLBL): structure, dynamics and magnetosheath plasma penetration inside the magnetosphere, *Romanian Astronomical Journal*, v. 17, p. 139-145, 2007.
3. Россоленко С.С., Е.Е. Антонова, Ю.И. Ермолаев, М.И. Веригин, И.П. Кирпичев, Н.Л. Бородкова, Турбулентные флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое и формирование низкоширотного погранслоя: многоспутниковые наблюдения 2 марта 1996 года, *Космические Исследования*, том 46, № 5, с. 387-397, 2008.
4. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Formation and characteristics of low latitude boundary layer, *Advances in Space Research*, v. 41, Issue 10, p. 1545-1550, 2008.
5. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, N.N. Shewirev, M. Chugunova, Magnetosheath turbulence and the low latitude boundary layer formation, *Proceedings of 7th International Conference Problems of Geocosmos*, 26 - 30 May, 2008, St. Petersburg, Russia, 2008, p. 243-248, 2008.
6. Rossolenko S.S., M.O. Riazantseva, E.E. Antonova, I.P. Kirpichev, I.L. Ovchinnikov, K.G. Orlova, B.V. Marjin, M.A. Saveliev, V.M. Feigin, M.V. Stepanova, Structural features of auroral precipitations and topology of high latitude current systems, *Proceedings of the 31th Annual Seminar "Problems of Geocosmos"*, Apatity, p. 79-82, 2008.

7. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, M.I. Verigin, I.P. Kirpichev, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Magnetosheath turbulence and low latitude boundary layer (LLBL) formation, *Proceedings of the 30th Annual Seminar "Problems of Geocosmos", Apatity, 2007*, p. 81-85, 2007.
8. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, M.I. Verigin, I.P. Kirpichev, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Magnetosheath Turbulence and Low Latitude Boundary Layer, *WDS'07 Proceedings of Contributed Papers, Part 2*, p. 50–56, 2007.
9. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, V.N. Lutsenko, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Interball/Tail probe observations of characteristics of low latitude boundary layer and the problem of the magnetosheath plasma penetration inside the magnetosphere, *Proceedings of 6-th International Conference on Problems of Geocosmos, St. Peterburg, Russia, 23-27 May, 2006*, p. 167-170, 2006.
10. Rossolenko S.S., Antonova E.E., Ermolaev Yu.I., Magnetosheath/plasma sheet mixing and the LLBL formation: Case study. *Proceedings of 14th Annual Conference of Doctoral Study (WDS'05), 7-10 June 2005, Prague, Czech Republic*, p. 234-239, 2005.
11. Россоленко С.С., Характеристики низкоширотного пограничного слоя магнитосферы Земли: наблюдения со спутника Интербол/Хвостовой зонд, Труды шестой БМШ ЭТФ – 2005, Том 2, с. 81-87, 2005.
12. Антонова Е.Е., Кирпичев И.П., Овчинников И.Л., Россоленко С.С., Орлова К.Г., Топология токов в высокоширотной магнитосфере и отклик магнитосферы на изменения параметров солнечного ветра, Сборник Солнечно-земная физика, Вып. 12, т. 1, с. 125–128, 2008.
13. Россоленко С.С., Е.Е. Антонова, Ю.И. Ермолаев, И.П. Кирпичев, И.Л. Овчинников, М.И. Веригин, Н.Л. Бородкова, Е.Ю. Будник, Влияние сильной турбулентности в магнитосфере на формирование низкоширотного пограничного слоя, Сборник Солнечно-земная физика, Издательство СО РАН, Вып. 12, т. 1, с. 129-130, 2008.
14. Antonova, E.E., M.V. Stepanova, I.P. Kirpichev, S.S. Rossolenko, I.L. Ovchinnikov, K.G. Orlova, M.S. Pulinets, Turbulence and stress balance in the magnetosphere of the Earth, *The Non-Linear Magnetosphere, January 19-23, 2009, Vina del Mar, Chile, Abstracts*, p. 3, 2009.
15. Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Кирпичев И.П., Исследование баланса давления на магнитопаузе в подсолнечной точке по данным наблюдений спутников проекта THEMIS, Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 17-20 февраля 2009 г., ИКИ РАН, Сборник тезисов, с. 40, 2009.

16. Rossolenko S.S., Antonova E.E., Yermolaev Yu.I., Kirpichev, I.P., Observations of Low Latitude Boundary Layer by THEMIS Satellite: preliminary results of the analysis, book of abstracts of the International conference “Plasma Phenomena in the Solar System: Discoveries of Prof. K.I.Gringauz – a view from the XXI century”, p. 27-28, 2008.
17. Rossolenko S.S., Antonova E.E., Kirpichev, I.P., Yermolaev Yu.I., Interaction of the solar wind with the magnetosphere of the Earth and formation of magnetospheric boundary layers, abstracts of “School and Workshop on Space Plasma Physics”, Sozopol, Bulgaria, p. 80, 2008.
18. Antonova E.E., I.P. Kirpichev, I.L. Ovchinnikov, S.S. Rossolenko, M.V. Stepanova, M. Danov, Field-aligned currents and auroral structures, Abstracts of 37th COSPAR Scientific Assembly, 13 – 20 July 2008, Montreal, Canada, D36-0004-08, 2008.
19. Россоленко, С.С. Е.Е. Антонова, Ю.И. Ермолаев, И.П. Кирпичев, М.И. Веригин, Н.Л. Бородкова, Турбулентность в магнитослое и формирование низкоширотного пограничного слоя магнитосферы Земли, тезисы 4-й конференции «Фундаментальные и прикладные исследования», ИКИ РАН, с 33, 2008.
20. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, M.I. Verigin, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Characteristics of low latitude boundary layer and the magnetosheath plasma penetration inside the magnetosphere, *EGU Abstracts*, 2007-A-00315, 2007.
21. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, M.I. Verigin, I.P. Kirpichev, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Formation of Low Latitude Boundary Layer (LLBL) due to high level of turbulence in the magnetosheath: Case study, *IHY*, 2007.
22. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, V.N. Lutsenko, N.L. Borodkova, E.Yu. Budnik, Interball/Tail probe observations of characteristics of low latitude boundary layer and the problem of the magnetosheath plasma penetration inside the magnetosphere, *International Conference on Problems of Geocosmos. Book of Abstracts*, St. Peterburg, Russia, 23-27 May, 2006, p. 260, 2006.
23. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Yermolaev, I.P. Kirpichev, V.N. Lutsenko, E.Yu. Budnik, A.O. Fedorov, Formation and characteristics of Low Latitude Boundary Layer, *36th COSPAR Scientific Assembly*, Beijing, China, 16-23 July 2006, D3.1-0057-06, 2006.
24. Rossolenko S.S., E.E. Antonova, Yu.I. Ermolaev, I.P. Kirpichev, V.N. Lutsenko, Plasma sheet/magnetosheath plasma mixing and LLBL formation (Interball/Tail probe observations), *35th Cospar Assambly 2004 Abstracts*, Paris, France, 18-25 July 2004, Paper No D3.5-0072-04, 2004.

25. Rossolenko S.S., Antonova E.E., Ermolaev Yu.I., LLBL as a magnetosheath/plasma sheet boundary: Case study, *Geophysical research Abstracts*, Vol 6,01243, 2004.
26. Antonova E.E., Rossolenko S.S., Ermolaev Yu.I., I.P.Kirpichev, V.N. Lutsenko, E.Yu.Budnik, A.O. Fedorov, Characteristics of Low Latitude Boundary Layer: Theoretical treatment and the results of Interball/Tail probe observations, *IAGA*, 2005-A-00099, 2005.

Список литературы

- Застенкер Г.Н., Магнитослой, Плазменная гелиофизика, т. 1, с. 389-397, 2008.
- Савин С.П., Магнитопауза и пограничные слои магнитосферы, Плазменная гелиофизика, т. 1, с. 398-411, 2008.
- Antonova E.E., The structure of the magnetospheric boundary layers and the magnetospheric turbulence, *Planet. Space Sci.* 53(1), 161–168, 2005.
- Lynn Y.M., Discontinuities in an anisotropic plasma, *The physics of fluids*, 10(10), 2278-2280, 1967.
- Mitchell D.G., Kutchko F., Williams D.J. et al. An extended study of the low-latitude boundary layer on the dawn and dusk flanks of the magnetosphere// *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. № 7. P. 7394-7404.
- Newell, P., Meng, Ch., 2003. Magnetosheath injections deep inside the closed LLBL: a review of observations, in *Earth's Low-Latitude Boundary Layer*, edited by P.T. Newell and T. Onsager, AGU Monograph 133, Washington, DC, 149-156.
- Panov E.V., Buechner J., Fraenz M., Korth A., Savin S.P., Reme H., Fornacon K.-H., 'High-latitude Earth's magnetopause outside the cusp: Cluster observations'. *J. Geophys. Res.* 113, A01220, 2008.
- Sandahl I., The high-and low-latitude boundary layers in the magnetotail, Interball in the ISTP Program : studies of the solar wind-magnetosphere-ionosphere interaction / edited by D.G. Sibeck and K. Kudela. Dordrecht : Boston : Kluwer, 1999. (NATO science series. Series C, Mathematical and physical sciences ; v. 537), p.203.
- Sckopke, N., Paschman, G., Haerandal, G., Sonnerup, B.U.Ö., Bame S.J., Forbers, T.G., Hones, E.W., Russell, C.T., 1981. Structure of the low-latitude boundary layer. *J. Geophys. Res.* 86(A4), 2099-2110.
- Sibeck D.G., T.-D. Phan, R.P. Lin et al., A survey of MHD waves in the magnetosheath: International Solar Terrestrial Program observations, *J. Geophys. Res.*, 105(A1), 129-138, 2000.

Напечатано с готового оригинал-макета

Издательство ООО «МАКС Пресс»

Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.

Подписано к печати 14.05.2009 г.

Формат 60x90 1/16. Усл.печ.л. 1,25. Тираж 120 экз. Заказ 255.

Тел. 939-3890. Тел.Факс 929-3891

119992, ГСП-2, Москва, Ленинские Горы, МГУ им.М.В.Ломоносова,
2-й учебный корпус, 627 к.