

На правах рукописи



КАЛЕГАЕВ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ

**ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРНЫХ ТОКОВЫХ СИСТЕМ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Алексеев Игорь Иванович (НИИЯФ МГУ)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Гетлинг Александр Владимирович (НИИЯФ МГУ)

доктор физико-математических наук
Демехов Андрей Геннадьевич (ИПФ РАН)

доктор физико-математических наук
Пилипенко Вячеслав Анатольевич (ИФЗ РАН)

Ведущая организация: Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Защита состоится « 30 » 09 _____ 2009 г. в « 15 » часов

на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 501.001.45 в МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва,
Ленинские Горы, дом 1 стр. 5 ("19 корпус" НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 21 » 08 _____ 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 501.001.45

кандидат физико-
математических наук
Вохник Ольга Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Магнитосферные токовые системы формируются и эволюционируют в результате постоянного и активного взаимодействия между солнечным ветром и собственным магнитным полем Земли. Крупномасштабные токи в магнитосфере определяют структуру магнитного поля, размер и положение плазменных образований в околоземном космическом пространстве, траектории движения энергичных заряженных частиц. Находясь под постоянным воздействием солнечного ветра, магнитосферные токовые системы воспроизводят вариации параметров межпланетной среды, связанные с активными процессами на Солнце.

Воздействие межпланетной среды на магнитосферу реализуется двумя способами. Во-первых, это прямое взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой, приводящее к вариациям магнитного поля в переходной области, изменениям формы и положения магнитопаузы. Во-вторых, - изменение параметров магнитосферных токовых систем, их положения и интенсивности, в ответ на вариации солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Оба механизма воздействия на магнитосферу представляют собой части единого процесса взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, проявляющегося в несинхронном развитии крупномасштабных токовых систем. Изучение структуры магнитосферы и динамики отдельных магнитосферных токовых систем в ответ на изменение условий в солнечном ветре является главной задачей настоящей работы.

Актуальность такого исследования связана с тем, что взаимосвязь условий в межпланетном пространстве, процессов, происходящих в солнечном ветре, и глобальной динамики магнитосферных токовых систем, является ключевым фактором для понимания природы взрывных явлений в магнитосфере Земли, таких как магнитная буря, либо, наоборот, условий в околоземном космическом пространстве, поддерживающих стационарное состояние магнитосферы.

Взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем является одной из классических задач физики магнитосферы. С запуском космических аппаратов Cluster в 2000г. получены новые данные о структуре магнитопаузы и о природе процессов происходящих в ее окрестности под влиянием изменяющихся условий в солнечном ветре. В этой связи являются актуальными теоретические исследования механизмов поступления энергии и импульса, проникновения электрического и магнитного полей солнечного ветра внутрь магнитосферы, которые позволяют установить соответствие между параметрами межпланетной среды и динамикой и структурой магнитосферных токовых систем.

Наиболее ярко относительная, несинхронная динамика магнитосферных токовых систем проявляется во время взрывных магнитосферных процессов,

самым мощным из которых является магнитная буря. Магнитная буря является откликом магнитосферы на внезапное увеличение динамического давления солнечного ветра. Она связана с интенсивным энерговыделением в магнитосфере и в ионосфере, которое контролируется главным образом величиной и направлением межпланетного магнитного поля. Главная особенность магнитной бури – резкое усиление кольцевого тока вследствие инжекции заряженных частиц из хвоста магнитосферы. В то же время, магнитная буря сопровождается значительным усилением и других магнитосферных токовых систем: токов хвоста, ионосферных токов, токов на магнитопаузе. Разные магнитосферные токовые системы располагаются в областях космического пространства, обладающих разными физическими свойствами, и по-разному реагируют на внешнее воздействие. Кроме этого, магнитосферные токи обладают и собственной динамикой, выражающейся в их несинхронном развитии и распаде в ответ на воздействие солнечного ветра. Сложная эволюция магнитосферных токовых систем проявляется в вариациях магнитного поля измеряемых на поверхности Земли и в профилях рассчитываемых геомагнитных индексов. Исследование магнитосферных токовых систем во время магнитной бури под воздействием меняющихся условий в солнечном ветре является актуальной задачей физики магнитосферы. Миссия Themis, успешно выполняемая с 2007 года, должна пролить свет на многие детали магнитосферной динамики в возмущенные периоды. Наряду с экспериментальными исследованиями, эффективным методом является воспроизведение эволюции магнитосферных токовых систем с использованием теоретических моделей. Анализ экспериментальных данных с использованием моделей магнитного поля, формирующегося вследствие взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли позволяет осуществлять прогноз геомагнитной возмущенности и выполнять диагностику состояния межпланетной среды.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – изучение механизмов воздействия солнечного ветра на динамику магнитосферных токовых систем, исследование структуры и временных вариаций магнитосферного магнитного поля во время магнитных бурь на основе анализа экспериментальных данных и теоретических моделей взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработка модели магнитного поля, формирующегося в переходной области при сверхзвуковом взаимодействии потока замагниченной плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли.

2. Исследование структуры магнитного поля в магнитосфере и в переходной области магнитосферы при диффузионном взаимодействии замагниченного солнечного ветра с магнитосферой Земли для разных направлений межпланетного магнитного поля.
3. Изучение временной динамики и пространственного положения магнитосферных токовых систем при изменении условий в межпланетной среде.
4. Исследование относительной динамики кольцевого тока и токового слоя хвоста магнитосферы во время магнитных бурь разной интенсивности.

Методы исследования. Основными методами теоретического исследования, разработанными и примененными в диссертации, являются аналитические решения и оценки, а также численные алгоритмы, реализованные в виде программных кодов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются: тестированием численных алгоритмов для определения точности полученных решений, сходимости и устойчивости системы; совпадением полученных аналитических оценок и результатов численного моделирования с данными спутниковых и наземных наблюдений о положении границ плазменных образований и о величине магнитного поля в магнитосфере Земли. Все результаты, представленные в диссертации, докладывались на многочисленных Всероссийских и Международных конференциях и опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе работы над диссертацией:

1. Разработана новая модель диффузионного взаимодействия сверхзвукового потока замагниченной плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли.
2. Впервые получены аналитические решения для магнитного и электрического полей в переходной области с учетом сжимаемости и конечной проводимости плазмы солнечного ветра.
3. Впервые получены аналитические выражения для *интенсивности пересоединения* магнитосферного и межпланетного магнитных полей, отражающие зависимость от направления межпланетного магнитного поля, проводимости плазмы и от степени сжатия плазмы солнечного ветра на ударной волне.
4. Дано новое объяснение экспериментально установленным различиям в структуре магнитного поля вблизи магнитопаузы, наблюдаемым при южном и северном направлениях межпланетного магнитного поля (ММП).

5. Впервые, на основе статистического исследования 70 магнитных бурь 1998-2005 годов, установлено, что соотношение между вкладами магнитосферных токовых систем в Dst-индекс геомагнитной активности зависит от интенсивности бури. Показано, что в главную фазу магнитных бурь умеренной интенсивности кольцевой ток и токовый слой хвоста магнитосферы создают примерно одинаковые вклады в Dst-индекс, в то время как во время мощных магнитных бурь доминирующий вклад в Dst-индекс вносит кольцевой ток.
6. Обоснована новая концепция динамики токового слоя хвоста магнитосферы, согласно которой максимальный магнитный поток через доли хвоста растет с увеличением мощности геомагнитного возмущения, но испытывает *насыщение* на бурях с минимальными значениями геомагнитного индекса $Dst \sim -200 \text{ нТл}$.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Разработанная глобальная модель позволяет естественным образом связать геомагнитные возмущения в магнитосфере с условиями в межпланетной среде. Она может быть использована в теоретических исследованиях, а также при анализе данных космических экспериментов, в которых изучаются структура плазменных образований, движение заряженных частиц и динамические процессы в магнитосфере Земли. Трехуровневая структура модели: эмпирические данные - параметры магнитосферных токовых систем - магнитосферное магнитное поле, – позволяет легко менять параметризацию и, таким образом, гибким образом учитывать наличие или отсутствие необходимых для анализа состояния магнитосферы экспериментальных данных. Такие исследования могут быть полезными для диагностики состояния околоземного космического пространства, для прогнозирования геомагнитной активности и космической погоды в целом.

Теоретические результаты, представленные в диссертации, использовались при создании модели ISO/DIS 22009 «Космическая среда, естественная и искусственная. Магнитное поле магнитосферных токов», в 2008 году решением Международной организации по стандартам (ISO) утвержденной в качестве Проекта международного стандарта. Разработанные теоретические представления о формировании открытой магнитосферы использовались при создании моделей магнитного поля планет-гигантов: Юпитера и Сатурна и при изучении авроральной динамики, наблюдаемой в магнитосферах этих планет.

Исследования поддержаны грантами РФФИ 09-05-00798, 07-05-00529, 06-05-64508, 04-05-64396, 01-05-65003.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. В рамках кинематического МГД-приближения получены аналитические выражения для магнитного и электрического полей, формирующихся при стационарном обтекании земной магнитосферы солнечным ветром, с учетом сжимаемости и конечной проводимости плазмы в переходной области.
2. Установлено, что учет конечной проводимости плазмы солнечного ветра в переходной области приводит к появлению ненулевой нормальной компоненты магнитного поля на границе магнитосферы. Получены аналитические выражения для интенсивности пересоединения магнитосферного и межпланетного магнитных полей, зависящие от направления ММП, проводимости и степени сжатия плазмы солнечного ветра на головной ударной волне.
3. Дано объяснение различиям в структуре магнитного поля внутри магнитосферы и в окрестности магнитопаузы, наблюдаемым при южном и северном направлениях ММП.
4. Построена эмпирическая модель, которая описывает средние размер и форму параболоидальной магнитопаузы в зависимости от динамического давления солнечного ветра и B_z -компоненты ММП. Количественно обосновано, что при южном направлении ММП происходит более интенсивная передача импульса в магнитосферу, чем при северном.
5. Сформулирована унифицированная методика вычисления индекса геомагнитной возмущенности Dst и его составляющих с помощью моделей магнитосферного магнитного поля, согласующаяся со стандартной процедурой вычисления Dst по данным наземных магнитометров. Показано, что использование «стандартной» процедуры вычисления Dst -индекса позволяет однозначно определить вклады в Dst магнитосферных токовых систем с помощью моделей магнитосферного магнитного поля.
6. Установлено, что соотношение между вкладами магнитосферных токовых систем в Dst зависит от интенсивности бури. Показано, что в главную фазу магнитных бурь умеренной интенсивности магнитное поле токов хвоста магнитосферы на поверхности Земли сопоставимо с магнитным полем кольцевого тока. Во время сильных бурь поле кольцевого тока доминирует над полем токов хвоста, вклад которого в Dst -индекс не превышает по абсолютному значению 150 нТл.

7. Установлено, что токи хвоста магнитосферы достигают насыщения на магнитных бурях с $Dst \sim -200$ нТл, в то время как в бурях большей мощности кольцевой ток имеет возможность для дальнейшего развития.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Диссертация апробирована на научных семинарах НИИЯФ МГУ, ИКИ РАН, Финского метеорологического института (Хельсинки). Результаты работы доложены на съездах, симпозиумах, конференциях:

1. IUGG 21-th Gen. Assembly. Boulder, USA, July 2-14, 1995.
2. Int. Symposium Satellite investigations of the ionospheric and magnetospheric processes, Troitsk, Moscow Region, 11-13 Dec., 1995.
3. 10th Summer School of the Computational Physics Group EPS, Czeс. Rep., Scalsky Dvur, September 2-12, 1995.
4. International Conference "Problems of Geocosmos", S-Petersburg, June, 10-16, 1996.
5. 8-th JAGA General Assembly, Uppsala, Sweden, August 4-15, 1997.
6. Workshop "Space Radiation Environment Modelling: New Phenomena and Approaches", Moscow, Russia, October 7-9, 1997.
7. AGU Spring Meeting, Baltimore, USA, May 27-30, 1997.
8. 32nd COSPAR Scientific Assembly, Nagoya, Japan, 12-19 July 1998.
9. General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, France, April 20-24, 1998.
10. International Conference on Problems of Geocosmos, June 29 - July 3, St. Petersburg, Russia, 1998.
11. International Symposium "Space Plasma Studies by In-Situ and Remote Measurements" Moscow, Russia, June 1-5, 1998.
12. Международный симпозиум "Interball-99, Dynamics of the magnetosphere and its coupling to the ionosphere on multiple scales from INTERBALL, ISTP satellites and ground-bases observations", Zvenigorod, February 8-13, 1999.
13. XXIV General Assembly of EGS, 19-23 April 1999, the Hague, the Netherlands, 1999.
14. Генеральная ассамблея Международного геофизического и геодезического союза, Бирмингем, Великобритания, 19-30 июля 1999.
15. International Conference on Substorm-5, St.-Petersburg, Russia, 16-20 May, 2000.
16. European Geophysical Society, XXV Assembly, Nice, France, 25-29 April, 2000.
17. International workshop "Space Storms and Space Weather Hazards", Hersonissos, Crete, Greece, June, 19-29, 2000

18. 3-rd International Conference "Problems of geocosmos", Sankt-Petersburg, Russia, May 22-26, 2000
19. 6-th International School/Symposium for Space Plasma Simulation (ISSS-6), Garching, Germany, September 3-8, 2001.
20. EGS XXVII General Assembly Nice, France, 21 - 26 April 2002.
21. International Conference on Problems of Geocosmos, St. Petersburg, Russia, June 3-8, 2002.
22. 34th COSPAR Scientific Assembly (Second World Space Congress); Houston, Texas, USA, 10-19 October 2002.
23. Chapman Conference on Physics and Modelling of the Inner Magnetosphere, Helsinki, Finland, August 25-29, 2003.
24. International Conference on "Auroral phenomena and solar-terrestrial relations", Moscow, Russia, February 4-7, 2003.
25. Workshop "Effects of space weather of technology infrastructure", Rhodes, Greece, 25-29 March 2003.
26. International Symposium on Solar Extreme Events of 2003, Moscow. July 12-14, 2004.
27. International conference on Problems of Geocosmos, St. Petersburg, Russia, May 24-28, 2004.
28. AGU Fall Meeting, San Francisco, 2005.
29. 7th International Symposium for Space Simulations (ISSS-7), Kyoto, Japan, 26-31 March, 2005.
30. IAGA 2005 Scientific Assembly, Toulouse, France, 18 - 29 July 2005.
31. 6-th Int. Conf. "Problems of Geocosmos", St. Petersburg, Russia, 23-27 May, 2006.
32. International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System (ISROSES), Varna, Bulgaria, 17-22 September 2006.
33. XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Perugia, Italia, July 2-13 2007.
34. Int. Symposium "International Heliophysical Year 2007: New insights into solar-terrestrial physics", Moscow. November 5 - 11, 2007.
35. International conference "Problems of Geocosmos", St. Petersburg University (SPbU), Russia, 26 - 30 May, 2008.
36. Annual Meeting of AOGS, Busan, Korea, 16-20 May, 2008.
37. 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, Canada, 13 – 20 July 2008.
38. Конференция по Программе ОФН РАН «Плазменные процессы в солнечной системе (ОФН-16)», Москва, 17-20 февраля 2009.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты, полученные автором и изложенные в диссертации, представлены в общей сложности в 73 научных работах. Из них 51 статья опубликована в рецензируемых журналах, 22 статьи напечатаны в сборниках трудов конференций.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация изложена на 208 страницах машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы, результатов исследования, выводов, заключения, библиографического указателя, включающего 244 источника отечественных и зарубежных авторов. Работа иллюстрирована 63 рисунками и включает 2 таблицы. Диссертация состоит из 7 глав.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Во введении очерчен круг рассматриваемых физических вопросов, сформулированы цели работы, обосновывается их актуальность, новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также перечислены основные положения, которые автор выносит на защиту.

Глава 1. Литературный обзор

В этом разделе диссертации приводится обзор литературы, посвященной структуре магнитосферного магнитного поля и динамике магнитосферных токовых систем в спокойные геомагнитные периоды и во время магнитных бурь. Приведены сведения по спутниковым измерениям в бесстолкновительной космической плазме, в частности, в солнечном ветре, в переходном слое магнитосферы, в токовом слое хвоста магнитосферы Земли. Дан краткий обзор моделей магнитосферного магнитного поля. Сформулирована задача исследования структуры магнитосферы и динамики отдельных магнитосферных токовых систем в ответ на изменение условий в солнечном ветре.

Глава 2. Магнитное поле в переходной области магнитосферы Земли

В главе 2 в магнитогидродинамическом приближении построена модель магнитного поля в переходной области при сверхзвуковом обтекании магнитосферы Земли солнечным ветром. При таком подходе плазма рассматривается как проводящая замагниченная жидкость с макроскопическими параметрами: скоростью, плотностью и температурой [3,4]. В пренебрежении эффектами вязкости и теплопроводности МГД-уравнения упрощаются. В стационарном случае система уравнений в переходной области содержит уравнение движения, уравнение неразрывности, уравнения Максвелла и обобщенный закон Ома:

$$\begin{aligned}
 \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} &= -\nabla p + \frac{1}{4\pi}[\text{rot}\vec{B} \times \vec{B}] \\
 \text{div}\rho\vec{V} &= 0 \quad P(p, \rho) = 0 \\
 \text{div}\vec{B} &= 0 \quad \text{rot}\vec{B} = 4\pi\vec{j}/c \\
 \text{rot}\vec{E} &= 0 \\
 \vec{j} &= \sigma \cdot (\vec{E} + [\vec{V} \times \vec{B}]/c)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь \vec{V}, p, ρ - макроскопические скорость, плотность и давление плазмы солнечного ветра; $P(p, \rho) = 0$ - уравнение состояния, связывающее плотность и давление жидкости; $\vec{E}, \vec{B}, \vec{j}$ - электрическое и магнитное поля и плотность электрического тока; σ - проводимость плазмы солнечного ветра. Обобщенный закон Ома описывает электрический ток, созданный движением плазмы с изотропной проводимостью в электрическом и магнитном полях.

Общий подход к анализу системы (1), описывающей взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли, был предложен в [7]. МГД-модель, представленная системой (1), имеет два сингулярно возмущенных малых параметра: $\nu = M_a^{-2}$ и $\varepsilon = R_m^{-1/2}$, первый из которых описывает влияние магнитного поля на движение плазмы, а второй характеризует роль диссипативных процессов, связанных с конечной проводимостью плазмы. Здесь $M_a = V_\infty(4\pi\rho)^{1/2}/B_\infty = V_\infty/V_{a\infty}$ - число Маха-Альфвена; $R_m = 4\pi\sigma V_\infty R_1/c$ - магнитное число Рейнольдса; V_∞, B_∞ - скорость и магнитное поле в невозмущенном потоке, $V_{a\infty}$ - альвеновская скорость, R_1 - характерный масштаб магнитосферы (расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе). Вмороженное приближение соответствует случаю $\nu = 0, \varepsilon = 0$ и может быть использовано во всей переходной области, за исключением тонкого слоя вблизи магнитопаузы. Здесь асимптотическая теория позволяет рассмотреть нашу задачу в рамках методов теории пограничного слоя, которые используются, например, при исследовании обтекания затупленного тела вязкой жидкостью [21]. Параметры ν и ε определяют новые характерные

масштабы: $l_v = R_1 M_a^{-2}$ и $l_\varepsilon = R_1 R_m^{-1/2}$. Около границы магнитосферы на масштабах l_v и l_ε , величины всех переменных в (1) резко меняются.

Подход к решению системы (1) в окрестности магнитопаузы определяется соотношением между этими новыми масштабами. Когда $l_v < l_\varepsilon$ (т.е., $R_m^{1/2}/M_a^2 < 1$), магнитное поле не влияет существенно на движение плазмы солнечного ветра и, в нулевом приближении, можно пренебречь членом, описывающим силу Ампера в первом уравнении системы (1) (см. [7]). В результате задача распадается на две: газодинамическую и магнитную. Это, так называемое, кинематическое приближение, широко используемое в динамо-теории [5]. Рассматривая условие $l_v > l_\varepsilon$ ($R_m^{1/2}/M_a^2 > 1$), получаем другой предельный случай обтекания, характеризующийся определяющим влиянием магнитного поля на течение плазмы. Такие условия в солнечном ветре приводят к формированию вблизи магнитопаузы магнитного барьера и слоя разреженной плазмы [2,10,19].

В разделе 2.2 сформулирована система уравнений для кинематического приближения. Будем исходить из предположения, что $R_m^{1/2}/M_a^2 < 1$, то есть диффузия оказывает большее влияние на течение плазмы, чем сила Ампера. Используя регулярное разложение по малому параметру $\nu = M_a^{-2}$, получаем в нулевом приближении кинематические уравнения для магнитного и электрического полей в переходной области с учетом конечной проводимости плазмы солнечного ветра:

$$\begin{aligned}
 \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} &= -\nabla p \\
 \text{div} \rho \vec{V} &= 0 \quad P(p, \rho) = 0 \\
 \text{div} \vec{B} &= 0 \quad \text{rot} \vec{B} = 4\pi \vec{j}/c \\
 \text{rot} \vec{E} &= 0 \\
 \vec{j} &= \sigma \cdot (\vec{E} + [\vec{V} \times \vec{B}]/c)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Течение плазмы рассчитывается из газодинамической части системы, а магнитное поле вычисляется по известному полю скоростей [5].

Будем считать, что в области невозмущенного течения солнечного ветра поле скоростей и магнитное поле – однородны. Скорость направлена от Солнца к Земле, магнитное поле имеет произвольную ориентацию.

Введем декартовы координаты (X, Y, Z) , где оси X и Z направлены вдоль линии Солнце-Земля и ортогональной к ней компоненты ММП, соответственно. В области течения невозмущенного солнечного ветра $\vec{V} = \vec{V}_\infty = (-V_\infty, 0, 0)$, $\rho = \rho_\infty$, $\vec{B} = \vec{B}_\infty = (-B_\infty^\parallel, 0, -B_\infty^\perp)$. Здесь $V_\infty, B_\infty^\parallel$ и B_∞^\perp скорость солнечного ветра и величины продольной и поперечной к потоку солнечного ветра компонент ММП.

Будем использовать параболические безразмерные координаты α, β, φ , связанные с вышеупомянутыми декартовыми координатами соотношениями

$$\begin{aligned}
2x/R_1 &= \beta^2 - \alpha^2 + 1 \\
y/R_1 &= \alpha\beta \sin \varphi \\
z/R_1 &= \alpha\beta \cos \varphi
\end{aligned}
\tag{3}$$

(здесь, как и ранее, R_l – расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе).

Зададим софокусными параболоидами вращения границу магнитосферы (уравнением $\beta=1$) и положение ударной волны ($\beta=\beta_{bs}$). Вариации размеров переходной области сводятся к подобным изменениям положения магнитопаузы и головной ударной волны, связанным с изменениями расстояния до подсолнечной точки R_l .

В разделе 2.3 рассчитано газодинамическое течение плазмы в переходном слое магнитосферы. Рассмотрим области в потоке солнечного ветра: сверхзвуковую, перед ударной волной (1) и дозвуковую, между ударной волной и внутренней поверхностью магнитопаузы (2), включающую в себя собственно переходную область и магнитопаузу.

Решение в переходной области может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned}
U_2 &= -V_\infty R_1 [0.5(\beta^2 - \alpha^2) - \ln \beta], \\
\rho_2 &= K_{bs} \cdot \rho_1,
\end{aligned}
\tag{4}$$

где $K_{bs} = \frac{\beta_{bs}^2}{\beta_{bs}^2 - 1}$ – коэффициент сжатия плазмы солнечного ветра на ударной волне.

В безразмерных переменных электромагнитная часть уравнений (2) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
rot \vec{B} &= R_m \cdot (\vec{E} + [\vec{V} \times \vec{B}]) \\
div \vec{B} &= 0 \quad rot \vec{E} = 0
\end{aligned}
\tag{5}$$

Зададим граничные условия на магнитопаузе и на ударной волне

$$\begin{aligned}
\{\vec{B}\} |_{\beta=1} &= 0 \\
\{B_n\} |_{\beta=\beta_{bs}} &= 0
\end{aligned}
\tag{6}$$

В переходной области точное решение системы уравнений (6) для магнитного поля ортогонального к скорости солнечного ветра может быть представлено в виде разложения по вырожденным гипергеометрическим функциям $M(a,b,x)$ и $U(a,b,x)$ [1] (раздел 2.4). В безразмерных переменных:

$$\begin{aligned}
h B_\alpha^\perp &= \sum_{n,k} k \beta G_{n,k}'(\alpha) F_{n,k}'(\beta) \cos k\varphi / \alpha n \\
h B_\beta^\perp &= \sum_{n,k} m \alpha G_{n,k}'(\alpha) F_{n,k}'(\beta) \cos k\varphi / \beta n \\
B_\varphi^\perp &= - \sum_{n,k} G_{n,k}'(\alpha) F_{n,k}'(\beta) \sin k\varphi / n \\
\vec{B}^\parallel &= f^\parallel \vec{V} - [1/R_m] \cdot \nabla f^\parallel
\end{aligned}
\tag{7}$$

Здесь

$$F_{n,k} = d_{n,k}^1 f_{n,k}^1(\beta) + d_{n,k}^2 f_{n,k}^2(\beta)$$

$$G_{n,k} = \alpha U\left(\frac{k-n}{2}; k+1; R_m \alpha^2/2\right)$$

$$f^{\parallel} = \sum_{n>0} G_{n,0}(\alpha) F_{n,0}(\beta)$$

$$f_{n,k}^1 = \beta^{n+2a_{n,k}} M(a_{n,k}; b_k; -R_m \beta^2/2)$$

$$f_{n,k}^2 = \beta^{n+2a_{n,k}} U(a_{n,k}; b_k; -R_m \beta^2/2)$$

$$a_{n,k} = \left[(R_m^2 + 4k^2)^{1/2} + R_m - 2n \right] / 4$$

$$b_k = \left[(R_m^2 + 4k^2)^{1/2} + 2 \right] / 2$$

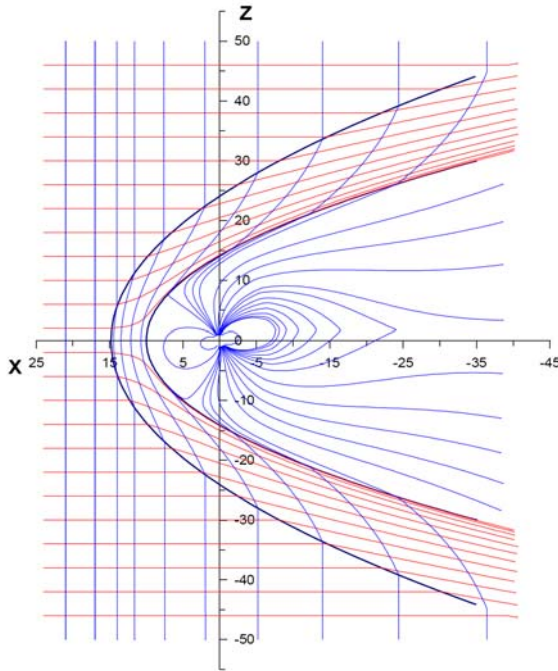


Рис. 1. Линии магнитного поля, лежащие в плоскости полдень-полночь, для открытой параболоидной модели магнитосферы на момент времени UT=14:00, 19.08.84 для ММП $\vec{B}_{\infty} = (0,0,-10$ нТл).

Анализ решения (раздел 2.5) показывает, что магнитное поле в переходной области увеличивается в $\sqrt{\rho_2/\rho_1}$ раз по сравнению со значениями магнитного поля в этой области для случая гидродинамического обтекания, полученными в [7]. Касательная компонента магнитного поля увеличивается на ударной волне в ρ_2/ρ_1 раз по сравнению со значениями в невозмущенном потоке. Учет конечной проводимости солнечного ветра позволяет получить нормальную к магнитопаузе компоненту магнитного поля. Для больших R_m

эффективность пересоединения $K_{mp}^{\perp} \approx 0.9 R_m^{-1/4} \sqrt{\rho_2/\rho_1}$ $K_{mp}^{\parallel} \approx \frac{2}{\sqrt{\pi R_m}} \rho_2/\rho_1$.

Проникающее в магнитосферу из солнечного ветра межпланетное магнитное поле $\vec{b}_{IMF} = K_{mp}^{\perp} \cdot \vec{B}_{\infty}^{\perp} + K_{mp}^{\parallel} \cdot \vec{B}_{\infty}^{\parallel}$.

Таким образом, во второй главе в кинематическом приближении построена модель магнитного поля в переходной области образующейся при сверхзвуковом взаимодействии потока замагниченной плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли. Получено аналитическое решение задачи обтекания земной магнитосферы с учетом сжимаемости и конечной проводимости плазмы солнечного ветра.

Глава 3. Структура магнитного поля вблизи магнитопаузы

В главе 3 рассмотрена структура магнитного поля в окрестности магнитопаузы, формирующаяся в результате совместного действия переноса и

накопления межпланетного магнитного поля солнечным ветром и диффузии магнитосферного поля в переходную область (раздел 3.2). Магнитное поле вблизи магнитопаузы представляется в виде суммы двух слагаемых: $\vec{B}_1 + \vec{B}_2$, - из которых первое слагаемое определяется ММП и описывает взаимодействие замагниченного солнечного ветра с непроводящим телом (с "пустой" магнитосферой). Второе, диффузионное слагаемое, зависит только от внутримангнитосферных источников и величины проводимости плазмы солнечного ветра и описывает проникновение магнитосферного магнитного поля в солнечный ветер, при отсутствии ММП ($\vec{b}_{MF} = 0$). Вследствие высокой проводимости плазмы солнечного ветра, второе слагаемое существенно только в тонкой окрестности магнитопаузы толщиной $\sim R_m^{-1/2}$.

На рис. 2 представлены профили магнитного поля в переходной области вдоль орбиты КА AMPTE/IRM на 8.08.1984, рассчитанные по модели (5-7). В качестве входных параметров модели использовались условия в солнечном ветре, наблюдавшиеся в течение 12:55-14:55 8 августа 1984 года, для разных, условных, направлений ММП (южного (0,0,-7нТл) и северного (0,0,7нТл)). Оси абсцисс характеризуют удаление от магнитопаузы, единицы измерения – минуты, время движения КА. На рис. а) и б) изображена z-компонента GSM магнитосферного магнитного поля B_2 , диффундирующего в солнечный ветер. Магнитосферное магнитное поле представлено моделью (5-7). Магнитное поле положительно и сосредоточено в узком слое вблизи обтекаемой поверхности.

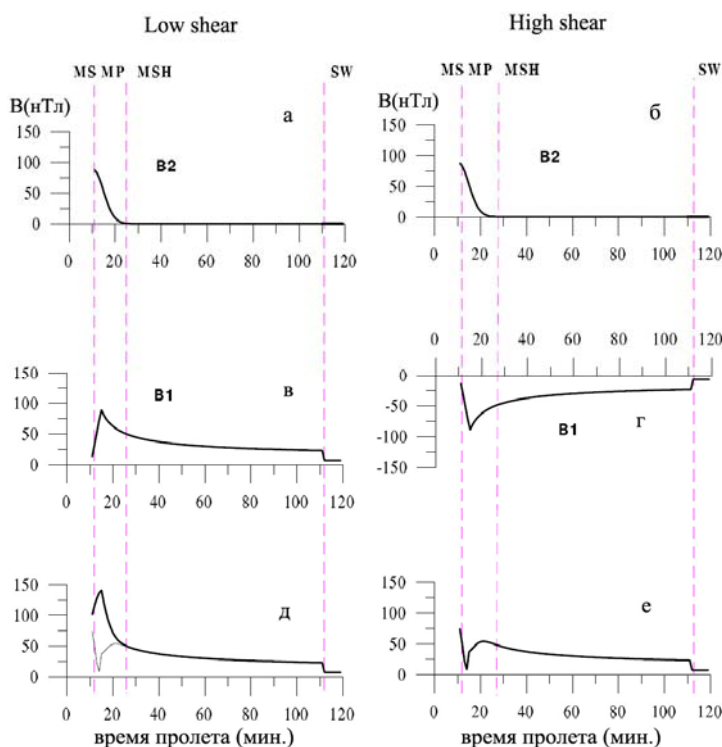


Рис. 2. Структура магнитного поля и его составляющих \vec{B}_1 и \vec{B}_2 в переходной области для разных направлений ММП (0,0,-7нТл) и (0,0,7нТл)

На рис. в) и г) изображена z-компонента GSM межпланетного магнитного поля B_1 , переносимого солнечным ветром. При южном ММП $B_{2Z} < 0$. Можно видеть усиление модуля поля вблизи магнитопаузы и последующее понижение поля. На рисунках д) и е) изображены модули поля, получаемого в результате сложения $\vec{B}_1 + \vec{B}_2$. В случае северного ММП (Рис. 2д) наблюдается усиление магнитного поля вблизи магнитопаузы: магнитный барьер [2,6]. Электрические токи на магнитопаузе, связанные с магнитосферным и межпланетным магнитными полями имеют одно и то же направление. Магнитные силы вблизи магнитопаузы

вызывают ускорение частиц плазмы вдоль магнитопаузы, регистрируемое на AMPTE/IRM, Wind, Cluster и других космических аппаратах при пересечении ими границ магнитосферы [14, 15]. В узком пограничном слое в окрестности магнитопаузы происходит нарушение газодинамического движения плазмы, характерного для основной части переходной области и формируется слой разреженной плазмы [10, 20].

При южном ММП (Рис. 2е) ситуация другая: слагаемые \vec{B}_1 и \vec{B}_2 в значительной мере компенсируют друг друга. При этом вблизи магнитопаузы наблюдается характерный провал магнитного поля. Для сравнения полученных результатов на рисунке д) тонкой линией приведен профиль магнитного поля и для южного направления ММП.

Провал магнитного поля вблизи магнитопаузы является характерным свойством магнитного поля при южном ММП. Он наблюдается тем лучше чем

сильнее Z_{GSM} -компонента ММП в солнечном ветре. На рис.3 представлены измерения модуля магнитного поля при пересечении переходной области КА AMPTE/IRM [15], 08.08.1984, тонкая линия, и результаты расчетов магнитного поля по модели (5-7), жирная линия. Усредненные по часу данные измерений КА IMP-8 ММП и параметров плазмы в невозмущенном солнечном ветре использовались как параметры модели. Магнитное поле в магнитосфере рассчитывалось по модели [8].

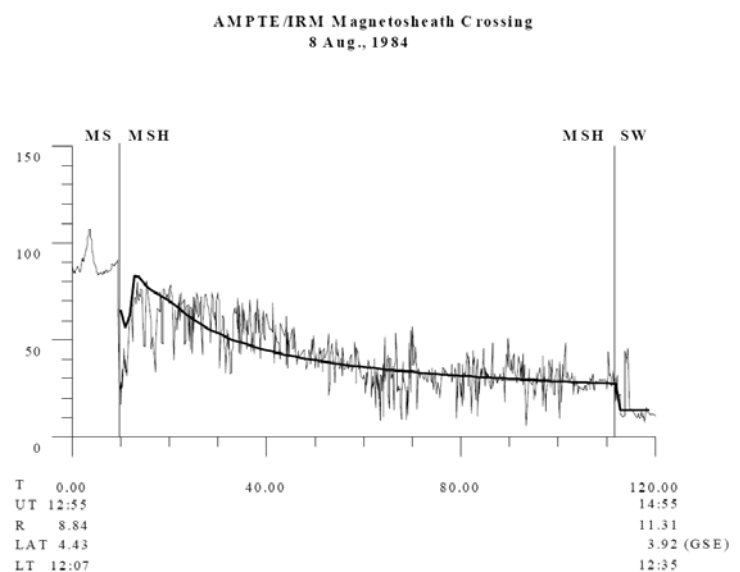


Рис. 3. Модуль магнитного поля при пересечении переходной области 08.08.1984 по данным КА AMPTE/IRM [15], тонкая линия, и по результатам расчетов магнитного поля по модели (5-7).

Расчеты в рамках модели показали, что структура магнитного поля в окрестности магнитопаузы определяется направлением межпланетного магнитного поля. При северном ММП вблизи магнитопаузы формируется область усиленного магнитного поля (магнитный барьер) и возникает слой разреженной плазмы. При южном направлении ММП в окрестности магнитопаузы наблюдаются резкие изменения магнитного поля, что позволяет ее идентифицировать как токовый слой.

В разделе 3.3 изучена структура магнитосферного магнитного поля для разных направлений ММП. Магнитное поле в магнитосфере Земли является суперпозицией поля магнитосферных токовых систем и проникающего в магнитосферу, искаженного взаимодействием с магнитосферой, ММП. Показано, что при южном направлении ММП формируется открытая

магнитосфера типа Данжи, а в ионосфере формируется двухвихревая система конвекции. В разделе 3.4 рассчитан поток вектора Пойнтинга на магнитопаузе и получены оценки для темпа поступления энергии в магнитосферу.

Глава 4. Положение и форма параболической магнитопаузы в зависимости от условий в солнечном ветре

Положение и форма магнитопаузы являются ключевыми параметрами, характеризующими магнитосферу, как ее размеры, так и внутреннюю структуру. Изменения размеров магнитопаузы под влиянием межпланетного магнитного поля (ММП) и динамического давления солнечного ветра проявляются в вариациях магнитосферного магнитного поля, особенно значительных во время магнитной бури. В главе 4 построена эмпирическая модель параболоидальной магнитопаузы в области до $-30 R_E$ в ночной магнитосфере. В разделе 4.3 описан массив данных пересечений магнитопаузы космическими аппаратами серий IMP, Explorer, ISEE и Прогноз и одновременные измерения в солнечном ветре [16]. В разделах 4.4, 4.5 в цилиндрических координатах x, ρ получены аналитические выражения, описывающие средний размер (расстояние до подсолнечной точки R_1) и форму $x(\rho)$ параболоидальной магнитопаузы в зависимости от динамического давления солнечного ветра P и B_z -компоненты ММП:

$$\begin{aligned}
 x(\rho) &= 1 - (0,7 + 0,05B_z)\rho^2 \\
 R_1[R_E] &= (11,3 + 0,39B_z) \cdot \left(\frac{P[\text{нПа}]}{2,63} \right)^{-1/6} \quad B_z[\text{нТл}] < 0 \\
 x(\rho) &= 1 - (0,7 + 0,014B_z)\rho^2 \\
 R_1[R_E] &= (11,3 + 0,09B_z) \cdot \left(\frac{P[\text{нПа}]}{2,47} \right)^{-1/6} \quad B_z[\text{нТл}] > 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

Показано, что для положительной B_z -компоненты ММП расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе больше, а степень расширения магнитопаузы меньше, чем в случае отрицательной B_z -компоненты. Изменения южного ММП сильнее воздействуют на размеры магнитосферы, чем изменения северного.

Выражения (8) описывают форму и положение магнитопаузы исходя из предположения о балансе динамического давления солнечного ветра и давления магнитосферного магнитного поля в подсолнечной точке [17]:

$$2kP = B_0^2/2\mu_0. \tag{9}$$

Здесь k - коэффициент, описывающий "степень упругости" взаимодействия частиц солнечного ветра с магнитопаузой ($k=1$ для абсолютно

упругого отражения и $k=0,5$ для случая полностью неупругого взаимодействия), P - динамическое давление солнечного ветра, B_0 - величина магнитосферного магнитного поля на магнитопаузе. В выражении (9), использованном для нормализации массива данных пересечения магнитопаузы, было неявно использовано предположение о дипольном характере магнитного поля в окрестности подсолнечной точки на магнитопаузе. Используя выражение $B_0 = 2fB_d$, где B_d - магнитное поле геомагнитного поля диполя, а f - параметр, описывающий вклад магнитосферных источников в магнитное поле на магнитопаузе и форму магнитопаузы [17], можно оценить величину f^2/k , характеризующую взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли (раздел 4.6). Для средних по массиву значений давления солнечного ветра получены значения $f^2/k = 2,15$ и $f^2/k = 3,5$ для $B_z < 0$ и $B_z > 0$, соответственно. Уменьшение f^2/k при $B_z < 0$ свидетельствует о более интенсивной передаче импульса солнечного ветра в магнитосферу при южном ММП

Глава 5. Магнитные бури и магнитосферные токовые системы

В главе 5 исследовалась динамика трехмерных магнитосферных токовых систем в возмущенной магнитосфере. Для расчета магнитного поля отличных от кольцевого тока источников магнитосферного магнитного поля использовалась параболоидная модель магнитосферы Земли. Согласно модели [8] магнитное поле в магнитосфере \vec{B}_m определяется суммой

$$\vec{B}_m = \vec{B}_D(\psi) + \vec{B}_{CF}(\psi, R_1) + \vec{B}_T(\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty) + \vec{B}_R(\psi, b_r) + \vec{B}_{CFR}(\psi, R_1, b_r). \quad (10)$$

В параболоидной модели магнитное поле в магнитосфере создано следующими крупномасштабными токовыми системами: внутриземными токами (\vec{B}_D); токами Чепмена-Ферраро на магнитопаузе, экранирующими поле диполя (\vec{B}_{CF}); токовой системой хвоста магнитосферы, включающей в себя токи утро-вечер поперек токового слоя хвоста магнитосферы и токи замыкания на магнитопаузе (\vec{B}_T); кольцевым током (\vec{B}_R); токами на магнитопаузе, экранирующими поле кольцевого тока (\vec{B}_{CFR}). Параболоидная модель позволяет рассчитать в отдельности поле каждого магнитосферного источника. Это обстоятельство существенно при изучении динамических процессов, так как магнитные поля различных токовых систем меняются с различными характерными временами. Каждый источник магнитного поля зависит от собственного набора параметров, который определяет его уникальную динамику в меняющихся условиях геомагнитной активности. Входными параметрами параболоидной модели магнитосферного магнитного поля являются: угол наклона геомагнитного диполя, ψ ; расстояние до подсолнечной точки, R_1 ; расстояние до внутреннего края токового слоя геомагнитного хвоста,

R_2 ; магнитный поток через доли хвоста, Φ_∞ ; максимальная интенсивность кольцевого тока, b_r . В разделе 5.2 приведено подробное описание способов параметризации модели магнитного поля.

В разделе 5.3 для расчетов временных зависимостей входных параметров параболоидной модели магнитосферы во время магнитной бури 23-27 ноября 1986 года использовались значения параметров солнечного ветра, ММП и AL -индекса геомагнитной активности. Границы аврорального овала определялись по данным измерений спутниками DMSP F6 и F7 потоков высыпавшихся электронов авроральных энергий. Для оценки магнитного поля кольцевого тока на поверхности Земли использовались данные измерений потоков частиц кольцевого тока спутником AMPTE/.

Результаты расчетов представлены на рис. 4. Магнитные поля токов на магнитопаузе, B_{CF} (помечено треугольниками) и токовой системы хвоста, B_T (помечено звездочками) на поверхности Земли, рассчитанные по параболоидной модели, и магнитное поле кольцевого тока, B_R (помечено кружками) на поверхности Земли, рассчитанное по данным AMPTE/CSE во время магнитной бури 23-27 ноября 1986 года увеличены в 1.5 раза для учета эффекта индуцированных (теллурических) токов под поверхностью Земли. Вариации магнитных полей кольцевого тока, B_R , токов на магнитопаузе, включающих в себя токи экранировки геомагнитного диполя и кольцевого тока, B_{CF} и токовой системы геомагнитного хвоста, B_T , примерно одного порядка (рис. 4а).

Из рис. 4б видно достаточно хорошее согласие результатов модельных расчетов $B_M = B_R + B_T + B_{CF}$ и Dst -вариации полученной из наземных измерений магнитного поля. Обращает на себя внимание то, что все составляющие рассчитанной суммарной вариации магнитного поля вносят значительный и сопоставимый вклад в Dst -вариацию. Во время возмущений, связанных с суббуревой активностью, усиливается влияние токовой системы хвоста магнитосферы. При этом общий вклад кольцевого тока и токов хвоста может значительно превышать наблюдаемое значение Dst . Такие превышения

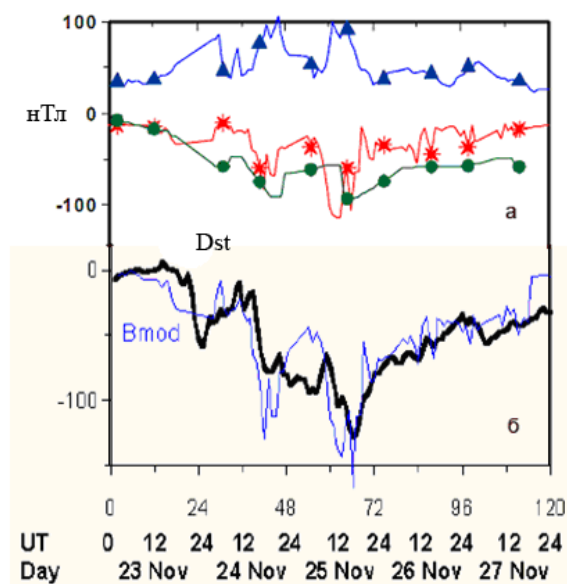


Рис. 4. (а) Магнитные поля токов на магнитопаузе, B_{CF} [нТл] (треугольники), токовой системы хвоста, B_T [нТл] (звездочки) и кольцевого тока, B_R [нТл] (кружки) на поверхности Земли во время магнитной бури 23-27 ноября 1986 года.

(б) Dst [нТл] (жирная линия) и рассчитанная вариация магнитного поля на поверхности Земли, B_M [нТл], (тонкая линия) для магнитной бури 23-27 ноября 1986 года.

компенсируются эффектом токов на магнитопаузе, имеющем противоположный знак. Усиление динамического давления солнечного ветра приводит к уменьшению расстояния до подсолнечной точки. При этом, согласно [Mead, 1964], измеренное на поверхности Земли магнитное поле токов на магнитопаузе обратно пропорционально R_1^3 . Такая сильная зависимость магнитного поля токов на магнитопаузе от R_1 приводит к усилению магнитного поля токов на магнитопаузе в три раза при изменении R_1 от $10R_E$ до $7R_E$. При этом, значение B_{CF} на поверхности Земли может измениться с 30 нТл до 90 нТл (с учетом эффекта индуцированных внутривоздушных токов).

В разделе 5.4 исследовалась динамика магнитосферных токовых систем во время магнитной бури 9-11 января 1997г. Для оценки магнитного поля кольцевого тока использовались расчеты полной энергии частиц кольцевого тока выполненные с использованием самосогласованной модели RAM [11].

На рис. 5 представлены рассчитанные составляющие Dst для магнитной бури 9

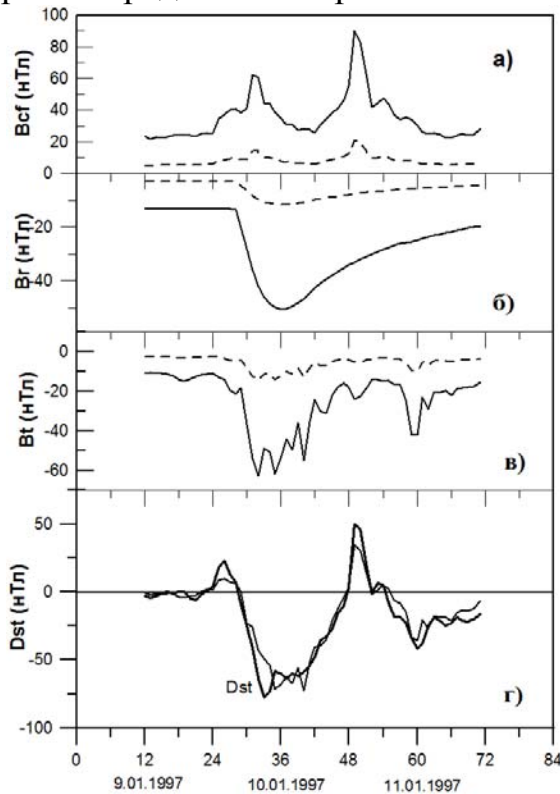


Рис. 5. Магнитное поле токов на магнитопаузе, кольцевого тока и токов хвоста магнитосферы (a, b, c) и сопоставление Dst с вариациями магнитного поля, рассчитанного на поверхности Земли по модели [Alexeev et al., 1996] во время магнитной бури 9 - 12 января 1997 года.

влияющие на динамику магнитных бурь на различных фазах их развития (раздел 5.5). Таковыми являются скорость и плотность солнечного ветра, величина и направление межпланетного магнитного поля (ММП), а также параметры магнитосферного происхождения, описывающие степень

- 12 января 1997 года и сопоставление измеренного и рассчитанного Dst. Пунктирной линией показаны вариации, порожденные теллурическими токами. Развитие бури началось при повороте V_z ММП к югу и закончилось, когда V_z ММП начала возрастать. Можно видеть, что импульс давления 11 января при северном направлении ММП привел к усилению токов на магнитопаузе, в то время как кольцевой ток и токи хвоста были в невозмущенном состоянии. Результатом стало необычное возрастание Dst до величин 50 нТл . Суббуревая активность в полдень 11 января привела к очередному спаду Dst, но без развития кольцевого тока.

Исследование магнитных бурь 9-12 января 1997 года и 23-27 ноября 1986 года позволило выделить ключевые факторы,

возмущенности магнитосферы. В таком качестве могут использоваться индексы геомагнитной активности.

Расчеты с использованием параболической модели и одновременных данных независимых наземных и спутниковых измерений показывают, что *Dst*-вариация не связана исключительно с кольцевым током. В разделе 5.6 показано, что другие источники магнитосферного магнитного поля, в частности токи хвоста магнитосферы и токи на магнитопаузе, ответственны за значительную часть возмущения. В максимуме умеренных магнитных бурь 23-27 ноября 1986 года и 9-12 января 1997 года с $Dst_{min} \sim -100$ нТл вклады в *Dst* вариацию кольцевого тока, тока хвоста магнитосферы и тока на магнитопаузе оказались в среднем одного порядка. Структура и интенсивность *Dst*-вариации определяются взаимодействием всех источников магнитосферного магнитного поля, накладывающих свои эффекты на общий профиль возмущения. В отдельные периоды времени одна из токовых систем становится доминирующей. Большой положительный выброс (до +50 нТ) в *Dst* в первые часы 11 января 1997 года связан с существенным ростом токов на магнитопаузе. При этом кольцевой ток и токи в хвосте остаются на спокойном уровне, несмотря на существенное возрастание динамического давления солнечного ветра.

Глава 6. Моделирование *Dst*-вариации во время магнитных бурь

Тестирование теоретических моделей геомагнитного поля, предназначенных для описания возмущенной магнитосферы, наиболее продуктивно на основе исследования отдельных геомагнитных бурь. Сопоставление расчетов с измерениями, выполненными на космических аппаратах, на наземных станциях, а также с *Dst*-индексом геомагнитной активности позволяют оценить точность и области применимости используемых моделей. Важным аспектом такого исследования является также изучение динамики магнитосферных источников магнитного поля во время магнитной бури, в том числе на основе их относительных вкладов в *Dst*.

Для получения результатов, допускающих корректное сравнение между собой, следует использовать некий единый, унифицированный метод для расчета *Dst*. Очевидно, он должен основываться на общепринятой экспериментальной процедуре вывода *Dst*-вариации [18], разработанной в Мировом центре данных в Киото, Япония.

В главе 6, раздел 6.2 изложена унифицированная процедура вычисления *Dst* с помощью магнитосферных моделей, которая включает в себя:

- вычисление вариации горизонтальной компоненты магнитного поля ($\delta H_i(t)$) (создается внешними (магнитосферными) и соответствующими индуцированными токами) на геомагнитном экваторе на долготах соответствующих станций.

- вычисление вариации спокойного дня для параметров, отвечающих спокойным условиям в солнечном ветре ($\delta H_i^q(t)$) и вычитание ее из $\delta H_i(t)$ для каждой обсерватории в каждый час.
- усреднение вариаций магнитного поля 4 приэкваториальных станций для каждого часа:

$$Dst(t) = \frac{1}{4} \sum_i (\delta H_i(t) - \delta H_i^q(t)) = \delta H(t) - \delta H_q(t),$$

где $\delta H(t) \equiv \frac{1}{4} \sum_i \delta H_i(t)$, $\delta H_q(t) \equiv \frac{1}{4} \sum_i \delta H_i^q(t)$ - средние вариации (возмущенная и спокойная) по всем станциям. При вычислении вариаций магнитного поля мы учитываем вклад теллурических токов, которые увеличивают магнитное поле примерно на 30%. Вариации магнитного поля вычисляются сразу на геомагнитном экваторе, чтобы избежать последующего деления на $\cos(\theta_i)$.

Главными источниками Dst-вариации являются токи на магнитопаузе, кольцевой ток, и токи хвоста магнитосферы. Современные модели магнитосферы позволяют рассчитывать как полное магнитное поле, так и магнитные поля от каждого магнитосферного источника. Рассчитанное по модели Dst может быть представлено в виде суммы составляющих: $DR+DT+DCF$, где DR , DT и DCF (составляющие Dst) являются вкладами в Dst кольцевого тока, токового слоя хвоста и токов на магнитопаузе, соответственно. Кольцевой ток содержит как симметричную, так и асимметричную части (частичный кольцевой ток), а вклад продольных токов зоны 1 в Dst - незначителен. Представляя вариации магнитного поля $\delta H(t)$ и $\delta H^q(t)$ как сумму составляющих магнитных полей от внешних источников, получаем:

$$Dst = \delta H_{RC} - \delta H_{RC}^q + \delta H_{TC} - \delta H_{TC}^q + \delta H_{CF} - \delta H_{CF}^q = DR + DT + DCF. \quad (11)$$

Отсюда можно определить вклад каждого источника магнитосферного магнитного поля в Dst как разность соответствующих вариаций магнитного поля рассчитанных во время бури и в спокойный день месяца (в частности, $DR = \delta H_{RC} - \delta H_{RC}^q$). В разделах 6.3, 6.4 приведены расчеты составляющих Dst по моделям A2000 [9] и T01[19].

Предложенный метод соответствует экспериментальной процедуре расчета Dst по данным магнитометров, описанной в работе [18]. Он позволяет однозначно вычислить Dst-вариацию, основываясь на расчетах магнитосферного магнитного поля с помощью магнитосферных моделей, а также, естественным образом обобщается для расчета составляющих Dst. Оценки вкладов тока хвоста и кольцевого тока в Dst, полученные предложенным методом с использованием различных моделей, имеют один и тот же физический смысл и позволяют определить относительную роль различных токовых систем во время магнитосферных возмущений.

Глава 7. Динамика магнитосферных токовых систем во время магнитных бурь разной интенсивности

В главе 7 с использованием параболоидной модели магнитосферы проведено исследование относительных вкладов в Dst токового слоя хвоста и кольцевого тока магнитосферы для семидесяти магнитных бурь разной интенсивности. Особое внимание уделено экстремальным бурям октября-ноября 2003 г. В разделе 7.2 изложена методика вычисления составляющих Dst , а в разделе 7.3 описана процедура расчета динамики кольцевого тока.

Для вычисления магнитного поля кольцевого тока в центре Земли b_r использовалась модель Бартона [1975]:

$$\frac{db_r}{dt} = F(E) - \frac{b_r}{\tau}, \quad (12)$$

которая представляет процесс развития кольцевого тока как результат инжекции, описываемой функцией $F(E)$, и последующей диссипации, описываемой членом $\frac{b_r}{\tau}$.

Здесь функции инжекции, $F(E)$, определяется через компоненту электрического поля солнечного ветра, E_y , направленную с утра на вечер:

$$F(E) = \begin{cases} d(E_y - 0,5), & E_y > 0.5 \text{ мВ/м} \\ 0, & E_y < 0.5 \text{ мВ/м} \end{cases} \quad (13)$$

где E_y - компонента утро-вечер электрического поля в солнечном ветре, d - коэффициент амплитуды инжекции, $\tau(\eta) = 2.37e^{9.74/(4.78+E_y)}$ - характерное время диссипации. Амплитуда инжекции определяется из условия лучшего согласия Dst рассчитанного по модели A2000 с Dst , полученным из измерений. Следует обратить внимание, что в рассчитанное Dst входят вариации магнитного поля токовых систем, отличных от кольцевого тока, которые вносят значительный вклад в суммарную вариацию магнитосферного магнитного поля и влияют на величину получаемого коэффициента амплитуды инжекции. Так что магнитное поле кольцевого тока не связано однозначно с электрическим полем в солнечном ветре, но учитывает также собственную динамику магнитосферы.

В главе 5 параболоидная модель магнитосферы использовалась для анализа динамики магнитосферного магнитного поля во время магнитных бурь умеренной интенсивности. Было показано, что токовый слой хвоста магнитосферы дает вклад в вариации магнитного поля на поверхности Земли, сопоставимый с эффектом кольцевого тока. Представляет интерес, сохраняется ли такая тенденция и для бурь иной интенсивности.

В разделах 7.4, 7.5 исследовалась динамика магнитосферных токовых систем во время экстремальных бурь октября-ноября 2003 г. Магнитные бури в октябре, ноябре 2003 года явились следствием взаимодействия магнитосферы с корональными выбросами массы и сопровождалась сильным поджатием магнитосферы и расширением овала полярных сияний до средних широт.

На Рис. 6 представлены часовые значения параметров солнечного ветра и геомагнитные индексы во время магнитной бури 28-31 октября 2003 г., а также составляющие Dst, рассчитанные по параболоидной модели.

В возмущении 28-31 октября можно выделить три мощные инжекции, каждую из которых можно рассматривать как отдельную бурю. Существенный момент состоит в том, что относительная роль кольцевого тока и токового слоя различны на разных этапах бури. Первое понижение Dst от -50 нТ до почти -200 нТ на фоне очень короткого поворота межпланетного поля к югу связано с относительно слабым кольцевым током (около 30% от полной депрессии поля). В основном, первые 12 часов после прихода ударной волны связаны с усилением и ослаблением вклада токового слоя. Этот вклад превышает поле кольцевого тока в несколько раз. Именно он обеспечивает наблюдаемое понижение Dst, несмотря на увеличение положительного вклада токов Чепмена-Ферраро из-за роста динамического давления солнечного ветра. Этот период следует рассматривать, как случай непосредственного контроля солнечным ветром геомагнитной активности. При этом некоторые расхождения между модельным прогнозом и измеряемым Dst, скорее всего, связаны с тем, что используемая версия модели не учитывает эффекты запаздывания и накопления энергии в токовом слое. Эти эффекты имеют существенно меньший временной масштаб (около 1 часа) по сравнению с характерным временем развития и распада кольцевого тока. Однако их необходимо учитывать для лучшего согласия модели и эксперимента.

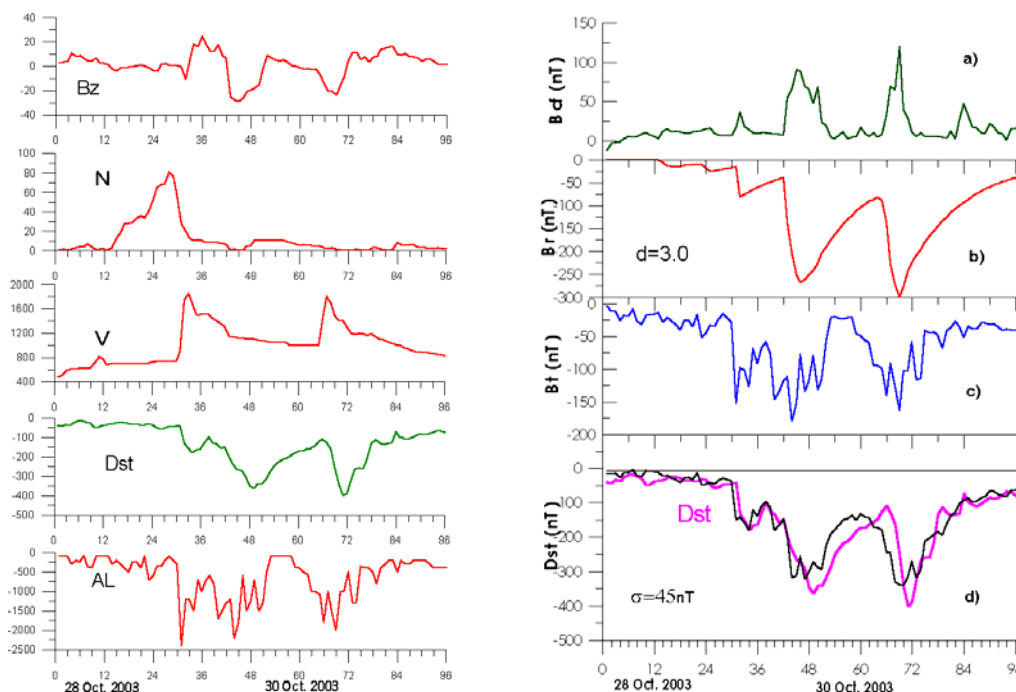


Рис. 6. Слева: параметры межпланетной среды для магнитной бури 28-31.10.2003: B_z -компонента ММП, плотность и скорость солнечного ветра (N , V), Dst и AL – индексы. Справа: составляющие Dst во время бури, порожденные: а) токами Чепмена-Ферраро, б) кольцевым током, в) токовым слоем хвоста магнитосферы и д) Dst (жирная линия) и суммарный вклад магнитосферных источников в Dst .

Для полноценного развития кольцевого тока магнитосфера «ждет» поворота B_z ММП к югу, который происходит в 18:00 UT 29 октября 2003. Третье нарастание возмущенности примерно через сутки носит характер “классической” магнитной бури с быстрой главной фазой и медленным распадом кольцевого тока. Оно связано с одновременным скачком давления и поворотом B_z компоненты ММП к югу. Оба фактора действуют синхронно и дают ожидаемый профиль Dst . При этом следует учесть, что фаза восстановления предыдущей бури не закончилась. Dst начинает уменьшаться от уровня -100 нТл, что дает максимальное понижение Dst до -400 нТл. Следует отметить, что во всех трех инъекциях вклад токового слоя хвоста магнитосферы был примерно одинаков и составлял в максимуме около -150 нТл, как и во время бури 22-24 ноября, в то время как вклад кольцевого тока достигал -300 нТл.

Для того, чтобы исследовать более детально относительную динамику кольцевого тока и токов хвоста магнитосферы в ответ на воздействие солнечного ветра, разделе 7.6 было рассмотрено дополнительно еще 70 магнитных бурь различной интенсивности с $|Dst^{min}|$ от 70 до 400 нТл произошедших в течение 1998-2005 гг. Во всех случаях использовались методики расчета Dst и источников Dst , описанные в Главе 6.

На Рис. 7 показаны отношения максимальных вкладов токов хвоста к минимальному значению Dst^* на главных фазах бурь, в зависимости от минимального значения Dst^* (Dst^* - скорректированное на давление солнечного ветра $Dst: Dst^*=Dst-DCF$).

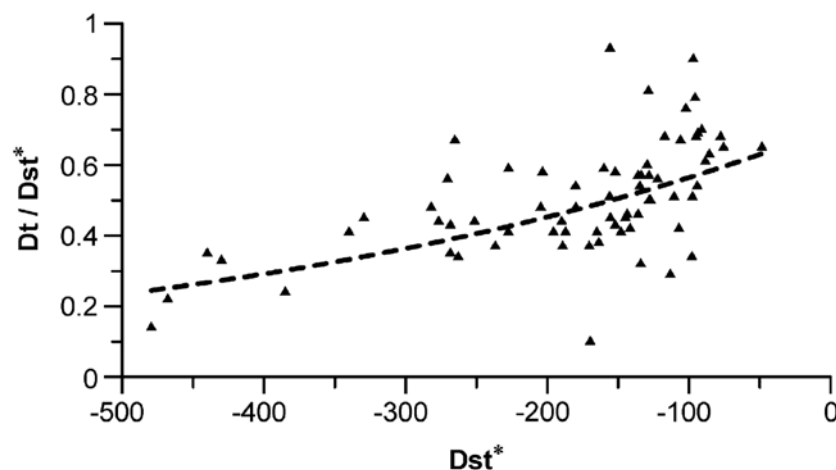


Рис. 7. Максимальные вклады токов хвоста в Dst в зависимости от Dst^* в главной фазе бурь, отнесенные к Dst^* в точках максимума бурь.

С ростом мощности бури относительный вклад токов хвоста Dt убывает. На главной фазе слабой бури сентября 2000 года с интенсивностью -75 нТл он составляет около 50% от Dst^* . Для бури сентября 1998 года с интенсивностью -220 нТл составляет уже 40%. Для бури апреля 2001 года с интенсивностью -270 нТл Dt составляет 25%, и, наконец, для экстремальной бури ноября 2003 года с интенсивностью -450 нТл на Dt приходится всего 18%.

Видно, что токовый слой хвоста магнитосферы дает сопоставимый с кольцевым током вклад в Dst для бурь средней интенсивности ($|Dst| \sim 100 - 200$

нТл), в то время как для мощных бурь кольцевой ток становится доминирующим источником Dst . Усиление токов хвоста, как правило, начинается до развития кольцевого тока, на начальной стадии бури. Вариации токов хвоста связаны с суббуревой активностью и описывают быстрые изменения профиля Dst . Кольцевой ток вносит определяющий вклад в Dst во время мощных бурь и определяет поведение магнитосферного поля на фазе восстановления бури. По-видимому, на бурях средней интенсивности с Dst^{\min} около $-100 - -200$ нТл, поле токов хвоста испытывает насыщение, достигая максимально возможного значения, в то время как кольцевой ток находится в условиях, когда он имеет возможность для дальнейшего развития. Мы видим, что для сильных бурь поле кольцевого тока доминирует над полем токов хвоста, не превышающего по абсолютному значению 150 нТл, которое достигается и в бурях меньшей интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитосфера Земли является результатом постоянного взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем. При этом формируются магнитопауза – граница магнитосферы, и магнитосферные токовые системы, порождающие регулярное магнитное поле в магнитосфере Земли. Структура магнитного поля, положение, форма и интенсивности токовых систем контролируются условиями в солнечном ветре. Влияние межпланетной среды на магнитосферу Земли реализуется двояким образом: как прямое воздействие потока солнечного ветра, приводящее к изменениям размеров и структуры магнитосферы, и опосредованное, выражающееся в несинхронной собственной динамике магнитосферных токовых систем. Оба механизма реализуются одновременно и представляют собой части единого процесса взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. Изучение структуры магнитосферы и динамики отдельных магнитосферных токовых систем в ответ на изменение условий в солнечном ветре являлось основной задачей проведенного исследования.

В настоящей работе область течения солнечного ветра и магнитосфера Земли представлены как единая система в общей, параболической геометрии. Это позволило получить магнитное поле, не имеющее особенностей на магнитопаузе. Решение в межпланетной среде было получено в рамках одножидкостной магнитогидродинамики. Использовалось кинематическое приближение, не учитывающее воздействие силы Ампера на течение плазмы. Внутри магнитосферы использовалась модель магнитосферного магнитного поля [9]. Динамика магнитосферы определялась вариациями параметров магнитосферных токовых систем.

Кинематическая МГД модель описывает магнитное поле в переходной области магнитосферы в рамках диффузионного механизма взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Динамика магнитного поля в переходной области, условия в окрестности магнитопаузы контролируются

ММП, скоростью и плотностью солнечного ветра. Для текущих значений параметров межпланетной среды можно получить магнитное поле, проникающее в магнитосферу из солнечного ветра и дать оценки для темпа поступления энергии в магнитосферу Земли. Из проведенного анализа следует, что структура магнитного поля в окрестности магнитопаузы определяется направлением межпланетного магнитного поля. При северной ориентации ММП вблизи магнитопаузы формируется область усиленного магнитного поля и возникает слой разреженной плазмы. При южном направлении ММП в окрестности магнитопаузы наблюдаются резкие изменения магнитного поля, что позволяет ее идентифицировать как токовый слой.

Магнитное поле в магнитосфере Земли является суперпозицией поля магнитосферных токовых систем и проникающего в магнитосферу ММП. Существенную роль в формировании магнитосферной конфигурации играет ориентация межпланетного магнитного поля. При южном направлении ММП формируется открытая магнитосфера типа Данжи, а в ионосфере формируется двухвихревая система конвекции. Поток энергии поступающий в магнитосферу при северном направлении ММП ослабевает примерно в 100 раз при пересечении диссипативного пограничного слоя вблизи магнитопаузы: спадая с 10^{13} до 10^{11} Вт. Основная часть энергии тратится на нагрев и ускорение плазмы вблизи магнитопаузы. При южном направлении межпланетного поля темп поступления энергии может увеличиваться до 10^{12} Вт.

Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле оказывают воздействие не только на размеры и структуру магнитосферы, но и на положение и интенсивности крупномасштабных токовых систем. Динамика магнитосферных токовых систем проявляется в вариациях магнитосферного магнитного поля, в изменениях размеров и структуры плазменных образований в магнитосфере, в движении энергичных заряженных частиц. Исследование крупномасштабных токовых систем во время магнитных бурь разной интенсивности позволяет выделить ключевые факторы, влияющие на динамику магнитосферы. Магнитосферные токовые системы реагируют на изменение состояния межпланетной среды, выражающиеся как непосредственно, через параметры солнечного ветра, так и опосредованно, через параметры магнитосферного происхождения, описывающие степень возмущенности магнитосферы. В таком качестве могут использоваться индексы геомагнитной активности Dst и AL.

Одним из ключевых вопросов физики магнитной бури является относительная роль магнитосферных токовых систем, в частности, токового слоя хвоста магнитосферы, в формировании Dst вариации на разных фазах бури. Концепция о значительной роли токового слоя во время магнитной бури была предложена российскими исследователями еще в 1993-1996 годах [9, 12]. Изучение динамики токового слоя хвоста магнитосферы во время магнитосферных возмущений проливает свет на соотношение между эффектами непосредственного воздействия солнечного ветра на динамику

магнитосферы и процессами накопления энергии в магнитосфере с ее последующим сбросом в ионосферу и верхнюю атмосферу. Концепция насыщения магнитного потока хвоста магнитосферы во время геомагнитных возмущений является дальнейшим развитием теоретических представлений о магнитной буре и позволяет лучше понять относительную динамику магнитосферных токовых систем.

Выполненное исследование является следующим шагом в развитии динамической модели магнитосферы [8]. Одно из основных требований к динамической модели - это возможность связать параметры, определяющие условия в солнечном ветре и величины, описывающие состояние магнитосферы. Проведенные исследования демонстрируют, что магнитосферное магнитное поле определяется входными параметрами, зависящими от факторов, которые имеют как магнитосферное, так и межпланетное происхождение. Так, ММП, проникающее в магнитосферу прямо контролирует размеры полярных шапок, разность потенциалов поперек полярных шапок, скорость поступления энергии в магнитосферу. С другой стороны, магнитосферные параметры, изменяясь под воздействием условий в межпланетной среде, определяют несинхронную динамику магнитосферных токовых систем. Таким образом, для известных параметров солнечного ветра можно рассчитать мгновенное состояние магнитосферы: интенсивности магнитосферных токовых систем и их характерные масштабы. Эволюция магнитосферы может быть представлена как последовательность таких состояний.

ВЫВОДЫ

1. В кинематическом приближении построена модель магнитного поля в переходной области, формирующегося при сверхзвуковом взаимодействии потока замагниченной плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли. Получено аналитическое решение задачи обтекания земной магнитосферы с учетом сжимаемости и конечной проводимости плазмы солнечного ветра. Установлено, что в переходной области продольная к потоку солнечного ветра компонента межпланетного магнитного поля усиливается пропорционально степени сжатия плазмы, а перпендикулярная - пропорционально квадратному корню из этой величины. Получены аналитические выражения для плотности электрического тока на ударной волне и для расстояния до подсолнечной точки на ударной волне.
2. Установлено, что вследствие конечной проводимости плазмы солнечного ветра на границе магнитосферы формируется тонкий диссипативный пограничный слой, который и следует рассматривать как магнитопаузу. Вне слоя решение может быть представлено в приближении в замороженности магнитного поля в плазму солнечного

- ветра, внутри слоя существенна конечная проводимость. Учет конечной проводимости приводит к появлению нормальной компоненты магнитного поля на границе магнитосферы.
3. Получены аналитические выражения для интенсивности пересоединения магнитосферного и межпланетного магнитного поля, с учетом проводимости плазмы и степени сжатия плазмы солнечного ветра на ударной волне. Показано, что при больших значениях магнитного числа Рейнольдса ММП, проникающее в магнитосферу – однородное магнитное поле ориентированное, преимущественно, ортогонально оси магнитосферы. Его величина определяется величиной вектора ММП, проводимостью и плотностью плазмы солнечного ветра.
 4. Для разных направлений ММП в окрестности магнитопаузы рассчитана структура магнитного поля, которое формируется при диффузионном взаимодействии замагниченного солнечного ветра с магнитосферой Земли. Дано объяснение различиям в структуре магнитного поля вблизи магнитопаузы, наблюдаемым при южном и северном направлениях межпланетного магнитного поля. Показано, что при южном направлении ММП магнитопауза представляет собой токовый слой, в то время как при северном она характеризуется усиленным магнитным полем и наличием слоя разреженной плазмы в ее окрестности.
 5. Рассчитана конфигурация магнитного поля в магнитосфере Земли для южного и северного направлений ММП. Рассчитан поток вектора Пойнтинга на магнитопаузе и получены оценки для темпа поступления энергии в магнитосферу.
 6. Построена эмпирическая модель, которая описывает средние размер и форму параболоидальной магнитопаузы в зависимости от динамического давления солнечного ветра и B_z -компоненты ММП. Установлено, что для положительной B_z -компоненты ММП расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе больше, а степень расширения магнитопаузы меньше, чем в случае отрицательной B_z -компоненты. Показано, что наиболее сильное воздействие на размеры магнитосферы оказывают изменения ММП южной ориентации.
 7. Для разных направлений ММП и средних значений динамического давления солнечного ветра вычислены значения параметра f^2/k , характеризующие взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли (см. [17]). Показано, что при южном ММП происходит более интенсивная передача импульса в магнитосферу, чем при северном.
 8. Выполнены расчеты динамики магнитосферных токовых систем во время магнитных бурь с минимальным $Dst > -100$ нТл. Показано, что в главную фазу магнитной бури умеренной интенсивности магнитное поле токов хвоста магнитосферы сопоставимо с магнитным полем кольцевого тока. Показано, что различные магнитосферные токовые системы

развиваются несинхронно и обладают собственной динамикой, которая проявляется в сложном профиле магнитосферного магнитного поля.

9. Установлено, что суммарная вариация магнитного поля является суперпозицией медленноменяющейся вариации магнитного поля кольцевого тока и более быстрых вариаций, связанных с развитием токовых систем в хвосте и на границе магнитосферы. Относительные изменения интенсивностей и пространственных характеристик токовых систем определяются следствием изменений параметров солнечного ветра и факторов магнитосферного происхождения.
10. Предложена унифицированная методика вычисления Dst-индекса и его составляющих с помощью моделей магнитосферного магнитного поля, согласующаяся со стандартной процедурой вычисления Dst по данным наземных магнитометров. Показано, что использование этой процедуры позволяет с хорошей точностью описать профиль Dst и однозначно вычислить вклады в Dst магнитосферных токовых систем в рамках, как теоретических, так и эмпирических моделей.
11. На основе статистического исследования 70 магнитных бурь 1998-2005 годов установлено, что соотношение между вкладами магнитосферных токовых систем в Dst зависит от интенсивности бури. Показано, что во время магнитных бурь с максимальным значением $|Dst|$, не превышающим 200 нТл, поле токов хвоста испытывает насыщение, достигая максимально возможного значения, в то время как кольцевой ток находится в условиях, когда он имеет возможность для дальнейшего развития. Для сильных бурь поле кольцевого тока доминирует над полем токов хвоста, не превышающего по абсолютному значению 150 нТл, которое достигается и в бурях меньшей интенсивности.

Литература:

- [1] *Абрамовиц, М., Стиган И.* Справочник по специальным функциям. Москва: Наука. 1979. 832 С.
- [2] *Еркаев Н.В.* Обтекание солнечным ветром магнитосферы Земли // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Под ред. Пудовкина М.И. и Семенова В.С. М.: Междугосударственный геофизический комитет при Президиуме Академии наук СССР. 1989. С. 5-129.
- [3] *Куликовский А.Г., Любимов Г.А.* Магнитная гидродинамика. М.: Физматгиз, 1962.
- [4] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
- [5] *Моффат Г.* Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Мир. 1980.

- [6] Пудовкин М.И. Образование и характеристики магнитного барьера перед дневной магнитопаузой // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. С. 18-21. 1987.
- [7] Alexeev I.I., Kalegaev V.V. Magnetic field and the plasma flow structure near the magnetopause // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 19267-19276.
- [8] Alexeev, I. I., E. S. Belenkaya, V. V. Kalegaev, Ya.I. Feldstein and A.Grafe, Magnetic storms and magnetotail currents // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 7737-7748.
- [9] Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Feldstein Ya.I., Gromova L.I. The Model Description of Magnetospheric Magnetic Field in the Course of Magnetic Storm on January 9-12. 1997 // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 25683-25694.
- [10] Farrugia C. J., Erkaev N. V., Biernat H. K., Lawrence G. R., Elphic R. C. Plasma depletion layer model for low Alfvén Mach number: Comparison with ISEE observations // J. Geophys. Res. 1997. V.102. P. 11315-11324.
- [11] Jordanova, V. K., Torbert R. B., Thorne R. M., Collin H. L., Roeder J. L., Foster J. C. Ring current activity during the early $B_z < 0$ phase of the January 1997 magnetic cloud // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 24895–24914.
- [12] Maltsev Y. P., Arykov A.A., Belova E.G., Gvozdevsky B.B., Safargaleev V.V. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 7697-7704.
- [13] Mead G. D. Deformation of the geomagnetic field by the solar wind // J. Geophys. Res. 1964. V.69. P.1181.
- [14] Paschmann G. B., Sonnerup U. Ö., Papamastorakis I., Scopke N., Haerendel G., Bame S. J., Asbridge J. R., Gosling J. T., Russell C. T., Elphic R. C. Plasma acceleration at the earth's magnetopause: Evidence for magnetic reconnection // Nature. 1979. V. 282 P. 243-246.
- [15] Phan T.-D., Paschmann G., Baumjohann W., Scopke N., Luhr H. The magnetosheath region adjacent to the dayside magnetopause: AMPTE/IRM observations // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. C. 121-141.
- [16] Sibeck D. G., Lopez R. E., Roelof E. C. Solar wind control of the magnetopause shape, location, and motion // J. Geophys. Res. 1991. V.96. P. 5489-5495.
- [17] Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere // Planet. Space Sci. 1966. V. 14. P. 223–253.
- [18] Sugiura, M., Kamei T. Equatorial Dst index 1957-1986 // in IAGA Bull. 40, edited by A. Berthelier, and M. Menvielle. Int. Serv. of Geomagn. Indices Publ. Off. Saint Maur, France. 1991.
- [19] Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. 10.1029/2001JA000220.

[20] *Zwan B. J., Wolf R. A.* Depletion of solar wind plasma near a planetary boundary // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P.1636-1648.

[21] *Van Dyke M.* Perturbation Methods in Fluid Mechanics. 1965. Academic Press. San Diego, Calif. 229 PP.

Вклад диссертанта. Все результаты, изложенные в диссертации, получены В.В. Калегаевым либо самостоятельно, либо при непосредственном и активном творческом участии на всех этапах работы. Постановка задачи формирования пограничного слоя в окрестности магнитопаузы в рамках теории сингулярных возмущений (Главы 2, 3), постановка задачи определения формы и положения магнитопаузы в зависимости от условий в солнечном ветре (Глава 4), постановка задачи расчета магнитного поля кольцевого тока с использованием уравнения Бартона и определение относительных вкладов магнитосферных токовых систем в Dst (Главы 5-7), анализ и интерпретация полученных результатов сделаны В.В. Калегаевым. Для модели магнитного поля в переходной области магнитосферы, основы которой изложены в Главе 2, диссертантом были получены аналитические решения в виде разложений по вырожденным гипергеометрическим функциям, написаны численные коды, позволившие провести анализ решений и их интерпретацию.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Алексеев И.И., Калегаев В.В. Диссипативный слой вблизи магнитопаузы // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1987. Т.27. С.75-81.
2. Алексеев И.И., Калегаев В.В. Электрическое и магнитное поля вблизи магнитопаузы // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1988. Т. 28. С.571-577.
3. Алексеев И.И., Беленькая Е.С., Калегаев В.В., Лютов Ю.Г. Электрическое поле в токовом хвосте магнитосферы при южном ММП // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1989. Т. 29. С. 896-901.
4. Алексеев И.И., Беленькая Е.С., Калегаев В.В., Лютов Ю.Г., Генерация электрического поля на низких широтах при южном ММП // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1990. Т. 30. С. 584-587.
5. Алексеев И.И., Калегаев В.В., Влияние ММП на течение плазмы в окрестности магнитопаузы // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1991. Т. 31. С. 526-528.
6. Алексеев И.И., Калегаев В.В., Фельдштейн Я.И. Моделирование магнитного поля в сильно возмущенной магнитосфере. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1992. Т. 32. С. 8-14.
7. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Lyutov Yu.G. Electric fields and field-aligned current generation in the magnetosphere // *Journ. Geophys. Res.* 1993. V.98. No 3. P. 4041- 4051.
8. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. Tail current sheet dynamics in the disturbed magnetosphere // *Advances in Space Res.* 1993. V.13. No 4. P. 229-233.

9. Belenkaya E.S., Alexeev I.I., Kalegaev V.V. Electromagnetic interaction of the solar wind with the magnetosphere // *Advances in Space Res.* 1993. V.13. No 4. P.33-35.
10. Alexeev I.I., Kalegaev V.V. Magnetic field and the plasma flow structure near the magnetopause, // *Journ. Geophys. Res.* 1995. V.100. No10. P.19267-19276.
11. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Feldstein Ya.I., Grafe A. Magnetic storms and magnetotail currents // *Journ. Geophys. Res.* 1996. V.101. No4. P.7737-7748.
12. Kalegaev V.V. The Energy Transport Across the Magnetopause. In "Problems of Geospace", edited by M. I. Pudovkin, B. P. Besser, W. Riedler, A.M. Lyatskaya. Austrian Academy of Sciences Press. Vienna, Austria. 1997. P.83-90.
13. Калегаев В.В., Алексеев И.И., Фельдштейн Я.И. и др. Магнитный поток через доли хвоста магнитосферы и динамика вариаций Dst // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1998. Т.38. С.10-16.
14. Feldstein Y.I., Gromova L.I., Grafe A., Meng C.-I., Kalegaev V.V., Alexeev I.I., Sumaruk Y.P. Auroral electrojet dynamics during magnetic storms, connection with plasma precipitation and large-scale structure of the magnetospheric magnetic field // *Ann. Geophys.* 1999. V.17. P.497-507.
15. Feldstein Y.I., Gromova L.I., Grafe A., Meng C.-I., Kalegaev V.V., Alexeev I.I., Sumaruk Y.P. Dynamics of the auroral electrojets and their mapping to the magnetosphere // *Radiation Measurements.* 1999. V. 30. N5. P. 579-587.
16. Kalegaev V.V. MHD modelling of supersonic solar wind - Earth's magnetosphere interaction. In "Problems of Geocosmos 2". Monograph. Austrian Acad. of Science. Edited by V.S. Semenov, H.K. Biernat, M.V. Kubyshkina, C.J. Farrugia, and Muhlbachler. 1999. P.141-146.
17. Dremukhina L. A., Feldstein Ya. I., Alexeev I. I., Kalegaev V. V., Greenspan M. Structure of the magnetospheric magnetic field during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. NoA12. P.28351-28360.
18. Kalegaev V.V. Magnetosheath conditions and magnetopause structure for high magnetic shear // *Physics and Chemistry of the Earth.* 2000. V.25. N1-2. P.173-176.
19. Kalegaev V.V., Lyutov Yu.G. The solar wind control of the magnetopause // *Advances in Space Research.* 2000. V.25. N7-8. P.1489-1492.
20. Kalegaev V.V., Dmitriev A. The magnetosphere dynamics under disturbed conditions on 23-27 November, 1986 // *Advances in Space Research.* 2000. V.26. N1. P.117-120.
21. Алексеев И.И., Калегаев В.В., Лютов Ю.Г. Положение и форма параболической магнитопаузы в зависимости от условий в солнечном ветре // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2000. Т.40. No 2. С.147-152.
22. Kalegaev V.V., Alexeev I.I., Feldstein Ya.I. The geotail and ring current dynamics under disturbed conditions // *Journal of Atm. and Sol-Terr. Phys.* 2001. V. 63/5. P.473-479.

23. Алексеев И.И., Калегаев В.В. Структура магнитного поля в переходной области магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41. N 3. С. 309-316.
24. Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Feldstein Ya.I., Gromova L.I. The Model Description of Magnetospheric Magnetic Field in the Course of Magnetic Storm on January 9-12, 1997 // Journ. of Geophys. Res. 2001. V.106. No A11. P. 25683-25694.
25. Feldstein Ya.I., Gromova L.I., Alexeev I.I., Kalegaev V.V. The fields of magnetospheric current systems on the earth's surface in an interval of the magnetic storm studied under the international program on solar-terrestrial physics // Cosmic Research. 2003. V. 41. N 4. P. 359-370.
26. Feldstein Y.I., Dremukhina L.A., Levitin A.E., Mall U., Alexeev I.I., Kalegaev V.V. Energetic of the magnetosphere during the magnetic storm // Journ. of Atm. And Sol.-Terr. Phys. 2003. V.65. No.4. P. 429-446.
27. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Y., Kalegaev V.V. Modelling of the electromagnetic field in the interplanetary space and in the Earth's magnetosphere // Space Science Review. 2003. V.107. N1/2. P.7-26.
28. Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л., Авдюшин С.И., Алексеев И.И., Аммосов П.П., Антонова А.Е., Баишев Д.Г., Беленькая Е.С., Белецкий А.Б., Белов А.В., Бенгин В.В., Бобровников С.Ю., Бондаренко В.А. 6, Боярчук К.А., Веселовский И.С., Вьюшкова Т.Ю., Гаврильева Г.А., Гайдаш С.П., Гинзбург Е.А., Денисов Ю.И., Дмитриев А.В., Жеребцов Г.А., Зеленый Л.М., Иванов-Холодный Г.С., Калегаев В.В., Канониди Х.Д., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Коломийцев О.П., Крашенинников И.А., Криволицкий А.А., Кропоткин А.П., Куминов А.А., Лещенко Л.Н., Марьин Б.В., Митрикас В.Г., Михалев А.В., Муллаяров В.А., Муравьева Е.А., Мягкова И.Н., Петров В.М., Петрукович А.А., Подорольский А.Н., Пудовкин М.И., Самсонов С.Н., Сахаров Я.А., Свидский П.М., Соколов В.Д., Соловьев С.И., Сосновец Э.Н., Старков Г.В., Старостин Л.И., Тверская Л.В., Тельцов М.В., Трошичев О.А., Цетлин В.В., Юшков Б.Ю. Магнитные бури в октябре 2003 года // Космические исследования. 2004 Т. 42. №5. С. 509 – 554.
29. Kalegaev V.V., Ganushkina N. Yu., Pulkkinen T. I., Kubyshkina M. V., Singer H. J., Russell C. T., Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. N 2. P. 523-533.
30. Kalegaev V.V., Ganushkina N. Yu. Global magnetospheric dynamics during magnetic storms of different intensities. AGU Monograph "Physics and Modeling of the Inner Magnetosphere". 2005. P. 293-301.
31. Bobrovnikov S.Yu., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Clauer C.-R., Feldstein Ya.I. Case Study of September 24-26, 1998 Magnetic Storm // Advances in Space Research. 2005. V.36. P. 2428-2433.

32. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Kalegaev V.V., Cowley S., A model of Jupiter's magnetospheric magnetic field with variable magnetopause flaring //Planet. Space Sci. 2005. V. 53. P. 863-872.
33. Blomberg L.G., Cumnock J.A., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Kalegaev V.V. Transpolar aurora: time evolution, associated convection patterns, and a possible cause // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. P. 1917-1930.
34. Cowley S.W.H., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bunce E.J., Cottis C.E., Kalegaev V.V., Nichols J. D., Prange R., Wilson F. J. A simple axisymmetric model of magnetosphere-ionosphere coupling currents in Jupiter's polar ionosphere // Journal of Geophys. Res. 2005. V. 110. A11209. doi:10.1029/2005JA011237.
35. Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Y., Bunce E. J., Cowley S.W.H., Nichols J.D. A global magnetic model of Saturn's magnetosphere and a comparison with Cassini SOI data // Geoph. Res. Lett. 2006. V.33. doi:10.1029/2006GL025896.
36. Калегает В. В., Макаренков Е. В. Динамика магнитосферных токовых систем во время магнитных бурь разной интенсивности // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46. N 5. P. 604-613.
37. Калегает В. В., Алексеев И. И., Макаренков Е. В., Ганюшкина Н. Ю. Моделирование Dst-вариации во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46. N 5. P. 596-603.
38. Belenkaya E.S., Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Blokhina M.S. Definition of the Saturn's magnetospheric model parameters for the Pioneer 11 flyby // Ann. Geophys. 2006.V. 24. N 3. P.1145-1156.
39. Belenkaya E.S., Bepalov P.A., Davydenko S.S., Kalegaev V.V. Magnetic field influence on aurorae and the Jovian plasma disk radial structure //Ann. Geophys. 2006.V. 24. N 3. P.973-988.
40. Cumnock J. A., Blomberg L. G., Alexeev I. I., Belenkaya E. S., Bobrovnikov S. Yu., Kalegaev V. V. Simultaneous Polar Aurorae and Modelled Convection Patterns in Both Hemispheres //Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 1685-1693. doi: 10.1016/j.asr.2005.04.105.
41. Belenkaya E.S., Alexeev I.I., Blokhina M.S., Cowley S.W.H., Badman S.V., Kalegaev V.V., Grigoryan M.S. IMF dependence of the open-closed field line boundary in Saturn's ionosphere, and its relation to the UV auroral oval observed by the Hubble Space Telescope //Ann. Geophys. 2007. V. 25. P. 1–12.
42. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Бобровников С.Ю., Веденькин Н.Н., Власова Н.А., Гарипов Г.К., Григорян О.Р., Иванова Т.А., Калегает В.В., Климов П.А., Ковтюх А.С., Красоткин С.А., Кузнецов Н.В., Кузнецов С.Н., Муравьева Е.А., Мягкова И.Н., Павлов Н.Н., Ныммик Р.А., Петров В.Л., Подзолко М.В., Радченко В.В., Рейзман С.Я., Рубинштейн И.А., Рязанцева М.О., Сигаева Е.А., Сосновцев Э.Н., Старостин Л.И., Суханов

- А.В., Тулупов В.И., Хренов Б.А., Шахпаронов В.М., Шевелева В.Н., Широков А.В., Яшин И.В., Маркелов В.В., Иванов Н.Н., Блинов В.Н., Седых О.Ю., Пинигин В.П., Папков А.П., Левин Е.С., Самков В.М., Игнатъев Н.Н., Ямников В.С. Первые результаты исследований космической среды на спутнике Университетский - Татьяна // Космич. Исслед. 2007. Т.45. N 4. С. 291-305.
43. Алексеев И. И., Калегаев В. В. Магнитосфера Земли. В кн.: Модель космоса. Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. Т.1: Физические условия в космическом пространстве. – М.: КДУ. 2007. С. 417-456.
 44. Alexeev I. I., Belenkaya E. S., Bobrovnikov S. Yu., Kalegaev V. V., Cumnock J. A., Blomberg L. G. Magnetopause mapping to the ionosphere for northward IMF // *Annal. Geophys.* 2007. V.25. P.2615–2625.
 45. Belenkaya E.S., Cowley S.W.H., Badman S.V., Blokhina M.S., Kalegaev V.V. Dependence of the open-closed field line boundary in Saturn's ionosphere on both the IMF and solar wind dynamic pressure // *Annal. Geophys.* 2007. V.25. P.2615–2625.
 46. Kalegaev V.V., Makarenkov E.V. Relative importance of ring and tail currents to Dst under extremely disturbed conditions // *Journ. of Atm. and Sol.-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 519–525. doi:10.1016/j.jastp.2007.08.029.
 47. Belenkaya E.S., Cowley S.W.H., Badman S.V., Blokhina M.S., Kalegaev V.V. Dependence of the open-closed field line boundary in Saturn's ionosphere on both the IMF and solar wind dynamic pressure: comparison with the UV auroral oval observed by the HST // *Ann. Geophys.* 2008. V.26. P.159–166.
 48. Бахмина К.Ю., Калегаев В. В. Моделирование эффекта частичного кольцевого тока в возмущенной магнитосфере // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2008. Т. 48. N.6. С.770-779.
 49. Калегаев В. В., Бахмина К.Ю., Алексеев И.И., Беленькая Е.С., Фельдштейн Я.И., Ганюшкина Н.В. Асимметрия кольцевого тока во время магнитной бури // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2008. Т. 48. N.6. С.780-792.
 50. Алексеев И.И., Калегаев В.В. Магнитное поле и основные токовые системы магнитосферы // В кн.: Плазменная гелиогеофизика. Под ред. Л. М. Зеленого и И. С. Веселовского. М.: Физматлит. 2008. Т.1. С. 414-426.
 51. Desorgher L., K. Kudela, E. Flückiger, R Bütikofer, M. Storini, V. Kalegaev, Comparison of Earth's Magnetospheric Magnetic Field Models in the Context of Cosmic Ray Physics. // *Acta Geophysica.* 2009. V. 57. N.1. P.75-87. DOI: 10.2478/s11600-008-0065-3.

Калегаев Владимир Владимирович

ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРНЫХ ТОКОВЫХ СИСТЕМ ПОД
ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

(автореферат)

Работа поступила в ОНТИ 19.06.2009 г.

Тираж 120 экз.

Отпечатано в типографии КДУ

Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: press@kdu.ru