

На правах рукописи

Назарков Илья Сергеевич

**Структура и динамика крупномасштабных токов в
возмущенной магнитосфере по данным спутниковых измерений**

Специальность:

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре физики космоса физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Калегаев Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией космофизических исследований отдела космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: **Григоренко Елена Евгеньевна**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва

Федоров Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится «21» декабря 2016 года в 15 час. 00 мин. на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 (19-й корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и на сайтах:

https://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/d39/62a/22277164/dissertatsiya_NazarkovIS.pdf

http://www.sinp.msu.ru/ru/system/files/dissertations/dissertaciya_nazarkov.pdf

Автореферат разослан «9» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.ф.-м.н. О.М. Вохник

Д 501.001.45

Общая характеристика работы

Работа посвящена исследованию структуры и динамики крупномасштабных магнитосферных токовых систем (токи хвоста и кольцевого тока) на основе модельных расчетов и экспериментальных данных, получаемых в ходе современных многоспутниковых космических миссий.

Актуальность работы обусловлена фундаментальным значением вопросов:

- Восстановления радиального профиля магнитного поля тока хвоста магнитосферы из данных спутниковых измерений с учетом эффектов пространственно-временной неопределенности.
- Изучения особенностей динамики хвоста магнитосферы во время периода экстремально-низкой солнечной активности 2008-2009 гг.
- Исследования соотношений между кольцевым током и потоками частиц на низких полярных орбитах.

Магнитосфера Земли возникает в результате взаимодействия собственного магнитного поля планеты с солнечным ветром: сверхзвуковым потоком плазмы, истекающим из солнечной короны. При этом формируются магнитосферные токовые системы, поддерживающие характерную «кометообразную» форму магнитосферы. Находясь в постоянном взаимодействии с потоком солнечного ветра, магнитосфера изменяет свою форму и свои размеры, одновременно меняются и характеристики крупномасштабных токовых систем. Токи хвоста магнитосферы и кольцевой ток являются наиболее интересными магнитосферными объектами, их динамика проявляется в вариациях магнитного поля на поверхности Земли и в высыпаниях частиц в верхней атмосфере. Настоящая работа посвящена изучению этих магнитосферных образований.

Геомагнитный хвост – одна из фундаментальных областей магнитосферы Земли, определяющая ее структуру и динамику [Ness, 1965]. Электрические токи поперек геомагнитного хвоста поддерживают определенную конфигурацию магнитного поля в окрестности Земли, а их вариации вызывают геомагнитные возмущения во внутренней магнитосфере. Изучение регулярной структуры и динамики магнитного поля геомагнитного хвоста – актуальная проблема магнитосферной физики [Fairfield and Jones, 1966; Tsyganenko and Fairfield, 2004; Angelopoulos, 2008; Sergeev et al., 2009; Petrukovich et al., 2013; Artemyev et al., 2015; Zelenyi et al., 2015].

Радиальные градиенты магнитного поля хвоста магнитосферы, а также положение переднего края токового слоя являются важными характеристиками состояния магнитосферы во время геомагнитных возмущений. Контролирующими факторами являются давление солнечного

ветра и межпланетное магнитное поле. На основе многочисленных измерений, проведенных на различных спутниках в течение длительного периода времени в работе [Fairfield and Jones, 1966] была определена структура магнитного поля в хвосте магнитосферы. В ходе анализа этих измерений были найдены корреляции между изменениями параметров солнечного ветра (СВ), межпланетным магнитным полем (ММП) и динамикой токового слоя хвоста. Уравнение, описывающее поле в хвосте, полученное на основе анализа приблизительно 12 000 часовых измерений с 11 различных космических миссий за 20 летний период времени, проведенных в диапазоне от -15 до $-70 R_E$:

$$B = \left[\frac{\sqrt{-96.5 + 294.5\sqrt{P_{SW}} + 2.36B_{imf}^2(\sin\theta/2)^2}}{B_0} \right] \times \left[\frac{1659.2}{R^{1.46}} + 7.47 \right] \quad (1)$$

где R – радиальное расстояние до местоположения в R_E , B_0 – среднее поле на расстоянии $30 R_E$, которое составляет 19 нТл, P_{SW} – динамическое давление солнечного ветра, B_{imf} – величина ММП, а $\theta = 180^\circ$ при южном направлении ММП и 0° при северном. Уравнение (1) описывает поле хвоста как функцию динамического давления солнечного ветра ($P_{SW} = nmv_{SW}^2$) и ММП (B_{imf}). Как видно, наибольший вклад в поле хвоста ММП дает при южном направлении, когда происходит активное пересоединение силовых линий и проникновение частиц солнечного ветра в хвост магнитосферы. Однако, основным фактором, непосредственно влияющим на величину магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли, является динамическое давление солнечного ветра. Вариации скорости и плотности потока плазмы, набегающей на магнитосферу Земли, приводят к изменениям структуры и интенсивности токов, протекающих в хвосте магнитосферы [Fairfield and Jones, 1966; Tanskanen et al., 2005; Petrukovich et al., 2013; Artemyev et al., 2015].

Главным источником информации для понимания физических процессов в хвосте магнитосферы являются космические эксперименты. При этом значительной проблемой экспериментальных исследований остается невозможность разделить эффекты, связанные с перемещением аппарата и с временными изменениями магнитосферы под воздействием солнечного ветра. Многоспутниковая миссия THEMIS дает возможность более детального исследования магнитного поля геомагнитного хвоста [Angelopoulos, 2008]. В активную фазу эксперимента каждые четыре дня одинаково оснащенные спутники в апогее выстраивались в одну линию. Одновременные измерения пятью спутниками дают возможность преодолеть пространственно–временную неопределенность и изучить конфигурацию магнитного поля в хвосте магнитосферы без использования дополнительных априорных предположений.

В динамике магнитосферы особую роль играет область ближнего хвоста, где магнитосферное магнитное поле изменяет свою конфигурацию от вытянутой в хвост на удаленной границе к квазидипольной вблизи Земли. Структура магнитного поля в этой области и пространственное положение переднего края хвоста точно не известны из-за сложности разделения областей, на которые преимущественное влияние оказывают и токи хвоста, и кольцевой ток. Сочетание экспериментального и теоретического подходов позволяет более детально изучить структуру и динамику магнитного поля в области ближнего хвоста. В частности, использование динамических моделей магнитосферы (моделей Цыганенко T96, T01, TC05, параболической модели A2000) позволяет оценить вклады различных токовых систем в магнитосферное магнитное поле.

Важную роль во время геомагнитных возмущений играет кольцевой ток (КТ) магнитосферы Земли, который вместе с токами геомагнитного хвоста вносит основной вклад в развитие магнитной бури. Только прямые измерения позволяют получить достоверную информацию о структуре и динамике КТ. Такие исследования проводилось, как вблизи экваториальной плоскости, так и на средних широтах [Ковтюх, 2001]. К сожалению, измерения на одном аппарате не позволяют разделить эффекты, связанные с движением спутника и с собственной динамикой магнитосферы. Новые возможности для изучения динамики КТ открываются на основе данных многоспутниковых миссий, таких как THEMIS, Van Allen Probes (RBSP), POES. Использование одновременных измерений в разных областях магнитосферы позволяет более точно оценивать относительную динамику и вклады крупномасштабных токовых систем в магнитосферное магнитное поле и подтвердить или опровергнуть результаты модельных расчетов.

В настоящей работе будут исследоваться структура и динамика магнитосферных токовых систем на основе модельных расчетов и экспериментальных данных, получаемых в ходе современных многоспутниковых космических миссий.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование структуры и динамики крупномасштабных токов в магнитосфере по данным спутниковых измерений с использованием моделей магнитного поля.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка специальных методов для определения характеристик крупномасштабных токовых систем магнитосферы на основе данных космических экспериментов.
2. Разработка и внедрение необходимых для обработки и анализа спутниковых данных программных кодов и комплексов.

3. Определение характеристик токовой системы хвоста магнитосферы в период экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг.
4. Исследование структуры и динамики магнитного поля кольцевого тока на основе комплексного анализа данных прямых измерений потоков частиц кольцевого тока и потоков частиц на низких орбитах.

Практическая ценность результатов

Практическая ценность диссертации заключается, прежде всего, в возможности использования программных кодов, разработанных автором, для систем анализа и прогнозирования космической погоды, прежде всего, в части оценки уровня геомагнитной возмущенности.

Разработанный автором метод восстановления профиля магнитного поля токов хвоста по данным многоспутниковых измерений позволяет избежать эффектов пространственно-временной неопределенности, присущих космическим измерениям и, в моменты времени, когда аппараты располагаются вдоль ночной магнитосферы, достоверно оценивать положение переднего края и радиальное распределение магнитного поля токов геомагнитного хвоста. Метод эффективно соединяет данные спутниковых наблюдений (THEMIS) с моделями геомагнитного поля. Разработанный автором программный комплекс, основанный на программном обеспечении, разработанном в университете Калифорнии, написан на актуальной и многофункциональной платформе IDL, что дает возможность использовать его в дальнейшем для анализа и визуализации и других спутниковых данных, в том числе в прикладных задачах по прогнозированию факторов космической погоды.

Личный вклад диссертанта:

- Участвовал в разработке метода восстановления радиального профиля магнитного поля геомагнитного хвоста по данным многоточечных спутниковых измерений и по результатам модельных расчетов. Разработал алгоритм расчета параметров магнитосферы с учетом выполнения условия баланса давлений в подсолнечной точке магнитопаузы.
- Лично разработал необходимый для обработки и визуализации спутниковых данных программный комплекс в среде IDL на основании модернизированного им оригинального комплекса, разработанного в университете Калифорнии (<http://themis.ssl.berkeley.edu/software.shtml>).

- Создал программные коды для платформ Linux и MacOS, которые обеспечили возможность использования модели магнитного поля A2000 в среде IDL.
- Обработывал и визуализировал данные спутниковых миссий THEMIS, RBSP, POES с применением моделей магнитосферного поля A2000, IGRF.
- Выполнял научный анализ и интерпретацию получаемых данных.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются: тестированием численных алгоритмов для определения точности полученных решений; применением современных методов анализа спутниковых данных; сопоставлением полученных аналитических оценок и результатов численного моделирования с данными спутниковых и наземных наблюдений о потоках заряженных частиц и о величине магнитного поля в магнитосфере Земли.

Апробация работы

Результаты диссертации были доложены автором лично на следующих конференциях и семинарах:

- Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 2016
- Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 2015
- 40-я Научная ассамблея COSPAR, Москва, 2014
- X Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 2013
- Восьмая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", ИКИ РАН, Москва, 2013
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2013», Москва, 2013
- 9-th International Conference "Problems of Geocosmos", St. Petersburg, Petrodvorets, 2012
- 11-я Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики, Приэльбрусье, Кабардино-Балкария, 2010

а также представлены на:

- Chapman Conference on Fundamental Properties and Processes of Magnetotails, Reykjavik, Iceland, Исландия, 2013

- 39-я Научная ассамблея COSPAR, Mysore/Bangalore, Индия, 2012

Результаты диссертационной работы также докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ.

Публикации

Материалы диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 6 глав и Заключения, изложена на 105 страницах и содержит 36 рисунков и 141 библиографическую ссылку.

Краткое содержание работы

Во **Введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы ее основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость ее результатов, представлена структура диссертации.

В **Главе 1** описана структура магнитосферы Земли и динамика крупномасштабных токовых систем во время геомагнитных возмущений. Особое внимание уделено структуре и динамике токов хвоста и кольцевого тока. Дан обзор работ, посвященных исследованию основных характеристик и особенностей развития этих токовых систем в спокойные и геомагнитно-возмущенные периоды.

Рассмотрены механизмы воздействия солнечного ветра (СВ) на магнитосферу Земли и описаны возникающие при этом характерные структуры и области внутри магнитосферы Земли.

На рисунке 1 приведены схематичные изображения магнитосферы Земли и крупномасштабных токовых систем.

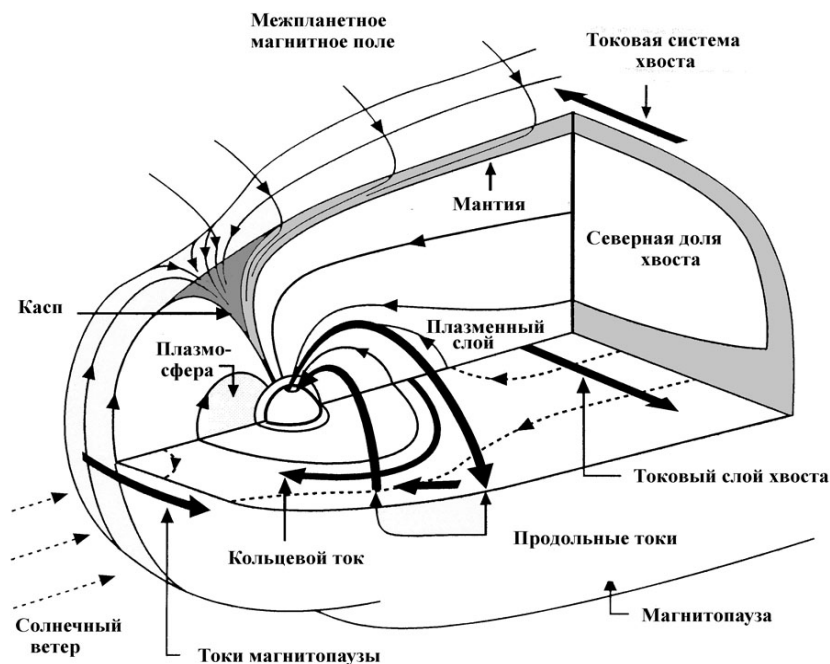


Рисунок 1. Магнитосфера Земли. Изображены характерные области и токовые системы (на основе оригинального изображения [Kivelson, Russel, 1995]).

Выделены основные источники магнитосферного поля: токи Чепмена-Ферраро на магнитопаузе (B_{CF}), кольцевой ток (B_R), токи хвоста магнитосферы (B_T), продольные токи (B_{fac}). С

учетом главного эффекта от внутриземных токов суммарное магнитное поле можно выразить как сумму полей от этих источников:

$$B = B_{in} + B_{CF} + B_R + B_t + B_{fac} + B_{trans} \quad (2)$$

Отдельно рассмотрены динамика и структура токов в хвосте магнитосферы и кольцевого тока, показана их важная роль во время геомагнитных событий.

В **Главе 2** представлены методы исследований и описаны спутниковые данные и модели магнитного поля, используемые в данной работе для анализа геомагнитных возмущений.

Для анализа динамики хвоста магнитосферы использовались данные измерений магнитного поля с борта пяти аппаратов THEMIS [Angelopoulos, 2008], и были проведены расчеты магнитного поля на основе модели магнитосферы A2000 [Alexeev et al., 2001; Alexeev et al., 2003] и модели поля внутриземных токов IGRF11 (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>). При удачном расположении вдоль хвоста магнитосферы 5 спутников THEMIS, их одновременные измерения позволяют оценить основные параметры токов хвоста. При этом удается устранить ошибки, связанные с пространственно-временной неопределенностью измерений, присутствующей при анализе данных измерений одиночных спутников.

В свою очередь, модель A2000 позволяет рассчитать вклады в магнитное поле от каждой токовой системы в магнитосфере в отдельности. Методика исследования заключается в выделении вкладов магнитного поля хвоста магнитосферы из спутниковых измерений, используя модельные расчеты.

Для анализа динамики и структуры кольцевого тока, а также для исследования возможности изучения кольцевого тока по измерениям потоков частиц на низких орбитах использовались одновременные экспериментальные данные, полученные с 2 спутников Van Allen Probes (RBSP) и спутников POES 18, POES 19.

Для построения графиков и проведения вычислений использовалась программная среда IDL и программные комплексы TDAS (THEMIS Data Analysis Software) и SPEDAS (Space Physics Environment Data Analysis Software), написанные на языке IDL (Interactive Data Language) и свободно распространяемые через сайт http://the_mis.ssl.berkeley.edu/software.shtml. Также были написаны собственные программы на языке IDL и библиотека на языке C++, необходимая для использования модели A2000 непосредственно в программной среде IDL.

В **Главе 3** описаны особенности динамики магнитосферы в 2008-2009 гг. В этот период магнитосфера Земли находилась в условиях аномально-низкой солнечной активности в период затянувшейся фазы минимума солнечного цикла. Это дало возможность детально изучить структуру спокойной магнитосферы, в том числе положение и структуру крупномасштабных токов в

магнитосферном хвосте. Данные измерений магнитного поля 5 спутниками миссии THEMIS и расчеты по модели A2000 использованы для реконструкции магнитного поля токов хвоста магнитосферы в спокойные и возмущенные периоды.

Были отобраны события для исследования (геомагнитно спокойный период – 04.04.09 и возмущенный период – 14.02.09) и описан метод выделения магнитного поля токов хвоста магнитосферы. Было проведено моделирование (по модели A2000) профилей магнитного поля для спокойных условий, которое позволило увидеть ожидаемую структуру магнитного поля в области крупномасштабных токов хвоста магнитосферы. На рисунке 2 приведены радиальные профили суммарного магнитного поля, магнитосферного поля (без учета поля внутривнеземных источников) и поля хвоста магнитосферы.

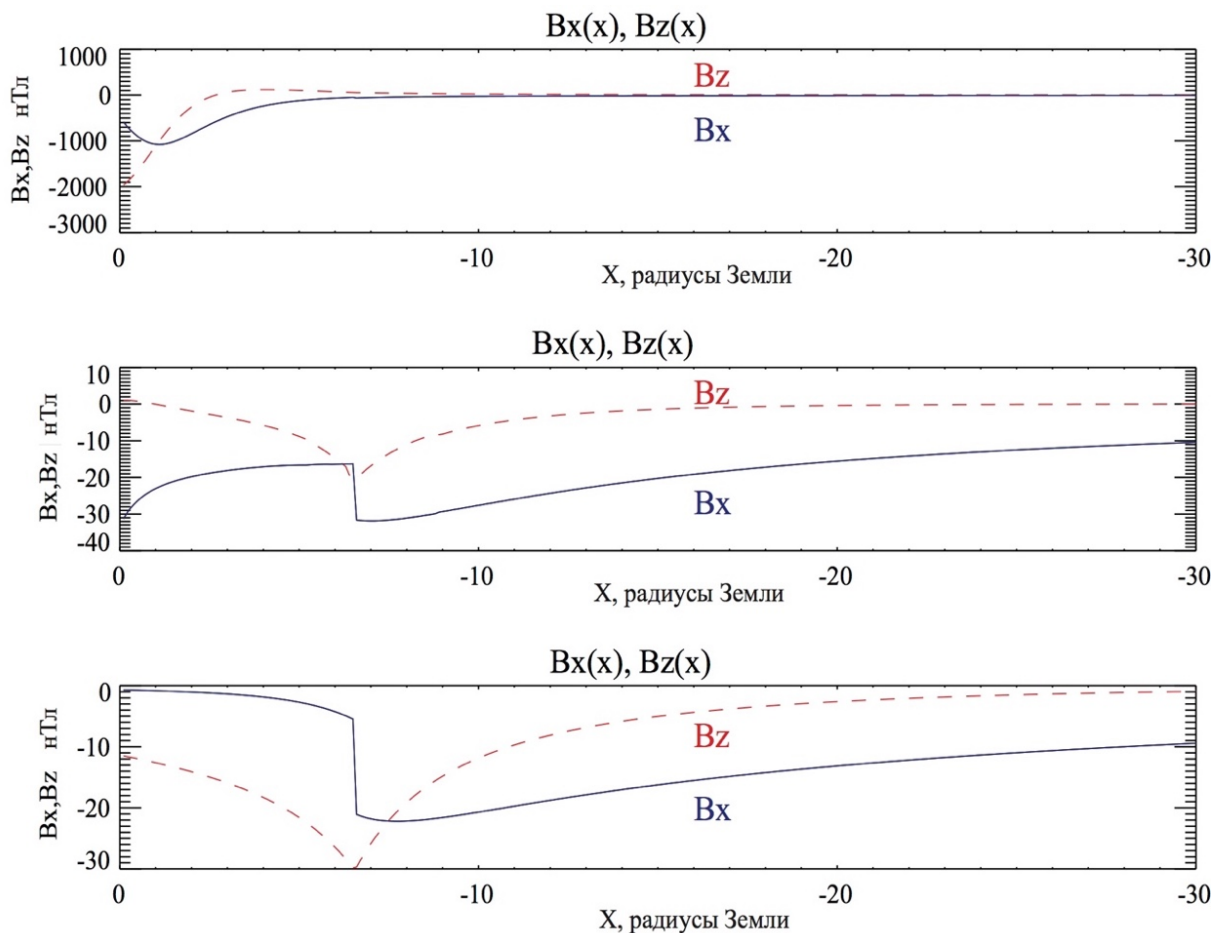


Рисунок 2. Характерные для спокойных условий профили компонент B_x и B_z магнитного поля в ночной магнитосфере, полученные по модели A2000 для заданных параметров межпланетной среды в 00 UT 14 февраля 2009 г., вдоль линии $Y_{GSM} = 0, Z_{GSM} = -2 R_E$. Компоненты магнитного поля показаны синими пунктирными (B_x) и красными сплошными (B_z) линиями. На верхней панели – полное магнитное поле от всех источников, на средней – полное поле за вычетом поля

IGRF (магнитное поле, создаваемое внутриземными токами), на нижней – поле токов хвоста магнитосферы.

Характерное измеряемое на спутнике THEMIS P5, магнитное поле вдоль его орбиты в течение 14 февраля 2009 года изображено на рисунке 3.

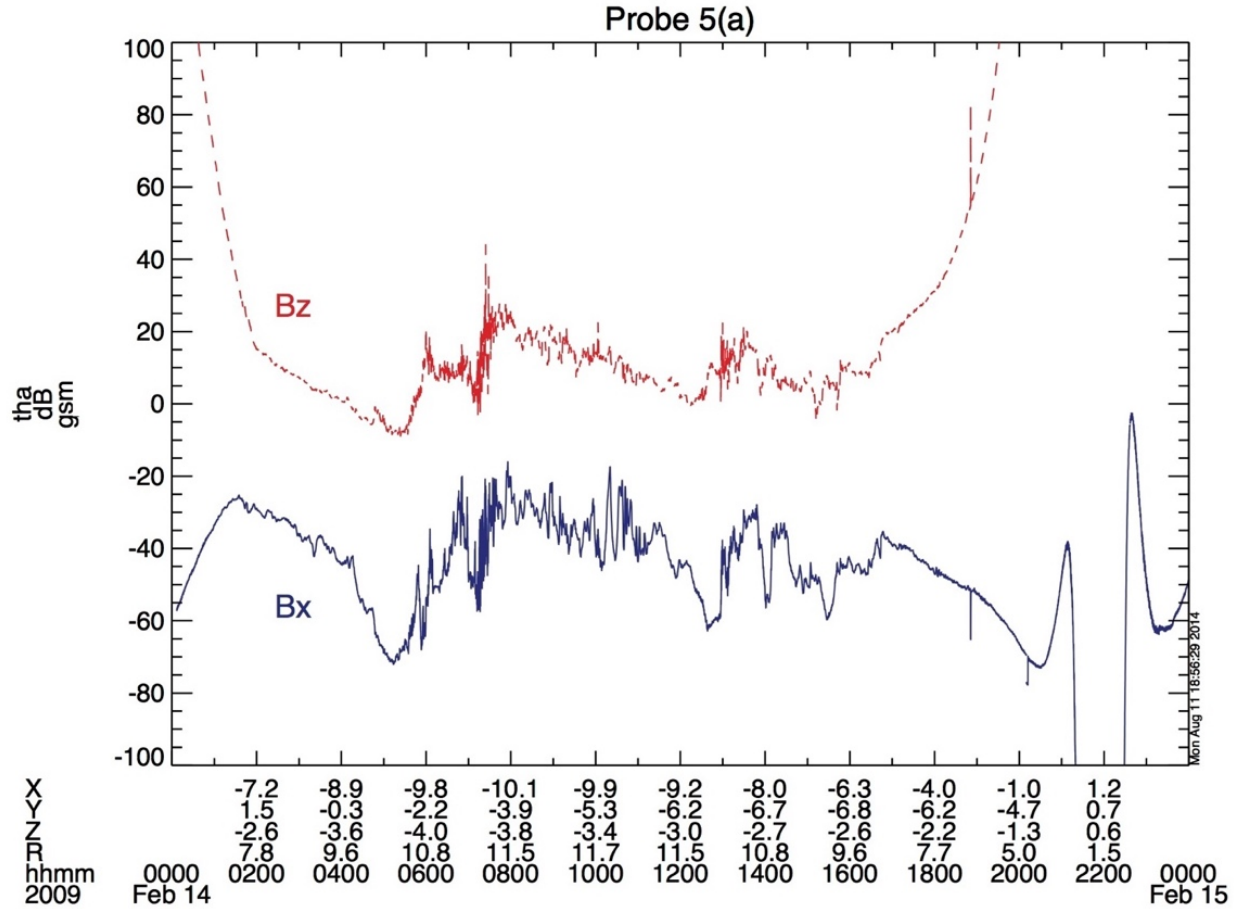


Рисунок 3. Компоненты магнитного поля вдоль орбиты спутника THEMIS P5 14 февраля 2009 года (B_x – синяя сплошная линия, B_z – красная пунктирная). B_y компонента магнитного поля не показана.

На рисунке 4 изображены магнитосферное магнитное поле вдоль орбиты спутника THEMIS P5 после вычитания вкладов в магнитное поле от токов Земли, кольцевого тока и токов на магнитопаузе.

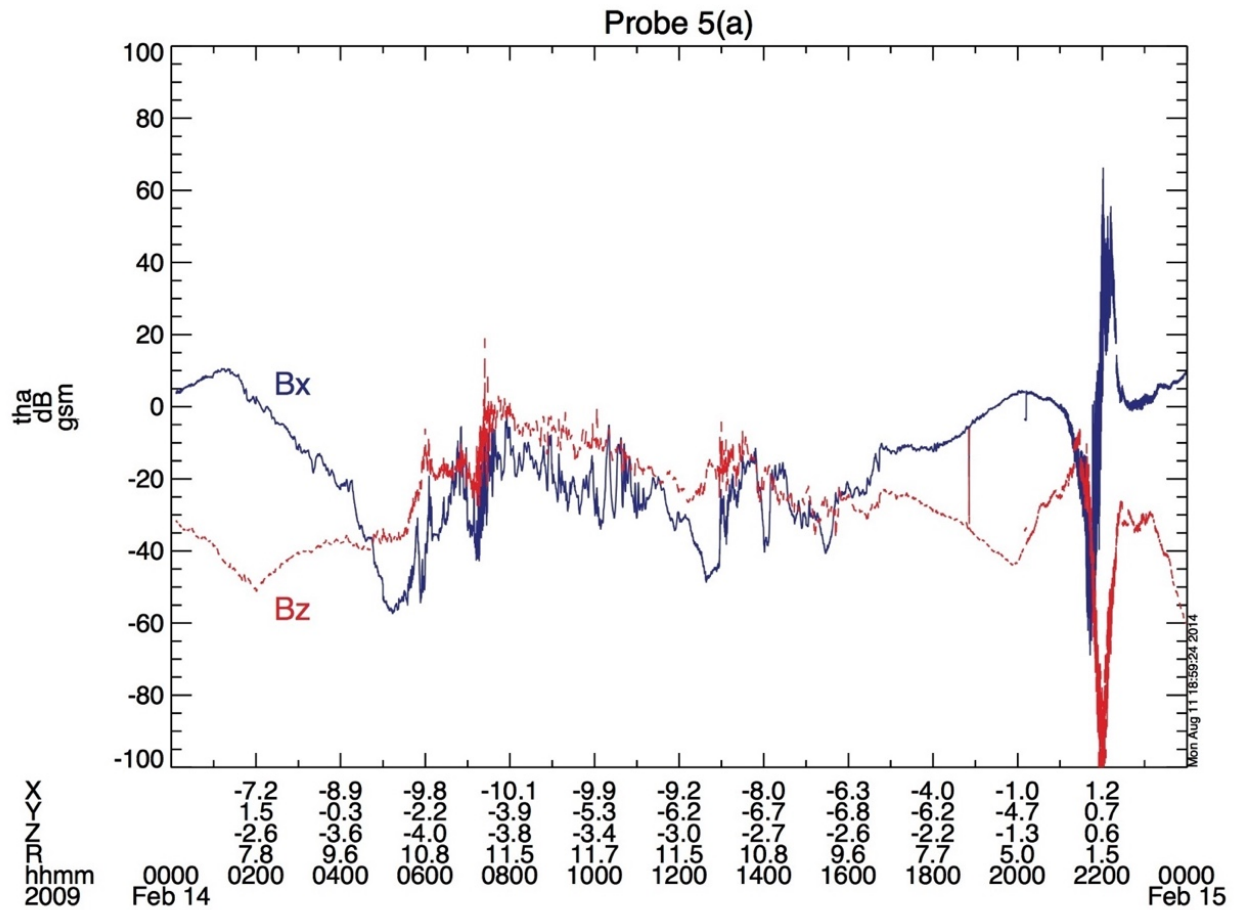


Рисунок 4. То же, что на рисунке 3, после вычитания вклада от внутриземных токов, кольцевого тока и токов на магнитопаузе.

Использование данных одновременных измерений магнитного поля со всех спутников THEMIS позволяет воспроизвести структуру магнитного поля хвоста (при соответствующем расположении самих спутников). На рисунке 5 представлены B_x , B_z (GSM) компоненты магнитного поля хвоста в ночной части магнитосферы на основании данных всех спутников. На рисунке 5 мы видим регулярное магнитное поле токов хвоста (красные круги) в сравнении с полным измеряемым магнитным полем (черные знаки «+») и внешним магнитным полем (синие символы) вдоль радиального направления в 05:45 UT 14 февраля 2009 года. Сплошные красные линии – рассчитанное по модели A2000 магнитное поле токов хвоста при следующих параметрах: $R_2 = 6.5 R_E$, $\Phi_\infty = 950$ МВб. Видно, что положение переднего края токового слоя соответствует минимуму B_z -компоненты поля и началу понижения B_x -компоненты. Соотношение между B_x и B_z -компонентами поля меняется на передней границе токового слоя. B_z -компонента преобладает

вблизи Земли, в то время как B_x – в регионе токов хвоста. Общее магнитное поле также меняется при приближении к переднему краю, не так резко как его компоненты [Lui and Hamilton, 1992].

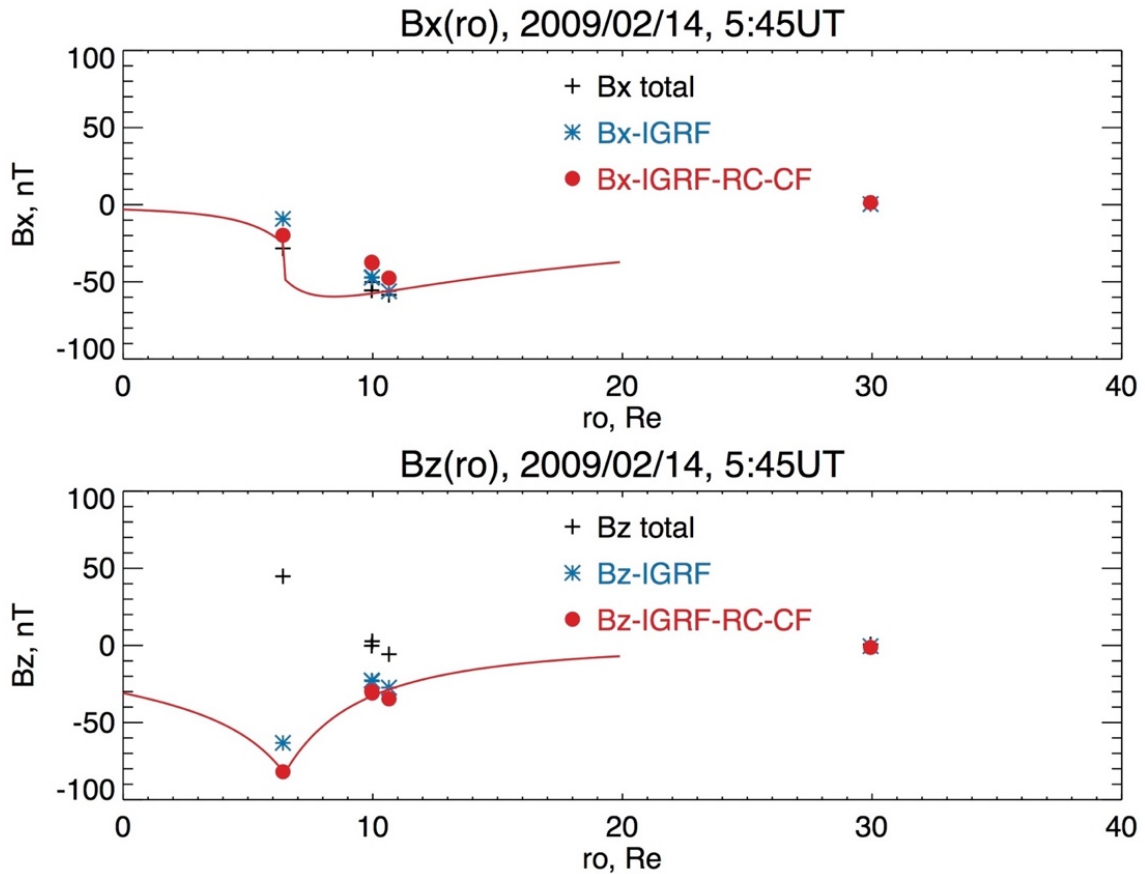


Рисунок 5. Радиальное распределение и структура магнитного поля (B_x , B_z (GSM) компоненты магнитного поля) в области хвоста магнитосферы в 05:45 UT 14 февраля 2009 года ($\rho = \sqrt{(x^2 + y^2)}$): полное магнитное поле (символ «+»), поле за вычетом вклада от внутриземных источников (символ «астерикс»), поле токов хвоста (символ «круг»). Сплошная линия – модельное (A2000) поле токов хвоста на основании данных по солнечному ветру.

Были восстановлены радиальные профили магнитного поля токов хвоста магнитосферы и определены его параметры в геомагнитно-спокойный период 4 апреля 2009 года (рисунок 6) и в геомагнитно-возмущенный период 14 февраля 2009 года.

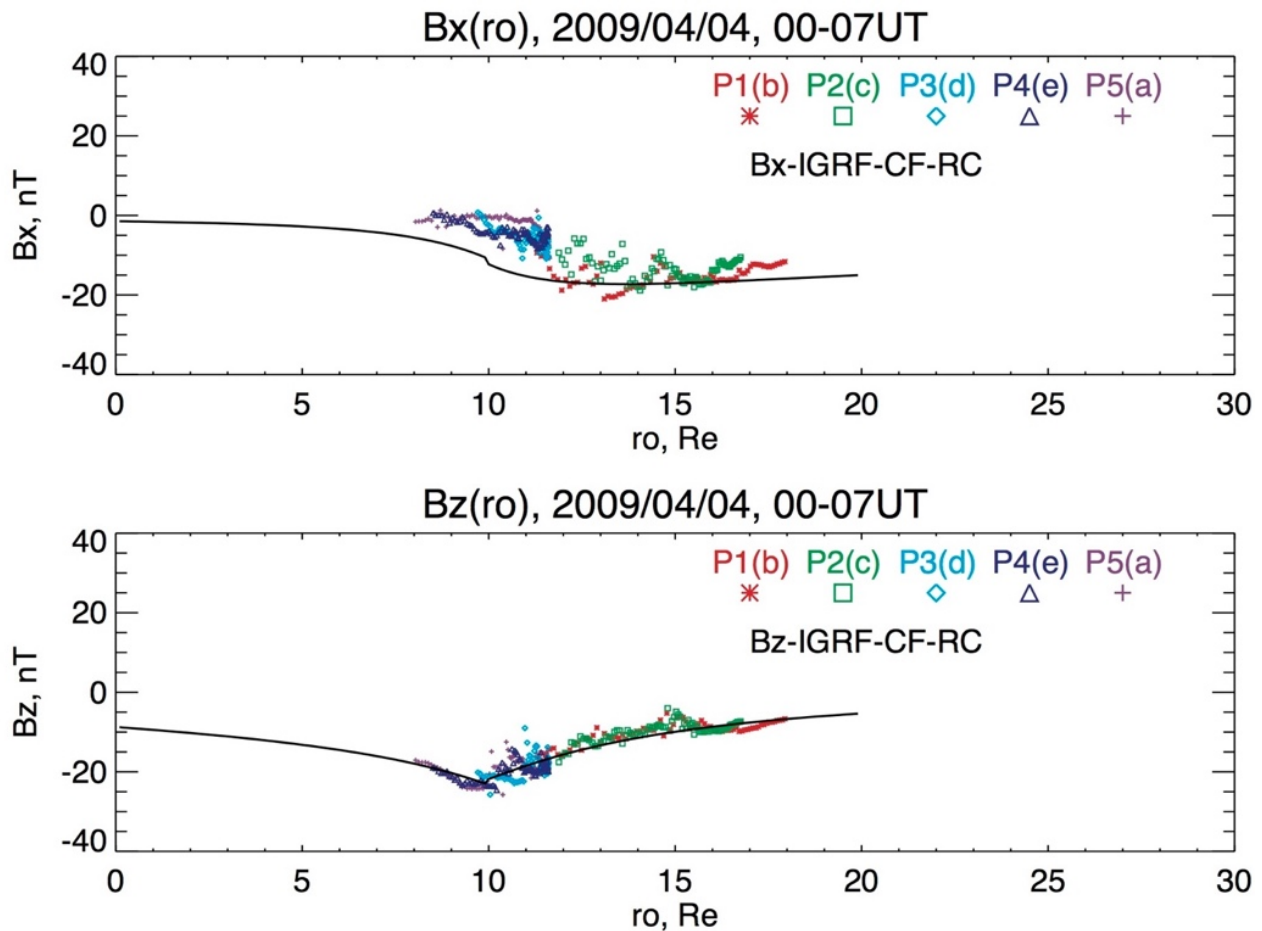


Рисунок 6. Структура магнитного поля (B_x , B_z) в течение 00-07 UT 4 апреля 2009 года на основе данных спутников THEMIS и с использованием модельных (A2000) вычислений (сплошная линия).

В Главе 4 изучено формирование переходной токовой системы вблизи переднего края токов хвоста магнитосферы во время подготовительной фазы бури 14 февраля 2009 года. Сформулирована идея об образовании переходной токовой системы в экваториальной плоскости, возникающей в ходе адиабатического сжатия магнитосферы солнечным ветром перед началом главной фазы бури, для поддержания магнитного потока через доли хвоста. Сделаны количественные оценки интенсивности такого тока.

Используя полученные в главе 3 модельные и экспериментальные данные о структуре магнитного поля хвоста магнитосферы во время геомагнитно спокойного периода, объяснены особенности структуры магнитного поля, наблюдаемые спутниками THEMIS во время бури 14 февраля 2009 года.

На рисунке 7 представлены компоненты магнитного поля токов хвоста магнитосферы, полученные из измерений THEMIS P5, на основе описанных в главе 2 методов.

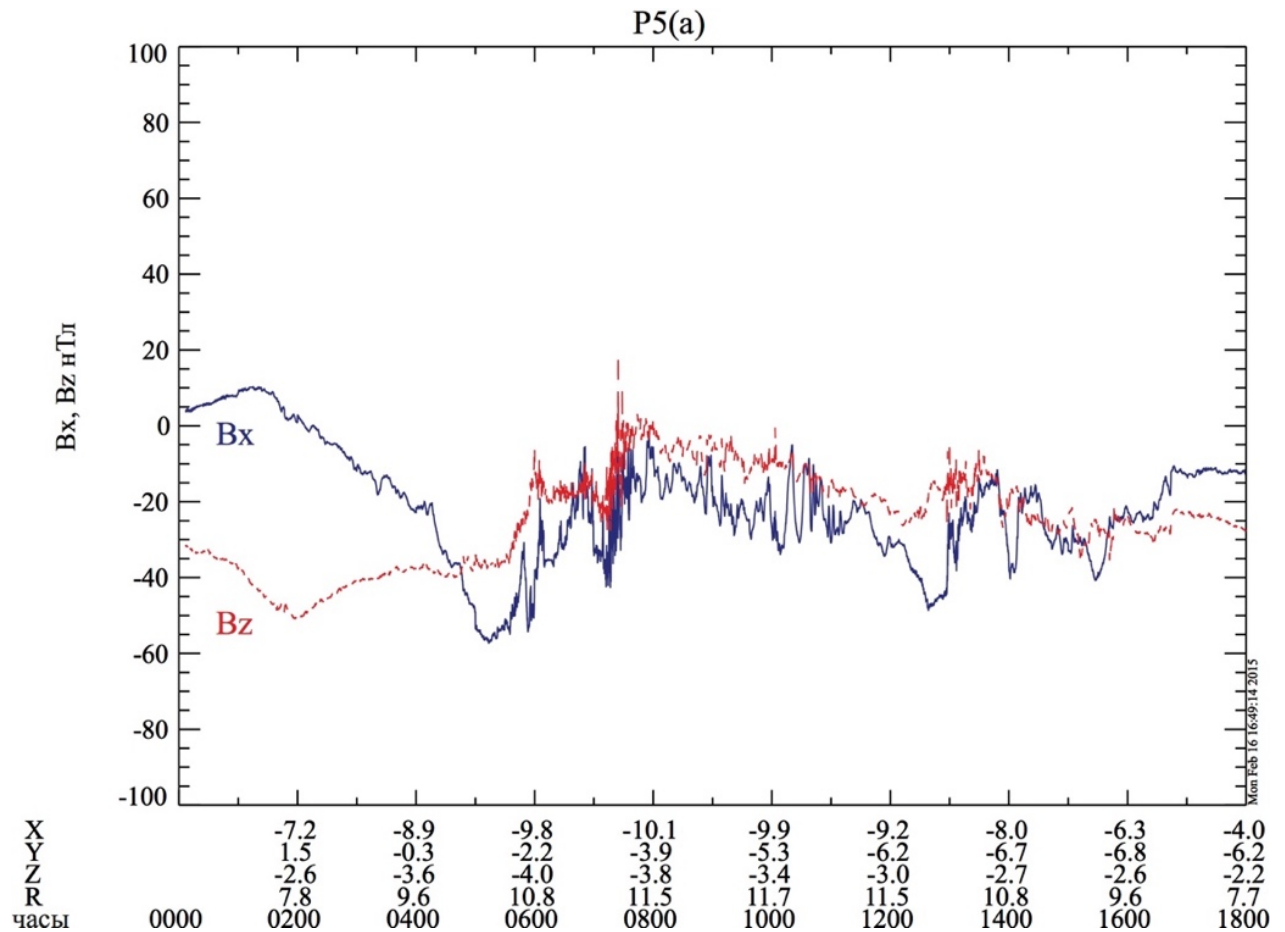


Рисунок 7. Компоненты магнитного поля вдоль орбиты THEMIS P5 14.02.2009 (B_x – синяя сплошная линия, B_z – красная пунктирная), полученные после вычитания магнитных полей от внутриземных токов и магнитосферных токов, отличных от токов хвоста. B_y -компонента магнитного поля не показана.

Видно, что в отличие от ожидаемой конфигурации (см., например, рисунки 2 и 6), минимум B_z -компоненты поля смещен относительно минимума B_x -компоненты (данные спутника THEMIS P5). Такая же особенность видна по данным спутников P3, P4.

Радиально-локализованный ток, протекающий с утра на вечер в окрестности внутренней части геомагнитного хвоста и замыкающийся на дневной магнитопаузе, может объяснить наши наблюдения: в ночной магнитосфере ток дает распределение B_z -компоненты магнитного поля в виде синусоидальной функции (мы видим отрицательное значение B_z во внутренней части контура и положительное – снаружи). Такой ток уменьшает амплитуду компоненты B_z магнитного

поля хвоста вблизи переднего края и увеличивает ее во внутренней магнитосфере. На рисунке 8 видно возмущение B_z -компоненты магнитного поля хвоста (синяя линия из точек) магнитным полем радиально-локализованного тока (зеленая пунктирная линия), расположенного вблизи токового слоя хвоста. Можно видеть образование специфического распределения магнитного поля (сплошная красная линия) и сдвиг минимума компоненты B_z к Земле с $10 R_E$ до $7 R_E$ в соответствии с данными THEMIS.

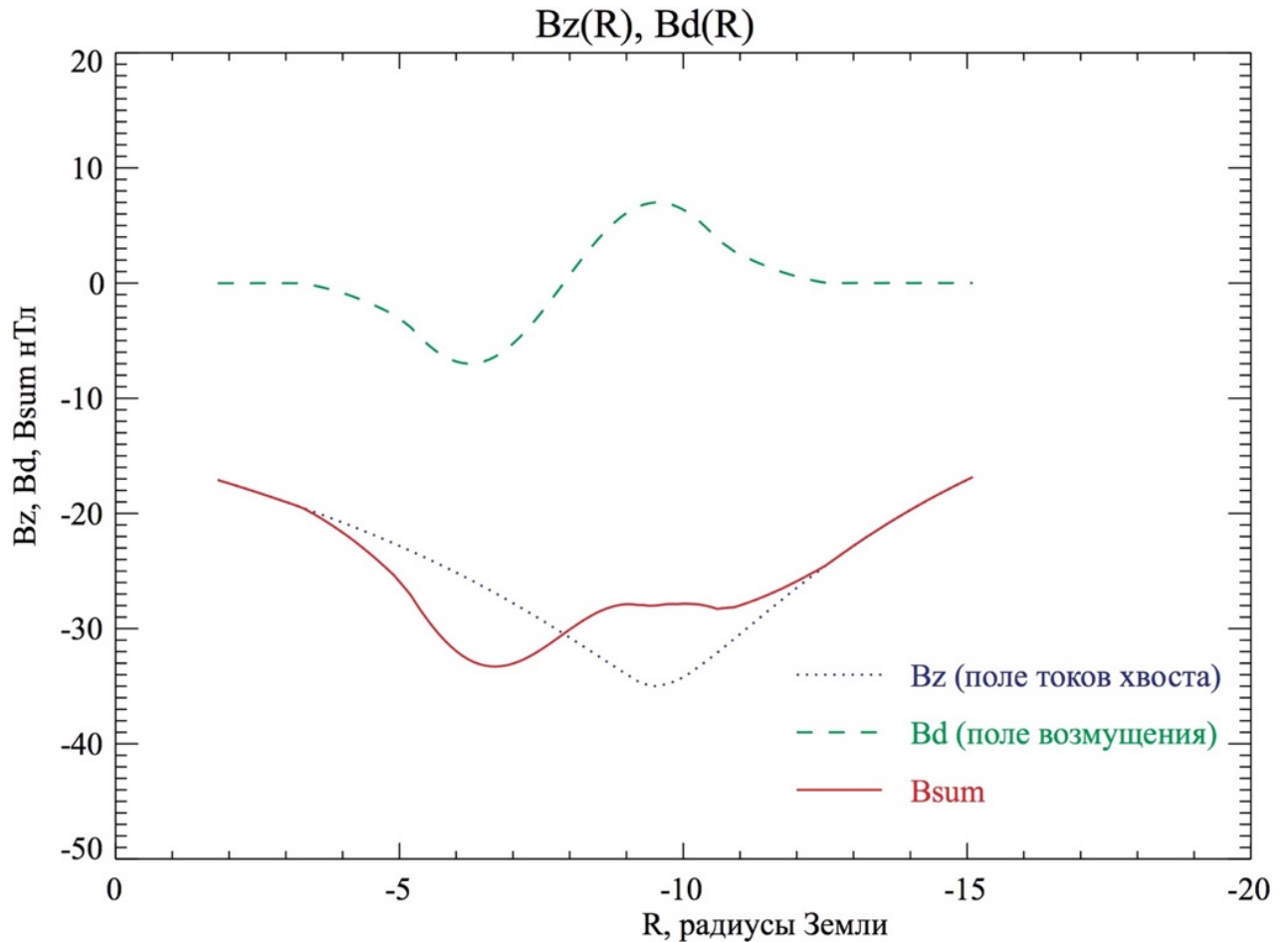


Рисунок 8. B_z -компонента магнитного поля (сплошная красная линия) вдоль геомагнитного хвоста, полученная при помощи наложения магнитного поля от токов хвоста (синяя линия из точек) и радиально-локализованного тока поперек хвоста (пунктирная зеленая линия).

Переходная токовая система возникает перед началом бури в ходе адиабатического сжатия магнитосферы солнечным ветром для поддержания магнитного потока через доли хвоста. Протекающий ток оценивается примерно в 500 кА.

В Главе 5 изучено явление, связанное с появлением магнитного поля с отрицательными значениями B_z -компоненты в передней части геомагнитного хвоста на главной фазе бури 14 февраля 2009 года, что сигнализирует о наличии структуры с замкнутой конфигурацией магнитного поля в хвосте магнитосферы. Наблюдаемая в эксперименте замкнутая конфигурация магнитных силовых линий подтверждена расчетами магнитного поля, выполненными для реальных условий в космической среде.

Во время геомагнитного возмущения 14 февраля 2009 года на 3 спутниках THEMIS (P3, P4, P5) была зафиксирована отрицательная B_z -компонента суммарного (без вычетов вкладов от токовых систем) магнитного поля.

Предложен механизм образования такой специфичной структуры, обусловленный экстремальным развитием тока в хвосте магнитосферы. На рисунке 9 представлены дипольное магнитное поле Земли (B_{dip}) и поле токов хвоста (B_{tail}), а также, суммарная B_z -компонента. B_z -компонента положительна при обычных условиях, как на верхнем рисунке. Пунктирная линия – это поле токов хвоста с противоположным знаком, представленное для удобства сравнения с полем Земли. Когда токи хвоста значительно усиливаются, B_{tail} становится больше, чем B_{dip} , и возникает область вблизи переднего края токового слоя, в которой суммарная B_z -компонента отрицательна (нижний рисунок). Альтернативный вариант получения отрицательного суммарного B_z – это отдаление переднего края токового слоя хвоста в ночную сторону магнитосферы. В этом случае, для получения отрицательных значений суммарного поля потребуются меньшие величины токов хвоста. Геомагнитные условия в 2009 году способствовали расширению магнитосферы с увеличением пространственных масштабов токовых систем, что сильно благоприятствовало формированию структур с отрицательной суммарной B_z -компонентой магнитного поля в геомагнитном хвосте.

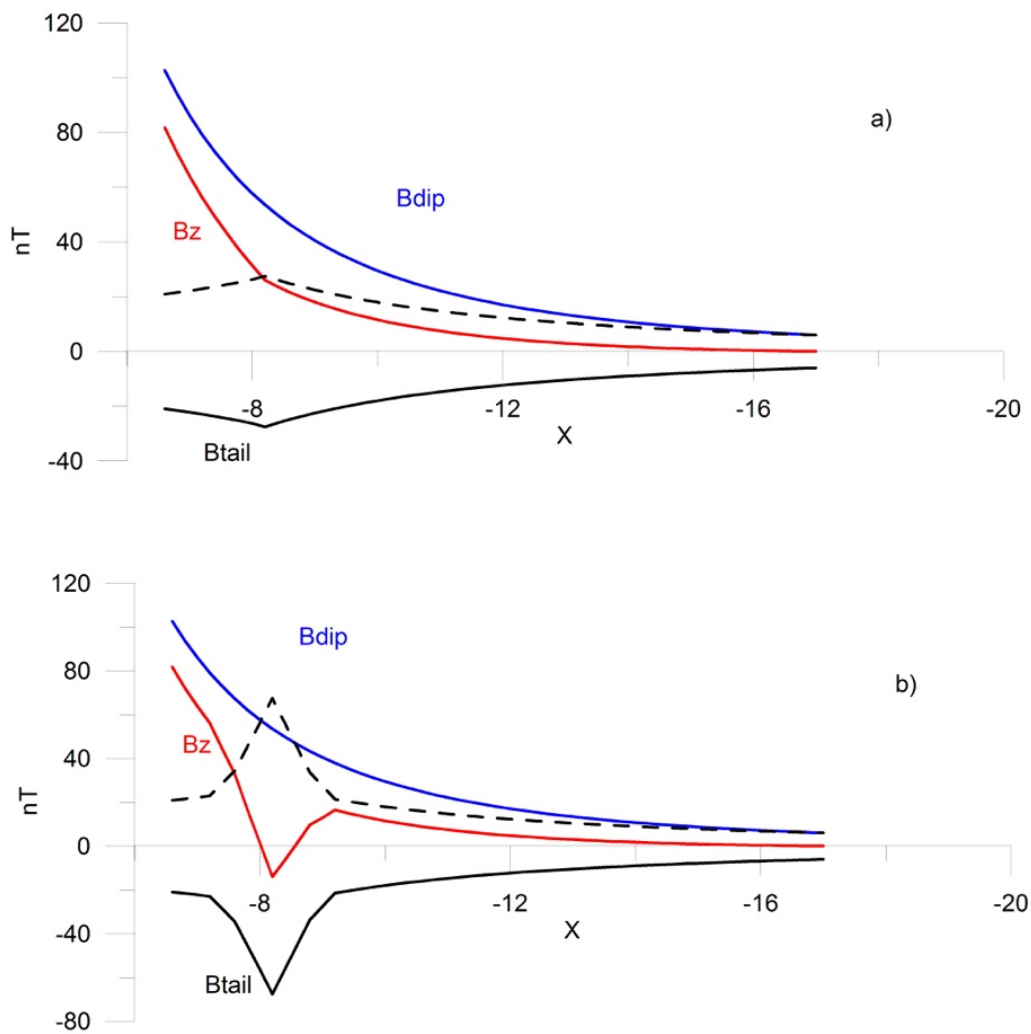


Рисунок 9. Структура магнитного поля, полученная суперпозицией поля Земли и токов хвоста. Поле Земли – синие линии, поле токов хвоста – красные, суммарное поле – черные, “перевернутое” поле хвоста – черные пунктирные (представлено для сравнения с полем Земли). Верхний рисунок: типичная ситуация со слабым полем токов хвоста. Нижний рисунок: усиленное поле токов хвоста, что в результате дает отрицательное суммарное поле.

На основе данных о солнечном ветре на главной фазе бури 14 февраля 2009 года были сделаны численные оценки характерных параметров магнитосферы (входных параметров модели A2000) и проведены расчеты структуры магнитного поля. Было показано, что сразу после внезапного начала бури произошло резкое возрастание потока через доли хвоста, которое привело к формированию магнитной структуры с отрицательной B_z -компонентой. На рисунке 10 изображено распределение магнитного поля вдоль хвоста и магнитные силовые линии, рассчитанные в 07:00 UT по модели A2000. Этот профиль B_z является магнитным островом с нейтральной точкой X-типа, находящейся на ближней к Земле стороне. Видно, что образование таких магнитных

структур (магнитные острова) - это естественный результат глобальной магнитосферной динамики. Похожие структуры могут также возникать из-за суббуревой активности, когда локальное магнитное поле превышает положительное геомагнитное дипольное поле даже на более близких к Земле расстояниях, по сравнению с тем, что было рассмотрено выше. Этот механизм преобразовывает избыточный магнитный поток через доли хвоста в замкнутые магнитные структуры (магнитные острова).

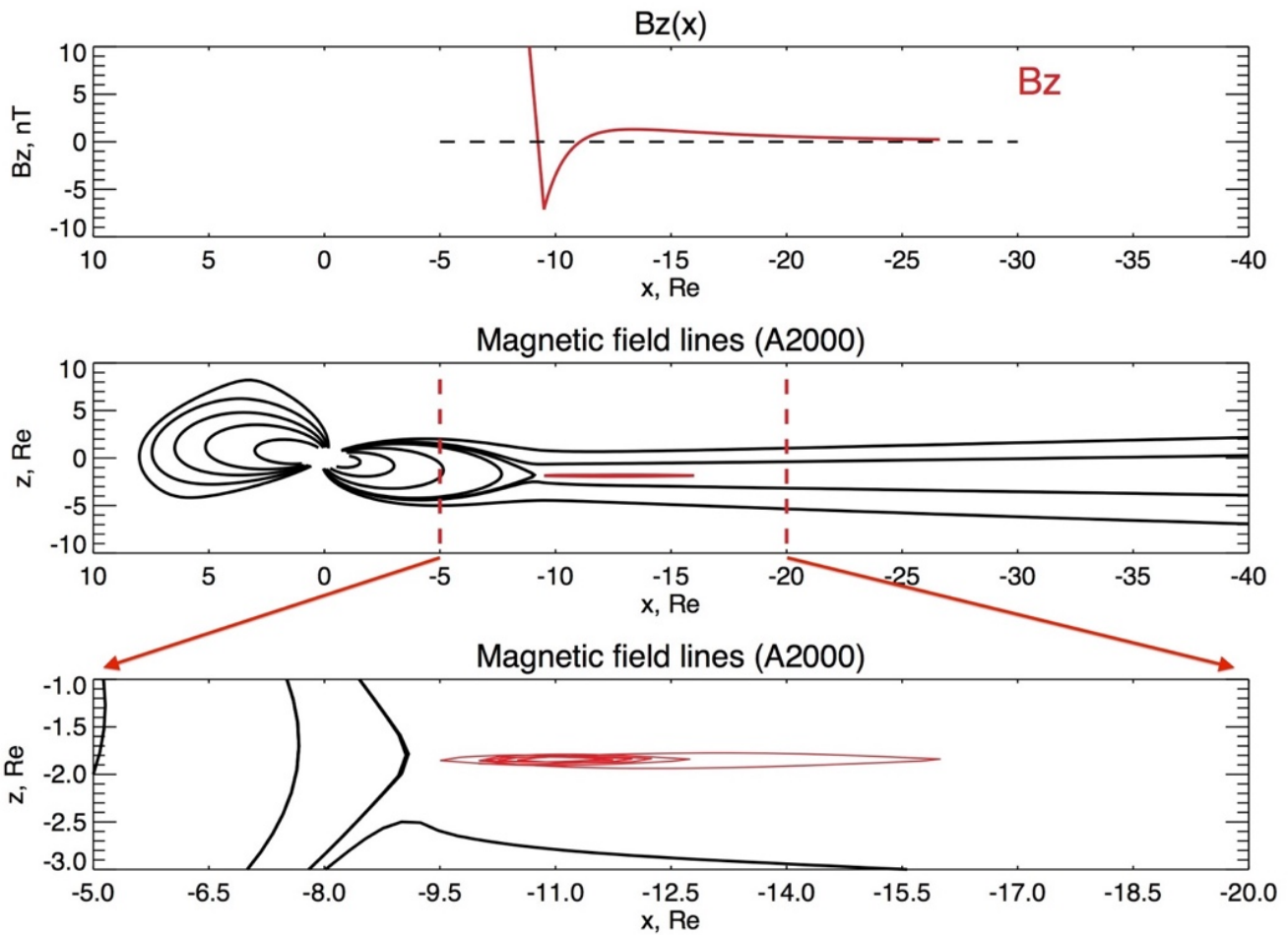


Рисунок 10. Распределение B_z -компоненты магнитного поля вдоль оси X_{GSM} и структура магнитного поля в 07 UT 14 февраля 2009 года, рассчитанная при помощи магнитосферной модели A2000.

В Главе 6 рассмотрена динамика кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время магнитной бури 27-28 февраля 2014 года по данным космических аппаратов Van Allen Probes (RBSP) и POES. Показано, что потоки ионов бурового экваториального пояса, регистрируемые на приэкваториальном участке орбиты низковысотных полярных спутников, отражают динамику частиц кольцевого тока, восстанавливаемую по прямым измерениям спутников Van Allen

Probes. Сделаны выводы о качественном соответствии вариаций потоков ионов бурового экваториального пояса на низких высотах в приэкваториальной области и динамики кольцевого тока, а также основных характеристик энергетических спектров частиц этих двух областей. В рассмотренном событии обнаружен эффект смягчения спектра потоков частиц кольцевого тока на главной фазе бури, обусловленный высыпаниями частиц кольцевого тока с $E > 100$ кэВ ниже границы изотропизации.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В спокойных геомагнитных условиях в эпоху экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг. передний край хвоста магнитосферы располагался на расстояниях $10-12 R_E$, интенсивность магнитного поля токов хвоста составляла около 20 нТл. В возмущенные периоды наблюдалось смещение токов геомагнитного хвоста до $7-8 R_E$, а интенсивность поля возрастала до 60 нТл. Увеличение пространственных размеров магнитосферы вследствие ослабления солнечной активности в 2008-2009 гг. ответственно за низкие уровни $|Dst|$ -вариации во время геомагнитных возмущений.
2. Во время магнитной бури 13-14 февраля 2009 г. вблизи переднего края токового слоя хвоста магнитосферы сформировалась переходная токовая система, образованная радиально-локализованными токами поперек хвоста, замыкающимися на дневной магнитопаузе. Переходная токовая система способствует сохранению величины магнитного потока через доли хвоста на фоне адиабатических изменений размеров магнитосферы в ходе плавного возрастания давления солнечного ветра,
3. На фазе внезапного начала магнитной бури 13-14 февраля 2009 г. в передней части геомагнитного хвоста обнаружена устойчивая замкнутая структура магнитного поля с отрицательными значениями B_z -компоненты. Получены условия формирования замкнутых магнитных структур в хвосте магнитосферы, подтвержденные расчетами магнитного поля, выполненными для реальных условий в космической среде.
4. Для магнитной бури 27-28 февраля 2014 г. показано, что вариации потоков ионов бурового экваториального пояса на низких высотах воспроизводят динамику кольцевого тока и основные характеристики его энергетического спектра.

Научная новизна исследования заключается в том, что в ходе работы:

1. Впервые разработана и программно реализована в программной среде IDL процедура восстановления радиального распределения магнитного поля хвоста магнитосферы по данным многоточечных измерений аппаратами THEMIS в сочетании с данными расчетов по моделям IGRF и A2000.
2. Получены оценки характерных параметров хвоста магнитосферы в уникальный период экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг. в геомагнитно спокойных и возмущенных условиях.
3. Показано, что увеличение пространственных размеров магнитосферы вследствие ослабления давления солнечного ветра в эпоху 2008-2009 ответственно за низкие уровни $|Dst|$ -вариации во время геомагнитных возмущений.
4. Впервые были сформулированы условия возникновения замкнутых магнитных структур в хвосте возмущенной магнитосферы и определены параметры короткоживущих переходных токовых систем.
5. Получены новые экспериментальные свидетельства о связи потоков частиц кольцевого тока и потоков ионов, регистрируемых в приэкваториальной области на низких высотах.

Список основных публикаций

I. Журналы из списка ВАК

1. Калегаев, В.В. Динамика магнитосферы во время бури 14.02.09 / В.В. Калегаев, И.С. Назарков // Вестник Московского Университета. — 2016. — Т. 3. — №. 3 — С.54-60
2. Калегаев, В.В. Формирование переходной токовой системы вблизи переднего края тока хвоста магнитосферы / В.В. Калегаев, И.С. Назарков // Вестник Московского Университета. — 2015. — Т. 3. — №. 4 — С.75-82
3. Калегаев, В.В. Динамика кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время магнитной бури 27-28.И.2014 г. / В.В. Калегаев, Н.А. Власова, И.С. Назарков // Геомагнетизм и аэрономия. — 2015. — Т. 55. — N 6. — С. 1–8.
4. Kalegaev, V.V. On the large-scale structure of the tail current as measured by THEMIS / V.V. Kalegaev, I.I. Alexeev, I.S. Nazarkov, V. Angelopoulos, A. Runov // Advances in Space Research. — 2014. — V.54. — I. 9. — P. 1773-1785.

II. Прочие работы

1. Назарков, И.С. Положение и динамика переднего края токового слоя хвоста магнитосферы на основе данных THEMIS в период экстремально спокойной солнечной активности / И.С. Назарков, В.В. Калегаев // Ученые Записки Физического Факультета МГУ. — 2013. — 4(134802).

2. Kalegaev, V.V.. Large-scale structure of the tail current by THEMIS data / V.V. Kalegaev, I.I. Alexeev, I.S. Nazarkov, V. Angelopoulos, A. Runov // in proceedings of 9th International Conference Problems of Geocosmos. — 2012. — P. 233–239.

Список цитируемой литературы

- Ковтюх А.С. Геокоорона горячей плазмы // Космические исследования. 2001. Т. 39. No 6. С. 563–596.
- 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 Rev. 2003. V. 107. P. 7–26.
- Alexeev I. I. and Feldstein Y. I. Modeling of geomagnetic field during magnetic storms and comparison with observations // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2001. V. 63(5). P. 431–440.
- Angelopoulos V. The THEMIS mission // Space Sci. Rev. 2008. V.141. I. 1. P. 5-34.
- Artemyev, A. V., A. A. Petrukovich, R. Nakamura, and L. M. Zelenyi (2015) Two-dimensional configuration of the magnetotail current sheet: THEMIS observations. // Geophys. Res. Lett. 2015. V.42. P. 3662–3667. doi: 10.1002/2015GL063994.
- Fairfield D. H., J. Jones Variability of the tail lobe field strength // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 7785-7791.
- Kivelson M.G., Russell C.T. Introduction to space physics // Cambridge University Press 1995.
- Lui A.T.Y., Hamilton D.C. Radial profiles of quiet time magnetospheric parameters // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. I. 19. P. 325-332
- Ness N.F. The Earth's magnetic tail // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 2989–3005.
- Petrukovich, A. A., Artemyev A. V., Nakamura R., Panov E. V., and Baumjohann W Cluster observations of $\partial B_z / \partial x$ during growth phase magnetotail stretching intervals // J. Geophys. Res. Space Physics 2013. V. 118. P. 5720–5730. doi:10.1002/jgra.50550.
- Sergeev V., Angelopoulos V., Apatenkov S., Bonnell J., Ergun R., Nakamura R., McFadden J., Larson D., Runov A. Kinetic structure of the sharp injection/dipolarization front in the flow-braking region // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L21105. doi:10.1029/2009GL040658.
- Tanskanen E.I., Slavin J.A., Fairfield D.H., Sibeck D.G., Gjerloev J., Mukai T., Leda A., Nagai T. Magnetotail response to prolonged southward IMF Bz intervals: Loading, unloading, and continuous magnetospheric dissipation. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110.
- Tsyganenko N. A., Fairfield D. H. Global shape of the magnetotail current sheet as derived from Geotail and Polar data // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. 1029/2003JA010062.
- Zelenyi L. M., Artemyev A., Petrukovich A. Properties of Magnetic Field Fluctuations in the Earth's Magnetotail and Implications for the General Problem of Structure Formation in Hot Plasmas // Space Sci. Rev. 2015. V. 188. P. 287–310. doi:10.1007/s11214-014-0037-7.

Подписано к печати 17.10.2016 г.

Тираж 100 экз. Заказ № 141

Отпечатано в отделе оперативной печати

Физического факультета МГУ