

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра физики космоса

*на правах рукописи*

Назарков Илья Сергеевич

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

01.04.08 – физика плазмы

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Калегаев В.В.

Москва, 2016 г.

## Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Магнитосфера Земли.....	12
1.1 Структура магнитосферы Земли.....	12
1.2 Магнитосферное магнитное поле.....	15
1.3 Воздействие солнечного ветра на магнитосферу: геомагнитные возмущения.....	15
1.4 Динамика и структура геомагнитного хвоста.....	20
1.5 Кольцевой ток во время магнитной бури.....	26
Глава 2. Методы исследований.....	31
2.1 Используемые спутниковые данные .....	31
2.1.1 Миссия THEMIS.....	31
2.1.2 Миссия Van Allen Probes.....	37
2.1.3 Миссия POES.....	39
2.2 Используемые модели магнитного поля.....	39
Глава 3. Структура и динамика геомагнитного хвоста в период экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг.....	44
3.1 Особенности геомагнитной обстановки в 2008-2009 гг.....	44
3.2 Метод выделения магнитного поля токов хвоста магнитосферы.....	47
3.3 Спокойная магнитосферы 4 апреля 2009 года.....	53
3.4 Геомагнитное возмущение 14 февраля 2009 года .....	57
3.5 Выводы.....	66
Глава 4. Формирование переходной токовой системы вблизи переднего края тока хвоста магнитосферы .....	67
4.1 Обзор и анализ.....	67
4.2 Выводы.....	71
Глава 5. Формирование структуры магнитного поля с отрицательными значениями $B_z$ компоненты в передней части геомагнитного хвоста во время бури 14 февраля 2009.....	72
5.1 Обзор, анализ и моделирование.....	72
5.2 Выводы.....	77
Глава 6. Динамика кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время магнитной бури 27-28 февраля 2014.....	79
6.1 Введение.....	79
6.2 Обзор и анализ события.....	84
6.3 Выводы.....	90
Заключение.....	92

Список литературы.....94

## Введение

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; Калегаев и др., 1998; Tanskanen et al., 2005; Tsyganenko and Fairfield, 2004].

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  $0^\circ$  при северном. Это уравнение 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 временные изменения 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. Выполнение одновременных измерений 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 точно не известны из-за сложности разделения областей, на которые преимущественное влияние оказывают и токи хвоста, и кольцевой ток. Сочетание экспериментального и теоретического подходов позволяют более детально изучить структуру и динамику магнитного поля в этой области.

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, например, обзор [Ковтюх, 2001]. К сожалению, практически все космические эксперименты, в которых может быть непосредственно исследован кольцевой ток, имеют ограниченную продолжительность. Кроме того, измерения на единичном аппарате не позволяют разделить эффекты, связанные с

движением спутника и с собственной динамикой магнитосферы. Новые возможности 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 будет исследоваться структура и динамика магнитосферных токовых систем 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 с учетом эффектов пространственно-временной неопределенности.
- Изучения особенностей динамики хвоста магнитосферы во время периода экстремально-низкой солнечной активности 2008-2009 гг.
- Исследования взаимосвязей между кольцевым током и потоками частиц на низких полярных орбитах.

### **Цели и задачи 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 захваченных частиц и потоков частиц на низких орбитах.

**В диссертации получены следующие новые результаты:**

Разработана и программно реализована процедура восстановления радиального распределения магнитного поля хвоста магнитосферы по данным многоточечных измерений аппаратов THEMIS в сочетании с данными расчетов по моделям IGRF и A2000 в программной среде IDL.

1. Получены оценки характерных параметров хвоста магнитосферы в период экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг. Обнаружено, что в спокойных геомагнитных условиях передний край хвоста магнитосферы наблюдался на расстояниях 10-12  $R_E$ , интенсивность  $B_x$  компоненты магнитного поля составляла около 20 нТл.
2. Показано, что во время главной фазы бури 13-14 февраля 2009 г. наблюдалось смещение токов геомагнитного хвоста до 7-8  $R_E$ , а интенсивность поля возрастала до 60 нТл. 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.
3. Показано, что на фоне плавного возрастания давления солнечного ветра 13-14 февраля 2009 г. на переднем крае токового слоя хвоста магнитосферы сформировалась радиально-локализованная переходная токовая система, замыкающаяся на дневной магнитопаузе, способствующая сохранению величины магнитного потока через доли хвоста.
4. На фазе внезапного начала бури обнаружена устойчивая структура магнитного поля с отрицательными значениями  $B_z$  компоненты в передней части геомагнитного хвоста. Наблюдаемая в эксперименте замкнутая конфигурация магнитных силовых линий подтверждена расчетами магнитного поля, выполненными для реальных условий в космической среде.
5. Для магнитной бури 27-28 февраля 2014 показано, что вариации потоков ионов бурового экваториального пояса на низких высотах в приэкваториальной области воспроизводят динамику кольцевого тока и основные характеристики его энергетического спектра.

### **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 в работе 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 GEOSMOS, 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.

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.

В **Главе 2** представлены методы исследований. Описаны спутниковые данные (миссии THEMIS, RBPS, POES) и модели магнитного поля (A2000, IGRF), используемые в данной работе для анализа геомагнитных возмущений.

В **Главе 3** изучены характерные особенности динамики магнитосферы в период минимума солнечной активности в 2009 году, выбраны геомагнитно спокойные и возмущенные периоды для анализа. В главе описан метод выделения магнитного поля токов хвоста магнитосферы, который используется при анализе магнитных данных, получаемых со спутников THEMIS. При помощи данного метода были восстановлены радиальные профили магнитного поля токов хвоста магнитосферы в геомагнитно спокойный период 4 апреля 2009 года и в геомагнитно возмущенный период 14 февраля 2009 года, по результатам сделаны выводы о динамике переднего края токового слоя хвоста магнитосферы и вариациях магнитного поля в его окрестностях.

В **Главе 4** изучено формирование переходной токовой системы вблизи переднего края тока хвоста магнитосферы во время бури 14 февраля 2009 года. Сформулировано предположение об образовании кругового тока в экваториальной плоскости, возникшего перед началом бури в ходе адиабатического сжатия магнитосферы солнечным ветром для поддержания магнитного потока сквозь доли хвоста. Сделаны численные оценки интенсивности такого тока.

В **Главе 5** изучено явление, связанное с появлением магнитного поля с отрицательными значениями  $B_z$  компоненты в передней части геомагнитного хвоста на фазе внезапного начала бури 14 февраля 2009 года. Дано качественное объяснение формированию 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.

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 динамикой кольцевого тока, а также основными характеристиками 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.

## Глава 1. Магнитосфера Земли

### 1.1 Структура магнитосферы Земли

Магнитосфера Земли – результат постоянного взаимодействия собственного магнитного поля планеты с солнечным ветром, сверхзвуковым потоком плазмы, истекающим из солнечной короны. В результате этого процесса возникают магнитосферные токовые системы, порождающие магнитосферное магнитное поле и формирующие сложную систему взаимосвязанных областей и структур в околоземном космическом пространстве.

Основными, регулярными, токовыми системами, поддерживающими общую структуру магнитосферы, являются токи на магнитопаузе, токи хвоста и кольцевой ток. При взаимодействии сверхзвукового потока солнечного ветра и поля Земли происходит поджатие геомагнитного поля с образованием магнитопаузы, которая определяет границы магнитосферы и по поверхности которой текут токи Чепмена-Ферраро [Chapman, Ferraro, 1931], экранирующее магнитосферное магнитное поле. Форма и положение магнитопаузы определяются на основе баланса давлений внутри и снаружи магнитосферы (главным образом, динамического - снаружи, и магнитного – внутри). Расстояние до ее подсолнечной границы от центра Земли составляет около 10-12  $R_E$  ( $R_E$  – радиус Земли, 6371 км) при спокойных условиях в солнечном ветре. Перед магнитопаузой образуется головная ударная волна, на фронте которой плазма солнечного ветра сжимается, нагревается и замедляется [Сергеев, Цыганенко, 1980]. Между магнитопаузой и головной ударной волной образуется переходная область, в которой плазма обтекает магнитосферу с флангов, отклоняясь от первоначальной траектории [Paschmann et al., 1979; Phan et al., 1994]. Главным результатом воздействия солнечного ветра на геомагнитное поле является образование хвоста магнитосферы, специфичной конфигурации силовых линий, которые вытянуты от Земли в ночную сторону [Ness, 1965]. Геомагнитный хвост состоит из двух долей, северной и южной, с противоположно направленными магнитными полями, разделенных электрическими токами поперек хвоста, которые замыкаются через магнитопаузу.

Благодаря стационарной магнитосферной конвекции, которая обеспечивает дрейф плазмы из удаленного хвоста к Земле, частицы плазмы постоянно поступают во внутреннюю магнитосферу, где они захватываются геомагнитным полем и, двигаясь вокруг Земли (положительные ионы движутся на запад, а электроны – на восток), формируют кольцевой ток [Frank, 1967].

Регулярное магнитное поле, образованное, как собственным полем Земли, так и полями от основных магнитосферных токовых систем определяет структуру и динамику магнитосферы в околоземном космическом пространстве. При этом, в отличие от медленно меняющегося поля

Земли, поле внешних токовых систем подвержено значительным вариациям под воздействием параметров солнечного ветра в ответ на разнообразные проявления солнечной активности.

Благодаря успешным космическим миссиям в настоящее время получено много экспериментального материала, который позволяет воссоздать структуру магнитосферы.

На рисунке 1.1 схематично изображена магнитосфера Земли и выделены характерные области и токовые системы, каждая из которых обладает своими уникальными параметрами и динамикой. Стоит заметить, что каждая отдельная область, каждая токовая система, вносит свой вклад в общую конфигурацию магнитосферы и, в то же время, тесно с ней связана, сама зависит от геомагнитных условий и параметров солнечного ветра, что позволяет считать магнитосферу самосогласованной системой.

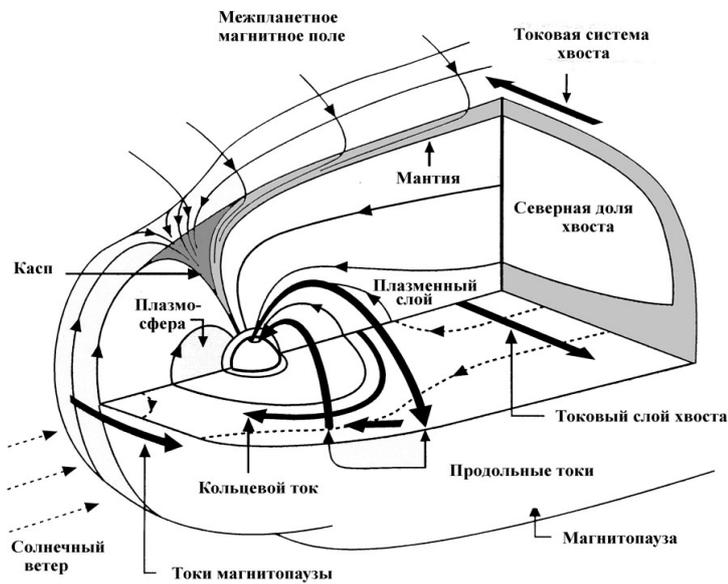


Рисунок 1.1 Магнитосфера Земли. Изображены характерные области и токовые системы (на основе оригинального изображения [Kivelson, Russel, 1995]).

Магнитное поле контролирует движение заряженных частиц и ответственно за формирование плазменных образований в магнитосфере Земли. Для описания структуры и динамики этих областей удобно использовать экваториальное геоцентрическое расстояние до силовой линии  $L$  (выраженное в  $R_E$ ) и местное магнитное время MLT (в часах). Хотя происхождение параметра Мак-Илвайна  $L$  [McIlwain, 1961] связано с анализом адиабатического движения заряженных частиц в дипольном магнитном поле, вышеприведенное определение данного параметра часто используется для описания крупномасштабной структуры магнитосферы. Точка в экваториальной плоскости магнитосферы естественным образом связана магнитной силовой линией с ионосферой. Проекция точки с параметром  $L$  имеет широту  $\varphi$ , такую, что  $1/\cos^2(\varphi)=L$ . Здесь под  $\varphi$  понимается исправленная геомагнитная широта. Вопросы

правомерности использования координат Мак-Илвайна в реальном магнитосферном поле остаются предметом дискуссий. В то же время, они удобны для качественного описания структуры внутренней магнитосферы. Здесь каждая силовая линия характеризуется единственным значением  $L$ , а набор линий с общим  $L$  образует, так называемую,  $L$ -оболочку. Экскурсию по магнитосфере удобно провести учитывая значения параметра  $L$ .

На малых  $L$  расположена плазмосфера. Область внутренней магнитосферы, заполненная частицами холодной плазмы с энергиями около нескольких электрон-вольт. Плазмосфера является естественным продолжением ионосферы и заполняет область с внешней границей, располагающейся, приблизительно, на  $L \sim 5$ . Она состоит, главным образом, из протонов, ионов гелия и кислорода, плотностью до  $10000 \text{ см}^{-3}$  [Lemaire, Gringauz, 1998]. Частицы более высоких энергий (от единиц до первых сотен кэВ), дрейфующие в искривленном магнитосферном поле во внутренней магнитосфере, образуют кольцевой ток, текущий вокруг Земли в западном направлении на  $L$ -оболочках 2-7. Во время магнитных бурь происходит усиление кольцевого тока [Singer, 1957, Kozyra and Liemohn, 2003], вызывающее депрессию магнитного поля на поверхности Земли.

Удаляясь далее вдоль экваториальной плоскости по  $L$ , переходим в область плазменного слоя, проектирующегося в высокие широты. Плазменный слой хвоста магнитосферы, располагается в окрестности экваториального сечения хвоста и заполнен плазмой с энергией около 1-15 кэВ и плотность около  $1 \text{ см}^{-3}$ . Толщина плазменного слоя составляет несколько  $R_E$ , а главным источником частиц является плазма переходной области. Во время магнитных бурь также возрастает доля ионов ионосферного происхождения, особенно ионов кислорода [Daglis et al., 1993]. Потоки ионов и электронов возрастают при приближении к Земле, резко обрываясь на внутренней границе плазменного слоя. Прямые наблюдения переднего края плазменного слоя хвоста магнитосферы очень редки, поскольку немногие КА осуществляли измерения за пределами геостационарной орбиты. В работе [Cao et al., 2011] положение границы оценивалось по возрастанию потоков и температуры ионов в измерениях аппарата TC-1 миссии Double Star. Показано, что в утренние часы положение границы плазменного слоя составляет  $7.64 R_E$ , а в вечерние – около  $6.5 R_E$ . С ростом геомагнитной возмущенности передний край плазменного слоя приближается к Земле и для  $K_p=3$  оказывается внутри геостационарной орбиты.

Магнитная проекция плазменного слоя в авроральную зону имеет вид овала (авроральный овал, или овал полярных сияний [Фельдштейн, 1963; Хорошева, 1963]). Электрический ток, текущий в плазменном слое поперек хвоста магнитосферы, замыкается на магнитопаузе и формирует токовую систему хвоста [Axford et al., 1965; Ness, 1965].

Электродинамическое взаимодействие между авроральной зоной и плазменным слоем хвоста магнитосферы реализуется системой продольных токов. В работе [Iijima and Potemra,

1976], были описаны токи зоны 1, втекающие на утренней стороне авроральной зоны и вытекающие на вечерней, и более слабые токи зоны 2, расположенные на экваториальной границе овала полярных сияний и имеющие противоположное направление течения.

## 1.2 Магнитосферное магнитное поле

Магнитосферное магнитное поле порождается двумя источниками разной природы: токами, текущими в жидком ядре Земли (внутриземное поле,  $B_{in}$ ), и крупномасштабными токами, текущими в магнитосфере. Основные источники магнитосферного поля — токи Чепмена–Ферраро на магнитопаузе ( $B_{CF}$ ), кольцевой ток ( $B_R$ ), ток хвоста магнитосферы ( $B_T$ ), продольные токи ( $B_{fac}$ ). Общее магнитное поле можно выразить как сумму полей от этих источников:

$$B = B_{in} + B_{CF} + B_R + B_t + B_{fac} + B_{trans} \quad (1.1)$$

Магнитосфера Земли является непростым объектом для детального изучения из-за наличия сложной структуры и слабо предсказуемой динамики при активно меняющихся параметрах в межпланетном пространстве, которые в свою очередь полностью зависят от процессов на Солнце. На изучение структуры магнитосферы были направлены многочисленные космические миссии, а, на основе полученных данных были созданы разнообразные модели магнитного поля [Sugiura et al., 1971; Mead and Fairfield, 1975; Алексеев, 1978; Tsyganenko, 1987, 1989, 1996; Alexeev et al., 1996; Tsyganenko, 2002a,b; Alexeev et al., 2003; Tsyganenko, Sitnov, 2005]. С течением времени процессы внутри магнитосферы изучаются все более подробно, становятся более понятными и предсказуемыми благодаря активному изучению этой актуальной научной задачи.

Магнитосферные токовые системы порождаются токами, которые меняются в ответ на изменения параметров межпланетной среды. При таких изменениях в магнитосфере могут возникать короткоживущие переходные системы, которые способствуют более быстрой перестройке магнитного поля, переходу от одной равновесной конфигурации к другой [Калегаев, Назарков, 2015; Kalegaev, Alexeev, Nazarkov, 2014; Беленькая, 2003].

## 1.3 Воздействие солнечного ветра на магнитосферу: геомагнитные возмущения

Состояние и конфигурация магнитосферы сильно зависит от уровня солнечной активности и условий в межпланетной среде: параметров солнечного ветра и вектора межпланетного магнитного поля (ММП). Типичные параметры спокойного солнечного ветра: концентрация протонов около  $5 \text{ частиц/см}^3$ , скорость около  $400 \text{ км/с}$ , а напряженность межпланетного магнитного поля около  $5 \text{ нТл}$  [Сергеев, Цыганенко, 1980]. Условия возмущенного солнечного ветра могут характеризоваться концентрациями частиц до  $100 \text{ в см}^3$ , со скоростями свыше  $1000 \text{ км/с}$ .

Механизм электродинамического взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем был предложен Данжи [Dungey, 1963]. Согласно этой теории, при взаимодействии солнечного ветра и магнитосферой Земли активно происходит пересоединение магнитных силовых линий на дневной стороне магнитопаузы, особенно эффективное при южном направлении межпланетного магнитного поля. Пересоединённые силовые линии уносятся солнечным ветром в хвост. На расстоянии около  $100 R_E$  в хвосте магнитосферы противоположно направленные магнитные силовые линии  $d$  в хвосте магнитосферы сближаются, здесь вновь происходит пересоединение, приводящее к формированию удаленной нейтральной линии, на которой магнитное поле равно нулю. Перезамкнувшиеся линии уносятся далее в хвост (рисунок 1.2). Важным следствием механизма Данжи является формирование регулярного потока плазмы из удаленного хвоста во внутреннюю магнитосферу под воздействием электрического дрейфа в скрещенных магнитосферном магнитном и электрическом полях, проникающих из солнечного ветра.

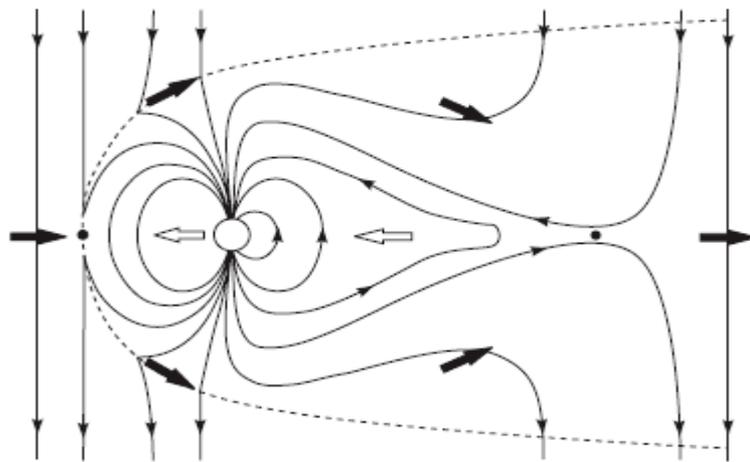


Рисунок 1.2 Схематическое изображение переноса магнитных силовых линий внутри магнитосферы Земли под воздействием солнечного ветра (черные стрелки – в хвоста, контурные – из хвоста). Магнитопауза показана пунктирной линией (на основе оригинального изображения [Hill, 1983]).

Откликом магнитосферы на внешние воздействия со стороны солнечного ветра являются геомагнитные возмущения: магнитные бури и магнитосферные суббури, которые связаны с интенсивным энерговыделением в магнитосфере. Основными «геоэффективными» параметрами являются давление солнечного ветра, а также, межпланетное магнитное поле. ММП, его величина и направление, контролирует перенос энергии и импульса внутрь магнитосферы и, как следствие, сильно влияет на уровень геомагнитной активности, который особенно возрастает при длительном южном направлении ММП [Gonzalez et al., 1994].

Депрессия (понижение) магнитосферного магнитного поля на поверхности Земли – основной признак магнитной бури, которая в свою очередь выражается в эволюции магнитосферных токовых систем: кольцевого тока, токов хвоста, токов на магнитопаузе и продольных токов [Alexeev et al., 1996]. Во время геомагнитной бури значительно меняется структура и динамика магнитного поля, конфигурация магнитосферы и ее состав [Daglis et al., 1999]. Величина депрессии магнитного поля составляет около 1% от величины стационарного геомагнитного поля. Основную роль здесь играют кольцевой ток и токи хвоста магнитосферы. Соотношение между ними на разных фазах развития бури представляет собой важный вопрос физики магнитосферы. Несмотря на дискуссии последних десятилетий, относительная роль каждой токовой системы в этом общем процессе еще не ясна окончательно [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Tsyganenko, Sitnov, 2005; Vasilyunas, 2006; Lopez et al., 2015].

Регулярность появления магнитных бурь связана с 11-летним циклом солнечной активности: в период максимальной солнечной активности частота магнитных бурь увеличивается. Тогда же происходят и наиболее мощные бури.

Для оценки мощности бури используется Dst-индекс, который характеризует величину депрессии геомагнитного поля на поверхности Земли, вклад в которую вносят как магнитосферные и ионосферные источники, так и токи, протекающие в земной коре, которые препятствуют проникновению внешнего поля внутрь Земли [Акасофу, Чепмен, 1975]. Dst-индекс определяется на основе измерений магнитного поля на четырех приэкваториальных станциях (рисунок 1.3). Каждый час на всех станциях определяется величина возмущения магнитного поля: из горизонтальной компоненты поля, измеряемого вдоль магнитного меридиана, вычитаются вековые и суточные SQ вариации, а сам индекс определяется как среднее по долготе возмущения, приведенное к экватору делением на косинус широты [Sugiura, Kamei, 1991]. Выделяют следующие типы геомагнитных бурь на основе минимального Dst-индекса в максимум бури: слабые (Dst-индекс более -50 нТл), умеренные (Dst от -100 нТл до -50 нТл) и интенсивные (Dst менее -100 нТл) [Gonzales et al., 1994].



Рисунок 1.3 Схематичное расположение станций, на основе данных которых вычисляется Dst-индекс (<http://www.ingv.it/ufficio-stampa/research-areas/sun-earth/dst-geomagnetic-index>).

Вариации Dst имеют сложный характер, так как являются результатом суперпозиции быстрых вариаций токов хвоста и токов на магнитопаузе, а также медленных вариаций кольцевого тока. Принято считать, что кольцевой ток, токи хвоста и токи на магнитопаузе вносят основной вклад в Dst, в то время как продольные токи зоны 1 существенно асимметричны и не вносят вклада в Dst [Feldstein et al., 2005]. Частичный кольцевой ток вносит незначительный вклад по сравнению с симметричным кольцевым током [Alexeev et al., 1996; Feldstein et al., 2005; Tsyganenko, Sitnov, 2005; Калегаев и др., 2008].

Принято выделять главную фазу магнитной бури, связанную с развитием депрессии геомагнитного поля и фазу восстановления. Периодически фиксируется внезапное начало бури (SSC, Sudden Storm Commencement) – кратковременное усиление магнитного поля, наблюдаемое в начале бури. SSC связано непосредственно с поджатием магнитопаузы при усилении динамического давления солнечного ветра, что приводит к усилению токов Чепмена-Ферраро и положительному скачке Dst-индекса. Усиление кольцевого тока и токов хвоста приводят к резкому падению Dst-индекса во время главной фазы. Продолжительность SSC составляет примерно нескольких часов, главной фазы – около 7 часов и фазы восстановления – около двух суток. На главной фазе кольцевой ток значительно усиливается, а токи хвоста приближаются к Земле, что увеличивает их вклад в общую депрессию геомагнитного поля.

На рисунке 1.4 можно увидеть усредненную динамику параметров солнечного ветра (скорость и плотность плазмы),  $B_z$  компоненты ММП и Dst-индекса по данным 120 магнитных бурь 1979-1984 г.г. [Maltsev et al., 1996]. По динамике Dst (рисунок 1.4) видно, что на усредненном профиле нет фазы SSC, что говорит об отсутствии регулярных механизмов ее появления.

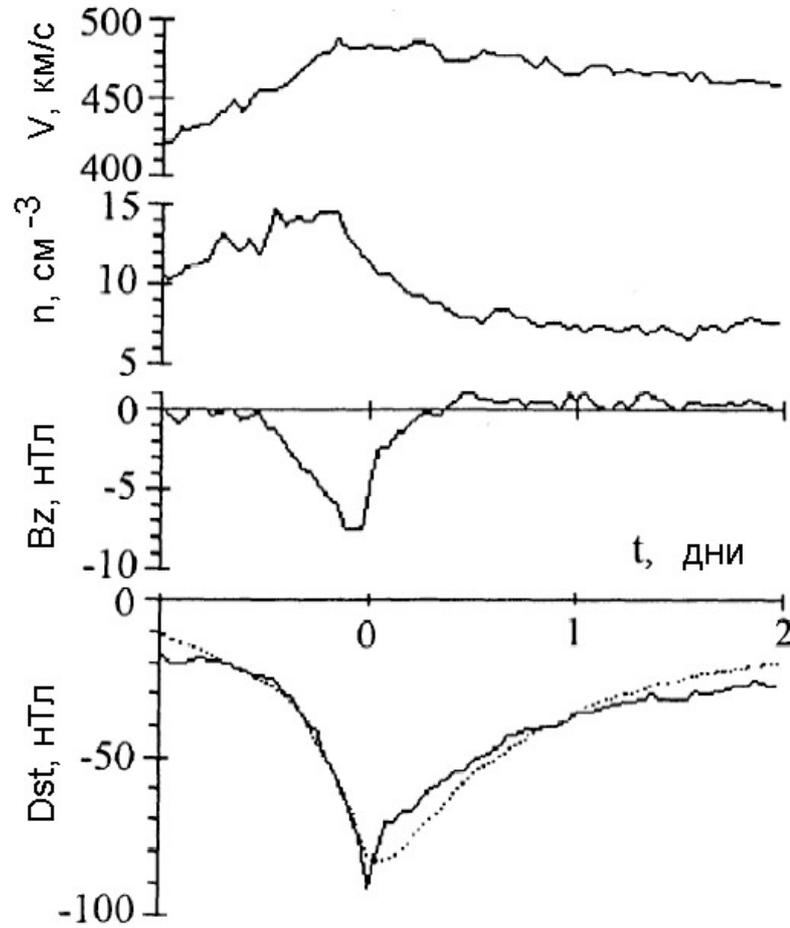


Рисунок 1.4 Параметры солнечного ветра (скорость и плотность плазмы),  $B_z$  компонента ММП, Dst-индекс, вычисленные на основе 120 магнитных бурь [Maltsev et al., 1996].

Для оценки уровня авроральной возмущенности и суббуревой активности используются геомагнитные индексы AL, AU, AE. В настоящее время индексы вычисляются по данным 12 обсерваторий, расположенных в северном полушарии на разных долготах между  $60$  и  $70^\circ$  геомагнитной широты. Для вычисления индексов используется отклонение  $H$  компоненты магнитного поля от среднего значения в данном месяце, которое вычисляется по 5 самым спокойным дням месяца. Каждую минуту мирового времени определяются станции с наибольшими и наименьшими значениями вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля, что соответствует AU и AL индексам, выраженным в нТл. Сумма модулей значений AU и AL дает AE индекс. Физически индекс AU представляет наибольшее магнитное возмущение, связанное с восточной электроструей, расположенной в вечернем секторе ионосферы, а AL - наибольшее магнитное возмущение, связанное с западной электроструей в утреннем секторе. Данные индексы активно используются при анализе магнитных бурь и магнитосферных суббурь наряду с параметрами солнечного ветра и Dst индексом.

Магнитные бури и магнитосферные суббури являются глобальными возмущениями магнитосферы. Они связаны с развитием буревых магнитосферных токов и проявляются во всей магнитосфере, прежде всего, вариациями магнитного поля. Спутниковые наблюдения, наряду с наземными измерениями, дают информацию о развитии магнитосферных токовых систем. Основной проблемой при анализе измерений на спутниках остается правильная интерпретация данных измерений, подверженных пространственно-временной неопределенности. Для решения данной проблемы используются многоспутниковые миссии, благодаря которым можно проследивать целые серии последовательных изменений в определенной области пространства. Космические проекты Cluster [Credland et al. 1997; Escoubet et al., 2001], Themis [Angelopoulos, 2008], Van Allen Probes [Kletzing et al., 2013], в частности, дают неоценимую информацию о структуре и динамике основных магнитосферных токовых систем: кольцевого тока и токов геомагнитного хвоста, ответственных за развитие геомагнитных возмущений.

#### 1.4 Динамика и структура геомагнитного хвоста

Геомагнитный хвост – одна из фундаментальных областей магнитосферы Земли, определяющая ее структуру и динамику [Parker, 1958; Piddington, 1960; Dessler, 1964; Axford et al., 1965; Ness, 1965; Behannon, 1968]. Геомагнитный хвост играет важнейшую роль в физике магнитосферы, поскольку здесь происходит трансформация магнитной энергии в энергию ускоренного движения частиц и в тепловую энергию плазмы [Birн, 1979; Parker 1994; Priest and Forbes 2000; Birн and Priest 2007; Malova et al., 2007; Petrukovich et al., 2015].

В ближнем хвосте магнитосферы, в области, находящейся на расстояниях от Земли  $\sim 8 - 15 R_E$  ( $R_E$  – радиус Земли) происходят сложные динамические процессы, приводящие к диссипации и трансформации энергии [Sergeev et al., 2009; Ergun et al., 2014], которые могут вызывать развитие плазменных неустойчивостей [Grigorenko et al., 2014; Zelenyi et al., 2015]. Следствием этих явлений становится разрушение токов поперек хвоста и формирование суббурового токового клина [Cao et al., 2010; Panov et al., 2013; 2014; Sergeev et al., 2014].

Типичной для геомагнитного хвоста является структура с токовым слоем внутри плазменного слоя [Runov et al., 2005, 2006]. Электрические токи поперек геомагнитного хвоста поддерживают определенную конфигурацию магнитного поля в окрестности Земли, а их вариации во время геомагнитных возмущений отражаются на внутренней магнитосфере [Fairfield, Jones, 1966; Калегаев, Алексеев, Фельдштейн и др., 1998; Tanskanen, Slavin, Fairfield et al., 2005; Tsyganenko, Fairfield, 2004; Petrukovich et al., 2013; Artemyev et al., 2015].

Магнитосферный хвост состоит из двух долей с противоположно направленным магнитным полем, напряженность поля в которых на расстоянии около  $30 R_E$  составляет  $\sim 20$  нТл,

плотность плазмы  $\sim 10^5 \text{ м}^{-3}$  в спокойных условиях [Lennartsson, Shelley, 1986]. Такая структура магнитного поля поддерживается электрическим током поперек хвоста, замыкающимся на магнитопаузе. Толщина токового слоя хвоста составляет 1000-3000 км, около 1-3 ионных ларморовских радиусов [Petrukovich et al., 2015]. В окрестности области пересоединения толщина может составлять доли ларморовского радиуса [Nakamura et al. 2006; Artemyev et al. 2013]. По данным измерений Themis в 2008-2009 годах на расстояниях получены оценки толщины токового слоя хвоста и плотность тока в хвосте  $j_0(x) \approx (c/4\pi) B_x/L$ , на расстояниях  $X \sim -25 R_E$ ,  $X \sim -17 R_E$ , и  $X \sim -10 R_E$ . Показано, что конфигурация хвоста относительно стабильна на масштабах 1-3 часа. Наблюдается увеличение модуля магнитного поля  $B_0$  и компоненты  $B_x$  поля хвоста при приближении к Земле. Отношение  $B_z/B_0$  почти постоянно [Artemyev et al., 2015].

На основе измерений Geotail даны оценки параметров удаленного и «среднего» хвоста магнитосферы: толщины, плотности тока, скорости ионов, их распределения поперек хвоста магнитосферы [Vasko et al., 2015]. Показано, что толщина токового слоя изменяется приблизительно от 3000 км до 12 000 км от вечернего к утреннему флангу магнитосферы, плотность тока возрастает в 2-3 раза к вечернему флангу. Наблюдаются сильные и слабые токовые слои, толщиной 3-7 и 20 ионных гирорадиусов, соответственно.

Схематическое изображение магнитосферного хвоста в поперечном сечении изображено на рисунке 1.5.

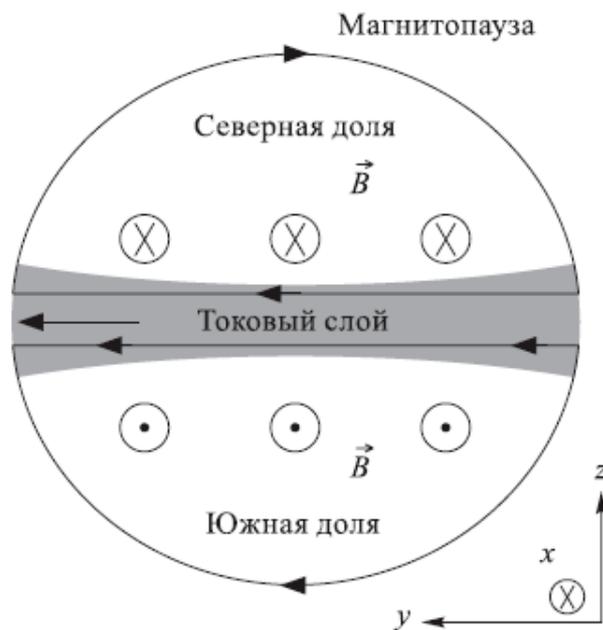


Рисунок 1.5 Поперечное сечение магнитосферного хвоста плоскостью  $X = const$ . Показаны доли хвоста, токовый слой и направление магнитного поля.

На рисунке 1.6 изображена токовая система хвоста магнитосферы и линии магнитного поля вблизи магнитопаузы, построенные при помощи параболоидной модели магнитосферы Земли A2000 [Alexeev et al., 1996; Alexeev et al., 2001; Alexeev et al., 2003].

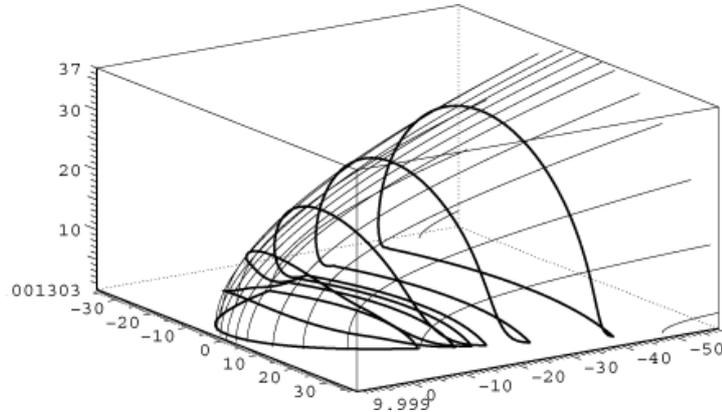


Рисунок 1.6 Токовая система хвоста магнитосферы. Жирные линии – линии электрического тока, тонкие линии – силовые линии магнитного поля, формирующие магнитопаузу.

Видно, что токи поперек хвоста замыкаются на магнитопаузе. С приближением к Земле токовая петля наклоняется, так что "последний" контур тока проходит через передний край токового слоя хвоста и экваториальное сечение магнитопаузы. В моменты высокой геомагнитной активности, когда магнитопауза и токовый слой хвоста приближаются к Земле, магнитное поле токов хвоста во внутренней магнитосфере может значительно усиливаться.

ММП и давление солнечного ветра контролируют электрические токи поперек геомагнитного хвоста. В ответ на воздействие солнечного ветра токи хвоста (как и остальные токовые системы) меняют свою форму, пространственное положение и интенсивность [Kaufmann, 1987; Lui and Hamilton, 1992; Sergeev et al., 1993; Pulkkinen et al., 1993; Runov et al., 2003; Ganushkina et al., 2010]. В работе [Rong et al., 2015] показано, что существует значительное запаздывание между откликом хвоста на импульс давления солнечного ветра и моментом проникновения ММП в хвост магнитосферы. Измерения КА Cluster для двух событий показали временной сдвиг около 1.5 часов между непосредственным откликом магнитосферы на динамическое воздействие солнечного ветра и на вариацию  $B_y$  ММП. Вариации токового слоя хвоста в зависимости от межпланетного магнитного поля и динамического давления солнечного ветра были изучены в статьях [Tsyganenko and Fairfield, 2004; Tanskanen et al., 2005; Zhou et al., 2013]. Форма, положение и пространственные характеристики, такие как граница магнитосферной области, которая разделяет области с преимущественно дипольным магнитным полем от области магнитного поля токов хвоста и ее динамические характеристики были изучены в зависимости от наклона геомагнитного диполя, межпланетного магнитного поля и давления солнечного ветра.

Радиальные градиенты магнитного поля хвоста магнитосферы, а также положение

переднего края токового слоя являются важными характеристиками состояния магнитосферы во время геомагнитных возмущений [Fairfield, Jones, 1966; Tanskanen, Slavin, Fairfield et al., 2005; Petrukovich et al., 2013; Kalegaev, Alexeev, Nazarkov, 2014; Artemyev et al., 2015; Калегает, Назарков, 2015]. 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, 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  $-70 R_E$ :

$$B = \left[ \frac{\sqrt{-96.5 + 294.5\sqrt{P_{SW}} + 2.36B_{imf}^2(\sin\theta/2)^2}}{B_0} \right] \times \left[ \frac{1659.2}{R^{1.46}} + 7.47 \right] \quad (1.2)$$

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  $0^\circ$  при северном. Это уравнение 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, Jones 1966; Tanskanen, Slavin, Fairfield et al., 2005]. Теоретические исследования показывают, что изменения давления солнечного ветра могут приводить к формированию переходных токовых систем, которые обеспечивают переход магнитосферы из одного равновесного состояния в другое [Беленькая, 2003]. При взаимодействии с ударными волнами большой амплитуды могут возникать неравновесные конфигурации магнитосферного магнитного поля.

На рисунке 1.7 приведены характерные распределения поля в хвосте магнитосферы, полученные на основе исследований, процитированных в работе [Fairfield, Jones, 1966].

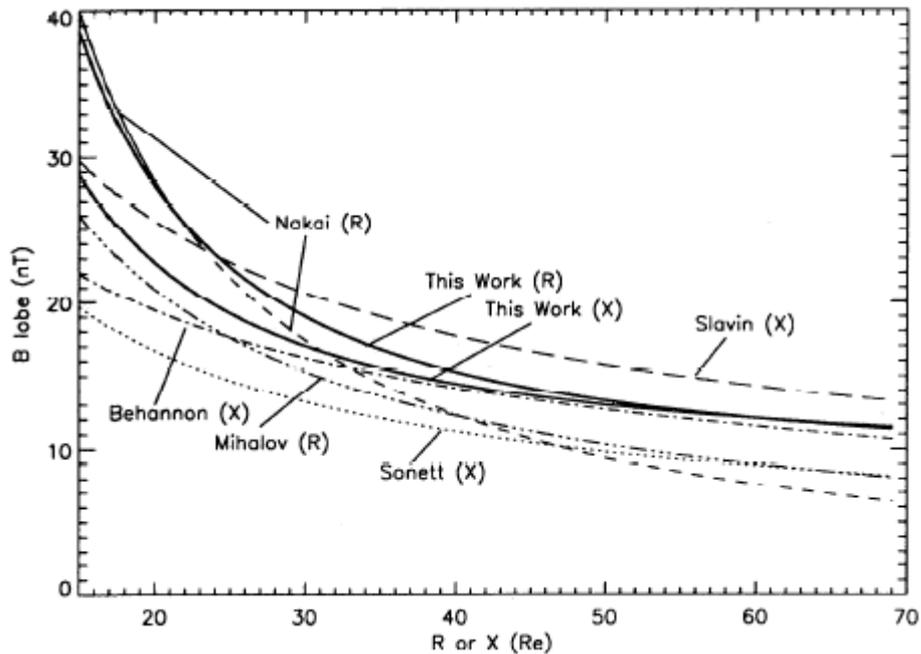


Рисунок 1.7 Зависимость магнитного поля в хвосте магнитосферы на основе различных исследований.  $R$  и  $X$  относятся к случаям, когда для анализ данных использовалась радиальная или  $X$  координата  $GSM$ .

Как видно из рисунка 1.7 результаты измерений магнитного поля в хвосте магнитосферы свидетельствуют о его убывании в ночную сторону по степенному закону с показателем от  $-1.5$  до  $-2$ . Это означает, что регулярное поле в хвосте магнитосферы возрастает с ростом  $X_{GSM}$  и характеризуется положительными значениями  $\partial B / \partial x$ . Можно видеть, что характерные величины модуля магнитного поля в магнитосферном хвосте в окрестностях переднего края токового слоя хвоста составляют  $\sim 30-40$  нТл, а в отдаленном хвосте порядка  $10-20$  нТл.

Особый интерес вызывает динамика  $B_z$  компоненты магнитного поля. Во время возмущений обычно наблюдается понижение  $\partial B_z / \partial x$  в ближнем хвосте магнитосферы. В среднем хвосте, по данным измерений Cluster,  $\partial B_z / \partial x$  может быть  $< 0,5$  нТл/ $R_E$ , временами принимая и отрицательные значения [Petrukovich et al., 2013]. Такие случаи соответствуют формированию магнитных структур с «минимумом  $B$ » [Pritchett and Coroniti, 2010], которые, как ожидается, нестабильны, и могут вызывать суббури [Hu et al., 2011; Yang et al., 2011].

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 временные изменения 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. Выполнение одновременных измерений пятью спутниками дают возможность преодолеть пространственно–временную неопределенность и изучить конфигурацию магнитного поля в хвосте магнитосферы без использования дополнительных априорных предположений.

В ходе геомагнитных возмущений под воздействием солнечного ветра происходят активные процессы перестройки магнитосферы. В это время возможно формирование различных короткоживущих переходных токовых систем и соответствующих им магнитных структур. Примерами таких структур являются фронты диполизации, магнитные облака (плазмоиды) и высокоскоростные потоки плазмы, направленные как к Земле, так и в удаленный хвост. Такие возмущения обычно рассматриваются на масштабах десятка минут [Angelopoulos et al., 1992; Tu et al., 2000; Schodel et al., 2001]. Фронты диполизации играют важную роль в переносе плазмы, импульса и энергии из «среднего» геомагнитного хвоста во внутреннюю магнитосферу [Angelopoulos et al., 1994]. Перед фронтом диполизации с пространственным масштабом около 1000 км обычно наблюдается область пониженного  $B_z$  [Ohtani et al., 2004], где регистрируется электрический ток в утреннем направлении [Runov et al., 2011, Yao et al., 2013], который может замыкаться транзиентами продольными токами.

В различных работах в качестве корреляции с изменением магнитного поля таких структур выступают: скорость плазмы [Angelopoulos et al., 1992], изменение электрического поля [Tu et al., 2000; Schodel et al., 2001], плотность плазмы [Fairfield et al., 1999]. Обзор более 1000 таких скоростных событий на основе данных спутника GEOTAIL было сделано в работе [Ohtani, Shay, Mukai, 2014], где авторы также провели 2-х жидкостное моделирование. В качестве одного из критериев образования магнитного облака, движущего по направлению в удаленный хвост, выступает изменение знака  $B_z$  компоненты магнитного поля в области плазменного слоя (в *GSM* системе координат) с положительной на отрицательную [Ohtani, Shay, Mukai, 2014].

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 точно не известны из-за сложности разделения областей, на которые преимущественное влияние оказывают и токи хвоста, и кольцевой ток. Сочетание экспериментального и теоретического подходов позволяют более детально изучить структуру и динамику магнитного поля в этой области.

Особый интерес вызывает роль токового слоя хвоста магнитосферы в развитии магнитных бурь. Длительное время считалось, что основной вклад в буреую депрессию магнитного поля

на поверхности Земли дает только кольцевой ток. Но в начале 1990 годов была сформулирована концепция, что и другие токовые системы (прежде всего токи хвоста также дают значительный вклад в Dst [Алексеев и др., 1992; Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Greenspan and Hamilton, 2000; Kalegaev et al., 2005; Feldstein et al., 2005]. В работах [Skoug et al., 2003; Lopez et al., 2015, Vasyliūnas, 2006] содержится экспериментальные и теоретические свидетельства, подтверждающие значительный вклад токов хвоста магнитосферы в Dst.

### **1.5 Кольцевой ток во время магнитной бури**

Магнитная буря связана с глобальной перестройкой магнитосферы под воздействием изменяющихся условий в солнечном ветре. При этом происходит развитие буревых магнитосферных токовых систем: токи на магнитопаузе, кольцевой ток, токи хвоста магнитосферы, продольные токи – которые формируют новое состояние магнитосферы. Несинхронное развитие вышеприведенных токовых систем обуславливает сложную динамику магнитосферного поля [Alexeev et al., 1996].

Основной вклад в развитие магнитной бури в магнитосфере Земли вносят токи геомагнитного хвоста и кольцевой ток (КТ). Именно они ответственны за характерную депрессию измеряемого на поверхности Земли магнитного поля, за вариацию Dst-индекса. Соотношение между вкладами этих токовых систем зависит от мощности бури и, из-за невозможности разделить эффекты магнитосферных токов в спутниковых измерениях, определяется, главным образом, благодаря использованию моделей магнитосферы [Kalegaev and Makarenkov, 2008]. Во время слабых бурь вклады кольцевого тока и токов хвоста в Dst сопоставимы, но вклад кольцевого тока преобладает во время более интенсивных бурь [Ganushkina et al., 2004; Kalegaev et al., 2005]. В работе [Калегаев, Власова, Пенг, 2015] на основании моделирования при помощи параболоидной модели магнитосферы A2000 [Alexeev et al., 1996; Alexeev et al., 2001; Alexeev et al., 2003] было показано, что для бури 21-22.01.2005, главную роль в развитии которой сыграл мощный импульс давления солнечного ветра, основной вклад в Dst вносил кольцевой ток, а для бури 14-15.12.2006, начавшуюся благодаря смене ориентации ММП, вклады кольцевого тока и токов хвоста в Dst-индекс сравнимы. При этом реализовывались два различных механизма формирования буревого кольцевого тока. Один, традиционный, связан с усилением магнитосферной конвекции и с суббуревыми интенсификациями, приводящим к инъекциям ионов из хвоста магнитосферы. Второй обеспечивается продолжительным и мощным импульсом давления солнечного ветра. Также сделаны выводы о разнообразии форм воздействия и реакции магнитосферы на внешние возмущения.

Кольцевой ток образован ионами, дрейфующими к западу и электронами, дрейфующими к востоку в дипольном поле Земли. Протоны с энергией 1-300 кэВ на геоцентрических расстояниях 2-10  $R_E$  составляют основную популяцию частиц кольцевого тока [Gonzalez et al., 1994]. Во время геомагнитных возмущений, наряду с протонами, ионы кислорода, попадающие в область кольцевого тока из полярной ионосферы, представляют собой существенный источник формирования кольцевого тока. Основные механизмы потери частиц кольцевого тока – кулоновское рассеяние и зарядовый обмен протонов с нейтральным водородом. Кольцевой ток существует постоянно, при этом активно усиливаясь во время геомагнитных возмущений и ослабевая после них.

Принято выделять частичный кольцевой ток (рисунок 1.8) и симметричный кольцевой ток. Первый активно развивается на главной фазе магнитной бури и затем распадается за несколько часов на фазе восстановления, в то время как второй распадается в течение десятков часов [Kozyra and Liemohn, 2003; Weygand and McPherron, 2006]. При этом симметричный кольцевой ток существует всегда, а частичный лишь во время магнитных возмущений. В отличие от симметричного кольцевого тока, образованного в результате отдельного движения протонов и электронов (захваченных магнитным полем) вдоль замкнутых силовых линий вокруг Земли, частичный кольцевой ток образуется, когда токи, текущие в западном направлении в ночном и вечернем секторах вблизи геомагнитного экватора, замыкаются через продольные токи зоны 2 и ионосферные токи.

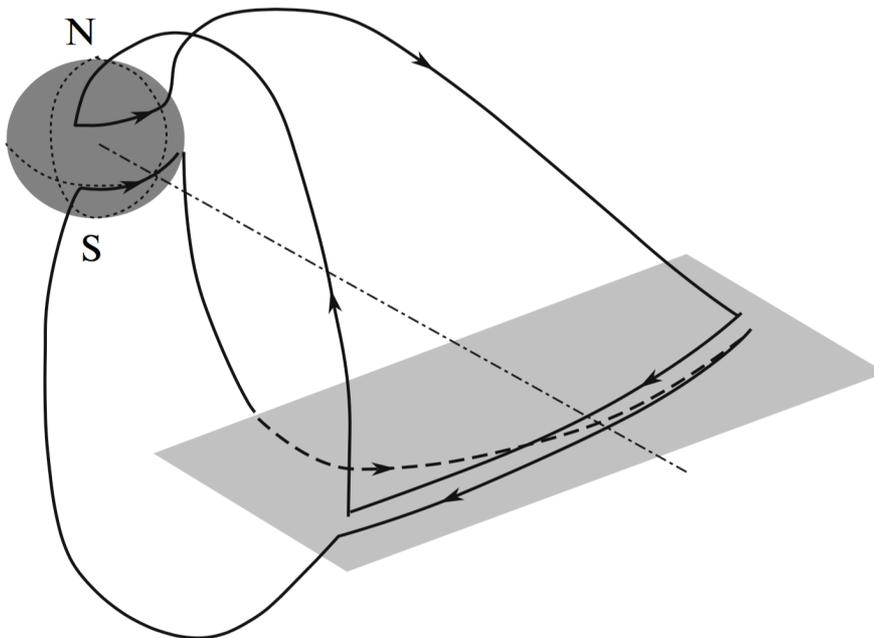


Рисунок 1.8 Схематичное расположение частичного кольцевого тока в магнитосфере Земли.

Достоверно известно из измерений, что депрессия магнитного поля, измеренного на поверхности Земли, перестает быть равномерно распределенной во время магнитных возмущений. Долготная асимметрия магнитного поля вдоль геомагнитного экватора доказывает существование асимметричных токовых систем (включая частичный кольцевой ток) [Clauer et al., 2001]. Прямые наблюдения, относящиеся к потокам нейтральных атомов водорода (ENA), которые появляются в следствие перезарядки ионов кольцевого тока на нейтральных атомах в экзосфере, экспериментально подтверждает, что кольцевой ток асимметричен в течение главной фазы магнитной бури. [Roelof, 1987; Fok et al., 2001]

Состав кольцевого тока меняется при геомагнитной активности: если при спокойных условиях он состоит в основном из протонов солнечного происхождения, то при магнитных бурях появляется значительное количество ионов ионосферного происхождения.

Следует отметить существенное усиление кольцевого тока при длительном южном ММП за счет усиления конвекции и инжекции частиц из хвоста магнитосферы во время суббуриных возмущений [Liemohn and Kozyra, 2002].

Магнитное поле кольцевого тока направлено к югу во внутренней магнитосфере и вносит основной отрицательный вклад в  $B_z$  компоненту магнитного поля вблизи Земли.

Для изучения магнитного поля кольцевого тока во время геомагнитных бурь используется уравнение Десслера-Паркера-Скопке [Dessler and Parker, 1959; Sckopke, 1966], которое связывает полную энергию частиц кольцевого тока с магнитным полем кольцевого тока.

$$b_r = -\frac{2}{3}B_0 \frac{e_r}{e_d} \quad (1.3)$$

где  $b_r$  – напряженность магнитного поля кольцевого тока в центре Земли,  $e_r$ - полная энергия частиц кольцевого тока,  $e_d = \frac{1}{3}B_0 M_E$  - энергия геомагнитного диполя,  $B_0$ - геомагнитное поле на экваторе.

Для изучения динамики и развития кольцевого тока используется модель Бартонна [Burton et al., 1975]:

$$\frac{db_r}{dt} = F(E) - \frac{b_r}{\tau} \quad (1.4)$$

которая отображает развитие кольцевого тока как результат инжекции, описанной функцией  $F(E)$  и последующего распада, описанного в виде члена  $\frac{b_r}{\tau}$ . Функция  $F(E)$  определена

зависимость от электрического поля солнечного ветра ( $E_y = -vB_z$ ), направленного с утра на вечер:

$$F(E) = \begin{cases} d(-0.5), & E_y > 0.5 \text{ мВ/м} \\ 0, & E_y < 0.5 \text{ мВ/м} \end{cases} \quad (1.5)$$

где  $d$  – коэффициент амплитуды инжекции, и время распада определено как

$$\tau = 2.37e^{9.74/(4.78+E_y)} \text{ [O'Brien and McPherron, 2000].}$$

Т.к. симметричный и асимметричный кольцевой ток состоят из одних и тех же частиц, инжектированных из токов хвоста, невозможно различить эти токи на основе измерений, и они часто считаются одной общей токовой системой. Такая модель развития кольцевого тока (его симметричная и асимметричная части) с уравнениями Бартона и Десслера-Паркера-Скопке используется в [Alexeev et al., 2001; Kalegaev et al., 2006] для оценки общего вклада кольцевого тока в Dst.

В тоже самое время анализ асимметрии кольцевого тока на основе наблюдений нейтральных атомов (ENA) и наземных магнетометров показывает, что симметричный кольцевой ток и частичный кольцевой ток развиваются асинхронно и на разных временных масштабах [Weygand and McPherron, 2006]. Симметричный кольцевой ток распадается преимущественно в результате перезарядки на нейтралах экзосферы, и этот процесс значительно медленнее, чем процессы развития (усиления) этого тока. Уравнение Бартона используется для точного моделирования таких явлений. Распад же частичного кольцевого тока – это принципиально отличающийся быстротой и внезапностью процесс, связанный с разрушением токовой системы при изменениях в геомагнитных условиях [Kozyra and Liemohn, 2003]. Характерное время распада при этом в два раза меньше по сравнению с симметричным кольцевым током при одних и тех же геомагнитных условиях [Weygand and McPherron, 2006].

В работе [Greenspan, Hamilton, 2000] было проведено обширное исследование кольцевого тока и его динамики во время 80 различных магнитных бурь в период 1984-1985 г.г. на основе данных спутника AMPTE/CCE, экваториальная орбита которого имела апогей  $8 R_E$ . Были показаны хорошие корреляции полной энергии частиц кольцевого тока с Dst, что подтверждает актуальность использования уравнения Десслера-Паркера-Скопке. Аналогичные исследования также были проведены в работе [Turner et al., 2001] на основе данных спутника POLAR в период с марта 1996 до сентября 1998. Результаты исследований говорят о значительном вкладе (не менее половины) кольцевого тока в Dst для умеренных бурь (Dst не менее -100 нТл). Следует отметить существенную асимметричность кольцевого тока во время главной фазы магнитной бури [Kalegaev et al., 2008; Kozyra and Liemohn, 2003].

Только прямые измерения позволяют получить достоверную информацию о структуре и динамике КТ. Такие исследования проводилось, как вблизи экваториальной плоскости, так и на средних широтах, например, обзор [Ковтюх, 2001]. К сожалению, практически все космические эксперименты, в которых может быть непосредственно исследован кольцевой ток, имеют ограниченную продолжительность. Кроме того, измерения на единичном аппарате не позволяют разделить эффекты, связанные с движением спутника и с собственной динамикой магнитосферы. Новые возможности открываются на основе данных много спутниковых миссий, таких как THEMIS, Van Allen Probes, 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 либо опровергнуть результаты модельных расчетов.

Благодаря новым космическим миссиям, которые позволяют получить вариации потоков ионов во внутренней магнитосфере (вблизи геомагнитного экватора) и на малых высотах, появляется возможность диагностики состояния кольцевого тока во время геомагнитной бури по данным с полярных космических аппаратов. В работе [Калегаев, Власова, Назарков, 2015] выполнен сравнительный анализ динамики кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время геомагнитной бури 27.02.2014. Используются одновременные экспериментальные данные по потокам ионов с энергией от  $\sim 30$  до  $\sim 250$  кэВ в приэкваториальной области магнитосферы на высотах до 30 000 км с ИСЗ Van Allen Probes и на полярной орбите до 1000 км с ИСЗ POES. Во время главной фазы бури наблюдаются возрастание потоков ионов с  $E < 100$  кэВ и спад потоков с  $E > 100$  кэВ как в области кольцевого тока, так и в приэкваториальной области на низкой орбите, отражающие смягчение спектра частиц кольцевого тока на главной фазе бури. Наблюдаемое явление может быть вызвано регистрируемыми ИСЗ POES высыпаниями частиц кольцевого тока ниже границы изотропизации. Показано, что вариации потоков ионов на низкой орбите во время геомагнитной бури в целом отражают динамику кольцевого тока, хотя в каждой исследуемой области наблюдаются свои особенности, которые дополняют общую картину динамики магнитосферы Земли.

Кольцевой ток является важной составляющей магнитосферы Земли, вносящий особый вклад в общую динамику во время магнитной бури, наряду с токами хвоста и токами на магнитопаузе. Из-за близости с токами хвоста во время главной фазы магнитной бури, задача разделения их вкладов в общее магнитное поле является важной и актуальной. В работе [Kalegaev, Alexeev, Nazarkov, 2014] благодаря одновременным измерениям спутников THEMIS и предложенного нового метода разделения вкладов от токовых систем с использованием модели геомагнитного поля A2000, удалось разделить их динамику во время одной из бурь.

## Глава 2. Методы исследований

Для анализа динамики хвоста магнитосферы использовались данные измерений магнитного поля с борта пяти аппаратов THEMIS, а также расчеты магнитного поля, выполненные с использованием моделей магнитосферного поля A2000 [Alexeev et al., 1996; Alexeev et al., 2001; Alexeev et al., 2003] и поля внутриземных токов IGRF.

Одновременные измерения 5 спутников THEMIS позволяют в ряде случаев оценить основные параметры токов хвоста магнитосферы. При этом удается устранить ошибки, связанные с пространственно-временной неопределенностью результатов измерений присутствующей при анализе данных одиночных измерений.

В свою очередь, модели позволяют 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 получения данных по частицам в приполярных областях использовались экспериментальные данные, полученные с 2 спутников Van Allen Probes (RBSP) и спутников POES 18, POES 19.

Далее в обозначениях используется геоцентрическая солнечно-магнитосферная система координат (*GSM*), в которой ось *X* направлена от центра Земли к центру Солнца, плоскость *XZ* содержит ось геомагнитного диполя, ось *Z* ориентирована на север, а ось *Y* образует с ними правую тройку векторов и направлена с утренней стороны на вечернюю.

Для построения графиков и проведения вычислений использовалась программная среда IDL и программные комплексы TDAS (THEMIS Data Analysis Software) и SPADS (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](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.

### 2.1 Используемые спутниковые данные

#### 2.1.1 Миссия THEMIS

THEMIS — космический проект НАСА по изучению магнитосферных явлений. Проект THEMIS состоит из пяти идентичных по конструкции и взаимозаменяемости микроспутников,

которые были запущены 17 февраля 2007 с космодрома Мыс Канаверал с помощью ракеты-носителя Дельта-2 7925-10С. THEMIS расшифровывается как Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (Динамика событий и макроскопических взаимодействий во время суббурь).

На каждом из пяти спутников установлены следующие научные приборы:

1) EFI (Electric Field Instrument)

Прибор для измерений электрического поля, предназначенный для измерения движения электризованного газа относительно спутника.

2) FGM (Flux Gate Magnetometer)

Феррозондовый магнитометр, предназначенный для измерения постоянного магнитного поля. Этот прибор мы будем использовать в исследованиях магнитного поля.

3) SCM (Search Coil Magnetometer)

Индукционный магнитометр, предназначенный для измерения излучения в земной магнитосфере в диапазоне частот от 0.1 до 4000 Гц.

4) ESA (Electrostatic Analyzer)

Электростатический анализатор, предназначенный для измерения параметров потоков электронов и ионов в диапазоне энергий от 3 эВ до 30 кэВ.

5) SST (Solid State Telescope)

Твердотельный телескоп, предназначен для измерения параметров потоков частиц в диапазоне энергий от 25 кэВ до 6 МэВ.

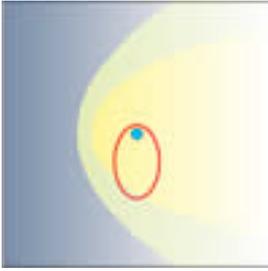
Пять космических аппаратов THEMIS расположены на дальних эллиптических орбитах, где космические аппараты выстраиваются в апогее раз в четыре дня. Апогей медленно «вращается» вокруг Земли, находясь по очереди на дневной, утренней, ночной и сумеречной сторонах магнитосферы. Первоначально, сразу после старта, все спутники были на одной орбите.

Параметры орбит:

- Запуск:  $1.07 \times 15.4 R_E$
- Спутник 1:  $1.3 \times 30 R_E$
- Спутник 2:  $1.2 \times 20 R_E$
- Спутник 3 и 4:  $1.5 \times 12 R_E$
- Спутник 5:  $1.5 \times 10 R_E$

Различные конфигурации орбит определяют пять основных этапов миссии:

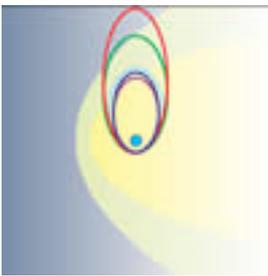
Этап 1: Фаза запуска



02/15/07 - 09/15/07

Сразу после запуска все космические аппараты выстроились на одной орбите с апогеем  $15.4 R_E$ . На рисунке представлены магнитосфера Земли, головная ударная волна, Земля и траектория спутников.

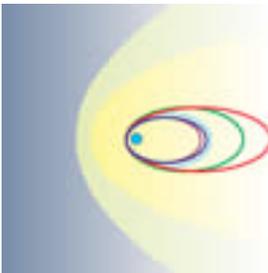
Этап 2: Фаза утренней стороны



09/15/07 - 12/15/07

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3 и 4 -  $12 R_E$ , а спутник 5 -  $10 R_E$ .

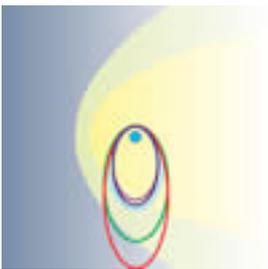
Этап 3: Фаза хвоста



12/15/07 - 04/15/08

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3 и 4 -  $12 R_E$ , а спутник 5 -  $10 R_E$ .

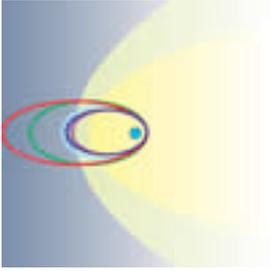
Этап 4: Фаза изучения радиационных поясов



04/15/08 - 06/15/08

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3 и 4 -  $12 R_E$ , а спутник 5 -  $10 R_E$ .

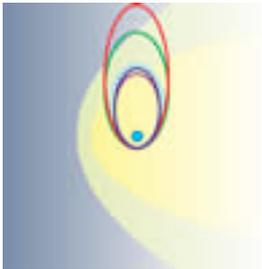
Этап 5: Фаза дневной стороны



06/15/08 - 10/15/08

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3 и 4 -  $12 R_E$ , а спутник 5 -  $10 R_E$ .

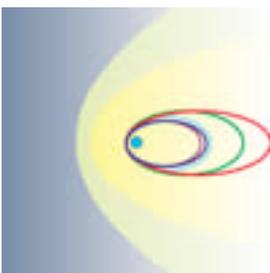
Этап 6: Фаза утренней стороны



10/15/08 - 12/15/08

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3, 4 и 5 -  $12 R_E$ .

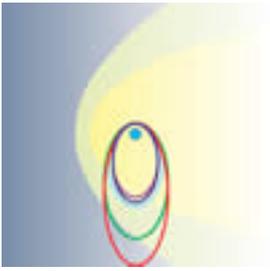
Этап 7: Фаза хвоста



12/15/08 – 04/15/09

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3, 4 и 5 -  $12 R_E$ .

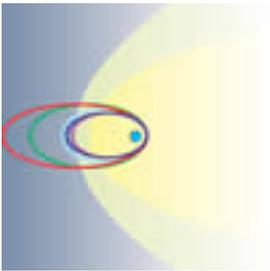
Этап 8: Фаза изучения радиационных поясов



04/15/09 - 06/15/09

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3, 4 и 5 -  $12 R_E$ .

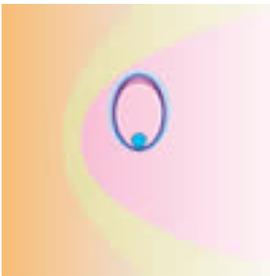
Этап 9: Фаза дневной стороны



06/15/09 - 09/30/09

Спутник 1 находится на орбите с апогеем на расстоянии  $30 R_E$ , спутник 2 имеет апогей  $20 R_E$ , спутники 3 и 4 -  $12 R_E$ , а спутник 5 -  $13 R_E$ .

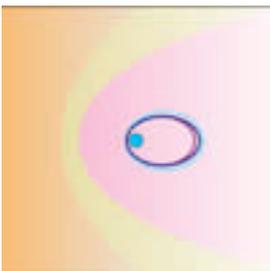
Этап 10: Фаза утренней стороны



12/29/09 - 03/01/10

Спутники 3 и 4 находятся на орбите с апогеем на расстоянии  $12 R_E$ , спутник 5 имеет апогей  $13 R_E$ .

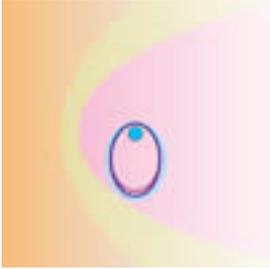
Этап 11: Фаза хвоста



03/02/10 - 05/31/10

Спутники 3, 4, 5 находятся на орбите с апогеем на расстоянии  $12 R_E$ . Они отдалены примерно на расстояния от 500 км до 3000 км друг от друга.

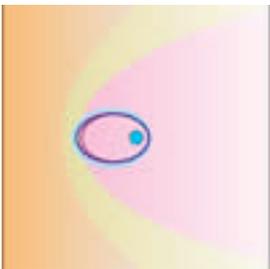
Этап 12: Фаза сумерек



06/01/10 - 09/01/10

Спутники 3, 4, 5 находятся на орбите с апогеем на расстоянии  $12 R_E$ . Спутники 1 и 2 стали использоваться в проекте ARTEMIS.

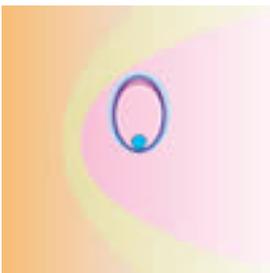
Этап 13: Фаза дневной стороны



09/02/10 - 11/30/10

Спутники 3, 4, 5 находятся на орбите с апогеем на расстоянии  $12 R_E$ . Они отдалены примерно на расстояния от 500 км до 3000 км друг от друга.

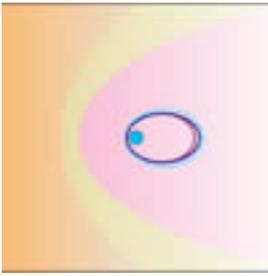
Этап 14: Фаза утренней стороны



12/09/10 - 03/15/11

Спутники 3 и 4 находятся на орбите с апогеем на расстоянии  $12 R_E$ , спутник 5 имеет апогей  $13 R_E$ .

Этап 15: Фаза хвоста



03/16/11 - 06/22/11

Спутники 3, 4, 5 находятся на орбите с апогеем на расстоянии  $12 R_E$ . Они отдалены примерно на расстояния от 500 км до 3000 км друг от друга.

До 2010 года THEMIS-зонды выстраивались в одну линию, параллельную линии Земля-Солнце (во время фазы исследования хвоста) раз в четыре дня, что, безусловно, очень удобно для изучения структуры магнитного поля хвоста магнитосферы. В течении нескольких часов можно наблюдать последовательные изменения магнитного поля в магнитосфере по измерениям на всех спутниках, расположенных вдоль геомагнитного хвоста [Angelopoulos V., et al., 2008].

Проект THEMIS предназначен для комплексного изучения динамических процессов, происходящих в магнитосфере во время магнитных бурь и суббурь. Он дает уникальную возможность проследить за изменением состояния космической среды в то время, когда спутники находятся на одной прямой, и связать эти данные с данными о солнечном ветре, получаемыми с космического аппарата ACE и с данными, получаемыми с поверхности Земли.

### 2.1.2 Миссия Van Allen Probes

Van Allen Probes (ранее Radiation Belt Storm Probes, RBSP) – космический проект НАСА по изучению радиационных поясов Земли. Проект состоит из 2 идентичных по конструкции и взаимозаменяемости спутников (RBSPa и RBSPb), которые были запущены на высокоэллиптическую орбиту с небольшим интервалом между ними 30 августа 2012. Элементы орбиты: наклонение –  $10^\circ$ ; период обращения – 9 часов; апогей  $\sim 6 R_E$ ; перигей  $\sim 600\text{--}700$  км (рисунок 2.1). Ось вращения КА стабилизирована и направлена на Солнце.

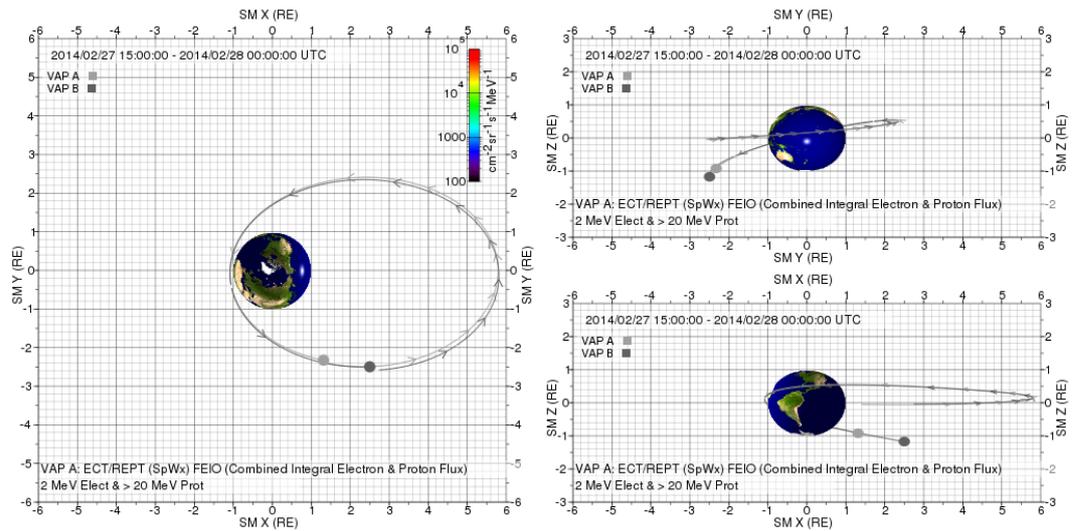


Рисунок 2.1 Положение орбиты спутников RBSPA, RBSPб.

На рисунке 2.1 изображены орбиты спутников RBSPA, RBSPб в  $SM$  системе координат (Solar Magnetic Coordinates, ось  $Z$  направлена к северному магнитному полюсу, ось  $Y$  по нормали к линии Земля-Солнце на вечер. Разница между этой системой и  $GSM$  во вращении вокруг оси  $Y$  на величину наклона диполя. В этой системе ось  $X$  не указывает прямо на Солнце.) проекциях  $XY$ ,  $YZ$ ,  $XZ$ .

На каждом из спутников установлены следующие научные приборы:

1) Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma (ECT).

Набор приборов ECT включает в себя приборы MagEIS, HOPE, REPT и предназначен для изучения спектров электронов и протонов с энергиями от 1 эВ до 10 МэВ с достаточным энергетическим разрешением пич-угловым распределением.

2) Набор инструментов Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS)

Набор инструментов создан для изучения важной роли, которую играют магнитное поле и плазменные волны в процессах ускорения и потерь частиц в радиационных поясах.

3) Electric Field and Waves Instrument (EFW)

Прибор предназначен для изучения электрического поля в околоземном космическом пространстве.

4) Van Allen Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE)

RBSPICE должен ответить на вопросы об образовании космической погоды, «временной бури кольцевого тока» и поддержании состава кольцевого тока.

5) Relativistic Proton Spectrometer (RPS)

Спектрометр измерит протоны внутреннего радиационного пояса с энергиями от 50 МэВ до 2 ГэВ.

В данной работе используются 11-ти секундные данные прибора MagEIS (Magnetic Electron Ion Spectrometer) [Spence et al., 2013]. Апертурная ось прибора направлена от Солнца под углом  $75^\circ$  к оси вращения ИСЗ. При вращении ИСЗ (5 об. в мин) ось прибора лежит на поверхности конуса, регистрируя частицы с питч-углами от  $\sim 90^\circ$  до  $\sim 15^\circ$ .

Проект Van Allen Probes [Kletzing et al., 2013] предоставляет хорошую возможность для изучения динамики и пространственной структуры кольцевого тока во время магнитосферных возмущений. Данные со спутников RBSPa и RBSPb будут использоваться при их совместном анализе вместе с данными спутников POES.

### 2.1.3 Миссия POES

ИСЗ POES – низкоорбитальные солнечно синхронные спутники с круговой орбитой на высоте  $\sim 800$  км и периодом обращения  $\sim 100$  мин. Орбита спутника такова, что в течение ограниченного времени ее восходящий и нисходящий участки постоянно находятся примерно на одних и тех же местных временах. На ИСЗ POES измерения потоков энергичных ионов производились аппаратурой MEPED [Evans and Greer, 2000]. Два взаимно перпендикулярно направленных детектора регистрируют частицы в радиальном направлении (по радиусу Земли – 0 детектор) и вдоль орбиты спутника (90 детектор). Поэтому, на высоких широтах 0 детектор измеряет, преимущественно, высыпавшиеся частицы, тогда как 90 детектор – захваченные (квазизахваченные). На экваторе ситуация противоположная. 0 детектор на экваторе регистрирует частицы с питч углами, близкими к  $90^\circ$ . При перемещении спутника из области экватора на средние широты 0 и 90 детекторы отклоняются от ортогонального и продольного направлений относительно магнитной силовой линии и начинают измерять потоки частиц с разными питч углами.

Спутники POES дают нам возможность анализа потоков заряженных частиц в приполярных областях, благодаря чему мы можем провести параллели и выстроить зависимости динамики заряженных частиц в области кольцевого тока по данным RBSP и высокоширотной части магнитосферы.

## 2.2 Используемые модели магнитного поля

Магнитосферное магнитное поле состоит из двух слагаемых. Первое порождается внутривоздушными токами, второе – токами, текущими в магнитосфере. "Внутреннее" поле подвержено медленным (вековым) вариациям. При изучении типичных магнитосферных

процессов оно может считаться постоянным по времени. Внутриземное магнитное поле вычисляется по модели IGRF, в которой оно представлено в виде разложения по сферическим гармоникам. В работе использовалась актуальная на момент изучения модель IGRF11 (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAAGA/vmod/igrf.html>). Это разложение по сферическим функциям с подтвержденными МАГА (Международная ассоциация геомагнетизма и аэронавтики) коэффициентами, актуальными до 2010-2015 эпохи. Главный член разложения представляет собой поле геомагнитного диполя. На расстояниях более  $3 R_E$  от центра Земли вклад недипольных членов разложения пренебрежимо мал. Здесь внутреннее магнитное поле обладает аксиальной симметрией относительно вектора магнитного момента Земли.

Внешнее поле порождается крупномасштабными токами в магнитосфере Земли. Параметры токовых систем испытывают быстрые вариации, связанные с изменениями в потоке солнечного ветра и ММП. Магнитное поле магнитосферных токов имеет доминирующую  $B_z$  - компоненту, которая положительна у дневной магнитопаузы, где поле определяется, главным образом, токами Чепмена - Ферраро, и отрицательна в ночной стороне магнитосферы, с минимумом у переднего края токового слоя. В первом приближении регулярное магнитное поле в магнитосфере симметрично относительно плоскости  $XZ$  GSM.

В настоящее время для вычислений магнитного поля крупномасштабных токовых систем в магнитосфере используются динамические (эмпирические, теоретические и адаптивные) модели [Tsyganenko, 1996; Alexeev et al., 1996; Tsyganenko, 2002a,b; Alexeev et al., 2001; Ganushkina et al., 2004; Tsyganenko, Sitnov, 2005; Kubyshkina et al., 2009]. Параболоидная модель магнитосферы A2000 [Alexeev et al., 1996, 2001] определяет магнитосферное магнитное поле каждой крупномасштабной токовой системы как аналитическое решение уравнения Лапласа при фиксированной форме магнитопаузы (параболоид вращения). Компоненты магнитного поля, перпендикулярные магнитопаузе, принимаются равными нулю. Модель предоставляет магнитное поле внутри магнитосферы как суперпозицию магнитных полей от кольцевого тока  $-B_r$ , токов хвоста  $-B_t$ , продольных токов зоны 1  $-B_{fac}$ , токов на магнитопаузе, экранирующих поле внутриземных токов,  $-B_{sd}$  и токов на магнитопаузе, экранирующих поле кольцевого тока  $-B_{sr}$ :

$$B_m = B_{sd}(\psi, R_1) + B_t(\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty) + B_r(\psi, b_r) + B_{sr}(\psi, R_1, b_r) + B_{fac}(I_{||}) \quad (2.1)$$

Модель A2000 не зависит от какой-то конкретной базы данных измерений, что могло бы накладывать ограничения на область ее применимости, таким образом модель может хорошо описывать магнитное поле как для спокойной и возмущенной, так и для сильно возмущенной

геомагнитной обстановки. Динамика магнитосферы во время бури представлена временными изменениями крупномасштабных токовых систем.

Входные данные для модели являются ключевыми параметрами магнитосферных токовых систем, которые отражают их расположение и интенсивность:

- Угол наклона геомагнитного диполя  $\psi$ .
- Расстояние до подсолнечной точки  $R_1$ .
- Расстояние до переднего края токового слоя хвоста  $R_2$ .
- Магнитный поток сквозь доли хвоста  $\Phi_\infty$ .
- Магнитное поле кольцевого тока в центре Земли  $b_r$ .
- Максимум интенсивности продольного тока  $I_{||}$ .

Параметры модели рассчитываются на основе эмпирических данных, используя субмодели, [Alexeev et al., 2001, 2003]. Для разных исследований могут выбираться разные субмодели для расчетов тех же самых параметров, тем самым, оптимизируя зависимости от наличия специфичных наборов эмпиричных данных. В работах [Alexeev et al., 1996, 2001; Kalegaev et al., 2005] расстояние до подсолнечной точки рассчитывалось по модели [Shue et al., 1998]:

$$R_1 = \{10.22 + 1.29 \tanh[0.184(B_z + 8.14)]\}(nv^2)^{-\frac{1}{6.6}} \quad (2.2)$$

Расстояние до переднего края токового слоя хвоста  $R_2$  было рассчитано как проекция аврорального овала вдоль магнитной силовой линии в полночь на широте  $\varphi_n$ :

$$\varphi_n = 74.9^\circ - 8.6^\circ \times \log_{10}(-Dst) \quad (2.3)$$

где  $\varphi_n$  определяется на основе [Старков, 1993]. Обычно применяется формула, верная в случае дипольного приближения  $R_2 = 1/\cos^2 \varphi_n$ . Для более точных вычислений можно использовать проектирование вдоль “реальных” силовых линий магнитного поля.

Магнитный поток сквозь доли хвоста  $\Phi_\infty$ , представляется как сумма магнитного потока  $\Phi_0 = 370$  МВб, связанного с медленными, адиабатическими вариациями геомагнитного хвоста и магнитного потока  $\Phi_s$ , связанного с суббуревой активностью [Alexeev et al., 2001]. В рамках параболической модели  $\Phi_s$  может быть определен как:

$$\Phi_s = -\frac{AL}{7} \frac{\pi R_1^2}{2} \sqrt{\frac{2R_2}{R_1} + 1} \quad (2.4)$$

Суммарный магнитный поток выглядит как  $\Phi_{\infty} = \Phi_0 + \Phi_s$ . Он равен магнитному потоку через полярную шапку и его изменения отражают динамику хвоста магнитосферы.

Поле кольцевого тока в центре Земли  $b_r$  (включая симметричную и асимметричную части кольцевого тока [Kalegaev et al., 2005]) во время магнитной бури определяется уравнением Бартонна [Burton et al., 1975]:

$$\frac{db_r}{dt} = F(E) - \frac{b_r}{\tau} \quad (2.5)$$

Оно связывает процесс инжекции частиц из хвоста магнитосферы с процессом распада кольцевого тока. Функция инжекции может быть представлена в виде:

$$F(E) = \begin{cases} d(-0.5), & E_y > 0.5 \text{ мВ/м} \\ 0, & E_y < 0.5 \text{ мВ/м} \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $E_y$  - электрическое поле утро-вечер в солнечном ветре и  $d$  - амплитуда инжекции. Характерное время распада кольцевого тока определяется как  $\tau = 2.37e^{9.74/(4.78+E_y)}$  [O'Brien and McPherron, 2000]. Единственный свободный параметр для каждой инжекции  $d$  определяется после процедуры подгонки между измеренными и модельными данными  $Dst$  [Kalegaev and Makarenkov, 2008]. Максимум интенсивности продольных токов региона 1  $I_{||}$  зависит от ММП и описана в [Alexeev and Feldstein, 2001].

Субмодели могут быть изменены или заменены пользователем для использования наиболее подходящего метода вычисления параметров токовых систем на основе имеющихся данных. Например, ключевые параметры токового слоя хвоста ( $R_2$ ;  $\Phi_{\infty}$ ) могут быть получены непосредственно из наблюдений в авроральной области [Alexeev et al., 2001; Desorgher et al., 2009] или в области магнитосферного хвоста, и мы постараемся это сделать в данной главе. Такой подход придает гибкости относительно различных аспектов солнечного ветра – магнитосферные связи при возможных геомагнитных условиях. Далее мы будем использовать измененные субмодели, принимающие во внимание актуальные данные со спутников THEMIS. Модельный токовый слой хвоста, который представлен как бесконечно тонкий токовый слой, был описан как расширение над функциями Бесселя и представлен в работе [Alexeev et al., 1996; Alexeev and Feldstein, 2001]. Ток поперек хвоста имеет внутреннюю границу, расположенную на расстоянии  $R_2$  в ночную часть магнитосферы и замыкается через токи на магнитопаузе.

Таким образом, использование модели A2000, позволяет: во-первых, получить представления о структуре магнитного поля крупномасштабного тока в хвосте магнитосферы, во-вторых, рассчитать и исключить из измерений вклады от других крупномасштабных токовых систем магнитосферы благодаря модульной структуре модели. В итоге, использование модели позволяет выделить магнитное поле, порожденное токами хвоста магнитосферы.

## Глава 3. Структура и динамика геомагнитного хвоста в период экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг.

### 3.1 Особенности геомагнитной обстановки в 2008-2009 гг.

Для анализа структуры и динамики токов хвоста магнитосферы мы будем рассматривать геомагнитные возмущения, происходящие на фоне экстремально-спокойных условий в магнитосфере в период затянувшейся фазы минимума солнечной активности.

В течение 2009 года магнитосфера Земли находилась в экстремально спокойном состоянии с редкими возмущениями, амплитуда которых по шкале Dst редко достигала -50 нТл.

На рисунке 3.1 показана геомагнитная обстановка в магнитосфере Земли в мае и декабре 2009 года, характеризуемая Dst - индексом, незначительные вариации которого свидетельствуют о преимущественно спокойном состоянии магнитосферы Земли в этот период (данные WDC Киото). Похожие зависимости Dst - индекса наблюдаются и в другие месяцы 2008-2009 годов, что характеризует общую спокойную геомагнитную обстановку в данный период.

### Геомагнитная обстановка в 2009 г.

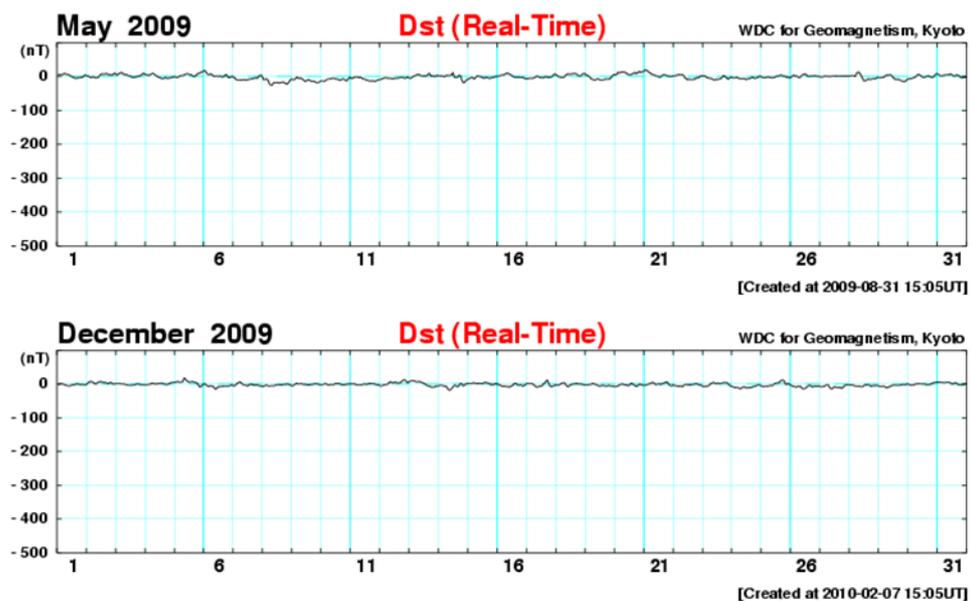


Рисунок 3.1 Геомагнитная обстановка в мае и декабре 2009г.

На рисунке 3.2 показаны параметры солнечного ветра 8 февраля 2009 года: компонента  $B_z$  межпланетного магнитного поля, концентрация и скорость плазмы солнечного ветра, меняющиеся в пределах от - 2 до 2 нТл, 4 - 12 частиц/см<sup>3</sup> и 300 - 320 км/с соответственно, а также динамическое давление солнечного ветра, Dst и AE индексы. Можно видеть, что основные параметры межпланетной среды претерпевают лишь незначительные вариации и их средние значения характерны для спокойной геомагнитной обстановки.

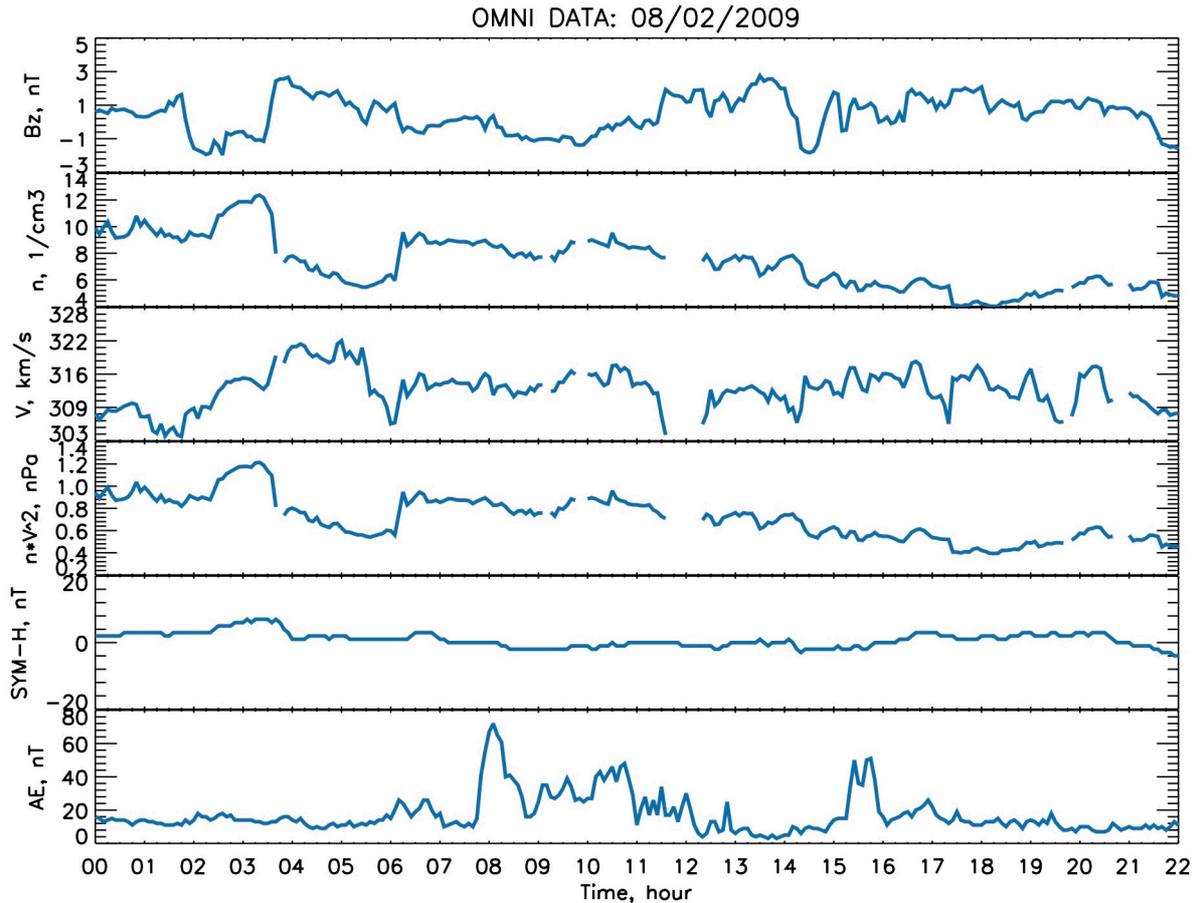


Рисунок 3.2 Параметры солнечного ветра 8 февраля 2009г.

Следует отметить, что в течение 2009 г. наблюдались небольшие (по обычным меркам) возмущения амплитудой 30 - 50 нТл. В рамках общей классификации магнитных бурь такие возмущения не считаются сформировавшейся бурей, но в нашей случае аномально долгой низкой солнечной активности – это наиболее сильные возмущения, которые следует объяснить и рассмотреть результаты их воздействия на магнитосферу Земли.

Примеры таких возмущений показаны на рисунке 3.3. Данные по солнечному ветру свидетельствуют, что возмущения связаны с приходом на орбиту Земли рекуррентных потоков плазмы от Солнца. Можно выделить такие фазы возмущения, как усиление магнитного поля при взаимодействии магнитосферы с фронтом ударной волны, депрессия магнитного поля и его медленное восстановление. Наличие особенностей развития магнитного поля характерных для

магнитной бури дает основания для подробного изучения динамики магнитосферных токовых систем в ходе таких событий. Особое место будет иметь изучение динамики магнитного поля токов хвоста магнитосферы.

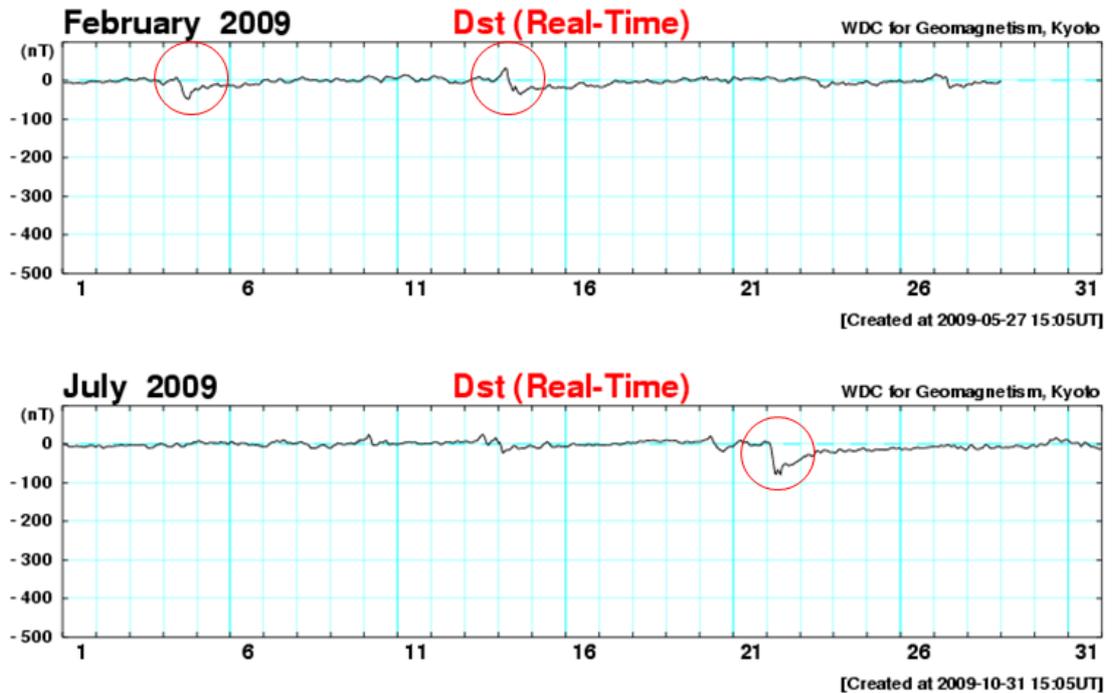


Рисунок 3.3 Геомагнитные возмущения в 2009 г.

Таким образом, в 2009 году магнитосфера Земли находилась в условиях аномально-низкой геомагнитной активности, связанной с затянувшимся солнечным минимумом. Это дало возможность детально изучить структуру спокойной магнитосферы, в том числе положение и структуру крупномасштабных токов в геомагнитном хвосте. Данные измерений магнитного поля 5 спутниками миссии THEMIS и расчеты по модели A2000 будут использованы для реконструкции магнитного поля токов хвоста магнитосферы в спокойные и возмущенные периоды. Особое внимание будет уделено буре 14 февраля 2009 года, во время которой в течение нескольких часов спутники THEMIS располагались удачным образом, позволяющим провести анализ структуры и динамики магнитного поля в хвосте магнитосферы.

В настоящей главе мы обсудим метод выделения магнитного поля токов хвоста из измеряемого на борту спутников магнитного поля с использованием модельных расчетов. Мы используем параболоидную модель A2000 [Alexeev et al., 1996; Alexeev et al., 2001] для расчетов магнитного поля крупномасштабных токовых систем (кроме токов хвоста). После вычитания из измерений внутреннего поля Земли, а также вкладов от этих токовых систем, мы будем изучать пространственную структуру выделенного магнитного поля токов хвоста магнитосферы, его свойства и динамику. Мы выполним эту процедуру для спокойных условий

в солнечном ветре 4 апреля 2009 года и для выбранного геомагнитного возмущения 14 февраля 2009 года. Будут проанализированы специфичные и уникальные аспекты геомагнитных возмущений во время затянувшегося минимума солнечной активности в 2009 году.

### 3.2 Метод выделения магнитного поля токов хвоста магнитосферы

Прежде чем выполнить анализ измеренного магнитного поля в хвосте магнитосферы, попытаемся получить искомые структуры с помощью модели. Это позволит понять, какие радиальные профили магнитного поля могут быть зарегистрированы на спутниках при различном их расположении относительно токового слоя хвоста магнитосферы и какие величины магнитного поля могут быть измерены для разных условий в околоземном пространстве.

На рисунок 3.4 приведены характерные для спокойных условий профили компонент  $B_x$  и  $B_z$  магнитного поля в хвосте магнитосферы вдоль линии  $Y_{GSM} = 0$ ,  $Z_{GSM} = -2 R_E$ , рассчитанные по модели A2000 при заданных значениях параметров межпланетной среды, зарегистрированных спутником ACE 00 UT 14 февраля 2009 г.. Смещение по оси  $Z_{GSM}$  выбрано таким, чтобы выполнить расчеты в непосредственной близости от токового слоя, смещенного относительно плоскости  $XY$  GSM-координат в южном направлении вследствие сезонных вариаций угла наклона геомагнитного диполя. На верхнем рисунке представлен профиль полного поля. На среднем проведено вычитание поля внутриземных источников, рассчитанного по модели IGRF, на нижнем изображен профиль компонент магнитного поля токового слоя хвоста магнитосферы, полученный дополнительным вычитанием поля токов на магнитопаузе, кольцевого тока и продольных токов. Компоненты магнитного поля показаны синим ( $B_x$ ) и красным ( $B_z$ ) цветами.

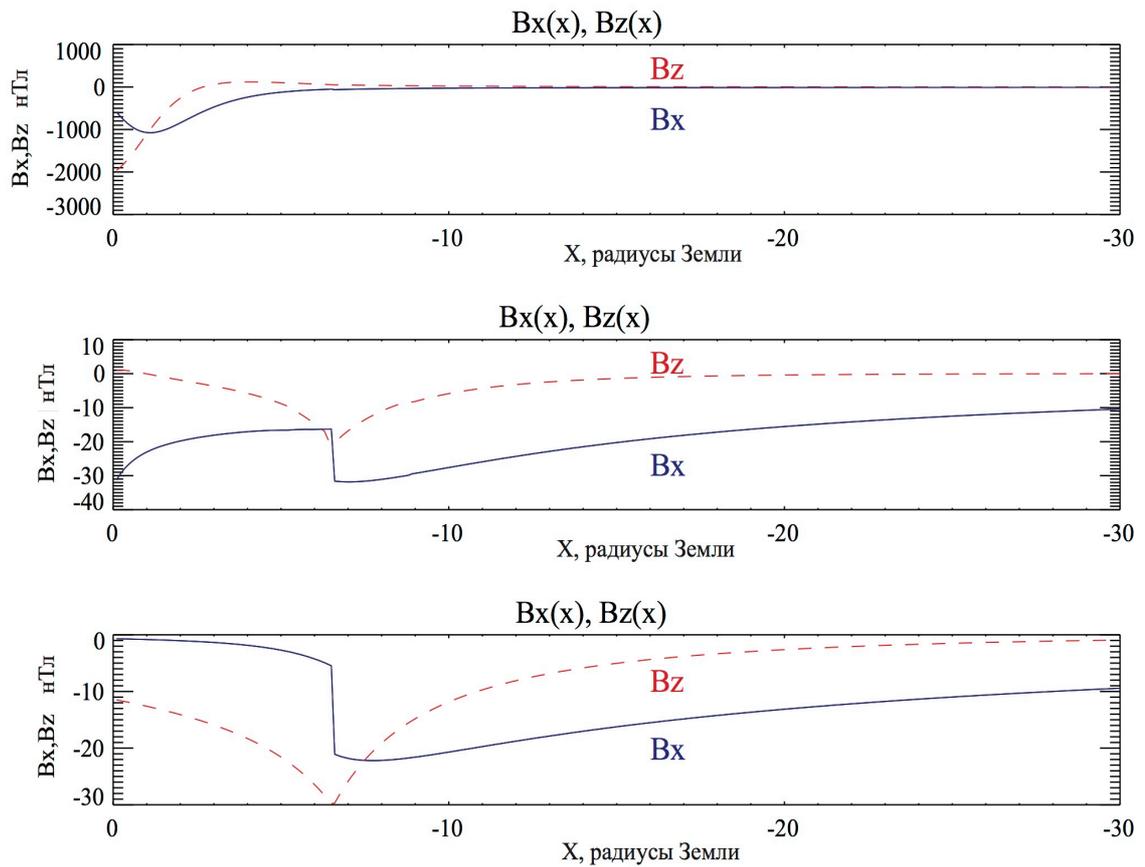


Рисунок 3.4 Характерные для спокойных условий профили компонент  $B_x$  и  $B_z$  магнитного поля в ночной магнитосфере, полученные по модели A2000 для заданных параметров межпланетной среды в 00 UT 14 февраля 2009 г., вдоль линии  $Y_{GSM} = 0$ ,  $Z_{GSM} = -2 R_E$ . Компоненты магнитного поля показаны синим ( $B_x$ ) и красным ( $B_z$ ) цветами.

Из рисунка 3.4 видно, что магнитное поле токовой системы хвоста максимально вблизи переднего края токов хвоста магнитосферы. Вычитание поля IGRF позволяет обнаружить характерную для токов хвоста структуру магнитного поля со скачком  $B_x$  компоненты на переднем крае токового слоя. Передний край токового слоя располагается в ночной магнитосфере на расстоянии  $-7 R_E$  от центра Земли. Знак  $B_x$  компоненты свидетельствует о том, что поле вычислено в области ниже токового слоя. Его смещение относительно плоскости  $XY$  GSM-координат, связанное с наклоном геомагнитного диполя, характерного для зимнего периода, составляет около  $-2 R_E$ . Характерные величины компонент магнитосферного магнитного поля в магнитосферном хвосте в окрестностях переднего края токового слоя хвоста внутри магнитосферы Земли составляют  $-(20 - 30)$  нТл для  $B_z$  компоненты,  $-20$  нТл для  $B_x$  компоненты, а в отдаленном хвосте значения  $B_x$  и  $B_z$  компонент составляют порядка 10 нТл.

Для того чтобы учесть особенности структуры магнитного поля хвоста вдоль траекторий спутников, которые не обязательно располагаются в плоскости хвоста магнитосферы, по модели были построены также графики (рисунок 3.5) профилей магнитного поля токов в хвосте

для разных значений  $Z_{GSM}$ , что соответствует случаям нахождения над и под токовым слоем хвоста.

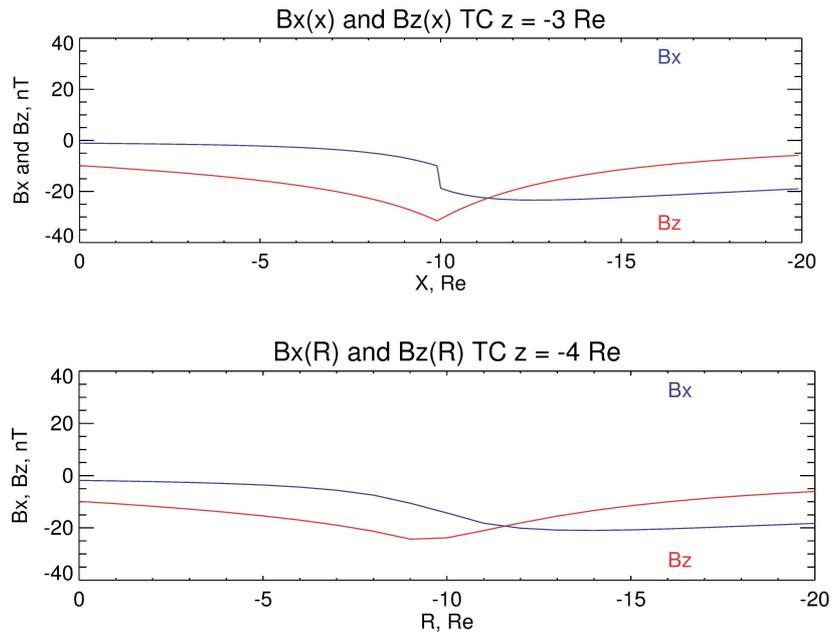


Рисунок 3.5 Особенности структуры магнитного поля хвоста в зависимости от  $Z_{GSM}$

Данные построения обуславливаются необходимостью получения модельных представлений о структуре магнитных полей в области крупномасштабного тока хвоста магнитосферы.

Из рисунка 3.5 видно, что характер профилей магнитных полей сохраняется при удалении от переднего тока хвоста по оси  $Z_{GSM}$ , но становится менее выраженным. Важной особенностью является примерное совпадение экстремумов составляющих компонент магнитного поля  $B_x$  и  $B_z$ , что можно использовать при анализе данных во время геомагнитных возмущений.  $B_x$  компонента положительна над токовым слоем и отрицательна ниже него.

В начале 2009 года 5 спутников THEMIS (P1 - P5) находились на эллиптических орбитах расположенных вдоль хвоста магнитосферы. Такое их расположение позволяет нам изучить магнитное поле в хвосте. На основе спутниковых измерений Themis [Angelopoulos, 2008] мы определим положение переднего края токового слоя хвоста, радиальное распределение и динамику компонент магнитного поля. Магнитосферное магнитное поле порождается несколькими токовыми системами, и непосредственно из измерений невозможно выделить эффекты токовой системы хвоста. Возможным выходом из этой ситуации является магнитосферное моделирование.

Пример измерений магнитного поля на спутнике THEMIS P5 в течение 14 февраля 2009 года изображен на рисунке 3.6. Показаны  $B_x$  и  $B_z$  компоненты магнитного поля в системе координат GSM. Вблизи перигея магнитное поле определяется, в основном, токами внутри Земли, в другие моменты можно увидеть вариации, связанные с токами хвоста: около 10:00 UT

видны значительные изменения  $B_x$  компоненты поля. Кольцевой ток и токи на магнитопаузе также дают вклад в измеряемое спутником поле, в дополнении к вкладу от токов хвоста, но их эффект не так очевиден.

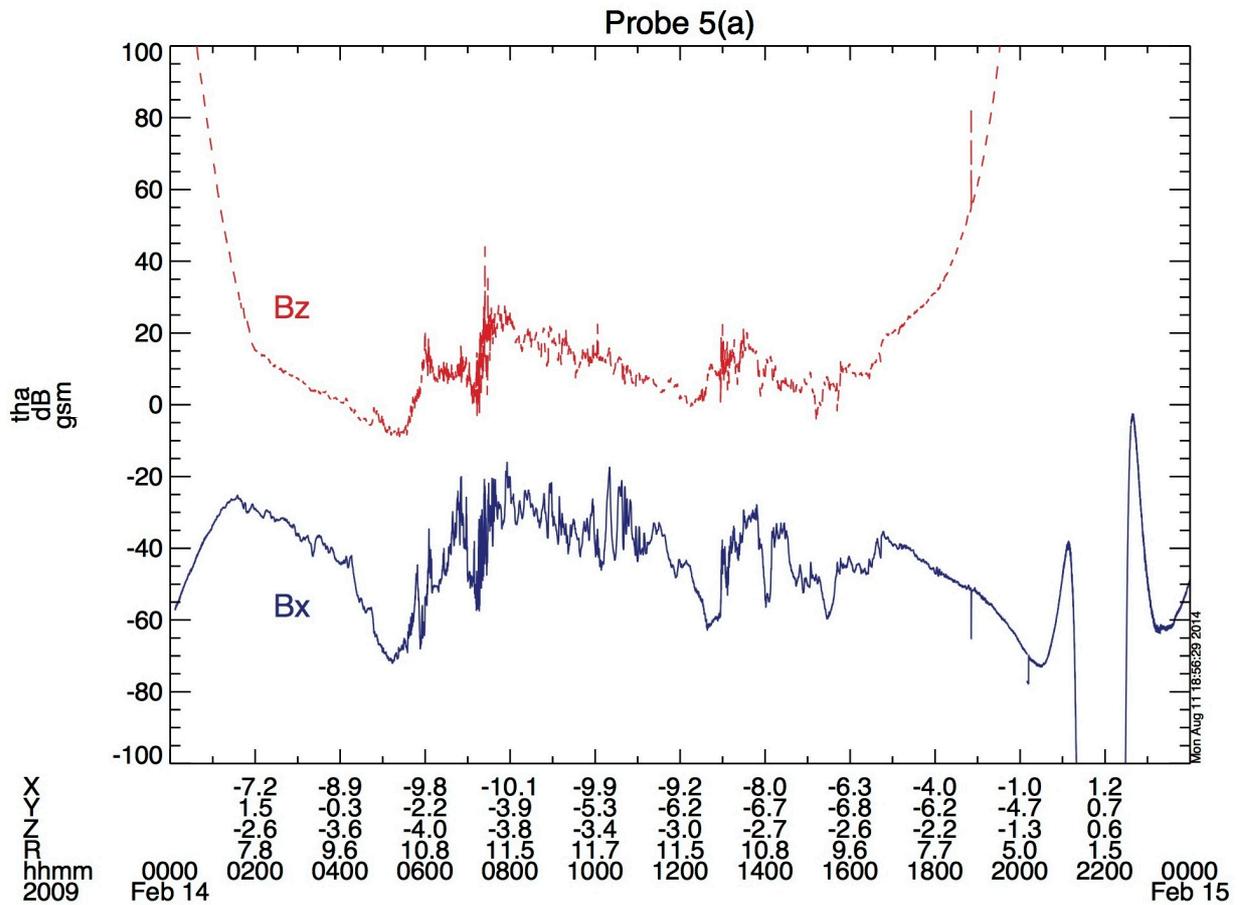


Рисунок 3.6 Компоненты магнитного поля вдоль орбиты спутника THEMIS P5 14 февраля 2009 года ( $B_x$ - синяя сплошная линия,  $B_z$ - красная пунктирная).  $B_y$  компонента магнитного поля не показана.

Для оценки вклада от токов хвоста в общее магнитное поле вычтем вклады от всех других источников из измеренного поля. Так как мы не можем оценить все эти источники непосредственно из измерений, используем модели магнитосферного магнитного поля. Модель IGRF11 была использована для вычитания вклада от внутренних токов Земли. Магнитное поле от крупномасштабных магнитосферных токовых систем может быть оценено при помощи современных динамических моделей, таких как T01 [Tsyganenko, 2002] или A2000 [Alexeev et al., 2001], или адаптивных моделей, таких как описаны в работе [Ganushkina et al., 2004]. Принимая в качестве входных параметров данные, полученные из измерений солнечного ветра и ММП, а также, геомагнитные индексы, мы можем оценить вариации магнитного поля от токовых систем как ответ на внешнее воздействие на магнитосферу.

Из-за того, что модель A2000 представляет магнитосферные токи как тонкие токовые слои, ожидаемо, что вблизи токового слоя хвоста точность вычислений магнитного поля будет ниже, чем в областях, расположенных дальше от слоя. Получим поле токов хвоста магнитосферы путем вычитания из измерений вкладов от поля Земли и магнитосферных токов, отличных от токов хвоста. На рисунке 3.7 изображены магнитосферное магнитное поле вдоль орбиты спутника P5 после вычитания вкладов от внутриземных токов, кольцевого тока и токов на магнитопаузе.

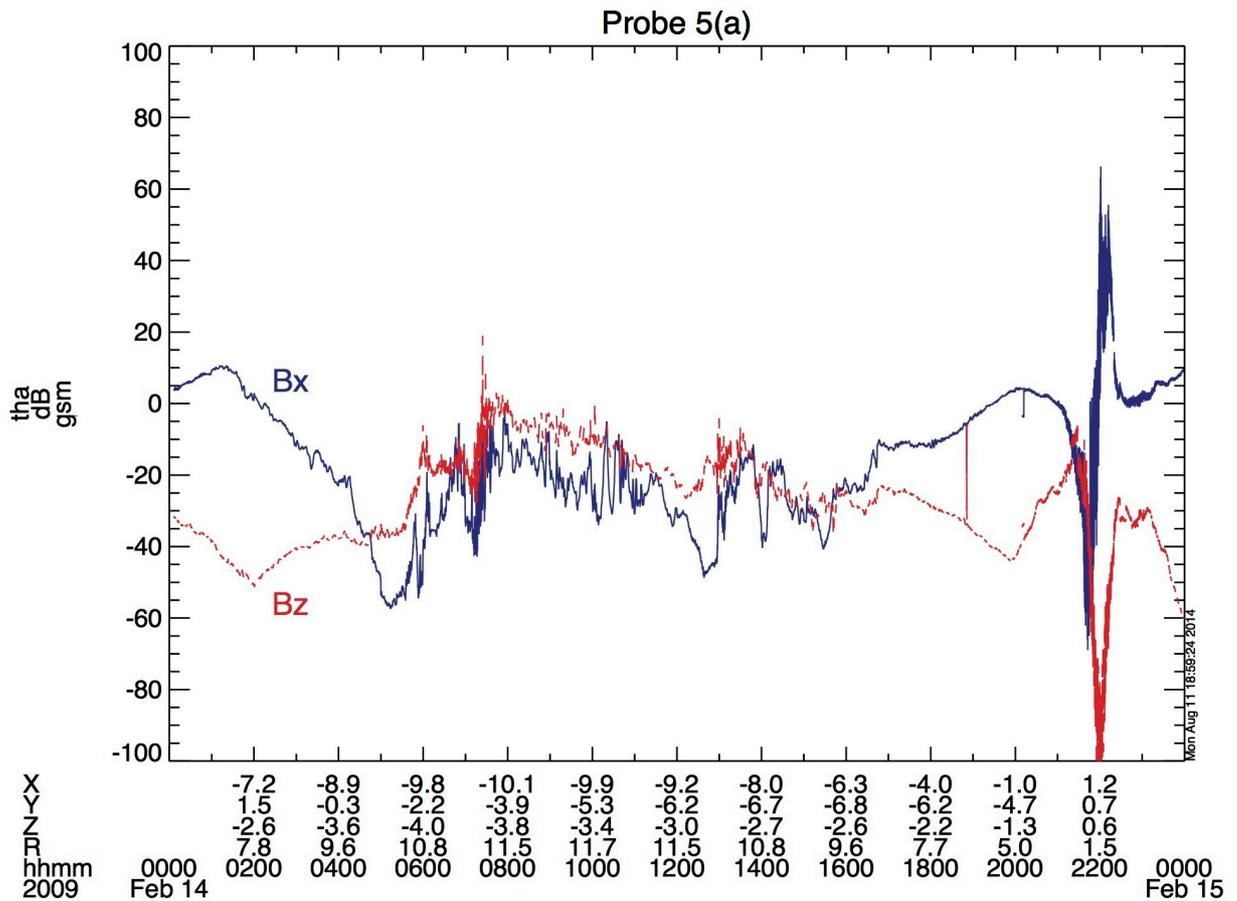


Рисунок 3.7 То же, что на рисунке 3.6, после вычитания вклада от внутриземных токов, кольцевого тока и токов на магнитопаузе.

На рисунке видны значительные вариации магнитного поля вблизи перигея, приблизительно в 22:00 UT. Возможное их происхождение - погрешности вычислений внутреннего поля Земли моделью IGRF, либо, неучет эффекта продольных токов. В то же время, эти флуктуации расположены вблизи Земли, вне токов хвоста. Вычисления при помощи модели A2000 показали, что вклад продольных токов мал в области хвоста магнитосферы. Для условий солнечного ветра на 14 февраля 2009 года вклад продольных токов в  $B_z$  компоненту поля в координатах GSM составляет около 5 нТл. Изучая динамику и структуру магнитного поля токов хвоста магнитосферы, мы будем пренебрегать продольными токами в области хвоста.

Использование данных по магнитному полю одновременно всех спутников поможет воспроизвести структуру магнитного поля хвоста (при соответствующем расположении самих спутников). На рисунке 3.8 представлены  $B_x$ ,  $B_z$  (GSM) компоненты магнитного поля хвоста в ночной части магнитосферы на основании данных всех спутников по сценарию/приближению, описанному выше. На рисунке вы 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 – посчитанное 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].

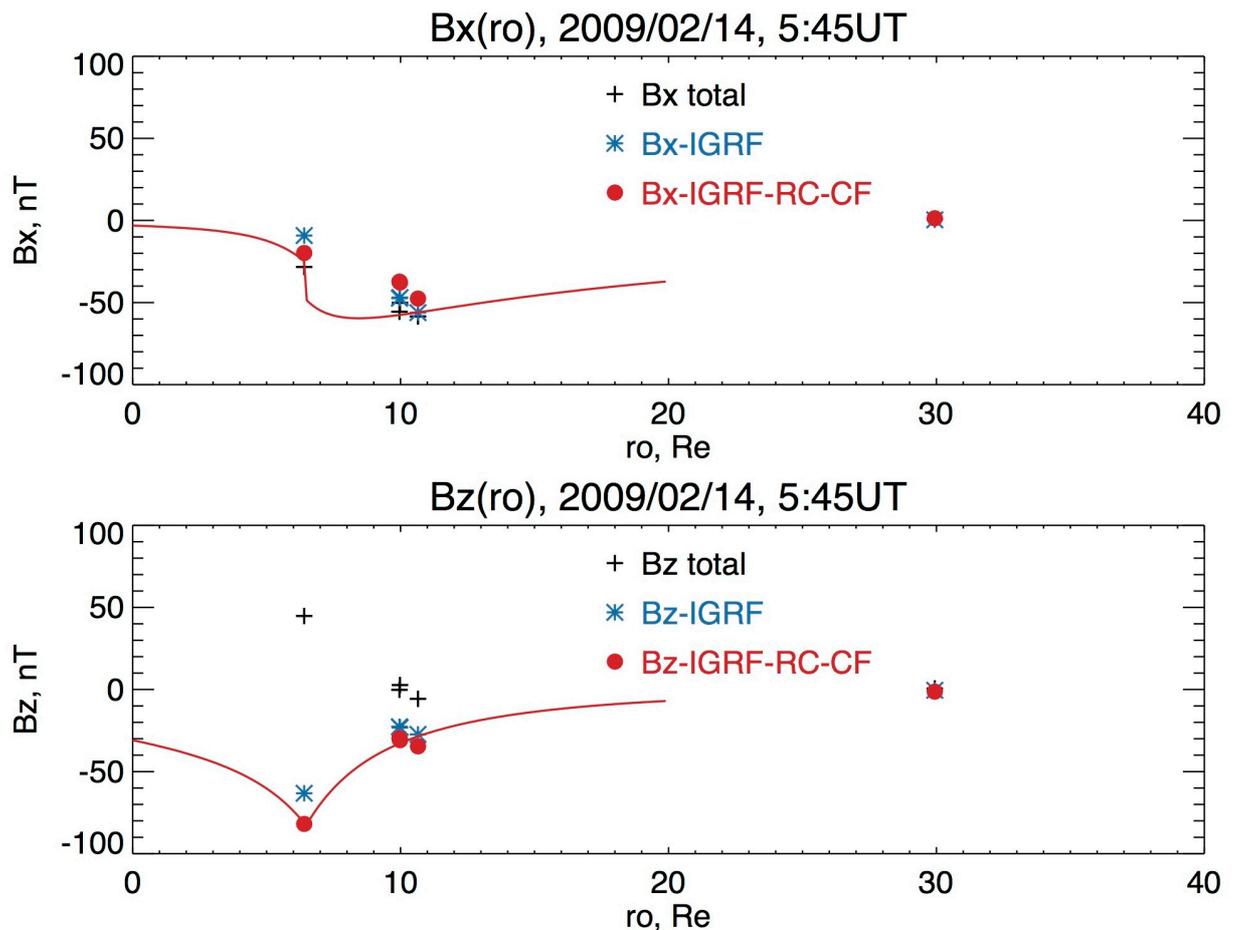


Рисунок 3.8 Радиальное распределение и структура магнитного поля ( $B_x$ ,  $B_z$  (GSM) компоненты магнитного поля) в области хвоста магнитосферы в 05:45 UT 14 февраля 2009 года ( $\rho = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ ): полное магнитное поле (символ «+»), поле за вычетом вклада от внутриземных

источников (символ «астерикс»), поле токов хвоста (символ «круг»). Сплошная линия – модельное (A2000) поле токов хвоста на основании данных по солнечному ветру.

Смоделированная структура магнитного поля поможет идентифицировать поле вблизи переднего края токового слоя по данным измерений. Ниже мы попытаемся воссоздать структуру магнитного поля хвоста используя данные THEMIS и вычисления по модели A2000. Для облегчения сравнения модельных и спутниковых данных мы постараемся получить распределение магнитного поля на основании данных нескольких спутников, измеряемое поле на которых похоже на то, что мы видели на рисунке 3.3.

### 3.3 Спокойная магнитосфера 4 апреля 2009 года

На рисунке 3.9 показаны геомагнитные условия 4 апреля 2009 года: параметры солнечного ветра ( $B_z$  ММП, скорость и плотность протонов солнечного ветра), а также Dst и AE индексы. В течение 00-07 UT были только небольшие вариации плотности протонов (в диапазоне 5-8 частиц/см<sup>3</sup>), скорости плазмы (300-330 км/с) и соответственно динамического давления солнечного ветра. ММП изменялось не более, чем на 1 нТл. Dst был между 5 нТл и 7 нТл. Такие значения параметров солнечного ветра и Dst индекса соответствуют спокойным геомагнитным условиям.

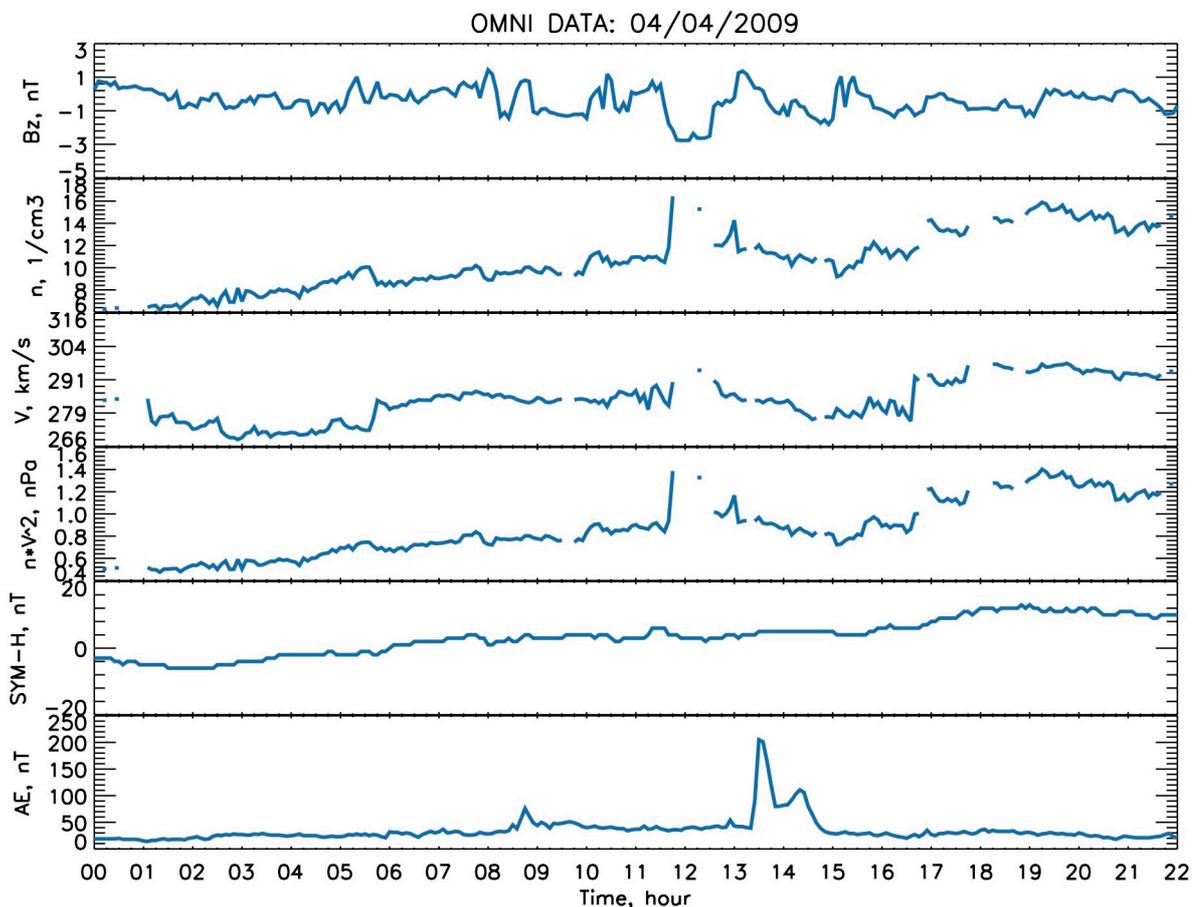


Рисунок 3.9 Параметры солнечного ветра ( $B_z$  ММП [нТл], плотность протонов солнечного ветра [ч/см<sup>3</sup>] и скорость [км/с], Dst-индекс [нТл] и AE-индекс [нТл] 4 апреля 2009 года.

В течение 00-07 UT аппараты THEMIS находились в хвосте приблизительно на расстоянии  $X_{GSM}$  от -5 до -15  $R_E$ . На рисунке 3.10 показано пространственное положение спутников в течение 00-07 UT. Крупные метки (для каждого спутника своя) обозначают начальные положения спутников в 00:00 UT. Так как в это время были спокойные условия в солнечном ветре и геомагнитная активность была низкая, мы рассмотрели непрерывные измерения на каждом спутнике в течение всего периода 00-07 UT, считая что магнитное поле изменялось незначительно и при своем движении спутники фиксировали только пространственные изменения. В отличие от возмущенных периодов, когда измеряемое магнитное поле на спутнике меняется в зависимости как от пространственного положения, так и от временных изменений геомагнитных условий, в данном случае остается только первый фактор. Это позволяет нам получить более точный профиль магнитного поля, нежели в возмущенные периоды.

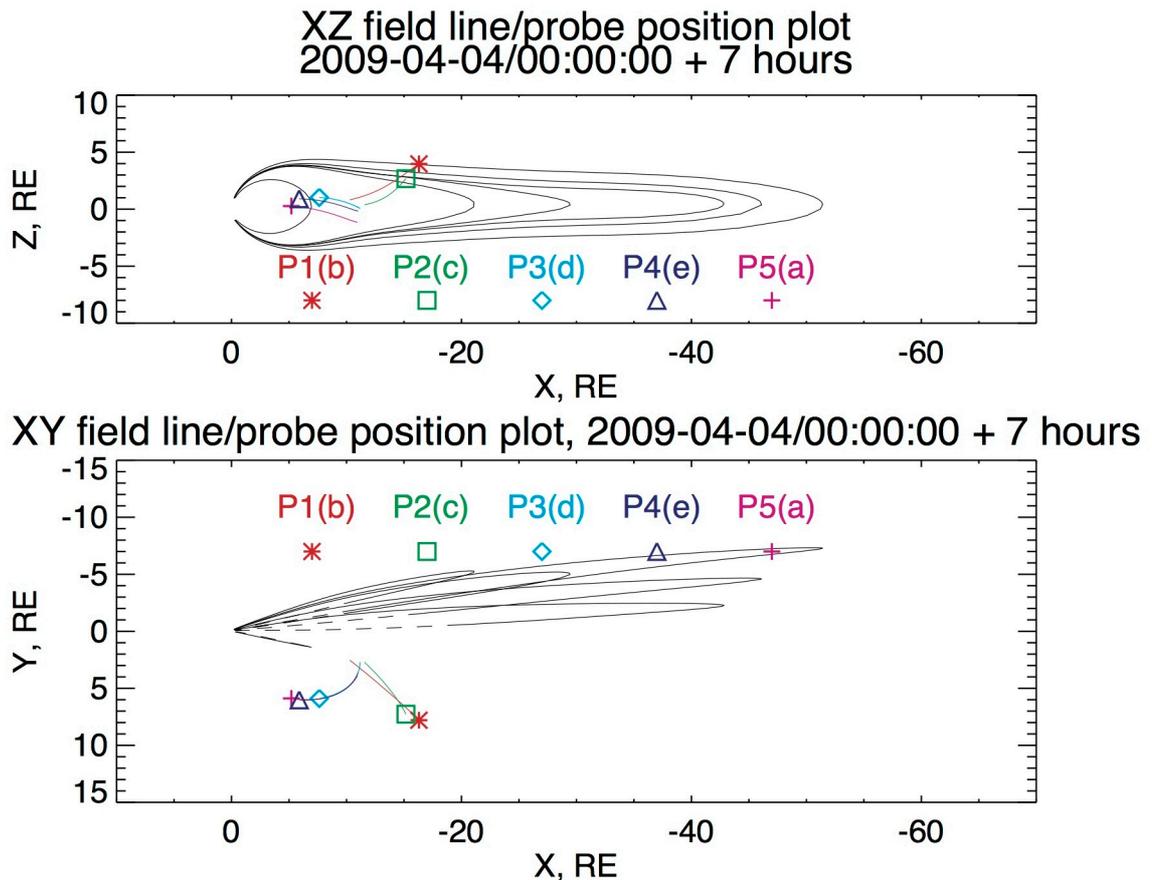
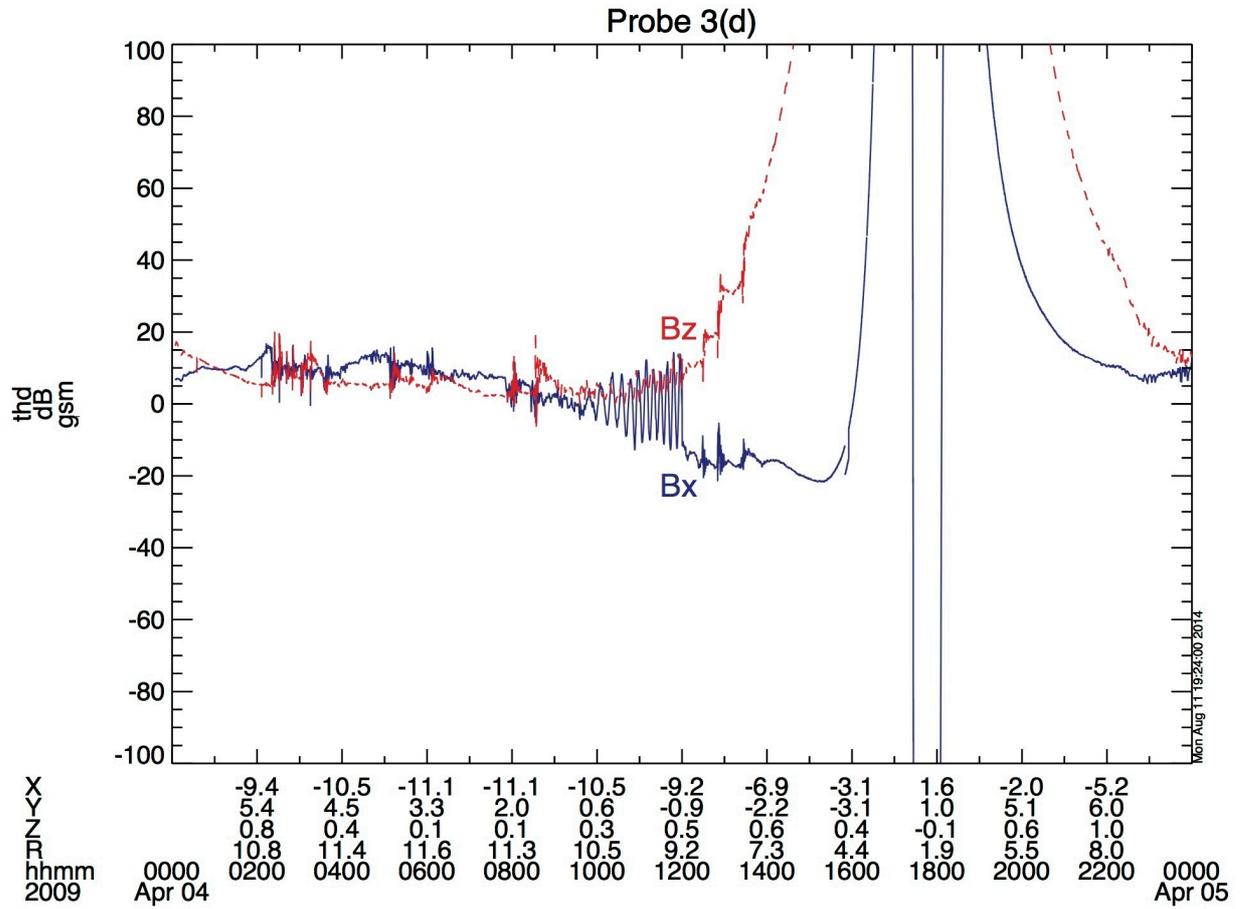


Рис. 3.10 Траектория спутников THEMIS в течение 00-07 UT 4 апреля 2009 года. Специальными символами обозначены начальные точки траекторий.

На рисунке 3.11 показано магнитное поле, измеренное вдоль орбиты спутника РЗ 4 апреля 2009 года. Видно достаточно плавное распределение магнитного поля в течение 00-07 UT.



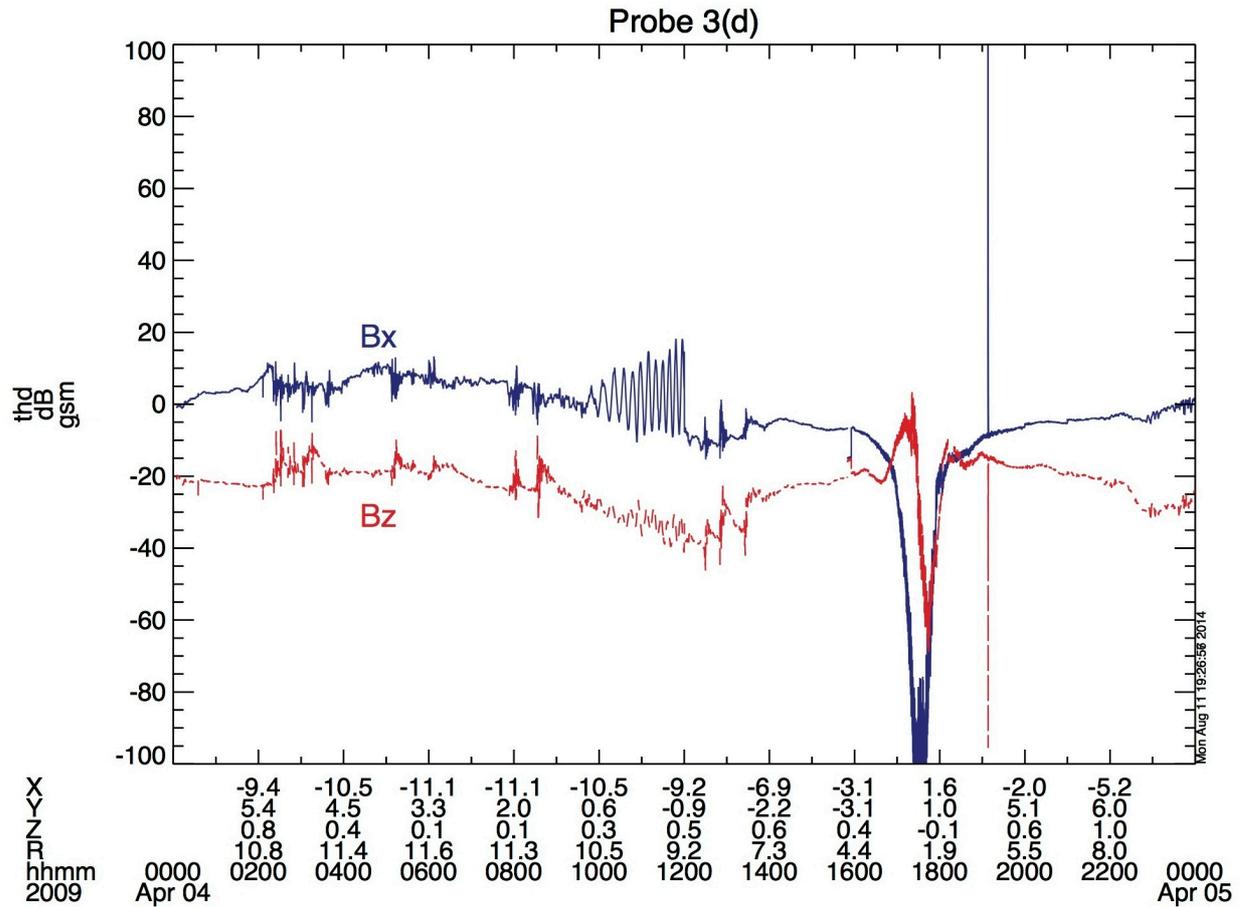


Рисунок 3.11 Распределение компонент магнитного поля вдоль орбиты спутника THEMIS P3 4 апреля 2009 года ( $B_x$ - синяя сплошная линия,  $B_z$ - красная пунктирная). Верхний рисунок – полное поле, нижний – поле токов хвоста.

На рисунке 3.12 показано распределение компонент магнитного поля  $B_x$ ,  $B_z$  вдоль геомагнитного хвоста в период 00-07 UT 4 апреля 2009 года на основе данных всех пяти аппаратов THEMIS после вычитания вкладов в магнитное поле от токовых систем, отличных от токов в хвосте магнитосферы, при помощи моделей A2000 и IGRF на основе параметров геомагнитной среды, представленных на рисунке 3.9. Из-за того, что аппараты были расположены не вдоль оси  $X$ , мы отображаем распределение в зависимости от  $\rho = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ . Положительные значения  $B_x$  компоненты на борту P1 и P2 были изменены на отрицательные для большей наглядности и получения структуры магнитного поля, как если бы спутники его измеряли, находясь ниже токового слоя.

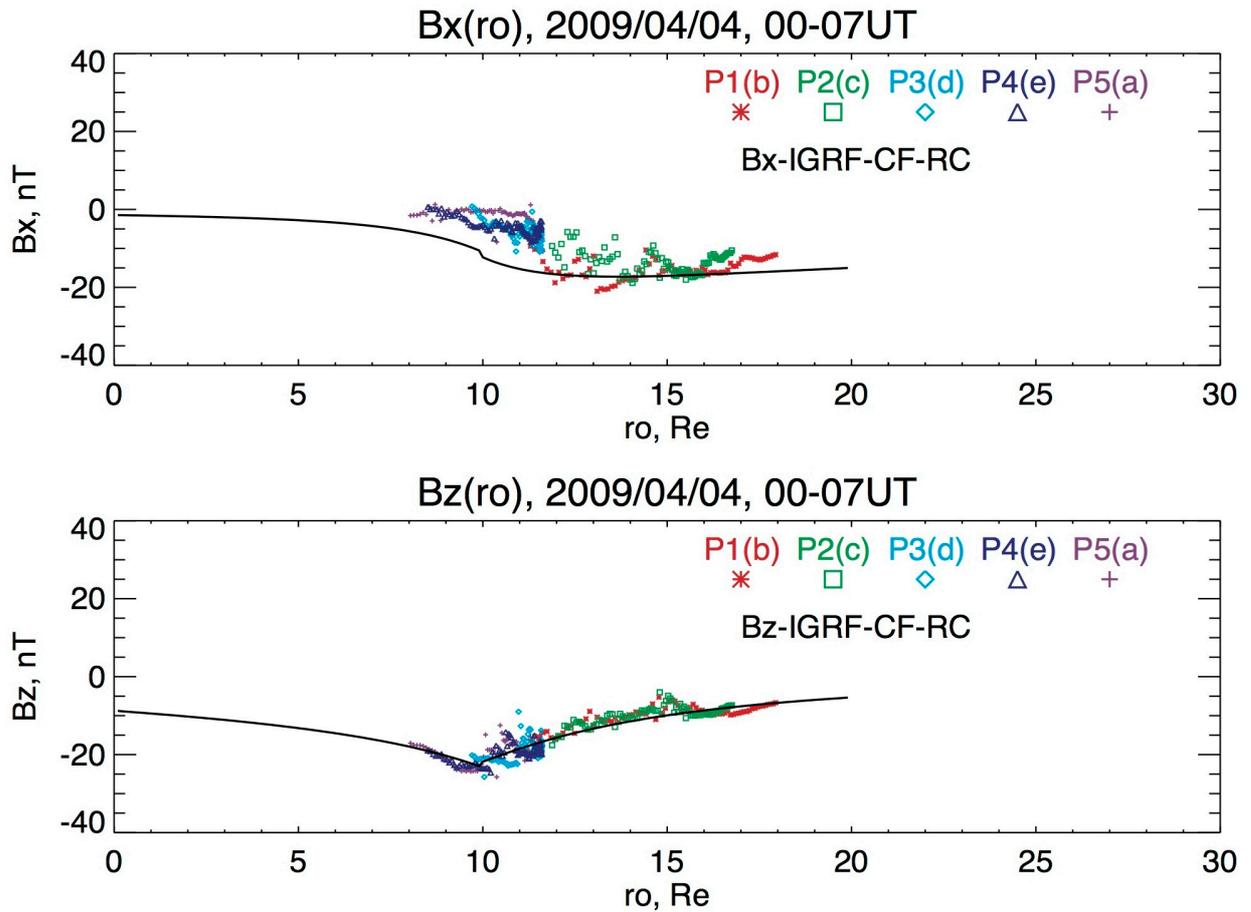


Рисунок 3.12 Структура магнитного поля ( $B_x$ ,  $B_z$ ) в течение 00-07 UT 4 апреля 2009 года на основе данных спутников THEMIS и использования модельных (A2000) вычислений (сплошная линия).

Как видно значения как  $B_x$ , так и  $B_z$  компоненты поля на всех спутниках находятся примерно на одних и тех же кривых. Сплошная линия – распределение магнитного поля, посчитанная при помощи модели A2000 для параметров  $R_2 = 10 R_E$ ,  $\Phi_\infty = 580$  МВб. Видно, что модельная кривая отображает основные особенности магнитного поля данных со спутников:  $B_z$  компонента преобладает вблизи Земли,  $B_x$  – в хвосте,  $B_z$  достигает максимального значения по абсолютной величине вблизи переднего края токового слоя хвоста, где  $B_x$  начинает уменьшаться. Также видно, что абсолютный максимум магнитного модельного поля не соответствует измерениям и располагается на расстоянии  $|X| = 10-12 R_E$ . Эти профили также позволяют оценить интенсивность магнитного поля в хвосте. Вблизи переднего края  $B_x$  и  $B_z$  компоненты достигают по модулю величины в 20 нТл, в то время как в удаленном хвосте поле становится слабее.

### 3.4 Геомагнитное возмущение 14 февраля 2009 года

Для изучения геомагнитного хвоста при возмущённых условиях в магнитосфере мы будем анализировать событие 14 февраля 2009 года. Для февраля 2009 года характерны очень спокойные внешние условия. Небольшие вариации ММП, плотности, скорости плазмы и динамического давления солнечного ветра были зафиксированы 13 февраля, в предыдущий от интересующего нас дня. Внешние условия сказались на расширении магнитосферы с увеличением расстояния до подсолнечной точки до 12-13  $R_E$  (вычислено при помощи [Shue et al., 1998]) и расстоянием до переднего края токового слоя до  $|X| = 10 - 12 R_E$ , как это было 4 апреля 2009 года. Dst индекс был спокойным не было каких-либо значительных вариаций, характерных для магнитосферной активности.

14 февраля 2009 года произошло взаимодействие быстрого потока плотной плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли. На рисунке 3.13, сверху вниз представлены  $B_z$  компонента ММП, плотность и скорость солнечного ветра, Dst и AE индексы. Плотность протонов начала увеличиваться в 22:00 UT 13 февраля и достигла 70 частиц/см<sup>3</sup> в 04:30 UT 14 февраля, в то время как скорость была около 300 км/с. После достижения максимального значения плотность резко упала, но скорость начала увеличиваться, достигая 400 км/с (за один час) и потом 500 км/с. Начальная фаза магнитной бури началась в 02:00 UT во время поджатия магнитосферы солнечным ветром. Были зафиксирована фаза SSC как усиление токов Чепмена-Ферраро на магнитопаузе, которая достигла максимума по данным Dst около 05:35 UT. В 06:00 UT  $B_z$  компонента ММП изменила направление на южное, спровоцировав начало главной фазы бури, во время которой минимум Dst индекса был зафиксирован примерно в 10:00 UT и был равен примерно -40 нТл, в то время как фаза восстановления началась примерно в 16:00 UT.

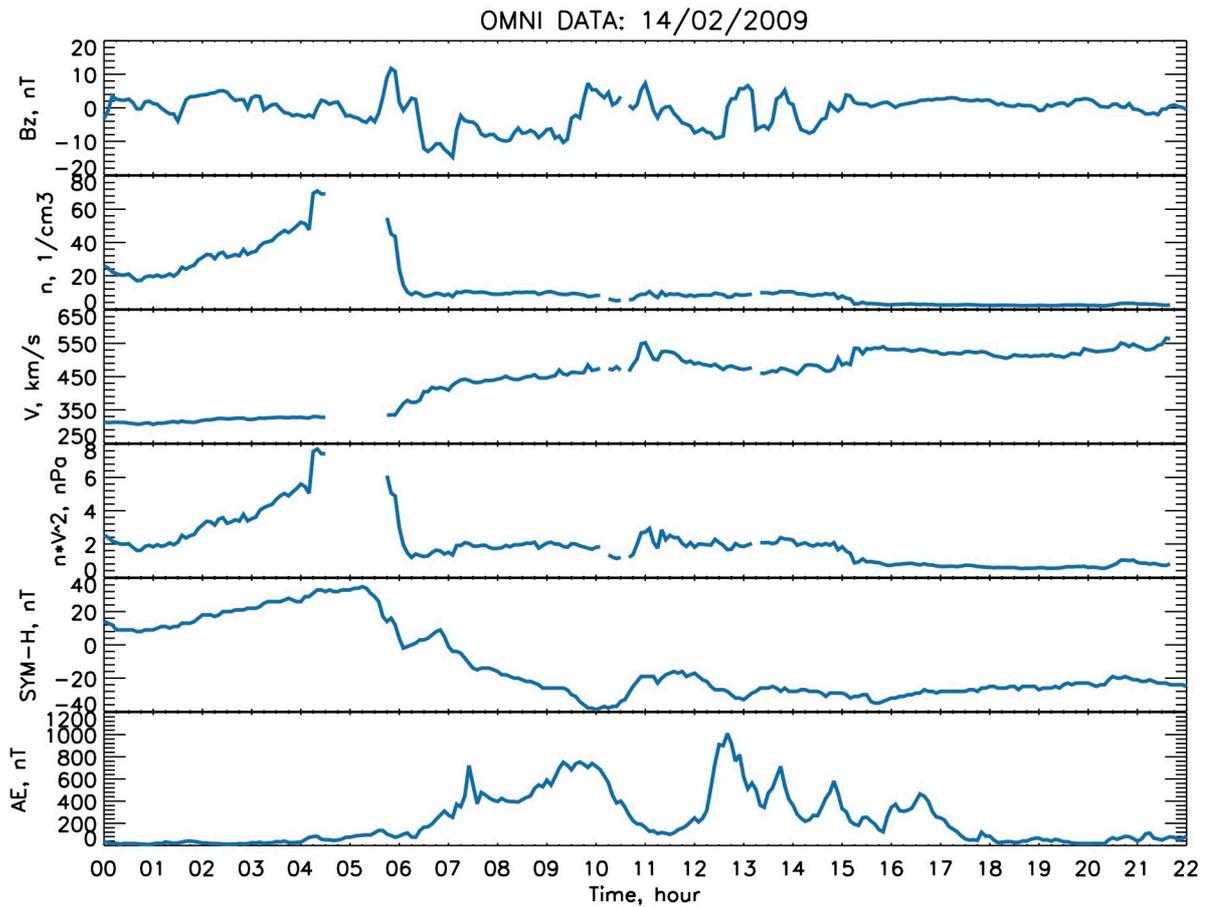


Рисунок 3.13 Рис. 4 Параметры солнечного ветра ( $B_z$  ММП [нТл], плотность протонов солнечного ветра [ $\text{ч}/\text{см}^3$ ] и скорость [км/с], Dst-индекс [нТл] и AE-индекс [нТл] 14 февраля 2009 года.

На рисунках 3.4 и 3.5 показаны данные измерений магнитного поля на борту P5 14 февраля 2009 года и магнитное поле, из которого вычтен вклад от внутриземных токов, токов на магнитопаузе и кольцевого тока. Из-за малого вклада продольных токов в магнитное поле во внешней магнитосфере на рисунке 3.5 отображено преимущественно поле токов хвоста вдоль орбиты спутника. На рисунке 3.14 изображено поле токов хвоста магнитосферы ( $B_x$  – синяя сплошная линия,  $B_z$  – красная пунктирная) в течение 14 февраля 2009 года, полученное после вычитания из полного измеренного поля вклада от внутриземных источников, токов на магнитопаузе и кольцевого тока для спутников P1-P5. Орбиты спутников показаны на рисунке 3.15. В течение начальной и главной фаз бури спутник P1 был расположен в удалённой части хвоста, остальные же располагались вблизи переднего края токового слоя. Для каждого спутника специальным символом отображено его положение в 00:00 UT и это его начальная точка траектории. Абсолютный максимум  $B_x$  компоненты на рисунке 3.14 показывает, что спутники P3, P4, P5 были в области токов хвоста после 06:00 UT. P1 несколько раз пересекал токовый слой хвоста на расстоянии около  $30 R_E$  в ночной части магнитосферы.





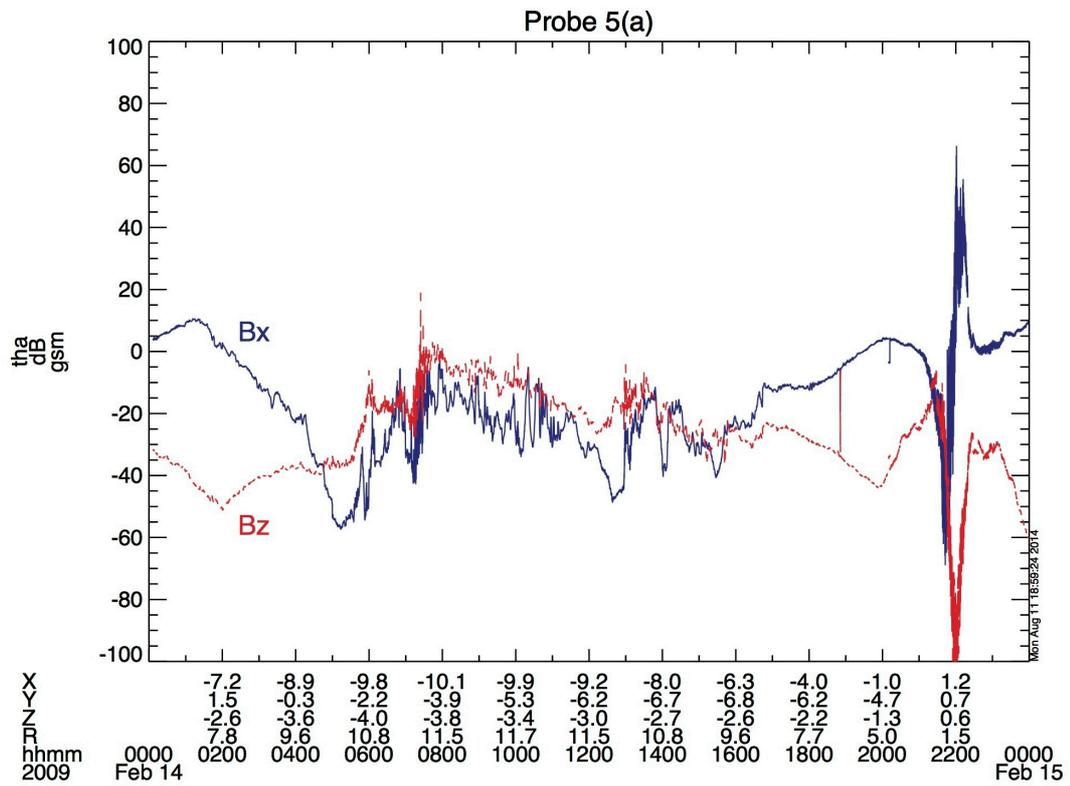


Рисунок 3.14 Радиальное распределение магнитного поля в ночной части магнитосферы, измеренное спутниками THEMIS в течение 00-22 UT 14 февраля 2009 года с вычетом поля внутриземных токов и поля от токов на магнитопаузе.

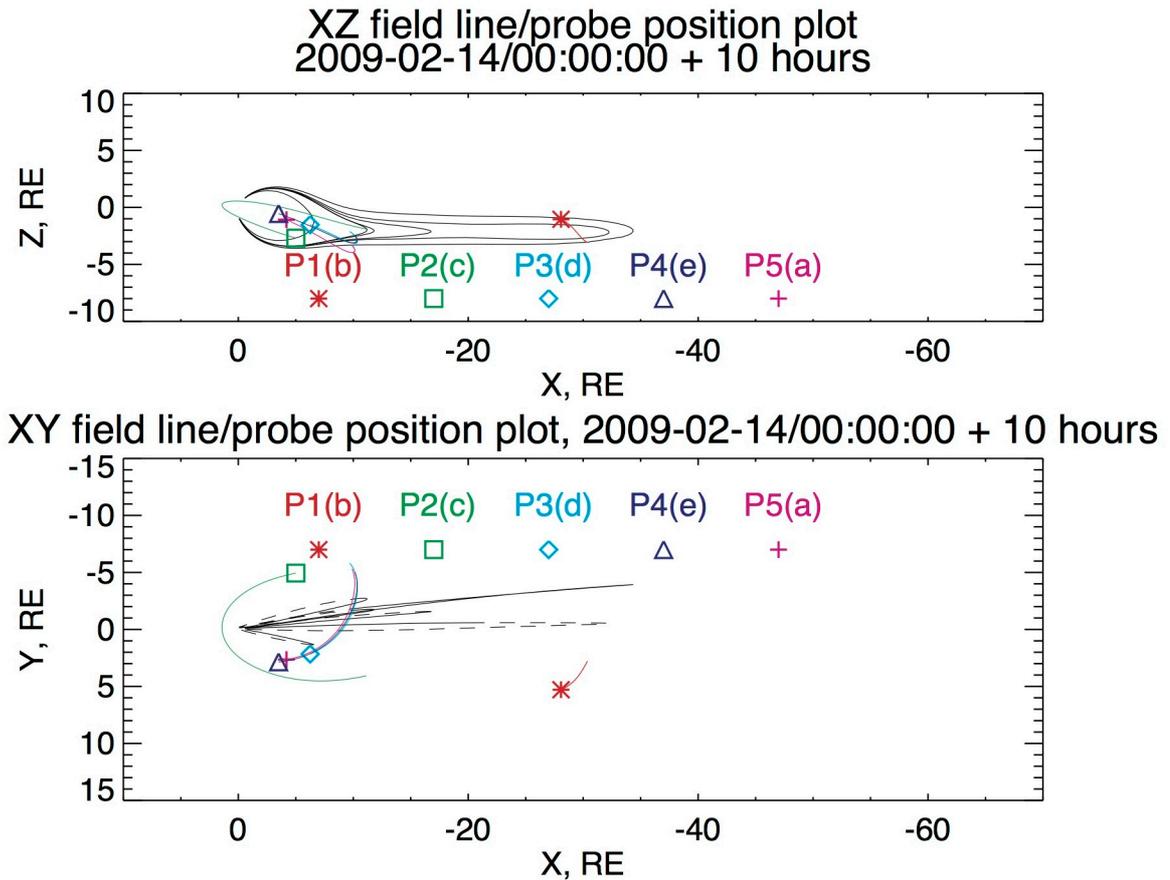
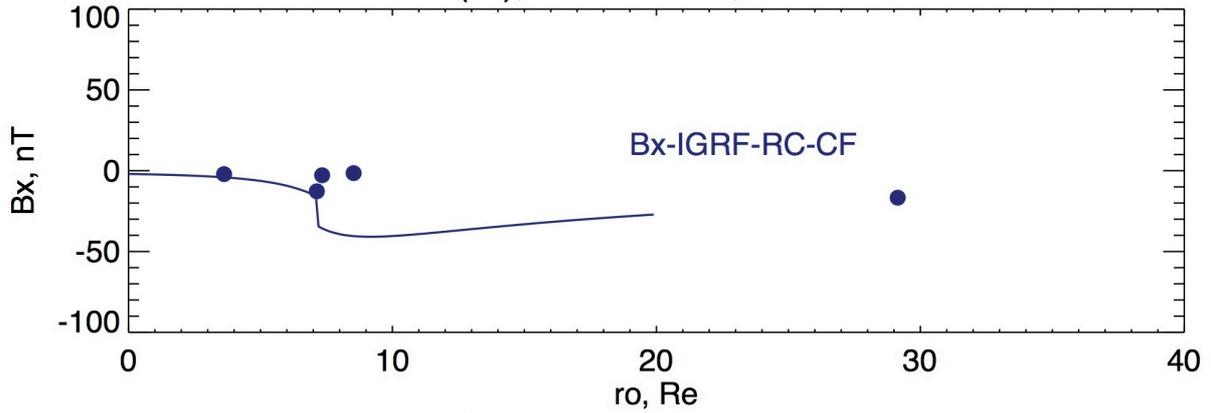


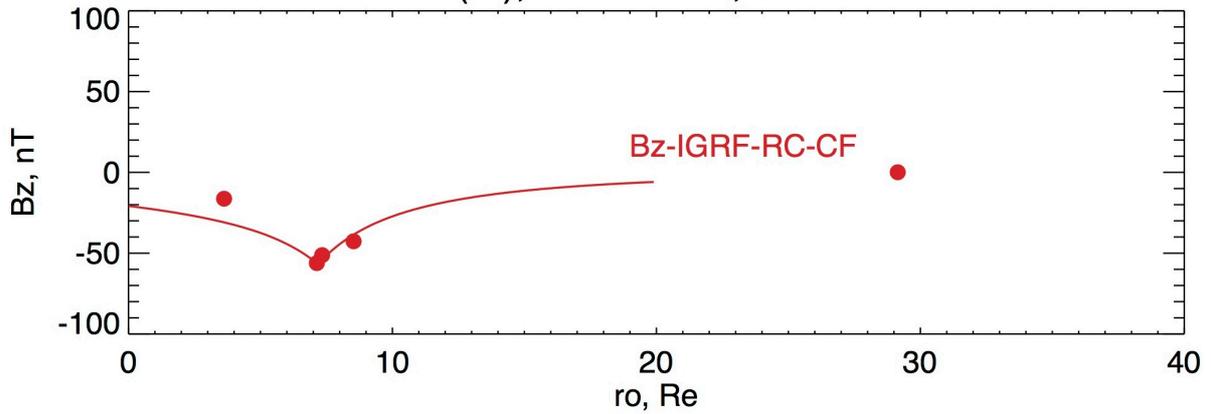
Рисунок 3.15 Траектории спутников в течение 00-10 UT 14 февраля 2009 года. Специальными символами обозначены начальные точки траекторий.

На рисунке 3.16 отображено магнитное поле, одновременно измеренное на всех 5 спутниках THEMIS в 02:00 UT и 04:00 UT во время спокойных геомагнитных условий и в 15:35 UT на фазе восстановления. Синие и красные точки соответствуют  $B_z$  (верхние рисунки) и  $B_x$  (нижние рисунки) компонентам после вычитания вклада от внутриземных токов, токов на магнитопаузе и кольцевого тока, посчитанных при помощи A2000 на основе входных параметров по данным OMNI. Отчетливо выраженный экстремум  $B_z$  обозначает близкое расположение аппаратов к токовому слою. Отчетливо прослеживается регулярная структура магнитного поля, соответствующая сильным токам, протекающим в переднем крае хвоста магнитосферы. Сплошными линиями обозначены модельное (A2000) магнитное поле для следующих параметров:  $R_2 = 7.2 R_E$ ,  $\Phi_\infty = 780$  МВб,  $R_2 = 9.0 R_E$ ,  $\Phi_\infty = 580$  МВб,  $R_2 = 8.6 R_E$ ,  $\Phi_\infty = 1000$  МВб в 02:00 UT, 04:00 UT и 15:35 UT соответственно.

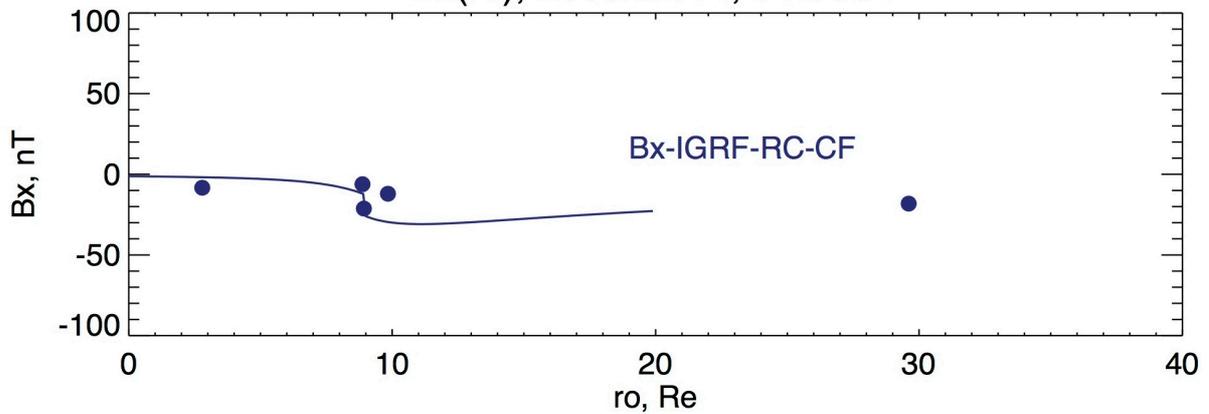
Bx(ro), 2009/02/14, 02:00UT



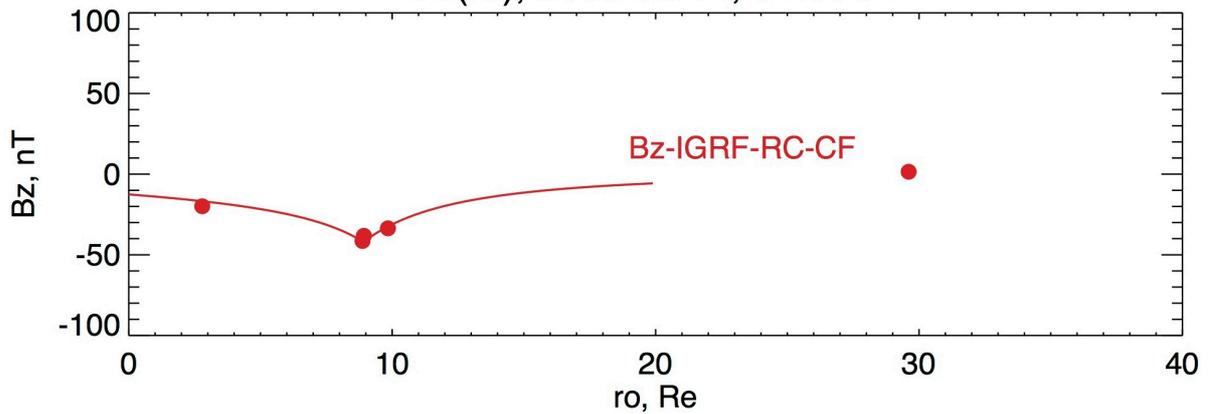
Bz(ro), 2009/02/14, 02:00UT



Bx(ro), 2009/02/14, 04:00UT



Bz(ro), 2009/02/14, 04:00UT



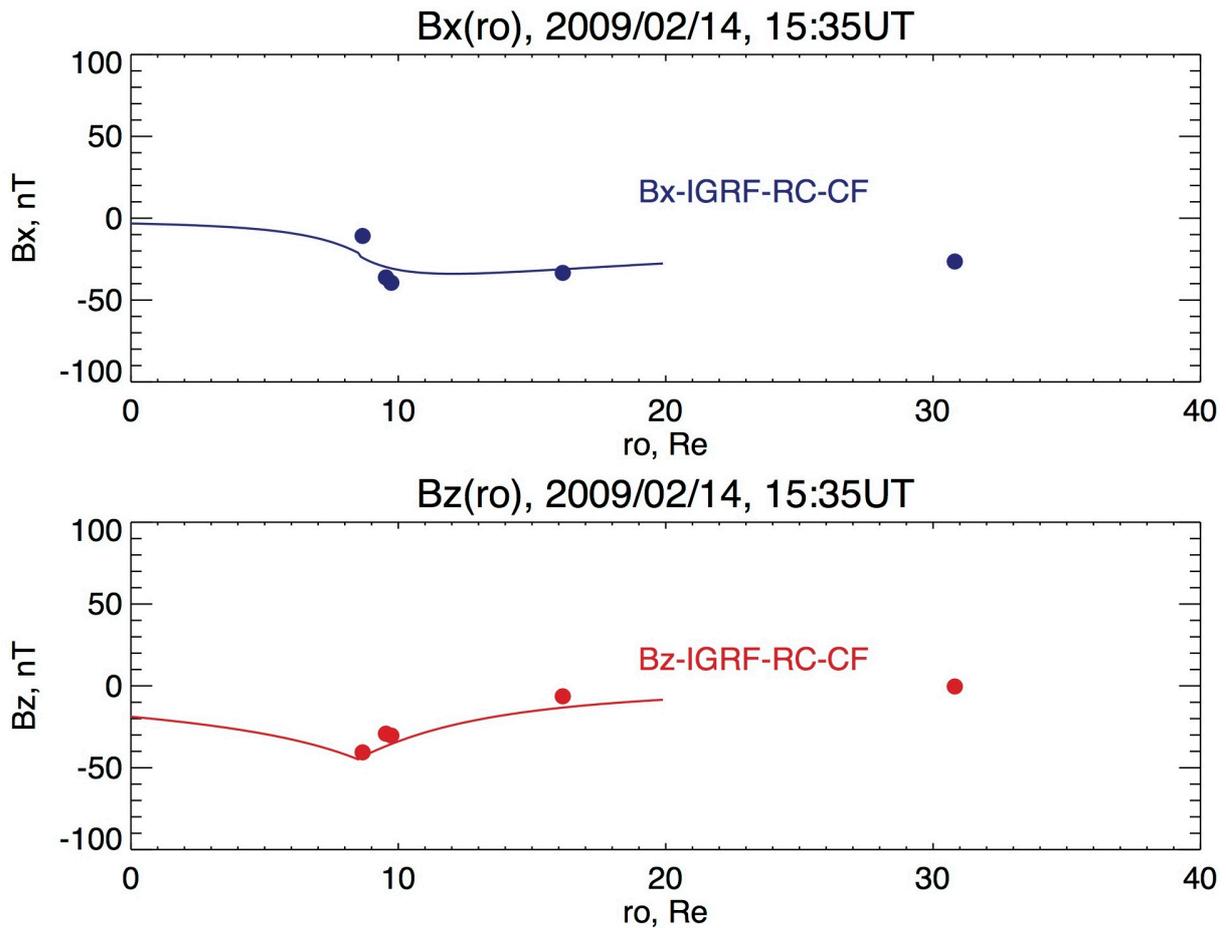


Рисунок 3.16 Распределение поля токов хвоста ( $B_z$  и  $B_x$  компоненты) в 02:00 UT, в 04:00 UT и в 15:35 UT 14 февраля 2009 года.

Изменения измеряемого магнитного поля происходят как из-за движения спутника, так и изменения состояния магнитосферы под воздействием солнечного ветра. В те моменты, когда спутники располагаются удобным образом вдоль хвоста, мы можем определить структуру поля в этой области и соотношения  $B_x$ - $B_z$  компонент в хорошем соответствии с модельными данными (A2000). Полученные при помощи моделирования параметры поля токового слоя хвоста достаточно хорошо описывают магнитное поле в этой области. Из рисунка 3.6 и рисунка 3.16 видно, что во время геомагнитных возмущений 14 февраля 2009 года передний край токового слоя хвоста магнитосферы приблизился к Земле с 12  $R_E$  (что соответствует его положению при спокойных условиях, см. рисунок 3.12) до приблизительно 7  $R_E$  в начале главной фазы бури.

Магнитное возмущение 14 февраля 2009 года было спровоцировано воздействием потока ускоренной плазмы солнечного ветра на магнитосферу Земли. Хотя минимум Dst (около -40 нТл) не типичен для образования бури (< -60 нТл), мы считаем это событие магнитной бурей, так как оно сопровождается стандартными процессами развития бури в ответ на воздействие усиления давления солнечного ветра. Скорость плазмы была около 500 км/с, что достаточно медленно по сравнению с характерной скоростью потока во время окончания фазы

солнечного максимума (600-800 км/с), но ответ магнитосферы был классическим из-за экстремально медленного предшествующего солнечного ветра. Стоит отметить, что рост плотности плазмы солнечного ветра был очень сильный. Обычно условия в солнечном ветре такого уровня вызывают умеренную магнитную бурю. Наш анализ показал сильное магнитное поле, созданное токами геомагнитного хвоста во время бури 14 февраля 2009 года.  $B_x$  и  $B_z$  компоненты поля достигали абсолютных значений в 60 нТл вблизи переднего края токового слоя хвоста магнитосферы.

Относительно малый эффект на поверхности Земли во время бури 14 февраля 2009 года является результатом экстремально низкой солнечной активности в предыдущие дни. Как результат, предбуриное состояние магнитосферы было несколько более «расширенным», чем обычно во время таких бурь и как следствие магнитосферные токовые системы находились дальше от Земли и давали меньший вклад в Dst индекс во время бури.

### 3.5 Выводы

Была изучена структура и динамика магнитного поля (в области хвоста магнитосферы) во время спокойных и возмущенных периодов в 2009 году на основе данных по магнитному полю спутников THEMIS. Радиальный профиль магнитного поля был восстановлен из спутниковых данных при помощи моделирования, за счет которого были исключены вклады от токовых систем, отличных от токов хвоста. Было показано, что передний край токового слоя хвоста магнитосферы при спокойных условиях в солнечном ветре располагается на расстоянии около 10-12  $R_E$  в хвост магнитосферы и магнитное поле в его окрестности составляет около 20 нТл. Во время умеренной магнитной бури 14 февраля 2009 года, передний край токового слоя хвоста магнитосферы приблизился к Земле на расстояние около 7-8  $R_E$ , при этом были зафиксированы сильные токи в геомагнитном хвосте во время главной фазы.  $B_x$  компонента магнитного поля вблизи переднего края токового слоя достигла 60 нТл,  $B_z$  – 60 нТл. Однако сильные токи в геомагнитном хвосте не внесли ощутимого вклада в Dst индекс. Объяснение этого явления связано с тем, что экстремально спокойные условия в солнечном ветре, привели к смещению магнитосферных токовых систем (в том числе – токов хвоста магнитосферы) дальше от Земли, ао сравнению с «обычными» условиями. На поверхности Земли были зафиксированы лишь небольшие возмущения внутри «расширенной» магнитосферы.

## Глава 4. Формирование переходной токовой системы вблизи переднего края тока хвоста магнитосферы

В главе будет рассмотрено образование интенсивного радиально-локализованного тока около переднего края токового слоя хвоста магнитосферы во время рассмотренного выше геомагнитного возмущения 14 февраля 2009 года. Этот ток возник для поддержания магнитного потока сквозь доли хвоста вследствие плавного усиления давления солнечного ветра (СВ) и уменьшения размеров внутренней магнитосферы.

### 4.1 Обзор, анализ и моделирование

Магнитосферное магнитное поле порождается двумя источниками разной природы: токами, текущими в жидком ядре Земли (внутриземное поле,  $B_{in}$ ) и крупномасштабными токами, текущими в магнитосфере. При этом, наряду с регулярными, постоянно присутствующими в магнитосфере крупномасштабными токами, описанными во второй главе, существуют и токовые системы другого типа. Магнитосферные токи меняются в ответ на изменения параметров межпланетной среды. При таких изменениях в магнитосфере могут возникать короткоживущие переходные системы ( $B_{trans}$ ), которые способствуют более быстрой перестройке магнитного поля, переходу от одной равновесной конфигурации к другой. Теперь магнитное поле может быть представлено в виде:

$$B = B_{in} + B_{CF} + B_r + B_t + B_{fac} + B_{trans} \quad (4.1)$$

где также представлены регулярные источники магнитосферного поля - токи Чепмена–Ферраро на магнитопаузе ( $B_{CF}$ ), кольцевой ток ( $B_r$ ), ток хвоста магнитосферы ( $B_t$ ), продольные токи ( $B_{fac}$ ).

В ходе геомагнитных возмущений происходит перестройка магнитосферы, связанная с воздействием солнечного ветра. При этом следует ожидать формирования короткоживущих переходных токовых систем, которые дают вклад в общее магнитное поле, измеряемое на спутнике. При медленном сжатии магнитосферы 14.02.2009 могли сформироваться такие токовые системы. В таком случае на рисунке 4.4б мы видим не поле хвоста, а суммарное поле токов хвоста и эффекты переходных токовых систем.

Рассмотрим структуру магнитного поля токов хвоста полученных на основании данных THEMIS P5, а также P3 и P4, которые представлены на рисунках 3.7 и 3.14. Можно видеть, что

накануне главной фазы возмущения она отличается от полученной в спокойных условиях: минимум  $B_z$  не соответствует области максимального изменения  $B_x$ . Расстояние между экстремумами  $B_x$  и  $B_z$  составляет около  $3 R_E$ . Этот участок орбиты спутник P5 преодолел за время от 2 UT до 6 UT когда наблюдался постепенный рост давления солнечного ветра. Из рисунков 3.14 видно, что минимумы  $B_z$ -компоненты токов хвоста не соответствуют  $B_x$  компоненте вдоль орбит всех 3 спутников P3, P4, P5. Минимумы  $B_z$  обнаружены в различные моменты времени, но примерно на одинаковом расстоянии от Земли, около  $7 R_E$  и в  $3 R_E$  от переднего края токового слоя, идентифицируемого нами по  $B_x$  компоненте.

Радиально-локализованный ток, протекающий с утра на вечер поперек внутренней части геомагнитного хвоста может объяснить наши наблюдения: он дает распределение  $B_z$  компоненты магнитного поля в виде синусоидальной функции: мы увидим отрицательное значение  $B_z$  в направлении к Земле и положительное - в сторону хвоста. Таким образом, такой ток уменьшил бы амплитуду  $B_z$  магнитного поля хвоста вблизи переднего края и увеличил бы ее во внутренней магнитосфере.

На рисунке 4.1 изображено 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.

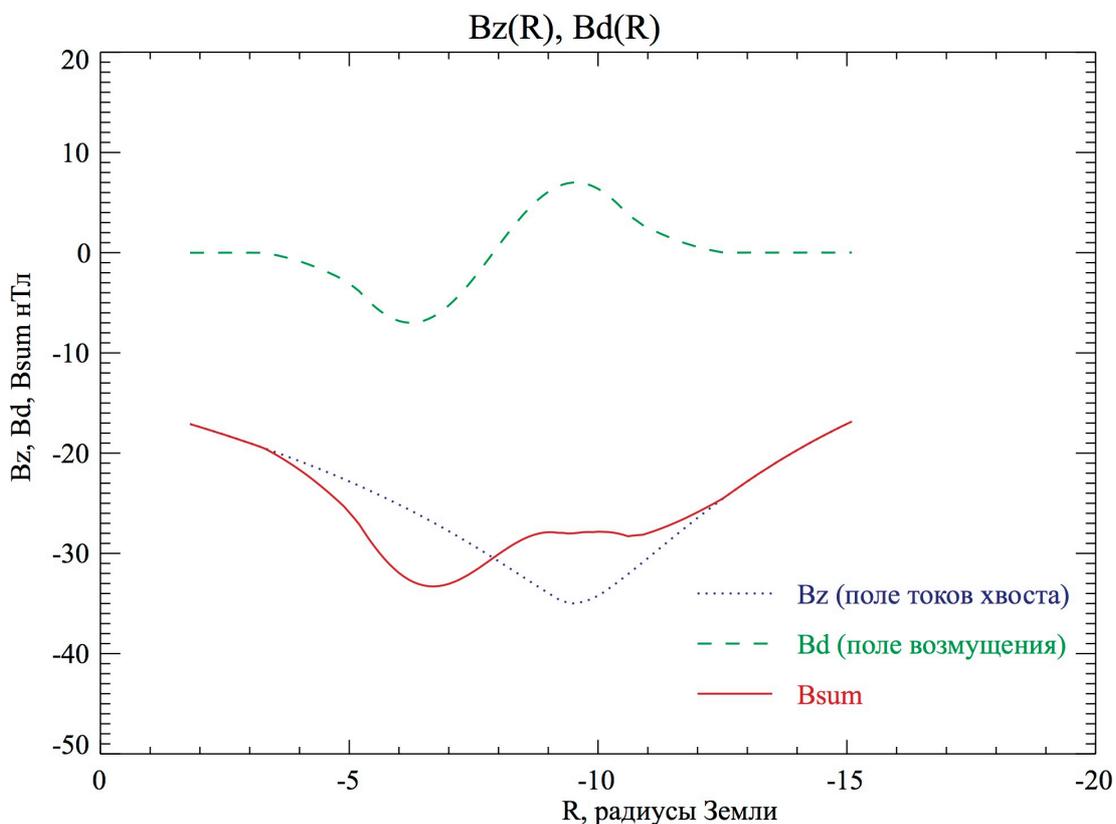


Рисунок 4.1  $B_z$  компонента магнитного поля (сплошная красная линия) вдоль геомагнитного хвоста, полученная при помощи наложения магнитного поля от токов хвоста (синяя линия из точек) и радиально-локализованного тока поперек хвоста (пунктирная зеленая линия)

Мы предполагаем, что происхождение такого тока может быть результатом плавного возрастания давления солнечного ветра. Плотность СВ начала расти в 02 UT 14 февраля. Рост давления сопровождался сжатием магнитосферы с ожидаемым уменьшением сечения хвоста магнитосферы [Stern and Alexeev, 1988] предположили, что магнитный поток сквозь доли хвоста (около 400 МВб) сохраняется в ходе медленных адиабатических изменений в магнитосфере. Электрический ток в хвосте должен увеличиваться в соответствии с магнитосферными пространственными вариациями, чтобы предотвратить уменьшение магнитного потока в долях хвоста с уменьшением его поперечника. Так как ток в хвосте магнитосферы Земли распространяется ночную сторону по крайней мере до орбиты Луны и, следовательно, относительно медленно реагирует на внешние изменения в СВ, то можно предположить, что сразу после сжатия магнитосферы Земли "корректирующий" ток, текущий в направлении утро-вечер, возникает, в первую очередь, вблизи переднего края хвоста. Это радиально-локализованный индукционный ток поперек хвоста, замыкающийся через экваториальную дневную магнитопаузу, так называемый, ток Кауфмана [Kaufmann, 1987]. Он создает магнитное возмущение в дополнении к магнитному полю от токов хвоста, которые текут поперек хвоста вдоль переднего края и замыкаются через магнитопаузу. «Корректирующая» токовая система распространяется со временем в область удаленного хвоста. После того, как внешнее давление выйдет на постоянный уровень, эта новая временная токовая система исчезнет, и усиленный ток в хвосте будет поддерживать стандартный по величине магнитный поток. На рисунке 4.2 представлены силовые линии магнитного поля в плоскости полдень-полночь, рассчитанные в момент максимального сжатия магнитосферы солнечным ветром (07:00 UT, 14.02.2009). Сближение силовых линий в ночной магнитосфере свидетельствует об усилении тока геомагнитного хвоста вследствие усиления динамического давления солнечного ветра.

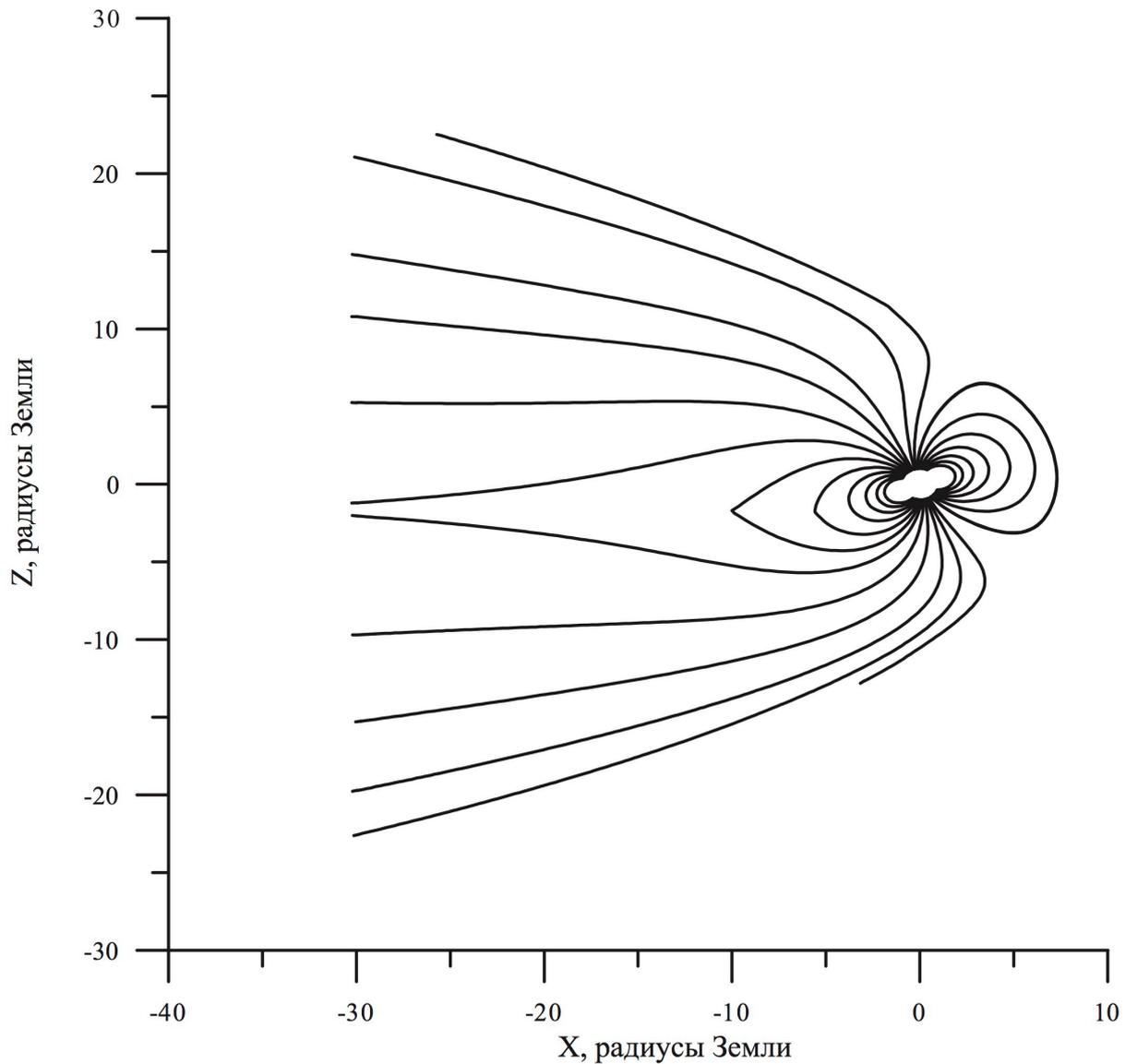


Рисунок 4.2 Силовые линии магнитного поля в плоскости  $XZ$  GSM, рассчитанные в момент максимального сжатия магнитосферы солнечным ветром.

Оценим электрический ток переходной круговой токовой системы. Как мы видим по спутниковым данным, этот ток примерно расположен на расстоянии  $8.5 R_E$  и на расстоянии примерно в  $\delta r = 1.5 R_E$  дает нам магнитное поле  $\delta B = 10$  нТл. Такое возмущение может быть создано линейным током поперек хвоста:

$$I = \frac{2\pi\delta r\delta B}{\mu_0} \sim 0.5 \text{ MA} \quad (4.2)$$

Таким образом, данные измерений THEMIS показывают, что при плавном сжатии магнитосферы во время подготовительной фазы бури 14.02.2009 наблюдалась переходная

токовая система, которая внесла свой вклад в результирующее магнитное поле, наблюдаемое на спутнике.

Следует отметить, что для реализации данного сценария необходимо, чтобы сжатие магнитосферы происходило медленно, приводя к плавным адиабатическим изменениям магнитосферного магнитного поля. Внезапные импульсы давления, связанные с распространением межпланетных ударных волн, приводят к резким изменениям условий в магнитосфере, переводя ее в неравновесное состояние. При этом изменяется величина магнитного потока через доли хвоста, а «корректирующая» переходная токовая система не возникает. Подобная задача рассмотрена в [Сомов, 2011] для случая взаимодействия ударной волны большой амплитуды с магнитным полем компактного релятивистского объекта, например нейтронной звезды. При таком взаимодействии возникает неравновесная магнитосфера с обратным током в переднем крае токового слоя хвоста.

## 4.2 Выводы

Необычная структура магнитного поля от токов в хвосте с  $B_z = -60$  нТл и небольшой по величине  $B_x$  компонентой была зафиксирована во внутренней магнитосфере на расстоянии около  $7 R_E X_{GSM}$  до начала и в течение начальной фазы умеренной бури. Показано, что такая структура магнитного поля вблизи переднего края токового слоя хвоста может быть связана с формированием переходной токовой системы в магнитосфере. Круговой ток в экваториальной плоскости возникает перед началом бури в ходе адиабатического сжатия магнитосферы солнечным ветром для поддержания магнитного потока сквозь доли хвоста. Протекающий ток оценивается примерно в 500 кА.

## **Глава 5. Формирование структуры магнитного поля с отрицательными значениями $B_z$ компоненты в передней части геомагнитного хвоста во время бури 14 февраля 2009**

Во время геомагнитной бури развитие крупномасштабных токовых систем в магнитосфере может способствовать образованию специфичных структур в магнитном поле, которые не существуют в спокойной магнитосфере. Их временные и пространственные характеристики являются проявлениями динамики различных токовых систем. Одним из характерных явлений, происходящих в хвосте возмущенной магнитосферы является формирование структур типа фронта диполизации, и магнитных образований замкнутого типа. В данной главе будет исследована динамика магнитного поля во время геомагнитного возмущения 14 февраля 2009 года, в ходе которого измерения спутников THEMIS показали в начале главной фазы наличие в хвосте магнитосферы отрицательной  $B_z$  компоненты магнитного поля [Калегаев и Назарков, 2016]. Такие магнитные конфигурации свидетельствуют о формировании магнитного острова, связанного с чрезмерным усилением магнитного потока через доли хвоста магнитосферы.

### **5.1 Обзор, анализ и моделирование**

Около 06:00 UT 14 февраля 2009 года, во время максимума SSC,  $B_z$  компонента магнитного поля на спутнике P5 стала отрицательной (рисунок 3.6). Похожую ситуацию видно также на спутниках P3, P4 (рисунок 5.1). Эти спутники были вблизи переднего края токового слоя: P4 и P5 находились приблизительно в месте с координатами  $X_{GSM} \sim$  от -9.5 до -10  $R_E$ ,  $Y_{GSM} \sim 0 R_E$ , тогда как P3 находился там же по  $X_{GSM}$ , но  $Y_{GSM} \sim 5 R_E$ . Отрицательное значение  $B_z$  означает формирование нетипичных структур магнитного поля в хвосте магнитосферы. Такое явление могло произойти из-за сильно неадиабатического изменения токовых систем [*Stern and Alexeev, 1988; Hau and Voigt, 1992*].

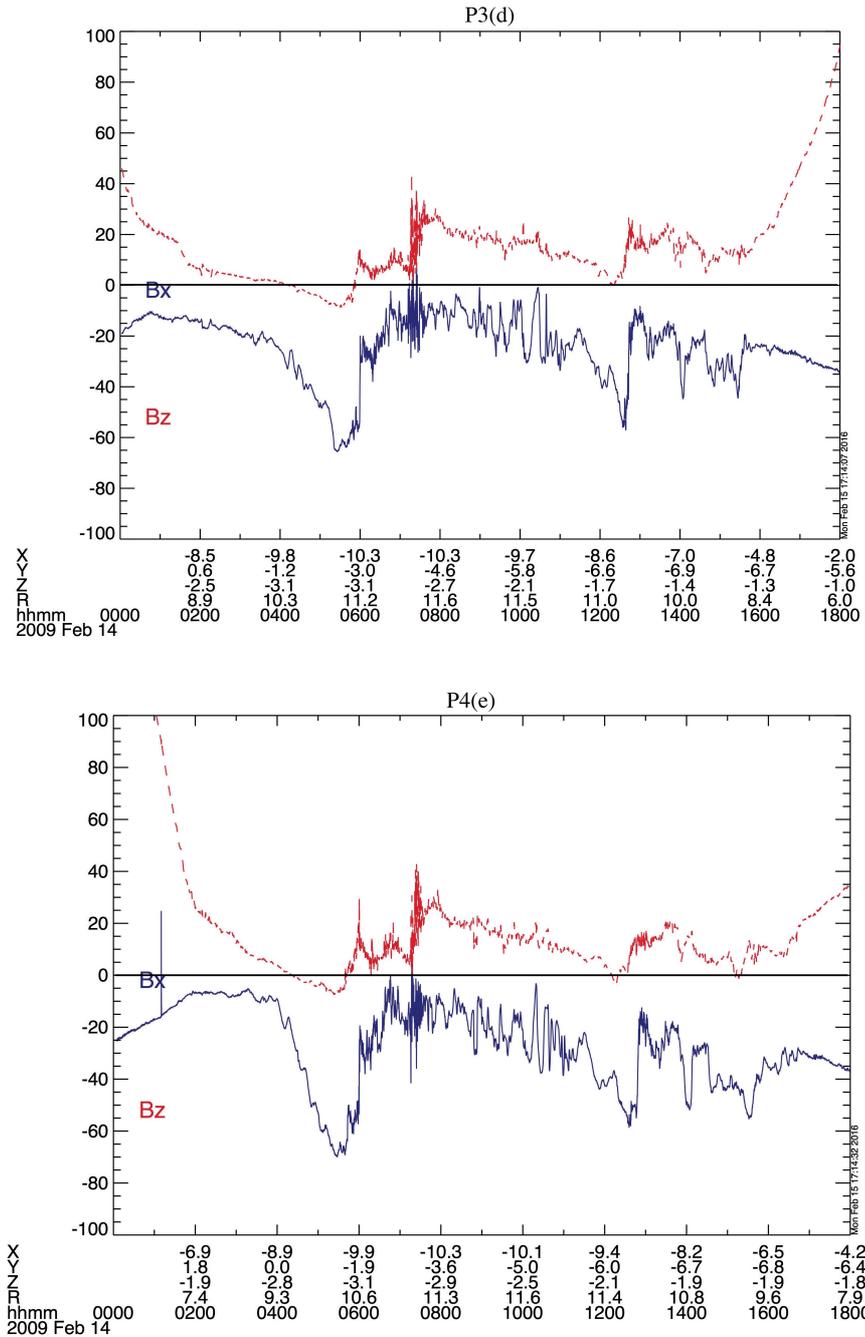


Рисунок 5.1 Компоненты магнитного поля измеренного вдоль орбиты THEMIS P3-4 14.02.2009 ( $B_x$  – синяя сплошная линия,  $B_z$  – красная пунктирная).

Проведем качественный анализ этой ситуации в рамках простой модели. На рисунке 5.2 показан радиальный профиль  $B_z$  компоненты поля, являющегося суперпозицией поля Земли ( $B_{dip}$ ) и типичного поля токов хвоста ( $B_{tail}$ ).  $B_z$  компонента поля  $B_{tail}$  отрицательна, поля  $B_{dip}$  положительна. Обычно дипольное магнитное поле Земли больше, чем поле токов хвоста и в результате суммарная  $B_z$  компонента положительна, как на верхнем рисунке. Пунктирная линия – это поле токов хвоста с противоположным знаком, представленное для удобства сравнения в поле 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 то время как максимум магнитного поля токов хвоста расположен на расстоянии  $\sim 7 R_E$  его поле должно быть около 100 нТл, чтобы превысить поле Земли. Если же максимум располагается на расстоянии около  $10 R_E$ , то в данном случае потребуется поле токов хвоста лишь в 30 нТл. 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.

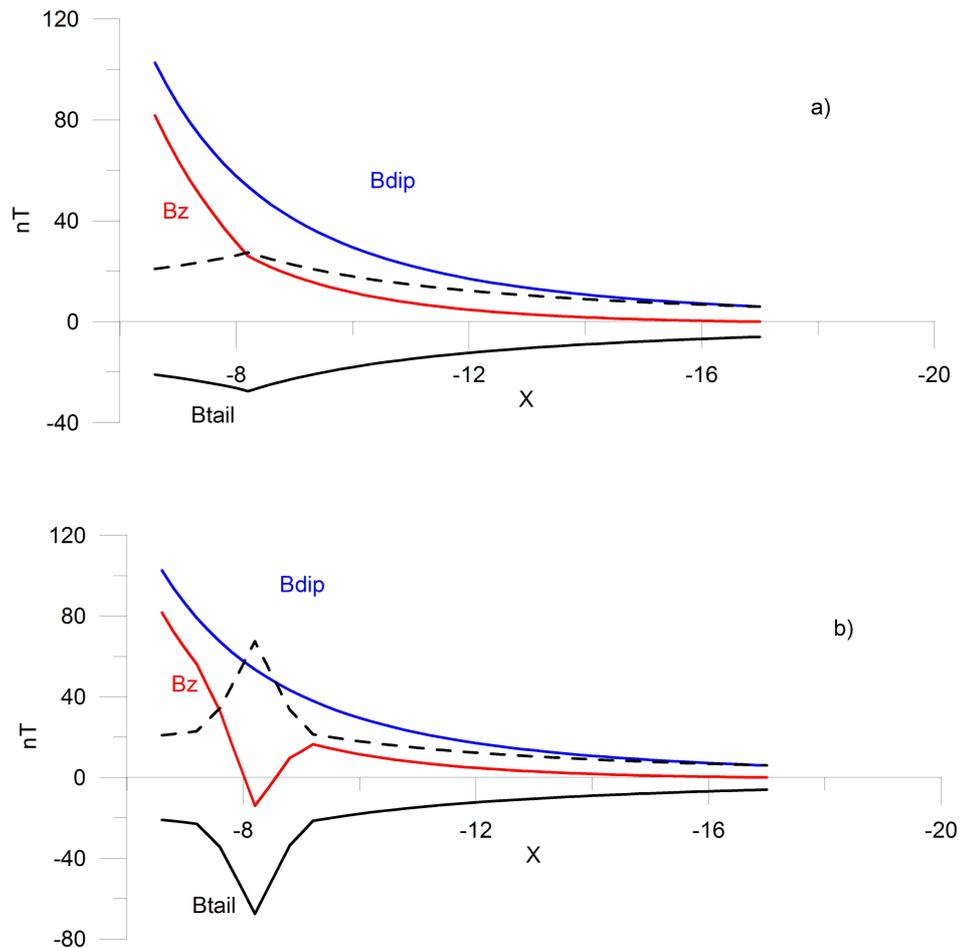


Рисунок 5.2 Структура магнитного поля, полученная суперпозицией поля Земли и токов хвоста. Поле Земли – синие линии, поле токов хвоста – красные, суммарное поле – черные, “перевернутое” поле хвоста – черные пунктирные и представлено для сравнения с полем Земли. Верхний рисунок: типичная ситуация со слабым полем токов хвоста. Нижний рисунок: усиленное поле токов хвоста, что в результате дает отрицательное суммарное поле.

Можно оценить граничное значение магнитного потока, который разделяет обычную структуру магнитного поля в хвосте от специфичной. В параболической модели A2000

магнитное поле вблизи переднего края токового слоя хвоста  $b_t$  и поле диполя Земли  $b_d$  рассчитываются так [Alexeev et al., 2001]:

$$b_t = \frac{2\Phi_\infty\sqrt{R_1}}{\pi R_1^2\sqrt{2R_1+R_2}} \quad (5.1)$$

$$b_d = \frac{B_0}{R_2^3} \quad (5.2)$$

Если  $b_t = b_d$ , то мы можем оценить критическое значение магнитного потока:

$$\Phi_{\infty,tr} = \frac{B_0\pi\sqrt{R_1^3(2R_1+R_2)}}{2R_2^3} \quad (5.3)$$

и если поток превышает граничное значение, то возникает ситуация с суммарным отрицательным  $B_z$ . Мы пренебрегли токами Чепмена-Ферраро и кольцевым током. Граничное значение потока тем меньше, чем меньше  $R_1$  и больше  $R_2$ . Фактически, это условия по время SSC, когда магнитосферные токовые системы (токи хвоста и кольцевой ток) еще находятся в невозмущенном состоянии, но уже происходит поджатие магнитосферы.

Оценим соотношение между магнитным потоком сквозь доли геомагнитного хвоста и его критическим значением во время бури 14 февраля 2009. Мы рассчитали параметры модели по данным солнечного ветра и геомагнитным индексам через субмодели или использовали прямые измерения параметров, когда это возможно. Значения  $R_2$  были рассчитаны проектированием приэкваториальной границы аврорального овала в полночь (формула 3.3 главы 3) в токовый слой хвоста в «реальном» магнитном поле, рассчитанным по модели A2000.

Наиболее важным параметром, определяющим структуру магнитосферы, является расстояние до подсолнечной точки  $R_1$ . Все источники магнитного поля, кроме поля Земли и кольцевого тока, зависят от этого параметра. На первом шаге мы рассчитывали  $R_1$  используя [Shue et al., 1998] модель. Следующим шагом была корректировка этих значений на основе баланса давлений в подсолнечной точке:

$$2kP = B_0^2/2\mu_0 \quad (5.4)$$

где  $P$  – динамическое давление солнечного ветра,  $B_0$  – магнитосферное магнитное поле в подсолнечной точке и  $k = 0.88$  – фактор, отображающий эластичность взаимодействия между солнечным ветром и магнитосферой [Spreiter et al., 1966]. Из-за зависимости давления

магнитного поля от самого параметра  $R_1$ , мы выполняли несколько итераций для того, чтобы получить наиболее точное значение  $R_1$ .

На рисунке 5.3 показаны значения  $R_1$ ,  $R_2$ , магнитного потока сквозь доли геомагнитного хвоста в течение магнитной бури и граничное значение, рассчитанное по формуле 5.3, для каждого часа времени по мгновенным рассчитанным значениям  $R_1$ ,  $R_2$ . Видно, что магнитный поток, рассчитанный по модели A2000, превышает граничный в течение нескольких часов во время фазы SSC. Не смотря на то, что точность интервала времени больше точности уравнения 5.3, мы можем ожидать, что во время SSC отрицательное значение  $B_z$  вблизи переднего края токового слоя хвоста магнитосферы может возникнуть магнитный остров. Вышеупомянутый отрицательный минимум  $B_z$  компоненты магнитного поля действительно появился в смоделированном геомагнитном хвосте, как ожидалось.

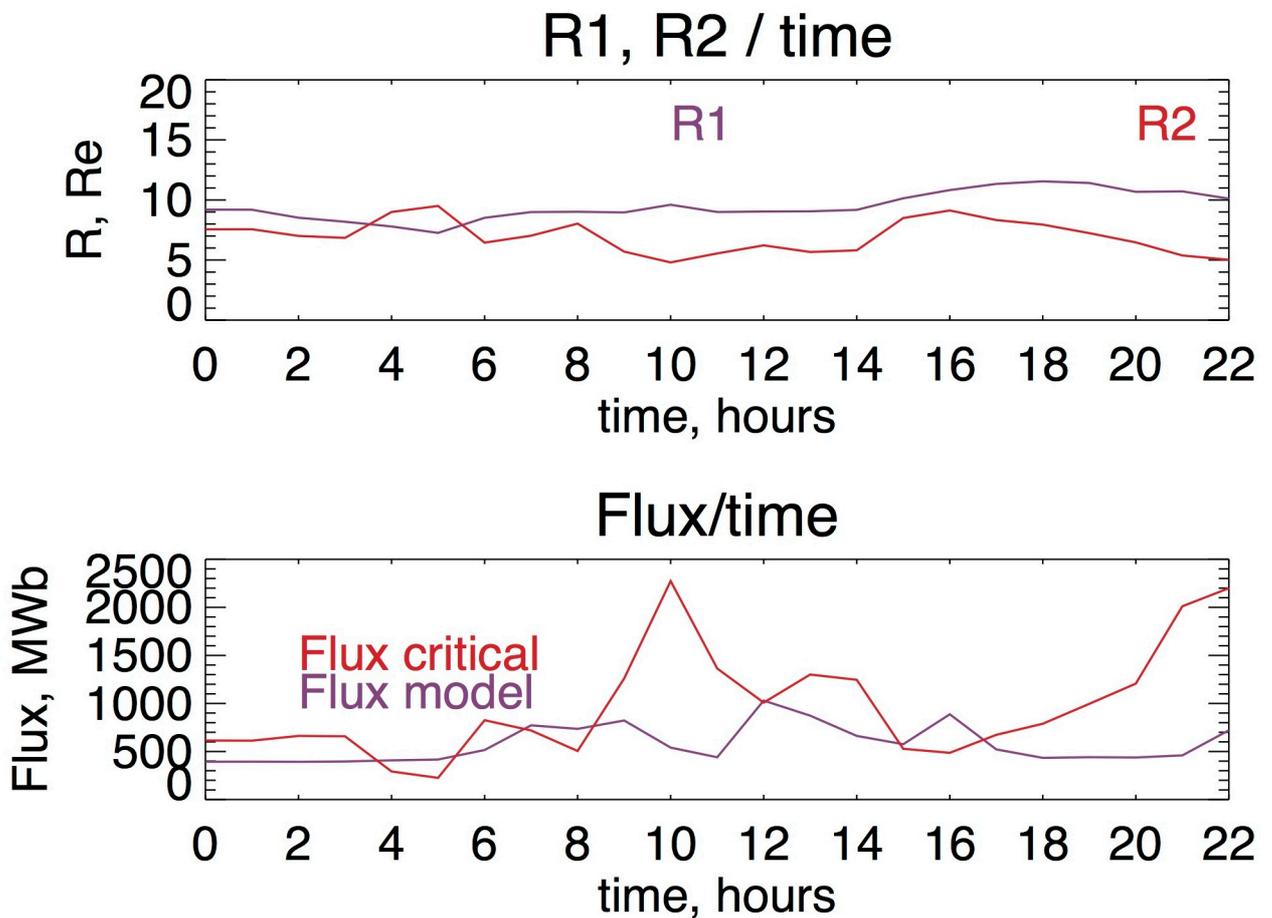


Рисунок 5.3 Магнитный поток сквозь доли хвоста в течение магнитной бури 14 февраля 2009 года (временной масштаб - 00-22 UT 14 февраля 2009) и граничное значение, рассчитанное для каждого часа времени по полученным при помощи модели A2000 мгновенным значениям параметров  $R_1$  и  $R_2$ .

На рисунке 5.4 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. Во время суббури 14 февраля 2009 года образовалось несколько областей с пониженным магнитным полем. Возможно, что они также сопровождалось образованием магнитных островов около 12 UT и 16 UT.

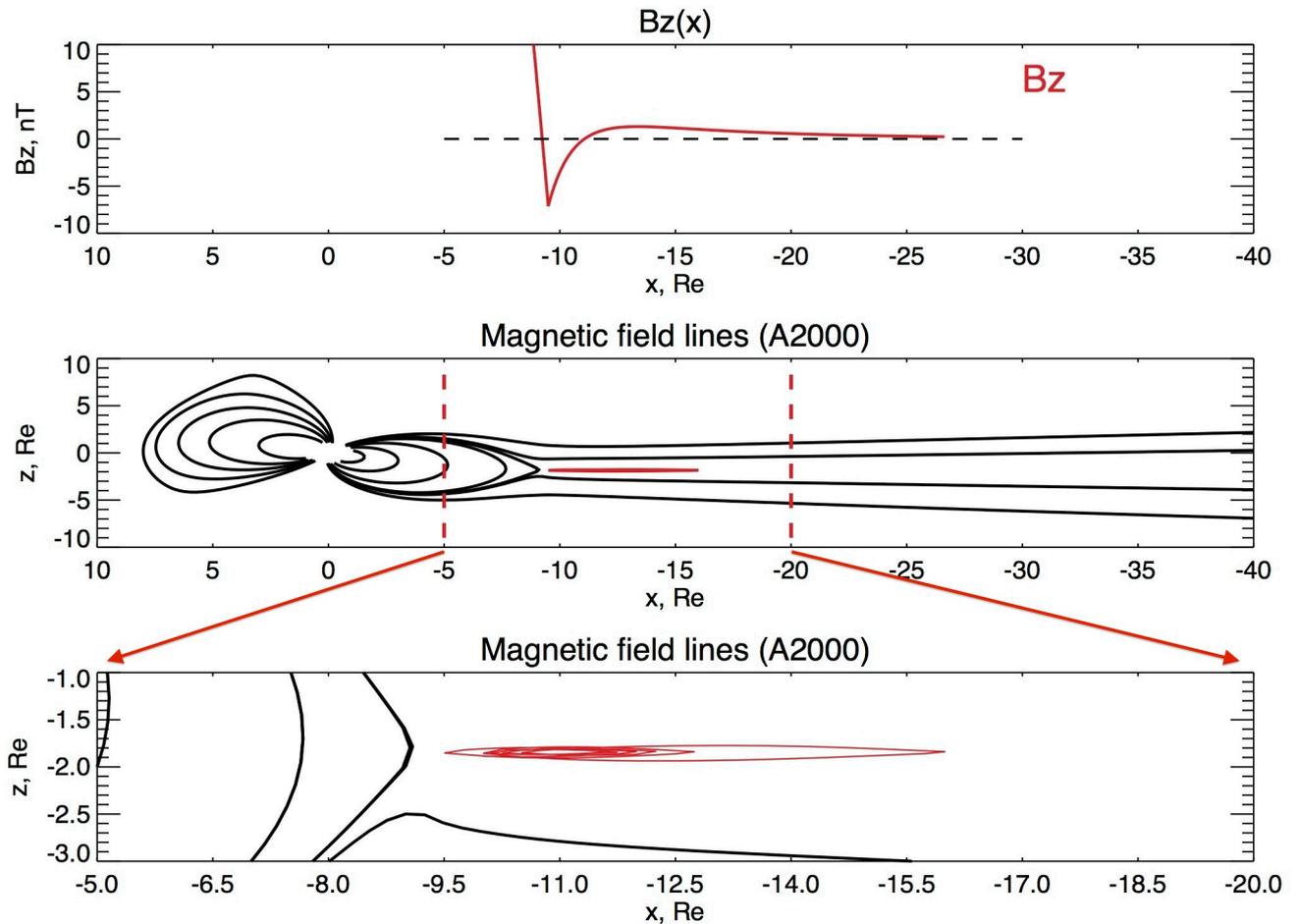


Рисунок 5.4 Распределение  $B_z$  компоненты магнитного поля вдоль оси  $X_{GSM}$  м и структура магнитного поля в 7 UT 14 февраля 2009 года, рассчитанная при помощи магнитосферной модели A2000.

## 5.2 Выводы

Изучена структура и динамика магнитного поля в магнитосфере во время магнитной бури 14.02.09 на основе данных спутников THEMIS и магнитосферного моделирования.

Была исследована структура  $B_z$  компоненты магнитного поля по данным THEMIS во время SSC бури 14 февраля 2009 года. Было показано, что геомагнитные условия в 2009 году,

которые способствовали расширению магнитосферы, были благоприятны для образования структур магнитное поля с отрицательной  $B_z$  компонентой в области геомагнитного хвоста. Магнитные острова возникали, когда магнитный поток сквозь доли хвоста превышал граничный поток. Этот механизм преобразовывал магнитный поток сквозь доли хвоста в замкнутые магнитные структуры (магнитные острова) и предотвращал сильное развитие магнитного поля в хвосте.

## Глава 6. Динамика кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время магнитной бури 27-28 февраля 2014

В данной главе, на основе многоспутниковых наблюдений, будет выполнен сравнительный анализ динамики кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время геомагнитной бури 27 февраля 2014. Используются одновременные экспериментальные данные по потокам ионов с энергией от  $\sim 30$  до  $\sim 250$  кэВ в приэкваториальной области магнитосферы на высотах до 30000 км с ИСЗ Van Allen Probes и на полярной орбите до 1000 км с ИСЗ POES. Во время главной фазы бури наблюдаются возрастание потоков ионов с  $E < 100$  кэВ и спад потоков с  $E > 100$  кэВ как в области кольцевого тока, так и в приэкваториальной области на низкой орбите, отражающие смягчение спектра частиц кольцевого тока на главной фазе бури. Наблюдаемое явление может быть вызвано регистрируемыми ИСЗ POES высыпаниями частиц кольцевого тока ниже границы изотропизации. Показано, что вариации потоков ионов на низкой орбите во время геомагнитной бури в целом отражают динамику кольцевого тока, хотя в каждой исследуемой области наблюдаются свои особенности, которые дополняют общую картину динамики магнитосферы Земли.

### 6.1 Введение

Магнитная буря связана с глобальной перестройкой магнитосферы под воздействием изменяющихся условий в солнечном ветре. При этом происходит развитие буревых магнитосферных токовых систем: токи на магнитопаузе, кольцевой ток, токи хвоста магнитосферы, продольные токи, - которые формируют новое состояние магнитосферы. Несинхронное развитие вышеприведенных токовых систем обуславливает сложную динамику магнитосферного поля [Alexeev et al., 1996].

Основной вклад в развитие магнитной бури в магнитосфере Земли вносят токи геомагнитного хвоста и кольцевой ток (КТ). Именно они ответственны за характерную депрессию измеряемого на поверхности Земли магнитного поля, за вариацию *Dst*-индекса. Соотношение между вкладами этих токовых систем зависит от мощности бури и, из-за невозможности разделить эффекты магнитосферных токов в спутниковых измерениях, определяется, главным образом, благодаря использованию моделей магнитосферы [Kalegaev and Makarenkov, 2008].

Только прямые измерения позволяют получить достоверную информацию о структуре и динамике КТ. Такие исследования проводилось, как вблизи экваториальной плоскости, так и на

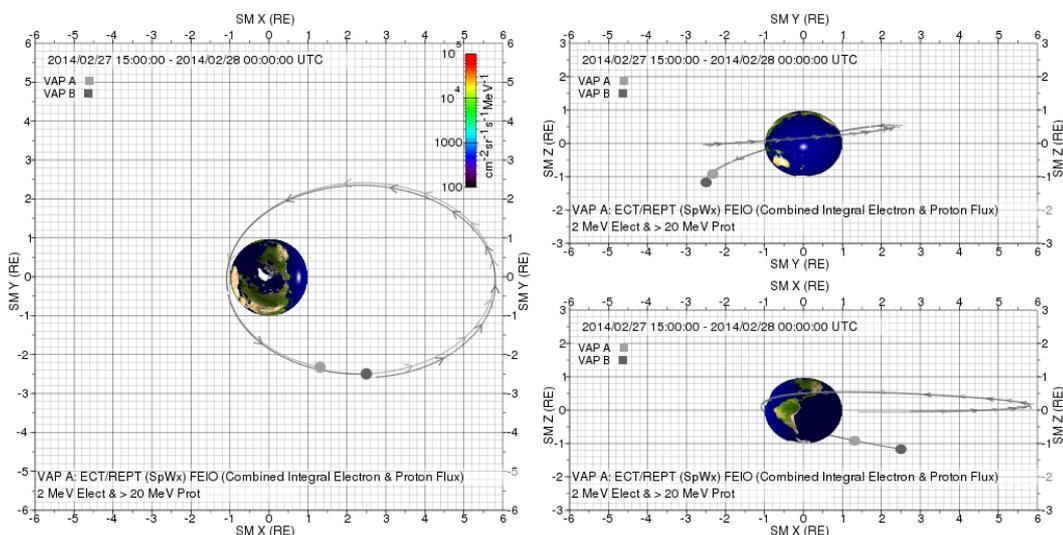
средних широтах (см., например, обзор [Ковтюх, 2001]). К сожалению, практически все космические эксперименты, в которых может быть непосредственно исследован кольцевой ток, имеют ограниченную продолжительность. Кроме того, измерения на единичном аппарате не позволяют разделить эффекты, связанные с движением спутника и с собственной динамикой магнитосферы. Новые возможности открываются на основе данных многоспутниковых миссий, таких как Themis, Van Allen Probes, 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 либо опровергнуть результаты модельных расчетов.

В настоящей главе приведены результаты исследований динамики кольцевого тока во время магнитной бури на основе одновременных измерений потоков частиц в окрестности экваториальной плоскости магнитосферы и на низких орбитах. В 2012 г. стартовал космический проект НАСА по изучению радиационных поясов Земли — Van Allen Probes (ранее Radiation Belt Storm Probes, RBSP), при этом длительность основной миссии запланирована только на 2 года. В то же время, начиная с 1998 года, на малых высотах постоянно функционируют несколько ИСЗ NOAA серии POES с приборами, измеряющими потоки ионов, в том числе, в диапазоне энергий частиц кольцевого тока. Такие измерения могут стать важным дополнением к данным миссии Van Allen Probes. Спутниками POES в экваториальной плоскости регистрируются возрастания потоков частиц в геомагнитно-возмущенные периоды, названные буревым экваториальным поясом (storm time equatorial belt – STEB) (см., например, [Søråas et al., 2002]). Предполагается, что это явление обусловлено двойной перезарядкой частиц КТ: вначале рождением энергичных нейтральных атомов (ЭНА) при перезарядке частиц КТ на нейтралах экзосферы, затем взаимодействием движущихся к Земле ЭНА с ионосферными частицами. В работе [Søråas et al., 2003] показано, что вариации потоков частиц, регистрируемых вблизи экватора на низких орбитах, являются отражением динамики кольцевого тока. Сопоставление потоков частиц с энергией 30-240 кэВ на орбите аппаратов Van Allen Probes и на орбитах спутников NOAA POES в период их одновременного функционирования позволит экспериментально проверить эту концепцию.

Целью исследований является изучение динамики кольцевого тока во время геомагнитной бури 27.02.2014. На основе сравнительного анализа вариаций потоков ионов во внутренней магнитосфере (вблизи геомагнитного экватора) и на малых высотах будет проверена возможность диагностики состояния кольцевого тока во время геомагнитной бури по данным с полярных космических аппаратов.

Результаты и расчеты в данной главе основаны на экспериментальных данных, полученных с ИСЗ Van Allen Probes и ИСЗ POES 18 и 19.

Van Allen Probes (ранее Radiation Belt Storm Probes, RBSP) — космический проект НАСА по изучению радиационных поясов Земли [<http://vanallenprobes.jhuapl.edu/index.php>]. Проект состоит из 2 идентичных по конструкции и взаимозаменяемости спутников (RBSP -а и -b), которые были запущены на высокоэллиптическую орбиту с небольшим интервалом между ними 30 августа 2012. Элементы орбиты: наклонение  $-10^\circ$ ; период обращения - 9 часов; апогей  $\sim 6 R_E$ ; перигей  $\sim 600-700$  км (рисунок 6.1, сверху). Ось вращения КА стабилизирована и направлена на Солнце. В представленных исследованиях используются 11-ти секундные данные прибора MagEIS (Magnetic Electron Ion Spectrometer) [Spence et al., 2013]. Апертурная ось прибора направлена от Солнца под углом  $75^\circ$  к оси вращения ИСЗ. При вращении ИСЗ (5 об. в мин.) ось прибора лежит на поверхности конуса, регистрируя частицы с питч-углами от  $\sim 90^\circ$  до  $\sim 15^\circ$ . Временные профили дифференциальных потоков ионов в семи энергетических диапазонах от 58.4 до 164.2 кэВ, измеренных ИСЗ RBSP-а за двое суток 27-28.И.2014, представлены на рисунок 6.1 (нижняя панель). Можно видеть, что спутник сделал 5 полных оборотов вокруг Земли. Минимальное время между двумя прохождениями ИСЗ через максимум КТ (на  $L\sim 4\div 5$ ) составляет  $\sim 3$  часа, что превышает период дрейфа протонов с  $E\sim 100$  кэВ на  $L\sim 4$  ( $\sim 1$  час). Исследовались временные вариации максимальных величин потоков ионов в сердцевине радиационных поясов Земли ( $L\sim 2\div 6$ ) в двух местных временах (приблизительно 9-10 *MLT* и 14-15 *MLT*). Для построения графиков и проведения вычислений использовались программные комплексы TDAS (THEMIS Data Analysis Software) и SPADS (Space Physics Environment Data Analysis Software), на языке IDL (Interactive Data Language), свободно распространяемые через сайт <http://themis.ssl.berkeley.edu/software.shtml>.



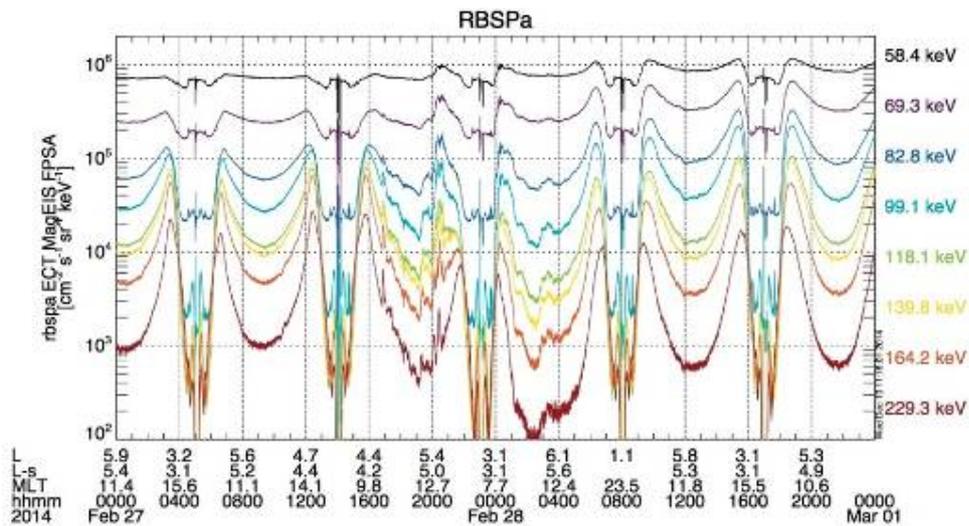


Рисунок 6.1 Положение орбиты ИСЗ RBSP и временные профили потоков ионов.

ИСЗ POES – низкоорбитальные солнечно-синхронные спутники с круговой орбитой на высоте  $\sim 800$  км и периодом обращения  $\sim 100$  мин. Орбита спутника такова, что в течение ограниченного времени ее восходящий и нисходящий участки постоянно находятся примерно на одних и тех же местных временах. На ИСЗ POES измерения потоков энергичных ионов производились аппаратурой MEPED [Evans and Greer, 2000]. Два взаимно перпендикулярно направленных детектора регистрируют частицы в радиальном направлении (по радиусу Земли - 0-детектор) и вдоль орбиты спутника (90-детектор). Поэтому, на высоких широтах 0-детектор измеряет, преимущественно, высыпавшиеся частицы, тогда как 90-детектор – захваченные (квазизахваченные). На экваторе ситуация противоположная. 0-детектор на экваторе регистрирует частицы с питч-углами, близкими к  $90^\circ$ . При перемещении спутника из области экватора на средние широты 0- и 90- детекторы отклоняются от ортогонального и продольного направлений относительно магнитной силовой линии и начинают измерять потоки частиц с разными питч-углами. Пример временного профиля потоков ионов по данным ИСЗ POES 19, измеренного за один оборот вокруг Земли, представлен на рисунке 6.2. Представлены данные о потоках ионов с энергией 30-80 кэВ (энергетические каналы 0p1 и 90p1) и 80-240 кэВ (0p2 и 90p2). В приэкваториальной области 0-детектором регистрируются захваченные частицы с большими питч-углами. Потоки уменьшаются с ростом широты, достигая минимума в области вблизи  $L=2$ . С другой стороны, потоки частиц по данным 90-детектора возрастают, отражая появление захваченных частиц кольцевого тока с относительно малыми приэкваториальными питч-углами. Следует отметить, что уменьшение с ростом широты потоков 0-детектора относительно потоков 90-детектора свидетельствует о незначительном вкладе частиц с малыми питч-углами в измерения 0-детектора на низких широтах.

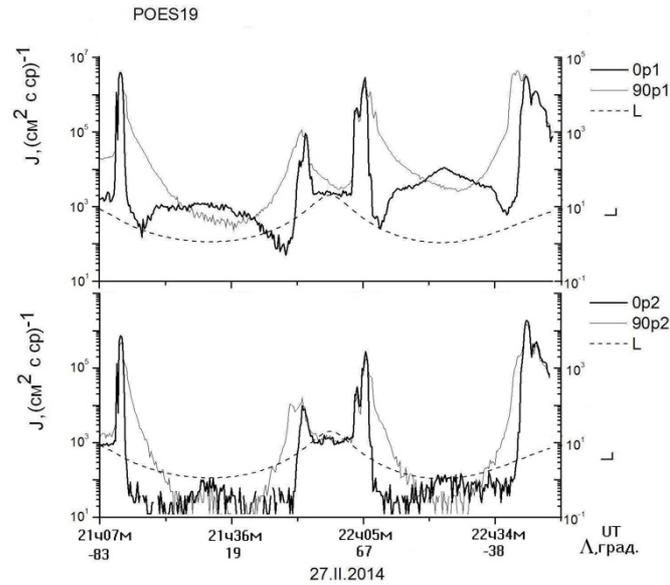


Рисунок 6.2 Временные профили потоков протонов с энергией 30-80 (p1) и 80-240 (p2) кэВ и L-параметра. На горизонтальной шкале указана широта ( $L$ ), измеряемая в градусах.

На высоких широтах потоки ионов практически изотропны, здесь наблюдаются максимумы потоков, ниже по широте - область резкого понижения потоков высыпавшихся частиц, граница между двумя областями называется границей изотропизации (ГИ) [Sergeev et al., 1993]. Подробному изучению динамики различных популяций ионов, измеренных на ИСЗ POES во время двух геомагнитных бурь, и диагностике состояния магнитосферы на основе вариаций данных потоков посвящены работы [Власова и Калегаев, 2014; Калегаев и др., 2015].

В рамках данной главы изучалась динамика потоков ионов в приэкваториальной области, где рассчитаны суммарные (т.е. проинтегрированные по времени по каждому энергетическому каналу) потоки захваченных ионов по данным 0-детектора вблизи экватора, в области ниже  $L=2$  (см. рисунок 6.2). Эти величины использовались для грубой оценки вариаций потоков частиц STEB вместо максимального потока на экваторе, который, особенно для высокоэнергичной части спектра частиц КТ, испытывает значительные флуктуации. На более высоких широтах близких к  $L=2$  мы получаем примесь частиц с питч-углами отличными от  $90^\circ$ , которыми мы пренебрегаем, учитывая общее уменьшение потоков регистрируемых 0-детектором частиц с ростом широты на фоне роста потоков высыпавшихся частиц в измерениях 90-детектора. Точное определение вклада таких частиц можно сделать только при известном питч-угловом распределении. Значение  $L=2$  носит условный характер, обозначая границу, где потоки достигают минимальных значений. Поскольку в области минимальных потоков показания 0-детектора меняются незначительно, точное значение границы интегрирования не является существенным. Таким

образом, в пренебрежении вкладом высыпающихся частиц и точным значением границы области захваченных ионов, мы используем суммарные по времени потоки, измеряемые 0-детектором частиц для грубой оценки динамики захваченных частиц на орбите КА POES. Необходимо отметить, что при анализе не рассматривались пролеты вблизи области Южно-Атлантической аномалии, что существенно уменьшило количество экспериментальных точек и привело к пробелам во временном профиле потоков. На высоких широтах рассматривались потоки ионов при пролетах ИСЗ над северным полушарием Земли, и были построены временные профили максимальных потоков высыпающихся частиц (см. рисунок 6.2 0-детектор), а также определялась динамика положения ГИ по  $L$ -параметру.

## 6.2 Обзор и анализ события

Геомагнитная буря 27 февраля 2014 произошла как отклик магнитосферы Земли на приход коронального выброса массы в результате солнечной вспышки 25 февраля в 00:49UT с координатами S12E82 балла X4/2B. 19-25 февраля зарегистрирован период высокой геомагнитной возмущенности: наблюдались 4 геомагнитные бури с  $Dst > 50$  нТл. С 25 по 27 февраля был относительно спокойный период: амплитуда  $Dst$ -индекса не превышала 30 нТл. 27 февраля в 16:50 UT ударная волна достигла орбиты Земли, а в 23:25  $SYM-H$  индекс достиг минимальных значений (-100 нТл).

Одновременные результаты измерений максимальных потоков протонов КТ в нескольких энергетических каналах по данным ИСЗ RBSPa, RBSPb и суммарных потоков ионов с энергиями 30-80 кэВ и 80-240 кэВ в приэкваториальной области на малых высотах по данным ИСЗ POES 19 представлены на двух верхних панелях рисунка 6.3. На третьей панели изображена динамика максимальных потоков частиц с энергиями 30-80 кэВ и 80-240 кэВ, зарегистрированных ИСЗ POES 19 на высоких широтах в области изотропных высыпаний.

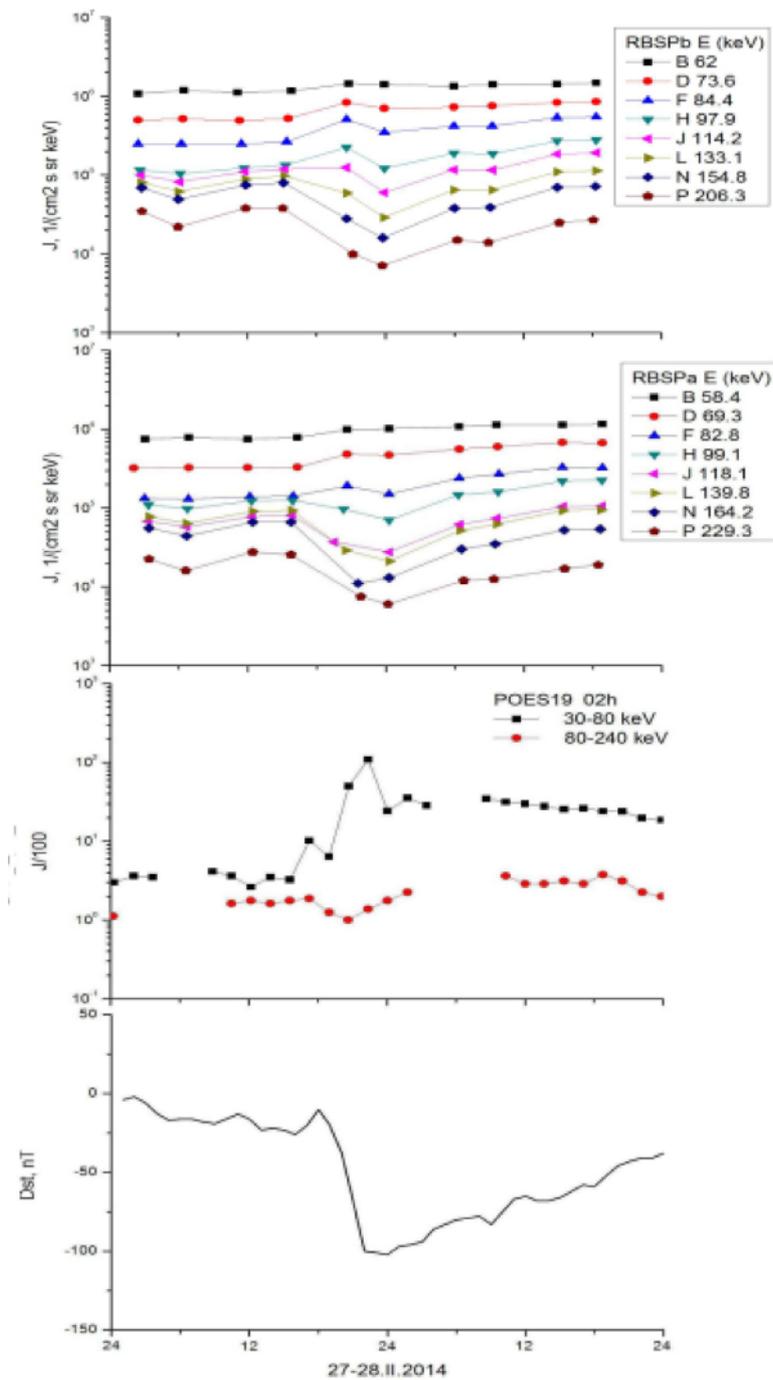


Рисунок 6.3 Временные профили потоков ионов по данным ИСЗ RBSPa, RBSPb и POES и геомагнитного индекса SYM-H (см. текст).

В сердцевине радиационных поясов временные вариации потоков ионов разных энергий в магнитно-активные периоды имеют принципиально различный характер: у потоков ионов с энергией от нескольких десятков до ~80 кэВ наблюдается тенденция к возрастанию, а с большими энергиями – к уменьшению. По данным, полученным с ИСЗ POES (рисунок 6.3), можно видеть, что эффект смягчения спектра захваченных частиц на главной фазе бури присутствует и на малых высотах в низкоширотной области, что может служить одним из факторов, свидетельствующих об «отображении» динамики кольцевого тока в вариациях

приэкваториальных потоков ионов на низких орбитах [Søråas et al., 2003]. Следует отметить, что эффект смягчения спектра захваченных частиц на главной фазе бури на малых высотах отсутствует в данных с высоких широт. В отличие от приэкваториальных частиц, которые являются «дочерними» для КТ, высыпающиеся потоки характеризуют, скорее, процесс инжекции частиц во время геомагнитных возмущений.

Похожий результат был получен в работе [Søråas and Davis, 1968] на основе анализа данных о потоках протонов 100-1700 кэВ по измерениям космического аппарата «Explorer-26». Во время ряда геомагнитных возмущений, на главной фазе бурь, наряду с возрастаниями потоков протонов 100-200 кэВ, авторы обнаружили потери протонов более высоких энергий (выше 700 кэВ). Было отмечено, что возрастание потоков протонов 100-200 кэВ связано с ускорением частиц плазменного слоя при их движении в область увеличенного магнитного поля. Понижение потоков протонов высоких энергий авторы интерпретировали как результат неадиабатического сжатия магнитосферы солнечным ветром, вследствие чего протоны высоких энергий оказываются на разомкнутых дрейфовых орбитах и уходят за магнитопаузу.

Отличия в динамике потоков частиц разных энергий также могут быть связаны с различием времен переноса частиц от границы захвата: во время бурь конвективный перенос ионов с  $E < 100$  кэВ на  $L < 5$  реализуется за десятки минут, что вызывает локальную депрессию магнитного поля и адиабатическое уменьшение потоков более энергичных захваченных частиц, которые обновляются более медленной радиальной диффузией [Ковтюх, 2001].

Альтернативной версией, объясняющей формирование более мягкого спектра частиц кольцевого тока на главной фазе магнитной бури, может быть высыпание частиц кольцевого тока в верхнюю атмосферу в области ниже границы изотропизации вследствие резонансного взаимодействия частиц кольцевого тока с ЭМИЦ (электромагнитными ионно-циклотронными) волнами [Yahnin et al., 2009; Яхнина и Яхнин, 2014]. На рисунке 6.4 приведены временные профили потоков ионов при пролете ИСЗ POES 18 через высокоширотную область: выше и ниже границы изотропизации. Можно видеть, что в 18:34 UT на средних широтах, соответствующих  $L \sim 4$ , в зоне адиабатического движения, происходит высыпание частиц с энергиями 30-80 и 80-240 кэВ (см. рисунок 6.4 область между двумя пунктирными вертикальными линиями). Высыпание из области кольцевого тока наблюдается в ночном секторе (04 *MLT*) на главной фазе бури. В дневном секторе на главной фазе бури высыпаний не обнаружено, в то время как на фазе восстановления они имели место в согласии с [Яхнина и Яхнин, 2014]. Возрастание потоков ионов в указанной на рисунке 6.4 ночной области наблюдается во всех четырех исследуемых каналах, но относительно максимальных величин потоков в высокоширотной области на  $L \sim 4$  высыпание в каналах, регистрирующих более энергичные ионы более интенсивное (так в канале

90p2 соотношение максимумов  $< 2$ , тогда как в канале 90p1 -  $\sim 20$ ). Учитывая, что величины потоков ионов с  $E=80-240$  кэВ значительно меньше соответствующих потоков частиц с  $E=30-80$  кэВ, можно ожидать, что такое высыпание частиц может дать дополнительный вклад в эффект уменьшения потока высокоэнергичных ионов во время главной фазы геомагнитной бури.

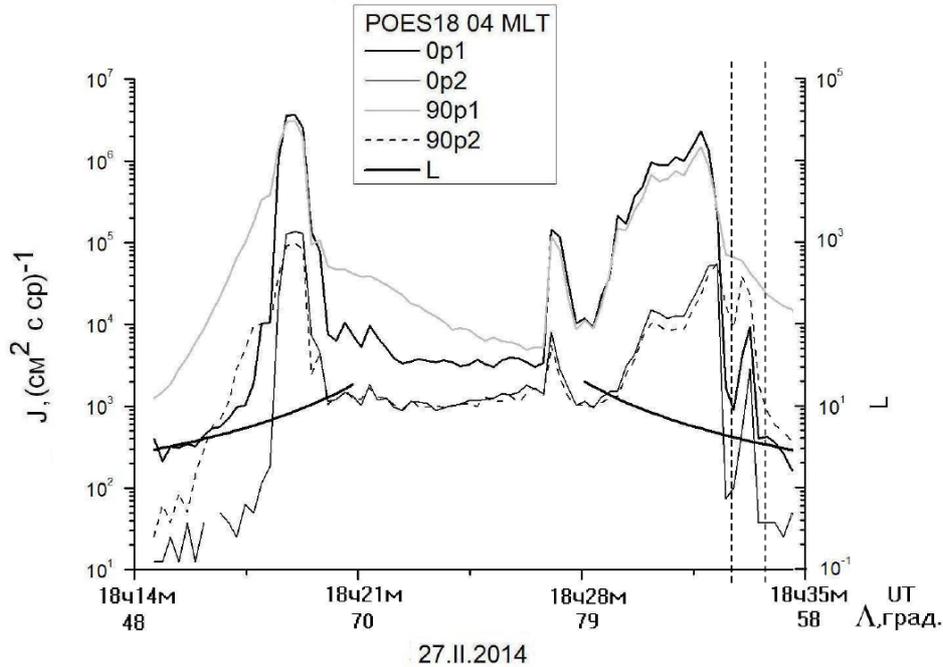


Рисунок 6.4 Временные профили потоков ионов при пролете ИСЗ POES 18 через высокоширотные области магнитосферы (см. текст). На горизонтальной шкале указана широта ( $\Lambda$ ), измеряемая в градусах.

Возрастания максимальных потоков высыпающихся ионов на малых высотах (третья панель рисунка 6.3) начинаются в то же время, что и уменьшение  $AL$ -индекса. Считается, что потоки частиц в области изотропных высыпаний характеризуют процесс инжекции частиц. Начало возрастания потоков ионов КТ и приэкваториальных потоков на малых высотах наблюдается после  $SC$ , одновременно с падением  $AL$ -индекса. Максимум приэкваториального потока ионов по данным ИСЗ POES 19 совпадает с окончанием главной фазы бури (см. профиль  $SYM-H$ ). Относительное возрастание максимальных потоков низкоэнергичных ионов КТ по данным ИСЗ RBSP-а и суммарных потоков ионов в приэкваториальной области на малых высотах по данным ИСЗ POES 19 во время геомагнитной бури 27.И.2015 существенно различается (рисунок 6.3): в КТ потоки ионов с  $E \sim 60$  кэВ возрастают не более чем в  $1,5 \div 2$  раза, в то время как на малых высотах с энергией 30-80 кэВ – почти на два порядка. Более того, по данным RBSP слабо выраженный максимум потока ионов присутствует только в канале 82 кэВ.

Различия в характере временных профилей потоков ионов в сердцевине КТ и на малых высотах, по-видимому, связаны с тем, что предбуревой уровень КТ в данном событии был очень высоким в связи с высокой геомагнитной активностью в предшествующий период. Динамика

кольцевого тока, проявляющаяся в изменении  $Dst$ -индекса в ходе рассматриваемой бури, связана, не столько с увеличением максимальных потоков частиц в области захвата, сколько с изменением геометрических размеров области, занятой КТ, и положения максимума. На главной фазе бури область максимальных потоков частиц кольцевого тока смещается к Земле. Также, возрастают потоки и на остальных  $L$ -оболочках, что приводит, как к усилению вклада КТ в вариацию измеряемого на поверхности Земли магнитного поля, так и к возрастанию потоков энергичных нейтралов, движущихся в область внутренней магнитосферы. Поэтому интегральное увеличение потока частиц КТ и, следовательно, потока частиц ENA, превышает увеличение потока в максимуме КТ. Важно, что на обеих высотах, во-первых, наблюдаются синхронные изменение потоков ионов на главной фазе бури, во-вторых, зарегистрирована общая особенность – различная динамика потоков с  $E > 100$  и  $< 100$  кэВ.

В работе [Тверской, 1997] рассчитана структура КТ и обоснована, полученная ранее эмпирическим путем, зависимость положения максимума пояса инжектированных во время магнитных бурь релятивистских электронов ( $L_{max}$ ) от амплитуды магнитной бури  $|Dst|_{max} = 2,75 \cdot 10^4 \cdot L_{max}^{-4}$  [Тверская 1986]. Показано, что положение  $L_{max}$  соответствует области максимального относительного ослабления поля при наибольшем значении  $|Dst|_{max}$  и, возможно, характеризует область максимального давления плазмы КТ. По данной зависимости для геомагнитной бури 27-28.И.2014 с  $|Dst|_{max} = 102$  нТл  $L_{max} \sim 4,05$ .

По данным ИСЗ RBSP построен временной профиль величины  $L$ -оболочек, где находятся максимумы потоков ионов с энергией:  $\sim 60$  кэВ и  $\sim 200$  кэВ (рисунок 6.5). По данным ИСЗ POES 19 был определен временной ход положения по  $L$ -параметру ГИ потоков ионов в двух энергетических диапазонах. Получено, что минимальные значения  $L$ -параметра в обоих случаях достигаются в конце главной фазы бури, при минимуме  $Dst$ . Для получения зависимости ГИ от инвариантной широты  $\phi_{inv}$  можно воспользоваться соотношением:  $L = 1 / \cos^2(\phi_{inv})$ .

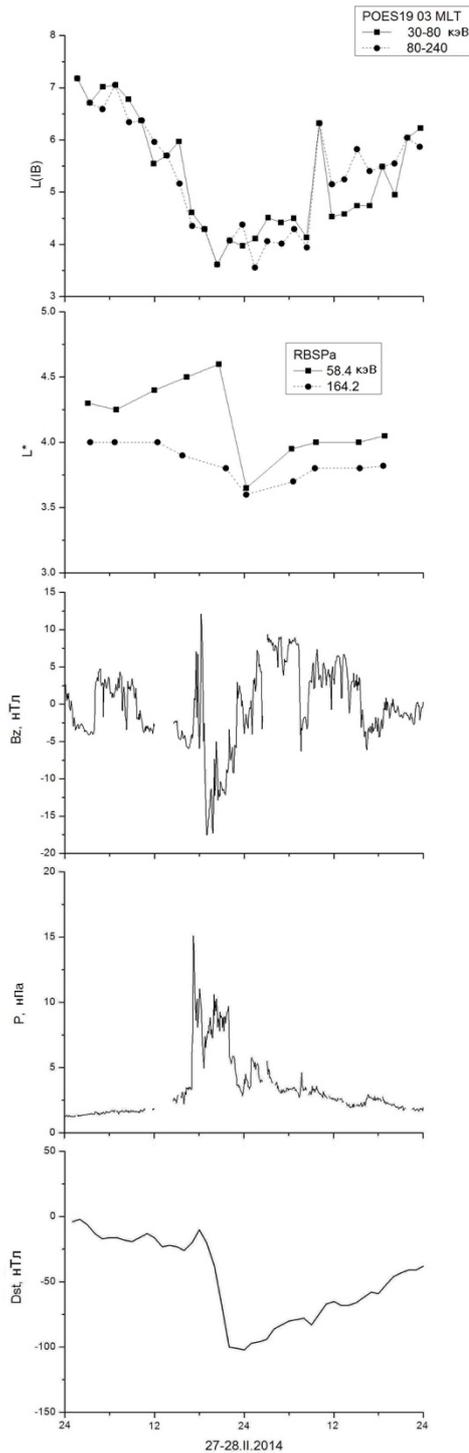


Рисунок 6.5 Временные профили положения по  $L$ -параметру границы изотропизации по данным ИСЗ POES, максимумов потоков ионов по данным ИСЗ RBSP-a, а также  $B_z$ -компоненты ММП, давления СВ и  $Dst$ -индекса.

По данным ИСЗ POES 19 временные профили положения по  $L$ -параметру ГИ для частиц двух рассматриваемых близких диапазонов энергий практически совпадают. Минимальное положение ГИ наблюдается в максимуме бури и располагается вблизи полуночи на  $L \sim 3.5 \div 4$ .

По данным ИСЗ RBSP наблюдается некоторая энергетическая зависимость положения максимума потока:  $L \sim 4$  для  $E \sim 60$  кэВ и  $L \sim 3.5$  для  $E \sim 200$  кэВ.

В данном событии движение положений ГИ и максимума КТ наблюдалось до начала магнитной бури, что, вероятно, может быть связано с изменениями в межпланетной среде, в частности, с переориентацией ММП (см. вариации  $B_z$ -компоненты). Существенное изменение положения низкоэнергичной части КТ происходит на главной фазе бури, связанной с поворотом ММП к югу. Реакции исследуемых положений на импульс давления СВ не наблюдается.

Из результатов, полученных в представленных исследованиях, следует, что данные, как прямых измерений в области КТ, так и измерений на малых высотах, позволяют исследовать динамику кольцевого тока и оценить его отдельные параметры, такие как положение максимума, либо момент инжекции. Использование таких данных будет полезно для оценки адекватности модельного описания магнитосферных токовых систем.

### 6.3 Выводы

В результате проведенного сравнительного анализа динамики кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время геомагнитной бури 27 февраля 2014 показано следующее:

- во время главной фазы бури в области кольцевого тока и в приэкваториальной области на малых высотах наблюдается качественно совпадающее изменение потоков ионов: возрастание потоков ионов с  $E < 100$  кэВ и спад потоков с  $E > 100$  кэВ;
- на малых высотах более ярко проявляется возрастание потоков на низких энергиях, в то время как в области КТ более заметно уменьшение потоков с  $E > 100$  кэВ;
- указанное различие динамики потоков ионов разных энергий может быть частично обусловлено преимущественным высыпанием потоков ионов с  $E > 100$  кэВ в ионосфере, связанным с резонансным взаимодействием частиц с ЭМИЦ-волнами. Высыпание частиц может быть рассмотрено как дополнение к известным механизмам, связанным с эффектами радиальной диффузии либо неадиабатического сжатия магнитосферы, описанным в разделе 3;
- во время геомагнитной бури граница изотропизации потоков ионов на малых высотах и максимум потока ионов КТ с  $E \sim 60$  кэВ вблизи экваториальной плоскости смещаются в сторону меньших  $L$ , при этом минимальные значения  $L(\text{ГИ})$  и  $L(\text{КТ})$  близки по величине и достигаются на главной фазе бури.

На основе сравнительного анализа данных о потоках частиц в области кольцевого тока и на малых высотах можно сделать вывод, что динамика потоков ионов бурового экваториального пояса для данного события, несмотря на большие (на два порядка величины) количественные отличия от вариаций потоков ионов кольцевого тока, отражает некоторые важные особенности последних, а именно, изменение положения и основные характеристики энергетического спектра.

## Заключение

В заключении приведем основные новые результаты и выводы диссертации:

Разработана и программно реализована процедура восстановления радиального распределения магнитного поля хвоста магнитосферы по данным многоточечных измерений аппаратов THEMIS в сочетании с данными расчетов по моделям IGRF и A2000 в программной среде IDL.

1. Получены оценки характерных параметров хвоста магнитосферы в период экстремально низкой солнечной активности 2008-2009 гг. Обнаружено, что в спокойных геомагнитных условиях передний край хвоста магнитосферы наблюдался на расстояниях 10-12 RE, интенсивность  $V_x$ -компоненты магнитного поля составляла около 20 нТл.
2. Показано, что во время главной фазы бури 13-14 февраля 2009 г. наблюдалось смещение токов геомагнитного хвоста до 7-8 RE, а интенсивность поля возрастала до 60 нТл. 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.
3. Показано, что на фоне плавного возрастания давления солнечного ветра 13-14 февраля 2009 г. на переднем крае токового слоя хвоста магнитосферы сформировалась радиально-локализованная переходная токовая система, замыкающаяся на дневной магнитопаузе, способствующая сохранению величины магнитного потока через доли хвоста.
4. На фазе внезапного начала бури обнаружена устойчивая структура магнитного поля с отрицательными значениями  $V_z$ -компоненты в передней части геомагнитного хвоста. Наблюдаемая в эксперименте замкнутая конфигурация магнитных силовых линий подтверждена расчетами магнитного поля, выполненными для реальных условий в космической среде.
5. Для магнитной бури 27-28 февраля 2014 показано, что вариации потоков ионов бурового экваториального пояса на низких высотах в приэкваториальной области воспроизводят динамику кольцевого тока и основные характеристики его энергетического спектра.

## Благодарности

Автор выражает свою искреннюю благодарность научному руководителю – Калегаяву Владимиру Владимировичу за чуткое руководство, поддержку и помощь при выполнении диссертационной работы, а также за приобретенные знания и квалификацию при совместной работе над материалами диссертации.

Автор выражает отдельную благодарность Панасюку Михаилу Игоревичу, Алексееву Игорю Ивановичу, Власовой Наталье Андреевне, а также другим сотрудникам кафедры и института за продуктивные обсуждения и замечания.

Автор выражает благодарность центру Goddard Space Flight Center NASA (Omniweb) за представленные данные межпланетной среды, центру Kyoto за данные по геомагнитным индексам, В. Ангелопулосу и А. Рунову (Университет Лос-Анжелеса, Калифорния) за предоставление данных проекта THEMIS.

И наконец, автор выражает глубокую признательность и благодарность близким людям, друзьям и коллегам за понимание, теплоту и поддержку в течение всего времени обучения и написания диссертационной работы.

### Список литературы

- *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно–земная физика. М.: Мир, 1974-1975. Т. 1 и 2.
- *Алексеев И.И.* Регулярное магнитное поле в магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т.18. С.656–665.
- *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.
- *Беленькая Е.С.* Переходные токовые системы // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 5. С. 602–608.
- *Власова Н.А., Калегаев В.В.* Динамика потоков про тонов с энергией 30–80 кэВ во время геомагнитных бурь 21–22.I.2005 и 14–15.XII.2006 по данным низковысотных спутников // Космические исследования. 2014. Т. 52. No 6. С. 449–458.
- *Калегаев В.В., Алексеев И.И., Макаренков Е.В., Ганюшкина Н.Ю.* Моделирование Dst-вариации во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. N 5. С. 596–603.
- *Калегаев В.В., Алексеев И.И., Фельштейн Я.И., Громова Л. И., Графе А., Гринспен М.* Магнитный поток через доли хвоста магнитосферы и динамика вариаций *Dst* // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т.38. С.10–16.
- *Калегаев В.В., Власова Н.А., Назарков И.С.* Динамика кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время магнитной бури 27-28.II.2014 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. N 6. С. 1–8.
- *Калегаев В.В., Власова Н.А., Пенг Ж.* Динамика магнитосферы во время геомагнитных бурь 22-21.I.2005 и 14-15.XII.2006 г. // Космические исследования. 2015. Т. 53. N26. С. 105–117.
- *Калегаев В В., Макаренков Е.В.* Динамика магнитосферных токовых систем во время магнитных бурь разной интенсивности // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. N 5. С. 604–613.
- *Калегаев В.В., Назарков И.С.* Формирование переходной токовой системы вблизи переднего края тока хвоста магнитосферы // Вестник Московского Университета. 2015. С. 3. Т. 4. С. 75-82

- *Калегаев В.В., Назарков И.С.* Динамика магнитосферы во время бури 14.02.09 // Вестник Московского Университета. 2016. С. 3. Т. 3. С. 54-60.
- *Ковтюх А.С.* Геокорона горячей плазмы // Космические исследования. 2001. Т. 39. No 6. С. 563–596.
- *Сергеев В. А., Цыганенко Н. А.* Магнитосфера Земли // М. Наука 1980.
- *Сомов Б.В.* Новый сценарий импульсных всплесков жесткого электромагнитного излучения в космической плазме // Письма в Астроном. журн. 2011. Т.37. 10. С. 740-753.
- *Старков Г. В.* Планетарная морфология авроральных явлений в магнитосферно-ионосферной физике // С.-Петербург: Наука. 1993. С. 85–90.
- *Тверской Б.А.* Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. 1997. Т. 37. No 5. С. 29–34.
- *Тверская Л. В.* О границе инжекции электронов в магнитосферу Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 1986. Т. 26. С. 864–869.
- *Фельдштейн Я.И.* Некоторые вопросы морфологии полярных сияний и геомагнитных возмущений в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия. 1963. Т. 3. № 2. С. 227–239.
- *Хорошева О. Б.* Протяженность дуг полярных сияний и их пространственная ориентация // Геомагнетизм и аэрномия. 1963. Т. 3. № 2. С. 363–366.
- *Яхнина Т.А., Яхнин А.Г.,* Протонные высыпания к экватору от изотропной границы во время геомагнитной бури 20–29 ноября 2003 года // Космические исследования. 2014. Т. 52. No 1. С. 82–88.
- *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., Belenkaya E. S., Kalegaev V. V., Feldstein, Ya.I. Grafe A.* Magnetic storms and magnetotail currents // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 7737–7748.
- *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.

- *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.
- *Angelopoulos V.* The THEMIS mission // *Space Sci. Rev.* 2008. V.141. I. 1. P. 5-34.
- *Angelopoulos, V., Baumjohann W., Kenne C. F. I., Coroniti F. V., Kivelson M. G., Pellat R., Walke R. J. r, Luh H.r, Paschmann G.* Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. A. 4027.
- *Angelopoulos, V., Kennel C. F., Coroniti F. V., Pellat R., Kivelson M. G., Walker R. J., Russell C. T., Baumjohann W., Feldman W. C., and Gosling J. T.* Statistical characteristics of bursty bulk flow events // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99(A11). P. 21257–21280. doi:10.1029/94JA01263.
- *Artemyev A.V., Petrukovich A.A., Frank A.G., Nakamura R., Zelenyi L.M.* Intense current sheets in the magnetotail: peculiarities of electron physics // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2789–2799. doi:10.1002/jgra.50297
- *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.
- *Axford W.I., Petschek H.E., Siscoe G.L.* Tail of the magnetosphere. // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. I. 5. P. 1231–1236.
- *Behannon K.W.* Mapping of the Earth's bow shock and magnetic tail by Explorer 33. // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73.
- *Birn J.* Self-consistent magnetotail theory: General solution for the quiet tail with vanishing field-aligned currents // *J. Geophys. Res.* 1979. V.84(A9). P. 5143–5152. doi:10.1029/JA084iA09p05143.
- *Birn J., Priest E.R.* Reconnection of Magnetic Fields: Magnetohydrodynamics and Collisionless Theory and Observations // 2007
- *Burton R. K., McPherron R. L., Russell C. T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 4204–4214.
- *Cao J. B., et al.* Geomagnetic signatures of current wedge produced by fast flows in a plasma sheet, *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A08205. doi:10.1029/2009JA014891.

- *Cao J. B., Ding W. Z., Reme H., Dandouras I., Dunlop M., Liu Z. X. and Yang J. Y.* The statistical studies of the inner boundary of plasma sheet // *Ann. Geophys.* 2011. V. 29. P. 289–298
- *Chapman S., Ferraro V. C. A.* A new theory of magnetic storms // *Terr. Magn. Atmos. Electr.* 1931. V. 36. P. 171–186.
- *Clauer C. R., Alexeev I. I., Belenkaya E. S., and Baker J. B.* Special features of the September 24–27, 1998 storm during high solar wind dynamic pressure and northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106(A11). P. 25695–25711. doi:10.1029/2000JA000435.
- *Credland J., Mecke G., Ellwood J.* The cluster mission: ESA'S spacefleet to the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* 1997. V.79 P.33–64. doi:10.1023/A:1004914822769
- *Daglis I. A., Sarris E. T., Wilken B.* AMPTE/CCE CHEM observations of the ion population at geosynchronous altitudes // *Ann. Geophys.* 1993. V. 11. P. 685–696.
- *Daglis I.A., Thorne R.M., Baumjohann W., Orsini S.* The terrestrial ring current: origin, formation and decay // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. P. 407–438.
- *Desorgher L., Kudela K., Flückiger E., Bütikofer R., Storini V., Kalegaev V.* Comparison of Earth's magnetospheric magnetic field models in the context of cosmic ray physics // *Acta Geophysica.* 2009. V. 57. No 1. P. 75-87. doi: 10.2478/s11600-008-0065-3
- *Dessler A. J., Parker E. N.* Hydromagnetic theory of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1959. V. 64. P. 2239–2252.
- *Dessler A.J.* Length of magnetospheric tail. // *J. Geophys. Res.* 1964. V.69. I. 19. P. 3913–3918.
- *Dungey J.W.* Interplanetary field and auroral zones // *Phys. Rev. Lett.* 1961. V.6. P.47–48.
- *Dungey J. W.* The structure of the ionosphere, or adventures in velocity space // *Geophysics: The Earth's Environment* 1963. P. 526–536.
- *Escoubet C.P., Fehringer M., Goldstein M.* Introduction: the cluster mission. // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. P. 1197–1200. doi:10.5194/angeo-19-1197-2001
- *Evans D.S., Greer M.S.* Polar Orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor, 2, Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Tech. Memo. OAR SEC 93. Natl. Oceanic and Atmos. Admin. Boulder. Colo. 55. P. 2000.
- *Ergun R. E., Goodrich K. A., Stawarz J. E., Andersson L., Angelopoulos V.* Large-amplitude electric fields associated with bursty bulk flow braking in the Earth's plasma sheet // *J. Geophys. Res.*

2015. V. 120. P. 1832-1844. doi :10.1002/2014JA020165

- *Fairfield D. H., J. Jones* Variability of the tail lobe field strength // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 7785-7791.
- *Fairfield, D. H., et al.* Earthward flow bursts in the inner magnetotail and their relation to auroral brightening, AKR intensifications, geosynchronous particle injections and magnetic activity // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. 355.
- *Feldstein Y. I., Levitin A. E., Kozyra J. U., Tsurutani B. T. , Prigancova A., Alperovich L., Gonzalez W. D., Mall U., Alexeev I. I., Gromova L. I., Dremukhina L. A.* Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24–27 September 1998 major magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A11214. doi:10.1029/2004JA010584.
- *Fok M.-C., Wolf R. A., Spiro R. W., and Moore T. E.* Comprehensive computational model of Earth's ring current // *J. Geophys. Res.* 2001. V.106(A5). P.8417–8424. doi:10.1029/2000JA000235.
- *Frank L.A.* On the extraterrestrial ring current during geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 3753–3765.
- *Ganushkina, N. Y., M. Liemohn, Kubyshkina M., Ilie R., Singer H.* Distortions of the magnetic field by storm-time current systems in Earth's magnetosphere // *Ann. Geophys.* 2010. V. 28. P. 123–140.
- *Ganushkina N. Yu., Pulkkinen T. I., Kubyshkina M. V., Singer H. J., Russell C. T.* Long-term evolution of magnetospheric current systems during storms // *Annales Geophysicae.* 2004. V. 22. P. 1317–1334.
- *Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W., Rostoker G., Tsurutani B. T., Vasyliunas V. M.* What is a Geomagnetic Storm? // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 5771–5792.
- *Greenspan M. E., Hamilton D. C.* A test of the Dessler–Parker–Sckopke relation during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 5419–5430.
- *Grigorenko E. E., Sauvaud J.-A., Palin L., Jacquey C., and Zelenyi L. M.* THEMIS observations of the current sheet dynamics in response to the intrusion of the high-velocity plasma flow into the near-Earth magnetotail // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2014. V. 119. P. 6553–6568. doi:10.1002/2013JA019729.

- *Hau L.-N., Voigt G.-H* Loss of MHD equilibrium caused by the enhancement of the magnetic  $B_y$  component in Earth's magnetotail // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97(A6). P. 8707–8711. doi:10.1029/92JA00445.
- *Hill T. W.* Solar-wind magnetosphere coupling // *Solar-Terrestrial Physics.* – Springer Netherlands 1983. P. 261-302.
- *Hu B., Wolf R. A., Toffoletto F. R., Yang J., and Raeder J.* Consequences of violation of frozen-in flux: Evidence from OpenGGCM simulations // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A06223. doi:10.1029/2011JA016667.
- *Iijima T., Potemra T. A.* The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by TRIAD // *J. Geophys. Res.* 1976a. V. 81. P. 2165–2174.
- *Iijima T., Potemra T. A.* Field – aligned currents in the dayside cusp observed by TRIAD // *J. Geophys. Res.* 1976b. V. 81. P. 5971–5980.
- *Kalegaev V. V., Alexeev I. I., Makarenkov E. V., and Ganyushkina N. Yu* Modeling the dst variation during magnetic storms // *Geomagnetism and Aeronomy* 2006. V.46(5). P. 563–569.
- *Kalegaev V.V., Alexeev I.I., Nazarkov I.S. et al.* On the large-scale structure of the tail current as measured by THEMIS // *Advances in Space Research.* 2014. V.54, I. 9. P. 1773-1785.
- *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.
- *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 // *Ann. Geoph.* 2005. V. 26. No 2. P.523–533.
- *Kalegaev V.V., Makarenkov E.V.* Relative importance of ring and tail currents to Dst under extremely disturbed conditions // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2008. V. 70. № 2-4. P. 519-525
- *Kaufmann T. G.* Substorm currents: Growth phase and onset // *J. Geophys. Res.* 1987. V.92. P.7471–7486.
- *Kivelson M.G., Russell C.T. (Eds.)* Introduction to space physics // *Cambridge University Press* 1995.

- *Kletzing C. A. et al.* The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on RBSP // *Space Sci. Rev.* Springer US. 2013. V. 127-181.
- *Kozyra J.U., Liemohn M.W.* Ring Current Energy Input and Decay // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 109. P. 105–131.
- *Kubyshkina M., Sergeev v, Tsyganenko N., Angelopoulos V., Runov A., Singer H., Glassmeier K. H., Auster H. U., and Baumjohann W.* Toward adapted time-dependent magnetospheric models: A simple approach based on tuning the standard model // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A00C21. doi:10.1029/2008JA013547.
- *Lennartsson W., Shelley E.G.* Survey of 0.1– to 16-keV/e plasma sheet ion composition // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 3061–3076.
- *Lemaire J. F., Gringauz K. I.* The Earth's Plasmasphere Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1998.
- *Liemohn M.W., Kozyra J.U.* Assessing the importance of convective and inductive electric fields in forming the stormtime ring current // R.L. Winglee (ed.), Sixth International Conference on Substorms, Univ. Washington, Seattle. 2002. P.456–462.
- *Lopez R. E. et al.* Decrease in SYM-H during a storm main phase without evidence of a ring current injection // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2015. V. 134. P. 118-129.
- *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
- *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.* V. 101. P. 7697–7704. 1996.
- *Malova H.V., Zelenyi L.M., Popov V.Yu., Delcourt D.C., Petrukovich A.A., Runov A.V.,* Asymmetric thin current sheets in the Earth's magnetotail // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L07123, doi:10.1029/2007GL030011.
- *McIlwain C.E.* Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles // *J. Geophys. Res.* 1961. V.66. I. 11. P.3681-3691.
- *Mead G.D., Fiarfield O.H.* A quantitative magnetospheric model derived from spacecraft magnetometer data // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 523–534.
- *Nakamura R., Baumjohann W., Runov A., Asano Y.* Thin current sheets in the magnetotail

observed by cluster // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 122. P. 29–38. doi:10.1007/s11214-006-6219-1

- *Ness N.F.* The Earth's magnetic tail // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. P. 2989–3005.
- *O'Brien T. P., McPherron R. L.*, An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, P. 7707–7719.
- *Ohtani S., Shay M.A., Mukai T.* Temporal structure of the fast convective flow in the plasma sheet: Comparison between observations and two-fluid simulations. // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A03210, doi:10.1029/2003JA010002
- *Panov E. V., Baumjohann W., Nakamura R., Amm O., Kubyshkina M. V., Glassmeier K.-H., Weygand J. M., Angelopoulos V., Petrukovich A. A., and Sergeev V. A.* Ionospheric response to oscillatory flow braking in the magnetotail // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2013. V. 118. P. 1529–1544. doi:10.1002/jgra.50190.
- *Panov, E. V., Baumjohann W., Nakamura R., Kubyshkina M. V., Glassmeier K.-H., Angelopoulos V., Petrukovich A. A., and Sergeev V. A.* Period and damping factor of Pi2 pulsations during oscillatory flow braking in the magnetotail // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2014. V. 119. P. 4512–4520. doi:10.1002/2013JA019633.
- *Paschmann G. B., Sonnerup U. Ö., Papamastorakis I., Scopke N., Haerendel G., Bame S. J., Asbridge J. R., Gosling J. T., Russel C. T., Elphic R. C.* Plasma acceleration at the earth's magnetopause: Evidence for magnetic reconnection // *Nature.* 1979. V. 282. P. 243–246.
- *Parker E.N.* Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields // *Astrophysical Journal.* 1958. V. 128. P. 664
- *Parker E.N.* Spontaneous current sheets in magnetic fields: with applications to stellar x-rays, in *Spontaneous Current Sheets in Magnetic Fields: with Applications to Stellar x-Rays* // *International Series in Astronomy and Astrophysics* 1994. V. 1
- *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.
- *Petrukovich A., Artemyev A., Vasko I., Zelenyi L.* Current Sheets in the Earth Magnetotail: Plasma and Magnetic Field Structure with Cluster Project Observations. // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 188. P. 311–337. doi:10.1007/s11214-014-0126-7

- Phan T.-D., Paschmann G., Baumjohann W., Sckopke N., Lü hr H. The magnetosheath region adjacent to the dayside magnetopause: AMPTE/IRM observations // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. C. 121–141.
- Piddington J.H. *Geomagnetic storm theory* // *J. Geophys. Res.* 1960. V.65. I. 1. P. 93-106.
- Pritchett, P. L., and F. V. Coroniti *A kinetic ballooning/interchange instability in the magnetotail* // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A06301. doi:10.1029/2009JA014752
- Priest E., Forbes T. *Magnetic Reconnection* // 2000
- Pulkkinen T. I., Baker D. N., Owen C. J., Gosling J. T., Murthy N. Thin current sheets in the deep geomagnetotail // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2427–2430.
- Roelof E. C. Energetic neutral atom image of a storm-time ring current // *J. Geophys. Res. Letters* 1987. V.14. I. 6. P. 652–655.
- Rong Z. J., Lui A. T. Y., Wan W. X., Yang Y. Y., Shen C., Petrukovich A. A., Zhang Y. C., Zhang T. L., and Wei Y. Time delay of interplanetary magnetic field penetration into Earth's magnetotail // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2015. V. 120. P. 3406–3414. doi: 10.1002/2014JA020452.
- Rong Z. J., Barabash S., Stenberg G., Futaana Y., Zhang T. L., Wan W. X., Wei Y., and Wang X.-D. (echnique for diagnosing the flapping motion of magnetotail current sheets based on single-point magnetic field analysis // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2015. V. 120. P. 3462–3474. doi: 10.1002/2014JA020973.
- Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z., Zhang X.-J. S. Li, Plaschke F. and Bonnell J. A THEMIS multicase study of depolarization fronts in the magnetotail plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A05216. doi:10.1029/2010JA016316.
- Runov A., Nakamura R., Baumjohann W., Zhang T.I., Volwerk M. Cluster observation of a bifurcated current sheet // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi:10.1029/2002GL016136.
- Runov A., Sergeev V.A., Baumjohann W., Nakamura R., Apatenkov S., Asano Y., Volwerk M., Vörös Z., Zhang T.L., Petrukovich A., Balogh A., Sauvaud J., Klecker B., Rème H. Electric current and magnetic field geometry in flapping magnetotail current sheets // *Ann. Geophys.* V.23. 2005. P. 1391–1403.
- Runov A, Sergeev V.A., Nakamura R., Baumjohann W., Apatenkov S., Asano Y., Takada T., Volwerk M., Vörös Z., Zhang T.L., Sauvaud J., Rème H., Balogh A. Local structure of the magnetotail current sheet: 2001 cluster observations // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P.247–262

- *Schodel, R., Baumjohann W., Nakamura R., Mukai T.* Rapid flux transport and plasma sheet reconfiguration // *J. Geophys. Res.* 2001. V.106. 8381.
- *Sckopke N.* A general relation between the energy of trapped particles and the disturbance field near the Earth // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 3125–3130.
- *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.
- *Sergeev V. A., Chernyaev I. A., Angelopoulos V., Runov A. V., and Nakamura R.* Stopping flow bursts and their role in the generation of the substorm current wedge // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 1106–1112. doi:10.1002/2014GL059309.
- *Sergeev V. A., Mitchell D. G., Russell C. T., Williams D.J.* Structure of the tail plasma/current sheet at 11 Re and its changes in the course of a substorm // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 17345–17365.
- *Shue J.-H., Chao J. K., Fu H. C., Khurana K. K., Russell C. T., Singer H. J., Song P.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 17691–17700.
- *Singer S. F.* A new model of magnetic storms and aurorae // *Eos Trans. AGU* 1957. V.38. P.175–190.
- *Skoug R. M., et al.* Tail-dominated storm main phase: 31 March 2001 // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. 1259. doi:10.1029/2002JA009705
- *Søraas F., Aarsnes K., Oksavik K., Evans D.S.* Ring current intensity estimated from low altitude proton observations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. No A7. P. 1149– 1859.
- *Søraas F., Davis L.R.* Temporal variations of the 100 keV to 1700 keV trapped protons observed on satellite Explorer 26 during first half of 1965 // *GSFC Rep. X 612 68 328.* Greenbelt. Md.: Goddard Space Flight Center. 1968. V. 52.
- *Søraas F., Oksavik K., Aarsnes K. et al.* Storm time equatorial belt – an “image” of RC behavior // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. No 2. P. 1052–1055.
- *Spence H. E., Reeves G. D., Baker D. N., Blake J. B., Bolton M., Bourdarie S., Chan A. A., Claudepierre S. G., Clemmons J. H., Cravens J. P., Elkington S. R., Fennell J. F.* Science goals and overview of the Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma (ECT) Suite on NASA’s

- Radiation Belt Storm Probes (RBSP) mission // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 179. I. 1. P. 311-336. doi:10.1007/s11214-013-0007-5.
- *Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y.* Hydromagnetic flow around the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1966. V. 14. P. 223–253.
  - *Stern D. P., Alexeev I. I.* Where do field lines go in the quiet magnetosphere? // *Rev. Geophys.* 1988. V. 26. P.782–791.
  - *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.
  - *Sugiura M., Ledley B.G., Skillman T.L., Heppner T.P.* Magnetospheric field distortions observed by OGO–3 and 5 // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 7552–7565.
  - *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.
  - *Turner N. E., Baker D. N., Pulkkinen T. I., Roeder J. L., Fennel J. F., Jordanova V. K.* Energy content in the storm–time ring current // *J. Geophys. Res.* 2001.V. 106. P. 19149–19156.
  - *Tu, J.-N., K. Tsuruda, H. Hayakawa, A. Matsuoka, T. Mukai, I. Nagano, S. Yagitani* (2000) Statistical nature of impulsive electric fields associated with fast ion flow in the near-Earth plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 2001.V. 105. 18. 901.
  - *Tsyganenko N. A.* Global Quantitative Models of the Geomagnetic Field in the Cislunar Magnetosphere for Different Disturbance Levels // *Planet. Space Sci.* 1987. V. 35. P. 1347-1358.
  - *Tsyganenko N. A.* A Magnetospheric Magnetic Field Model with a Warped Tail Current Sheet // *Planet. Space Sci.* 1989. V. 37. P. 5-20.
  - *Tsyganenko N. A.* A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *J. Geophys. Res.* 2002a. V. 107. 10.1029/2001JA000219.
  - *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations // *J. Geophys. Res.* 2002b. V. 107. 10.1029/2001JA000220.
  - *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.

- *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. 10.1029/2004JA010798.
- *Tsyganenko N. A. and Stern D.P.* Modeling the Global Magnetic Field of the Large-Scale Birkeland Current Systems // *J. Geophys.Res.* 1996. V. 101. P. 27187-27198.
- *Vasko I. Y., Petrukovich A. A., Artemyev A. V., Nakamura R., Zelenyi L. M.* Earth's distant magnetotail current sheet near and beyond // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2015. V.120. P. 8663–8680. doi:10.1002/2015JA021633.
- *Vasyliūnas V. M.* Ionospheric and boundary contributions to the Dessler-Parker-Sckopke formula for Dst // *Annales Geophysicae.* – Copernicus GmbH 2006. V. 24. №. 3. P. 1085-1097.
- *Weygand J.M., McPherron R.L.* Dependence of ring current asymmetry on storm phase // *J. Geophys. Res.* 2006. V.111. Doi: 10.1029/2006JA011808.
- *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U., Bössinger T., Manninen J.* Proton aurora related to intervals of pulsations of diminishing periods // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A12215. doi:10.1029/2009JA014670.
- *Yang, J., R. A. Wolf, and F. R. Toffoletto* Accelerated thinning of the near-Earth plasma sheet caused by a bubble-blob pair // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L01107. doi:10.1029/2010GL045993.
- *Yao Z., et al.* Current structures associated with dipolarization fronts // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2013. V. 118. P. 6980–6985. doi:10.1002/2013JA019290.
- *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.
- *Zhou X., Zhou X.-Z., Angelopoulos V., Shi Q., Wang C.-P., and Frey H.* Correction to “Interplanetary shock-induced current sheet disturbances leading to auroral activations: THEMIS observations” // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2013. V. 118. 5807. doi:10.1002/jgra.50510.