

## Положение и динамика переднего края токового слоя хвоста магнитосферы на основе данных THEMIS в период экстремально спокойной солнечной активности

И. С. Назарков\* В. В. Калегаев†

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ).  
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Статья поступила 14.06.2013; подписана в печать 11.09.2013)*

В 2009 г. магнитосфера Земли находилась в условиях затянувшегося периода низкой солнечной активности. На основе данных спутников THEMIS исследуется положение и динамика магнитного поля переднего края хвоста магнитосферы. Модели собственного магнитного поля Земли (IGRF-11) и магнитосферного магнитного поля (A2000) использовались для вычисления магнитного поля геомагнитного диполя и токов на магнитопаузе. Вычитание этих величин из измеренного на бортах спутников магнитного поля позволило оценить магнитное поле токов хвоста магнитосферы. Благодаря возможности использования одновременных измерений на 5 спутниках, были построены радиальные профили магнитного поля вдоль хвоста магнитосферы при различных условиях в солнечном ветре. В результате работы установлено, что передний край токового слоя при спокойных условиях в солнечном ветре 4 апреля 2009 г. находился на расстоянии около  $12 R_E$ , а магнитное поле в его окрестности составляло  $|\mathbf{B}| = 20$  нТл, в то время как в удаленном хвосте — около 10 нТл. Во время геомагнитного возмущения 14 февраля 2009 г. (мин.  $Dst = -35$  нТл) передний край токов хвоста магнитосферы приблизился к Земле до  $8 R_E$ , и значительно усилилось магнитное поле вблизи него ( $B_x$  компонента поля достигала 70 нТл,  $B_z$  достигала  $-50$  нТл). Полученные оценки свидетельствуют о значительных токах, протекающих в хвосте магнитосферы. Слабый геомагнитный эффект на поверхности Земли связан с увеличением характерных размеров магнитосферы в период затянувшегося минимума солнечной активности.

PACS: 94.30.cd, 94.30.-d, 91.25.-g, 94.30.C

УДК: 537.632/.636, 621.3.013, 550.383

Ключевые слова: магнитосфера Земли, передний край токового слоя магнитосферы Земли, низкая солнечная активность в 2009 г., магнитная буря, магнитное поле токовой системы хвоста магнитосферы.

### ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитный хвост — одна из фундаментальных областей магнитосферы Земли, определяющая ее структуру и динамику [1]. Электрические токи поперек геомагнитного хвоста поддерживают определенную структуру магнитного поля в окрестностях Земли и вызывают геомагнитные возмущения во внутренней магнитосфере. Изучение регулярной структуры и динамики магнитного поля геомагнитного хвоста — актуальная проблема магнитосферной физики [2–5].

Структура магнитного поля вблизи геомагнитного хвоста, также как и его пространственное положение, точно не известны из-за сложности разделения областей, на которые преимущественное влияние оказывают и токи хвоста, и кольцевой ток. Эта работа направлена на детальное исследование структуры магнитного поля в геомагнитном хвосте на основе измерений спутников THEMIS.

С тех пор, как стартовала миссия THEMIS, мы имеем возможность детального исследования крупномасштабной структуры геомагнитного хвоста [6]. Оди-

наково оснащенные спутники имели орбиты, апогеи которых выстраивались в одну линию каждые четыре дня. Существование одновременных измерений в различных областях хвоста позволяют преодолеть пространственно-временную неопределенность и изучить крупномасштабную структуру магнитного поля в хвосте магнитосферы без использования дополнительных априорных предположений.

В этой работе мы используем параболическую модель магнитосферы A2000 [7] и модель собственного магнитного поля Земли IGRF-11 (эпоха 2010–2015 гг.) для изучения структуры магнитосферного магнитного поля. Магнитное поле токовых систем, отличных от токов хвоста, было вычтено из измерений после вычислений по моделям A2000 и IGRF-11. Также, модель A2000 была использована для изучения и лучшего понимания характерных вариаций магнитного поля от токов хвоста магнитосферы при различных геомагнитных условиях.

Главная цель данной работы — изучить особые свойства геомагнитных возмущений, происходящих в экстремально спокойной магнитосфере Земли в течение затянувшегося минимума солнечной активности. Мы изучим характеристики магнитного поля хвоста магнитосферы при спокойных и возмущенных геомагнитных условиях в 2009 году. Мы проанализируем и сравним структуру магнитного

\*E-mail: nazarkov@dec1.sinp.msu.ru

†E-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru

поля хвоста магнитосферы при спокойных условиях 04.04.2009 и в умеренно-возмущенных условиях 14.02.2009. В процессе исследований мы будем выделять магнитное поле токов хвоста из измерений, используя модели магнитного поля A2000 и IGRF-11.

При анализе данных и проведении расчетов будет использоваться геоцентрическая солнечно-магнитосферная система координат (GSM). В этой системе 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.

### 1. ПАРАБОЛОИДНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСФЕРЫ A2000 И МОДЕЛЬ IGRF.

Магнитосферное магнитное поле (ММП) является суперпозицией двух слагаемых. Первое, собственное поле Земли, порождается токами, текущими в жидком ядре Земли, второе — крупномасштабными токами, текущими в магнитосфере. «Внутреннее» поле имеет дипольную форму во внешней магнитосфере и подвержено медленным (вековым) вариациям. При изучении типичных магнитосферных процессов изменением его параметров можно пренебречь. Для расчетов внутриземного магнитного поля используется модель IGRF, которая представляет его в виде разложения по сферическим гармоникам. На расстояниях более  $3 R_E$  от центра Земли вклад не дипольных членов разложения пренебрежимо мал. Здесь 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 вблизи 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  $XZ$ .

Для вычислений магнитного поля крупномасштабных токовых систем в магнитосфере (токи Чепмена-Ферраро на магнитопаузе  $B_{CF}$ , кольцевой ток  $B_r$ , ток хвоста магнитосферы  $B_t$ , продольные токи  $B_{fac}$ ) могут быть использованы динамические модели магнитосферы, такие как модели Цыганенко[9] или параболоидная модель A2000 [7]. Параболоидная модель A2000 основана на аналитическом решении уравнения Лапласа для каждой крупномасштабной токовой системы с граничным условием на магнитопаузе, которая аппроксимируется параболоидом вращения.

Внешнее магнитное поле представляется суммой:

$$B = B_{CF} + B_t + B_r + B_{fac}$$

Каждое слагаемое зависит от собственных параметров, которые определяют динамику магнитосферных токовых систем. Входными параметрами модели являются: угол наклона геомагнитного диполя  $\psi$ , расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе  $R_1$ , расстояние до переднего края слоя хвоста  $R_2$ , магнитный поток через доли хвоста  $\Phi$ , магнитное поле кольцевого тока в центре Земли  $B_r$ , максимальная интенсивность продольных токов зоны  $I_i$ . Эти параметры могут быть определены из наблюдательных данных: параметров солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитных индексов.

Поскольку мы намерены изучить магнитные поля в хвосте магнитосферы по данным спутниковых измерений, попытаемся сначала получить искомые структуры с помощью модели. Это позволит нам 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 рис. 1 приведены характерные для спокойных условий профили компонент  $B_x$  и  $B_z$  магнитного поля в хвосте магнитосферы вдоль линии  $y = 0$ ,  $z = -2R_E$ . Расчеты выполнены по модели A2000 при заданных, характерных для спокойных условий в магнитосфере, значениях параметров межпланетной среды. Значение  $Z$ -координаты выбрано таким, чтобы выполнить расчеты в непосредственной близости от токового слоя, смещенного относительно плоскости  $XY$  GSM-координат в южном направлении вследствие сезонных вариаций наклона геомагнитного диполя (расчеты проведены для зимнего периода). На верхнем рисунке представлен профиль полного поля. На среднем рисунке представлены профили поля после вычитания эффекта внутриземных источников, на нижнем — изображен профиль магнитного поля токового слоя хвоста. Компоненты магнитного поля показаны синим ( $B_x$ ) и красным ( $B_z$ ) цветами.

Из рис. 1 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, что говорит о величине протекающих там токов. Передний край токового слоя располагается в ночной магнитосфере на расстоянии  $10R_E$  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  $2R_E$ . Харак-

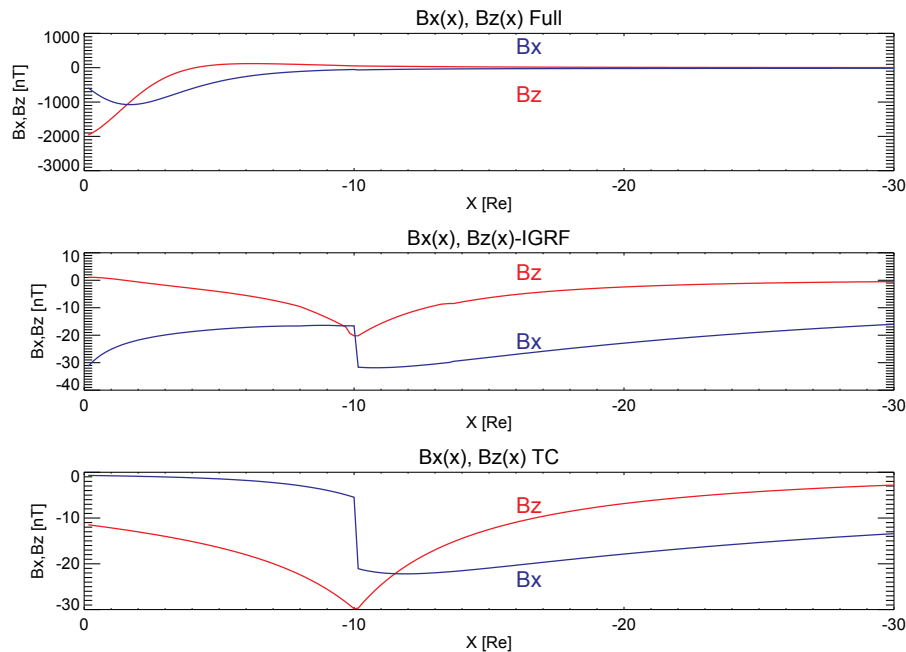


Рис. 1: Характерные для спокойных условий профили компонент  $B_x$  и  $B_z$  нТл магнитного поля в ночной магнитосфере вдоль линии  $y = 0, z = -2R_E$ , рассчитанные по модели A2000. Компоненты магнитного поля показаны синим ( $B_x$ ) и красным ( $B_z$ ) цветами. IGRF — магнитное поле, создаваемое внутриземными токами

терные величины компонент магнитосферного магнитного поля в магнитосферном хвосте в окрестностях переднего края токового слоя хвоста внутри магнитосфере 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 (рис. 2) профилей магнитного поля токов в хвосте для разных значений  $Z$ , что соответствует случаям нахождения над и под токовым слоем хвоста. Данные построения обуславливаются необходимостью получения модельных представлений о структуре магнитных полей в области крупномасштабного тока хвоста магнитосферы.

Из рис. 2 видно, что характер профилей магнитных полей сохраняется при удалении от переднего тока хвоста по оси  $Z$ , но становится менее выраженным.

Использование моделей A2000 и IGRF, 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 моделей позволяет выделить магнитное поле, порожденное токами хвоста магнитосферы.

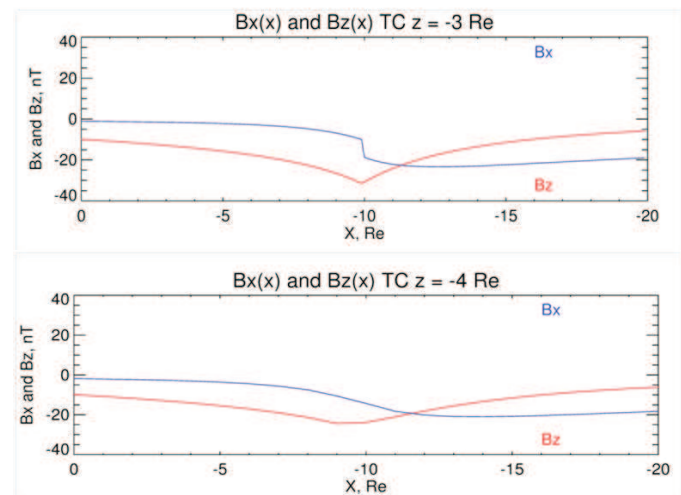


Рис. 2: Особенности структуры магнитного поля хвоста в зависимости от  $Z$

## 2. СПОКОЙНАЯ МАГНИТОСФЕРА 4 АПРЕЛЯ 2009 ГОДА

Спокойные условия в солнечном ветре были зафиксированы в течение 04.04.2009. На рис. 3 представлены данные с космического аппарата ACE и геомагнитные индексы:  $B_z$ -компонента межпланетного магнитного поля (ММП), плотность протонов солнечного ветра (СВ), скорость плазмы СВ,  $Dst$  и  $AE$  индексы. В течение 00-07 UT часов плотность протонов со-

ставляла 5-8 частиц/см<sup>3</sup>, скорость плазмы была около 280 км/с, т. е. наблюдались незначительные изменения динамического давления солнечного ветра. Межпланетное магнитное поле изменялось от 1 нТл до 0 нТл. *Dst* и *AE* индексы также соответствовали спокойным условиям. Такие параметры СВ и значения геомагнитных индексов характеризуют магнитосферное состояние в течение 00-07 UT часов 04.04.2009 как спокойное.

Такие магнитосферные условия без существенного внешнего влияния дают нам возможность использовать измерения в различных точках пространства для каждого из спутников THEMIS в течение 00-07 UT часов, чтобы получить структуру магнитного поля токов хвоста. Мы будем вычитать из измеренного на спутниках магнитного поля магнитное поле токовых систем, отличных от токов хвоста, с помощью моделей A2000 и IGRF-11.

На рис. 4 мы можем видеть радиальные профили  $B_x$ - и  $B_z$ -компонент магнитного поля геомагнитного хвоста в течение 00-07 UT часов 04.04.2009, полученные из данных аппаратов THEMIS. Эти профили показывают типичную структуру магнитного поля токов хвоста магнитосферы при спокойных условиях в СВ и позволяют определить положение и интенсивность токов хвоста. Рис. 3 показывает характерные свойства компонент магнитного поля хвоста: уменьшение модуля  $B_z$ -компоненты при движении в ночную часть магнитосферы, и увеличение  $B_x$ -компоненты вблизи переднего края токов хвоста. Мы можем видеть, что передний край токов хвоста магнитосферы Земли расположен на расстоянии  $10-12R_E$  в ночную часть магнитосферы. Все спутники находились ниже токов хвоста магнитосферы, и  $B_x$ -компонента магнитного поля была отрицательной.

Около переднего края токового слоя хвоста модули  $B_x$ - и  $B_z$ -компоненты магнитного поля составляют 20 нТл, в то время как в отдаленном хвосте магнитное поле становится более слабым.

### 3. МАГНИТОСФЕРНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ 14 ФЕВРАЛЯ 2009 ГОДА

На рис. 5 представлены параметры солнечного ветра:  $B_z$ -компонента ММП, плотность протонов СВ, скорость плазмы СВ, *Dst* и *AE* индексы в течение 14.02.2009. Магнитосфера находилось в возмущенном состоянии. Плотность протонов СВ была около 20 частиц/см<sup>3</sup> в 1:00 UT 14.02.2009, затем она увеличивалась и достигла значения в 60 частиц/см<sup>3</sup> в 5:00 UT часов, скорость плазмы СВ была около 300 км/с до 6:00 UT часов, когда сразу после быстрого падения плотности она достигла 400 км/с (за 1 час) и потом 500 км/с. Это означает, что поток плотной ускоренной плазмы приближался к Земле от Солнца на фоне спокойного солнечного ветра. После того, как импульс давления СВ вызвал поджатие магнито-

паузы к Земле, ММП сменило направление на южное, что вызвало геомагнитную бурю амплитудой  $-35$  нТл. Следует отметить, что наблюдаемые внешние условия характерны для начала развития более мощного возмущения. Для таких параметров СВ обычно характерен магнитный эффект на поверхности Земли около  $-100$  нТл.

Вариации *Dst* индекса в течение 14.02.2009 характерны для типичной магнитной бури: мы видим увеличение *Dst* во время импульса давления СВ и затем развитие небольшого отрицательного возмущения. Однако, его максимальная амплитуда очень мала. Ниже мы рассмотрим причины такого необычного поведения магнитосферы.

Начало 14.02.2009 характеризуется очень спокойными внешними условиями. Наблюдались незначительные вариации межпланетного магнитного поля, плотности протонов и скорости плазмы СВ. Внешние условия соответствовали увеличенной в размерах магнитосфере с расстоянием до магнитопаузы около  $13R_E$ . *Dst* индекс не претерпевал каких-либо значительных изменений, характерных для магнитосферной активности.

Начальная фаза бури 14.02.2009 и быстрое увеличение токов Чепмена-Ферраро на магнитопаузе были зафиксированы по увеличению *Dst* индекса; это так называемая SSC фаза (внезапное начало бури) — начало бури из-за импульса давления СВ. ММП изменило направление на южное в 5:00 UT часов и было отрицательным на протяжении 7 часов. Этот временной промежуток соответствует главной фазе бури, которая характеризуется уменьшением *Dst* индекса

Используя данные о СВ и *Dst* индексе, мы можем проследить изменения магнитосферного поля соответствующими различным фазам бури 14.02.2009.

1. Начальная фаза: первоначальное увеличение *Dst* индекса (SSC) и следующее за ним уменьшение *Dst* индекса. Началась в 2:00 UT часа и закончилась в 6:00 UT часов, как видно из изменений *Dst* индекса. Характеризуется поджатием магнитопаузы к Земле.
2. Главная фаза: начало главной фазы характеризуется поворотом  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля на южное направление в 6:00 UT часов. Она заканчивается в момент достижения минимума *Dst*-индекса в 10:00 UT часов.
3. Фаза восстановления: состояние магнитосферы возвращается в спокойное. Начинается в 10:00 UT часов.

Мы вычтем из магнитного поля, измеренного на спутниках THEMIS, магнитные поля от токовых систем, отличных от токов хвоста. Магнитное поле магнитосферных токов (токов Чепмена-Ферраро) было

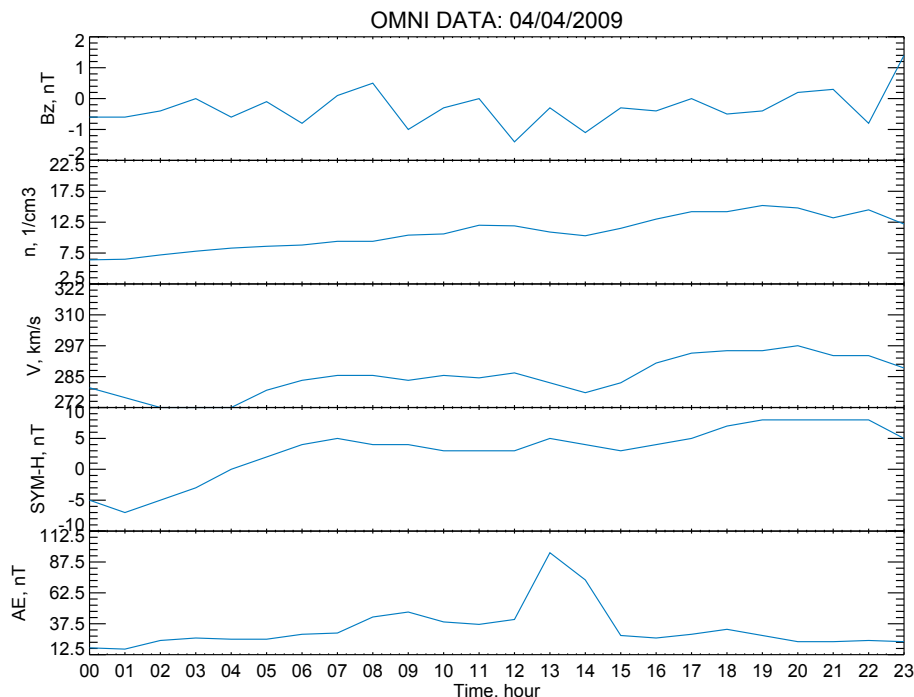


Рис. 3: Параметры солнечного ветра: ( $B_z$ ) — МПП нТл, плотность протонов СВ, частиц/см<sup>3</sup>, скорость СВ км/с),  $Dst$ -индекс, нТл и  $AE$ -индекс, нТл в течение 04.04.2009

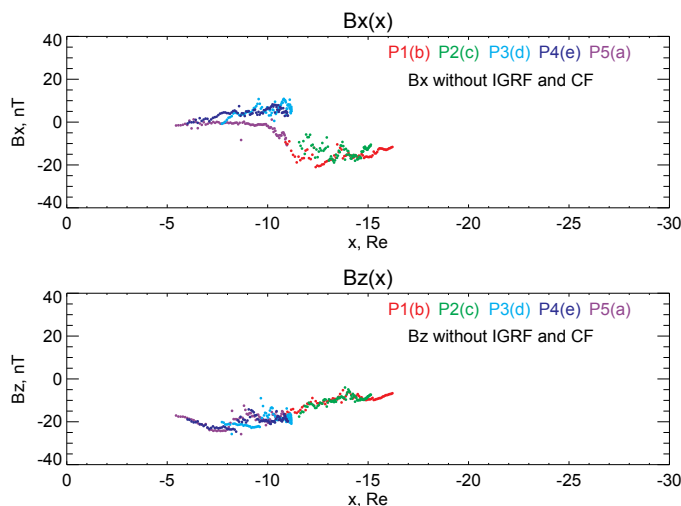


Рис. 4: Данные по магнитному полю ( $B_x$  и  $B_z$ , в нТл) и положение (в  $R_E$ ) спутников THEMIS в 00–07 UT часов 04.04.2009

рассчитано при помощи модели A2000, а поле токов Земли — по модели IGRF-11. В отличие от предыдущего случая (спокойные условия в СВ), мы не можем использовать одновременные измерения спутников в различные моменты времени. В каждый момент времени мы можем использовать не более чем 5 измерений (5 спутников THEMIS) в различных точках пространства.

Рис. 6 показывает одновременные измерения магнитного поля на бортах 5 спутников THEMIS в 5:35 UT часов 14.02.2009, когда  $Dst$ -индекс достиг своего максимального значения. Начальная фаза SSC подошла к концу и началась главная фаза. Черные точки — полное магнитное поле, измеренное спутниками. Голубые точки — полное поле, измеренное спутниками, но без поля Земли (использовалась модель IGRF). Красные точки — полное поле, измеренное спутниками, но без поля Земли (использовалась модель IGRF) и без поля от токов Чепмена–Ферраро на магнитопаузе (использовалась модель A2000). На спутниках THEMIS Probe 3, Probe 4 и Probe 5 (находившихся на расстоянии около  $-10R_E$  вдоль оси  $X_{GSM}$  наблюдался минимум  $B_x$ -компоненты  $-65$  нТл (на спутнике Probe 5 он наблюдался на 20 мин раньше). Такая величина поля говорит о значительных токах, протекающих в переднем крае токового слоя хвоста, и мы можем увидеть начало приближения геомагнитного хвоста к Земле. Наличие большой по модулю  $B_z$ -компоненты поля вблизи Земли, в области с умеренными значениями  $B_x$ -компоненты не связано с усилением токов хвоста и, по-видимому, свидетельствует о развитии кольцевого тока во время главной фазы бури.

Рис. 7 показывает одновременные измерения магнитного поля на бортах 5 спутников THEMIS в 13:00 UT часов 14.02.2009. Черные точки — полное магнитное поле, измеренное спутниками. Голубые точки — полное поле, измеренное спутниками, но без



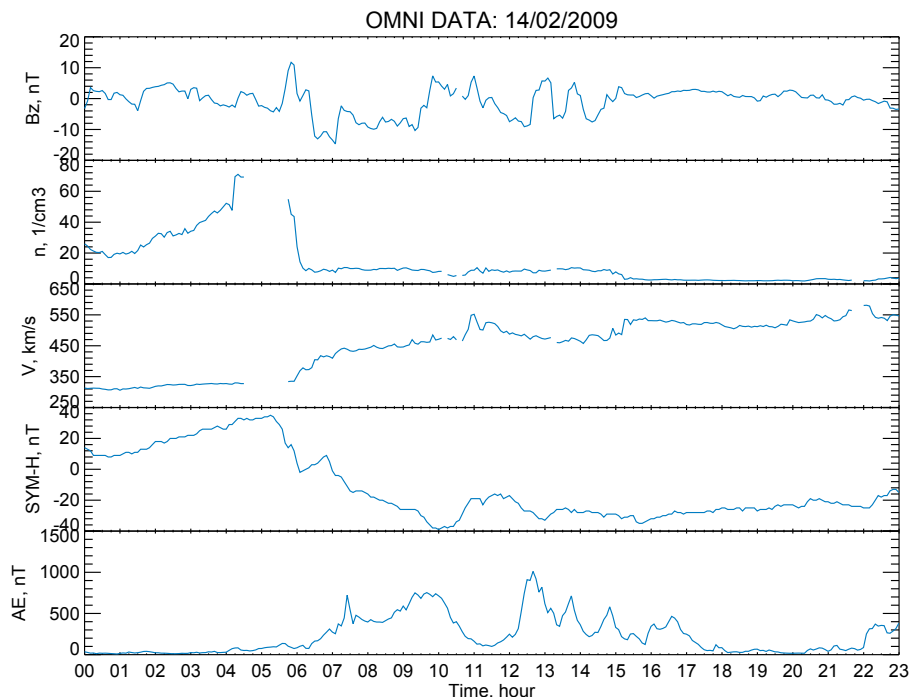


Рис. 5: Параметры солнечного ветра ( $B_z$  ММП, нТл, плотность протонов СВ, частиц/см<sup>3</sup>, скорость СВ, км/с),  $Dst$ -индекс, нТл и  $AE$ -индекс, нТл в течение 14.02.2009

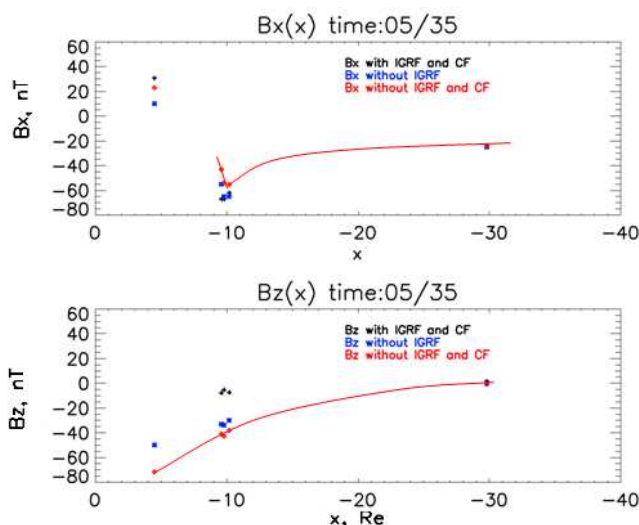


Рис. 6: Данные по магнитному полю ( $B_x$  и  $B_z$ , нТл) и расположение (в  $R_E$ ) спутников THEMIS в 05:35 UT часов 14.02.2009. Черные точки — полное поле, измеренное спутниками, но без поля Земли (использовалась модель IGRF). Красные точки — полное поле, измеренное спутниками, но без поля Земли (использовалась модель IGRF) и без поля от токов Чепмена-Феррарио на магнитопаузе (использовалась модель A2000)

поля Земли (использовалась модель IGRF). Красные точки — полное поле, измеренное спутниками, но без

поля Земли (использовалась модель IGRF) и без поля от токов Чепмена-Феррарио на магнитопаузе (использовалась модель A2000). Спутник THEMIS Probe 5 находился на расстоянии  $-8.6R_E$  (GSM) вдоль оси  $X$ , и его магнитометр зафиксировал локальный минимум  $B_x$ -компоненты магнитного поля  $-43$  нТл, который можно увидеть на рис. 7. Прежде всего это говорит о приближении переднего края токового слоя хвоста к Земле до расстояния  $-8.6R_E$ .

Предложенный метод позволяет, при удачном расположении спутников, восстановить распределение магнитного поля в магнитосферном хвосте. Как можно видеть, структура поля токов хвоста хорошо согласуется с модельными данными (A2000):  $B_z$ -компонента доминирует во внутренней магнитосфере, в то время как  $B_x$ -компонента преобладает за передним краем токового слоя и в удаленном хвосте. Максимальные значения  $B_x$ - и  $B_z$ -компонент достигаются вблизи переднего края токового слоя хвоста. В течение геомагнитных возмущений 14.02.2009 были зафиксированы сильные токи в хвосте магнитосферы, а передний край токового слоя приблизился к Земле на расстояние около  $8R_E$ .  $B_x$ -компонента магнитного поля вблизи переднего края токового слоя хвоста достигала  $-70$  нТл, а  $B_z$ -компонента  $-50$  нТл. Недостаточно сильный эффект на поверхности Земли от столь мощных токов связан судаленностью токовых систем от Земли, явлением, характерным для периода аномально-низкой солнечной активности в 2008-2009 гг.

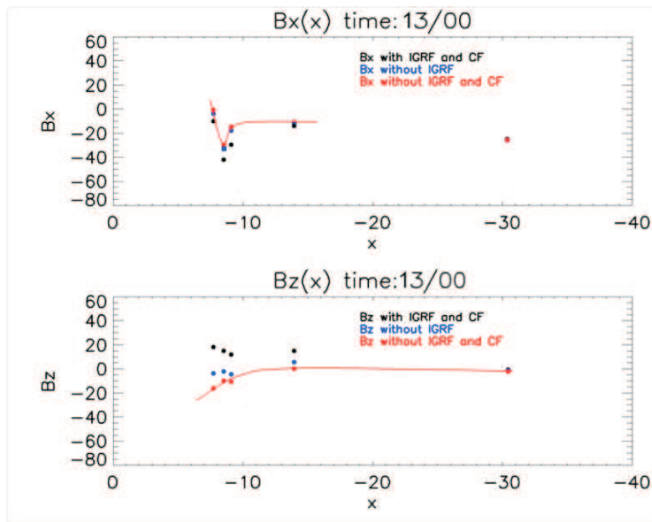


Рис. 7: Магнитные данные ( $B_x$  и  $B_z$ , нТл) и положение (в  $R_E$ ) спутников THEMIS в 13:00 UT часов 14.02.2009. Черные точки — полное магнитное поле, измеренное спутниками. Голубые точки — полное поле, измеренное спутниками, но без поля Земли (использовалась модель IGRF). Красные точки — полное поле, измеренное спутниками, но без поля Земли (использовалась модель IGRF) и без поля от токов Чепмена–Ферраро на магнитопаузе (использовалась модель A2000)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структура магнитного поля и положение переднего края токового слоя геомагнитного хвоста были

исследованы для периодов спокойного и умеренно-возмущенного состояния магнитосферы в 2009 году.

Было установлено, что передний край токового слоя хвоста при спокойных условиях находился на расстоянии около  $12R_E$  и магнитное поле в хвосте  $|B_t| \sim 20$  нТл.

В течение геомагнитных возмущений 14.02.2009 передний край токового слоя геомагнитного хвоста приблизился к Земле на расстояние около  $8R_E$  и были зафиксированы сильные токи в хвосте. Величина  $B_x$ -компоненты магнитного поля вблизи переднего края токового слоя хвоста достигала  $-70$  нТл, а значение  $B_z$ -компоненты составило  $-50$  нТл.

Магнитные возмущения в течение экстремально спокойной эпохи связаны с достаточно сильным воздействием солнечного ветра и характеризуются сильными магнитосферными токами в хвосте «раздутой» магнитосферы. Магнитная буря 14.02.2009 развивалась на фоне продолжительного периода низкой геомагнитной активности, связанной со слабым давлением солнечного ветра и низкими значениями ММП. Такие условия являются причиной слабого геомагнитного эффекта на поверхности Земли. Хотя условия в солнечном ветре были характерны для развития умеренной магнитной бури с минимум  $Dst$  около  $-100$  нТл, а токи в хвосте магнитосферы вызывал достаточно сильный магнитный эффект, зарегистрированная амплитуда  $Dst$ -вариации были втрое меньше ожидаемой.

- [1] Ness N. F. J. Geophys. Res. **70**. P. 2989–3005. (1965).
- [2] Fairfield D. H., Jones J. J. Geophys. Res. **101**. P 7785–7791. (1966).
- [3] Kalegaev V. V., Ganushkina N. Yu. AGU Monograph Physics and Modeling of the Inner Magnetosphere. P. 293–301. (2005).
- [4] Tanskanen E. I., Slavin J. A., Fairfield D. H., Sibeck D. G., Gjerloev J., Mukai T., Ieda A. and Nagai T. J. Geophys. Res. **110**. A03216. 10.1029/2004JA010561. (2005).
- [5] Tsyganenko N. A. Fairfield D. H. J. Geophys. Res. **109**. A03218. 10.1029/2003JA010062. (2004).
- [6] Angelopoulos V. Space Sci. Rev. **141**. P. 5–34. (2008).
- [7] Alexeev I. I., Belenkaya E. S., Kalegaev V. V., Feldstein Ya. I. Grafe A. J. Geophys. Res. **101**. P. 7737–7748. (1996).
- [8] Tsyganenko N. A., Sitnov M. I. J. Geophys. Res. **110**. 10.1029/2004JA010798. (2005).
- [9] Asikainen T., Maliniemi V., Mursula K. J. Geophys. Res. **115**. A12203. 10.1029/2010JA015774. (2010).

## Large-scale structure of the tail current by THEMIS data during extremely low solar activity

I.S. Nazarkov<sup>a</sup>, V.V. Kalegaev<sup>b</sup>

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>nazarkov@dec1.sinp.msu.ru, <sup>b</sup>klg@dec1.sinp.msu.ru

On the base of simultaneous measurements from the THEMIS satellites, the radial profile of the magnetic field and the position of the inner edge of the magnetospheric tail were determined during selected events in 2009. The magnetic field of the currents other than the tail current was subtracted from measurements. It was found that during quiet times the inner edge of the tail current sheet is located in the night side magnetosphere, at distances of about  $12R_E$ . In the vicinity of the inner edge of

the tail current the magnetic field  $B_x$ - and  $B_z$ - components were about -20 nT, while in the distant tail, at  $X_{GSM} = 30R_E$ , these values were about 10 nT. During geomagnetic disturbances the inner edge of the tail current sheet shifted towards the Earth to a distance of about  $7R_E$ . At the same time strong currents in the magnetotail were detected. During the disturbance of 14.02.2009 (min  $Dst$  -35 nT), the  $B_x$ -component of the magnetic field near the inner edge of the tail current sheet was about 70 nT, and the  $B_z$ -component was about -50 nT. Solar wind conditions on 14.02.2009 were consistent with those during moderate magnetic storms with minimum  $Dst$  of about -100 nT. However, strong currents, measured in the geomagnetic tail cause the insignificant  $Dst$ -effect. Actually, during the 2009 extremely quiet epoch, the magnetospheric current systems (magnetopause and cross-tail currents) were located at larger geocentric distances than typical and produce small disturbance on the Earth's surface.

PACS: 94.30.cl, 94.30.-d, 91.25.-r, 94.30.C

*Keywords:* Earth's magnetosphere, the inner edge of the magnetospheric tail, the low solar activity in 2009, a magnetic storm, the magnetic field of the inner edge of the magnetospheric tail.

*Received 14.06.2013*

### Сведения об авторах

1. Назарков Илья Сергеевич — аспирант, тел.: (917) 575-33-39, e-mail: nazarkov@dec1.sinp.msu.ru.
  2. Калегаев Владимир Владимирович — докт. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией ООКМ; тел.: (495) 939-19-15, e-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru.
-