

## АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

**Динамика магнитосферы во время бури 14.02.09**В. В. Калегаяев<sup>а</sup>, И. С. Назарков<sup>б</sup>

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобелева (НИИЯФ МГУ).  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

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

Статья поступила 26.01.2016, подписана в печать 24.02.2016.

Исследована структура магнитосферного магнитного поля во время бури 14 февраля 2009 г. Для каждого часа времени на основании данных по солнечному ветру рассчитаны модельные параметры (характеризующие магнитосферное магнитное поле) и была рассчитана эволюция магнитного поля в ходе бури при помощи модели магнитосферы Земли A2000. Показано, что аномально спокойные геомагнитные условия в 2009 г. способствовали расширению магнитосферы и были благоприятны для образования структур магнитного поля типа магнитного острова (плазмоидов) в области геомагнитного хвоста. В результате установлено, что отрицательные вариации  $B_z$ -компоненты в ночной магнитосфере могли возникать в ситуациях, когда магнитный поток через доли хвоста превышал некоторые критические значения, зависящие от параметров магнитосферных токовых систем. Показано, что формирование магнитного острова уменьшает магнитный поток через доли хвоста и предотвращает чрезмерно сильное развитие магнитного поля в хвосте.

*Ключевые слова:* магнитосфера Земли, магнитный остров, плазмоид, магнитная буря.

УДК: 550.383. PACS: 94.30.-d, 94.30.cl, 91.25.-r, 94.05.-a.

**Введение**

Магнитосфера возникает при взаимодействии солнечного ветра и собственного магнитного поля Земли. При этом ночная часть магнитосферы характеризуется особенной структурой магнитного поля: противоположно направленные магнитные поля в северной и южной долях образуют хвост магнитосферы, структуру, поддерживаемую электрическими токами поперек хвоста и замыкающимися через магнитопаузу [1]. Интенсивность и пространственная локализация токов в хвосте магнитосферы зависит от внешних условий: параметров солнечного ветра и вектора межпланетного магнитного поля (ММП) [2–5].

Токи хвоста магнитосферы, наряду с другими магнитосферными токовыми системами (кольцевой ток, токи на магнитопаузе, продольные токи, токи Чепмена–Ферраро на магнитопаузе), зависят от активности солнечного ветра и ответственны за развитие магнитных возмущений, таких как магнитные бури и суббури [6–8]. Взаимная динамика внутреннего поля и поля внешних источников (особенно поля хвоста магнитосферы) определяет структуру магнитного поля в хвосте магнитосферы. С другой стороны, токи хвоста и кольцевой ток определяют вариации магнитного поля во внутренней магнитосфере и ответственны за магнитную депрессию, наблюдаемую на поверхности Земли во время геомагнитных возмущений.

Dst-индекс является показателем возмущенности магнитосферы. Он характеризует депрессию магнитного поля, связанную с развитием буревых токовых

систем магнитосферы. Анализ изменения Dst-индекса во время магнитных бурь различной интенсивности показал, что изменение соотношений вкладов в магнитное поле от разных токовых систем в течение бури зависит от интенсивности самой бури. На бурях с максимальным  $|Dst|$  более 150 нТл происходит «насыщение» магнитного потока токов хвоста магнитосферы [9]. При этом вклад токов хвоста в Dst-индекс ограничен значениями от –150 до –200 нТл. Данный эффект определяется «насыщением» магнитного потока через доли хвоста магнитосферы, связанным с глобальной перестройкой магнитного поля, происходящей при возрастании токов хвоста выше критических значений.

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 фронта диполизации и образование магнитных структур замкнутого типа (плазмоидов). В настоящей работе исследована динамика магнитного поля во время геомагнитного возмущения 14 февраля 2009 г., в ходе которого измерения спутников THEMIS показали наличие структур в хвосте магнитосферы с отрицательной  $B_z$ -компонентой магнитного поля. Такие магнитные конфигурации свидетельствуют о формировании плазмоида, связанного с чрезмерным усиле-

нием магнитного потока через доли хвоста магнитосферы.

### 1. Формирования магнитного острова в хвосте магнитосферы

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 ( $B_{fac}$ ):

$$B = B_{in} + B_{CF} + B_R + B_T + B_{fac} + B_{trans}.$$

В отличие от внутриземных токов, испытывающих медленные, вековые вариации, существенные на временных масштабах около 1 года, магнитосферные источники подвержены значительно более быстрым изменениям, происходящим в течение суток или даже часов в ходе геомагнитных возмущений, таких как магнитные бури и магнитосферные суббури. Источники таких явлений — изменения условий в межпланетной среде, которые приводят к вариациям параметров магнитосферы и асинхронным изменениям магнитосферных токов, определяющих динамику магнитосферного поля.

Во время магнитной бури в глобальной структуре магнитосферного магнитного поля могут произойти значительные изменения. Например, при значительном усилении токов в хвосте магнитосферы может образоваться магнитный остров — плазмод. Такая структура магнитного поля может образоваться в хвосте в результате сложения поля внутриземных источников (с положительной  $B_z$ -компонентой) и усиленных токов в хвосте (с  $B_z < 0$ ). На рис. 1 качественно представлен механизм формирования плазмоида. Показан профиль  $B_z$ -компоненты магнитного поля, который в первом приближении является суммой вклада от диполя и токов хвоста ( $B_{dip}$  и  $B_{tail}$  соответственно). Поле  $B_{tail}$  отрицательное, а  $B_{dip}$  — положительное. Обычно дипольное магнитное поле больше, чем поле токов хвоста, и мы суммарно имеем положительную  $B_z$ , как на верхней панели. Здесь пунктирное поле  $B_{tail}$  противоположного знака представлено для наглядного сравнения  $|B_{tail}|$  и  $B_{dip}$ . Когда токи хвоста значительно усиливаются и  $|B_{tail}|$  становится больше  $B_{dip}$ , то возникает область с отрицательной  $B_z$ -компонентой магнитного поля вблизи переднего края токового слоя хвоста (нижняя панель). Это так называемый плазмод, область локального минимума магнитного поля вблизи переднего края токовой системы хвоста магнитосферы. X-точка возникает при такой структуре магнитного поля на границе раздела между плазмодом и полем внутренней магнитосферы. Эффект других источников магнитного поля, главными из которых являются токи на магнитопаузе, в данном рисунке не были учтены. Хотя они и внесли бы

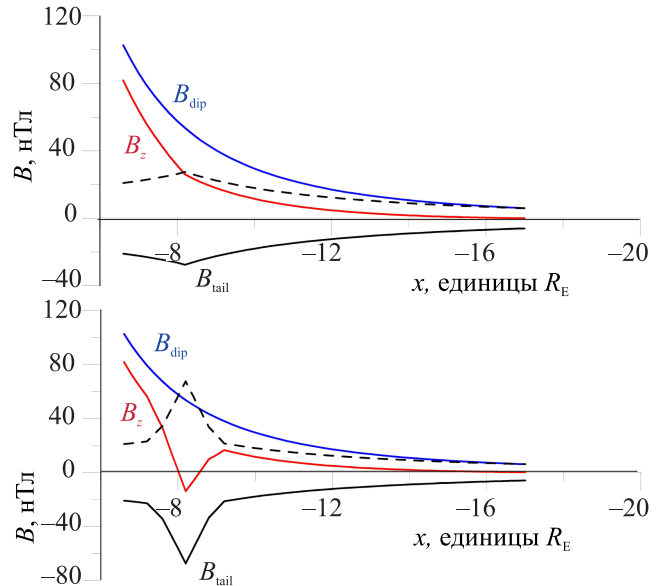


Рис. 1. Структура магнитного поля, полученная суперпозицией поля Земли и токов хвоста. Поле Земли — синие линии, поле токов хвоста — красные, суммарное поле — черные, «перевернутое» поле хвоста — черные пунктирные, представлено для сравнения с полем Земли. Вверху: типичная ситуация со слабым полем токов хвоста. Внизу: усиленное поле токов хвоста, что в результате дает отрицательное суммарное поле

дополнительный положительный вклад, около десятка нТл, в суммарную  $B_z$ -компоненту поля, качественно это не изменит характер картины.

Можно видеть, что возникновению нетипичной структуры магнитного поля с отрицательной  $B_z$ -компонентой способствуют как усиление токов хвоста выше критических значений, так и смещение его переднего края в ночную сторону. Важно, что при удалении токов хвоста потребуются умеренные токи для образования плазмоида. Так, если передний край токов хвоста расположен на расстоянии  $\sim 7R_E$ , его поле должно достигать  $-100$  нТл, чтобы превысить поле, порождаемое внутриземными токами. Если же передний край располагается на расстоянии около  $10R_E$ , то потребуется ток с магнитным эффектом лишь в  $-30$  нТл для того, чтобы превысить внутриземное поле. Аномально спокойные геомагнитные условия в 2009 г. привели к увеличению пространственных масштабов магнитосферы и отдельных токовых систем, что способствовало возникновению благоприятных условий для формирования структур магнитного поля в геомагнитном хвосте с отрицательной суммарной  $B_z$ -компонентой. Мы будем использовать измерения THEMIS для получения параметров магнитосферного хвоста на различных этапах магнитной бури и поиска структуры магнитного поля, характерной для образования плазмоида.

В течение зимы 2009 г. спутники THEMIS располагались вблизи апогея вдоль геомагнитного хвоста приблизительно каждые 4 дня. На основе спутниковых измерений мы можем восстановить параметры

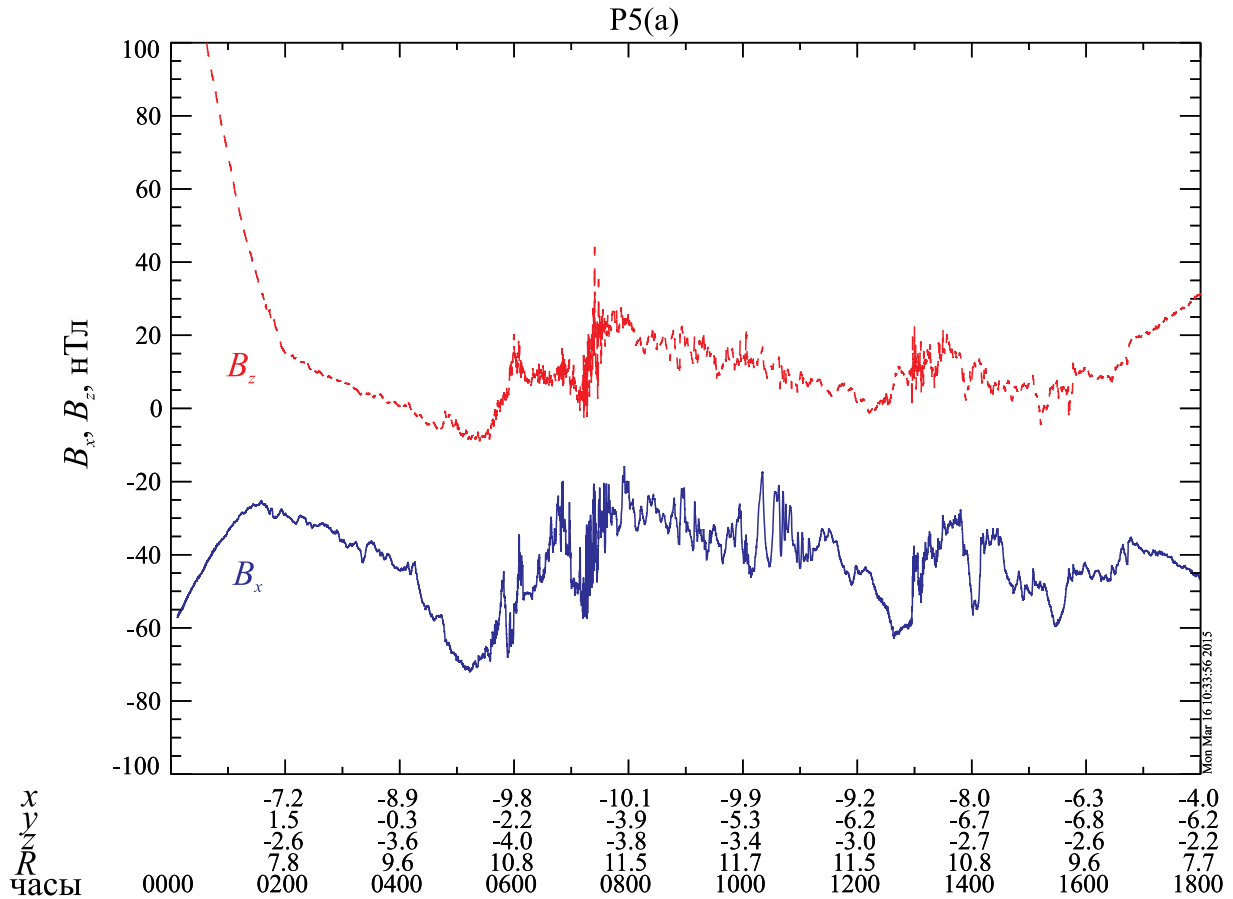


Рис. 2. Компоненты магнитного поля вдоль орбиты THEMIS P5 14.02.2009 ( $B_x$  — синяя сплошная линия,  $B_z$  — красная пунктирная),  $B_y$ -компонента магнитного поля не показана

токовой системы хвоста в определенные моменты времени: положение переднего края, максимальную интенсивность, радиальное распределение и динамику. Типичное магнитное поле, измеренное вдоль траектории спутника THEMIS P5, представлено на рис. 2. Показаны  $B_x$ - и  $B_z$ -компоненты магнитного поля в GSM-системе координат. В перигее магнитное поле составляет около нескольких десятков тысяч нТл, но на удалениях более 2 радиусов Земли мы уже видим динамику магнитосферного поля: так, вклад токов хвоста проявляется в сильных вариациях компонент магнитного поля в 10 UT и далее. В измерениях также присутствуют вклады от кольцевого тока и токов на магнитопаузе, которые, так же как и токи хвоста, дают вклад в измеряемое на спутнике магнитное поле.

## 2. Условия в магнитосфере 14 февраля 2009 г.

Для изучения динамики магнитосферного поля под воздействием солнечного ветра мы будем анализировать событие 14 февраля 2009 г. Для февраля 2009 г. характерны очень спокойные внешние условия. Небольшие вариации ММП, плотности, скорости плазмы и динамического давления солнечного ветра были зафиксированы 13 февраля, накануне интересующего нас дня. Внешние условия привели к расширению магнитосферы: к увеличением расстояния до подсолнечной точки до 12–13 $R_E$  (рассчитан-

ного при помощи модели [10]) и сдвигу переднего края токового слоя в ночную сторону до расстояний 10–12 $R_E$ . Dst-индекс не демонстрировал каких-либо значительных вариаций, характерных для магнитосферной активности.

14 февраля 2009 г. ускоренный поток плотной плазмы солнечного ветра достиг магнитосферы Земли. На рис. 3 сверху вниз представлены компонента ММП, плотность, скорость и давление солнечного ветра, а также 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 составляла около 300 км/с. После достижения максимальных значений плотность резко упала, но скорость начала увеличиваться, достигнув значений 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. Было зафиксировано усиление токов Чепмена–Ферраро на магнитопаузе, которое достигло максимума по данным Dst около 05:35 UT. В 06:00 UT 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 приблизительно 40 нТл, в то время как фаза восстановления началась примерно в 16:00 UT.

Вариации Dst-индекса в течение 14.02.2009 ха-

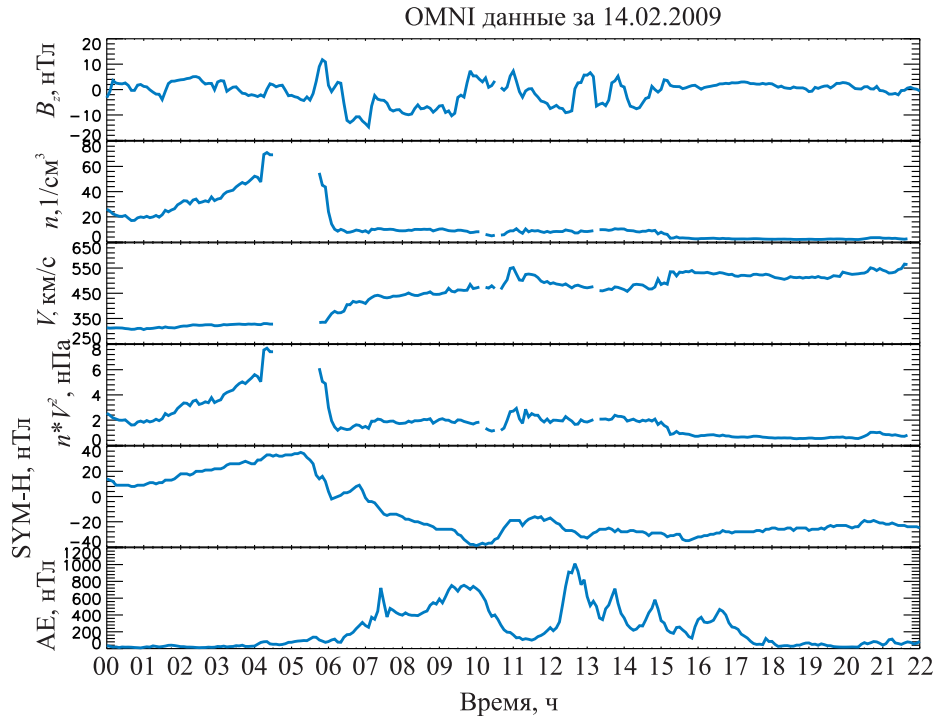


Рис. 3. Параметры солнечного ветра (ММП  $B_z$ , нТл; плотность протонов, частиц/см<sup>3</sup>; скорость, км/с; и давление, нПа), Dst-индекс и AE-индекс, нТл, 14 февраля 2009 г.

рактерны для типичной, хотя и миниатюрной магнитной бури: мы видим увеличение Dst во время импульса давления СВ и затем развитие небольшого отрицательного возмущения геомагнитного поля.

### 3. Структура магнитного поля в магнитосфере во время магнитной бури 14 февраля 2009 г.

Для количественных оценок магнитного поля могут быть использованы магнитосферные модели [8, 11, 12]. Параболоидная модель магнитосферы A2000 [8, 13] определяет магнитосферное магнитное поле каждой крупномасштабной токовой системы как аналитическое решение уравнения Лапласа при фиксированной форме магнитопаузы (параболоид вращения). Компоненты магнитного поля, нормальные к 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 внутривоздушных токов, —  $B_{sd}$  и токов на магнитопаузе, экранирующих поле кольцевого тока, —  $B_{sr}$ :

$$B_m = B_{sd}(\psi, R_1) + B_T(\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty) + B_R(\psi, b_r) + B_{sr}(\psi, R_1, b_r) + B_{fac}(I_{||}).$$

Модель A2000 не зависит от какой-то конкретной базы данных измерений, что могло бы накладывать ограничения на ее применимость. Таким образом, модель может хорошо описывать магнитное поле как для спокойной и возмущенной, так и сильно возмущенной геомагнитной обстановки, когда ограничен набор экспериментальных данных, что накладывает

ограничение на использование эмпирических моделей. Динамика магнитосферы во время бури представлена временными изменениями крупномасштабных токовых систем.

Входные данные для модели являются ключевыми параметрами магнитосферных токовых систем, которые отображают 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: параметров солнечного ветра и ММП, а также геомагнитных индексов Dst и Al [13, 14].

В работе [15] были восстановлены радиальные профили магнитного поля токов хвоста по данным измерений спутников THEMIS и с использованием моделей (A2000, IGRF), которые позволили рассчитать параметры модели в течение магнитной бури и вклады в измерения спутника токовых систем, отличных от токового слоя хвоста. На рис. 4 изображено распределение магнитного поля вдоль хвоста и магнитные силовые линии, рассчитанные в 12 UT 13 февраля, 00 UT и 07 UT 14 февраля по модели A2000 по вычисленным в [15] параметрам магнитосферы. Можно видеть, что по мере развития бури происходит сжатие магнитосферы. В 00 UT

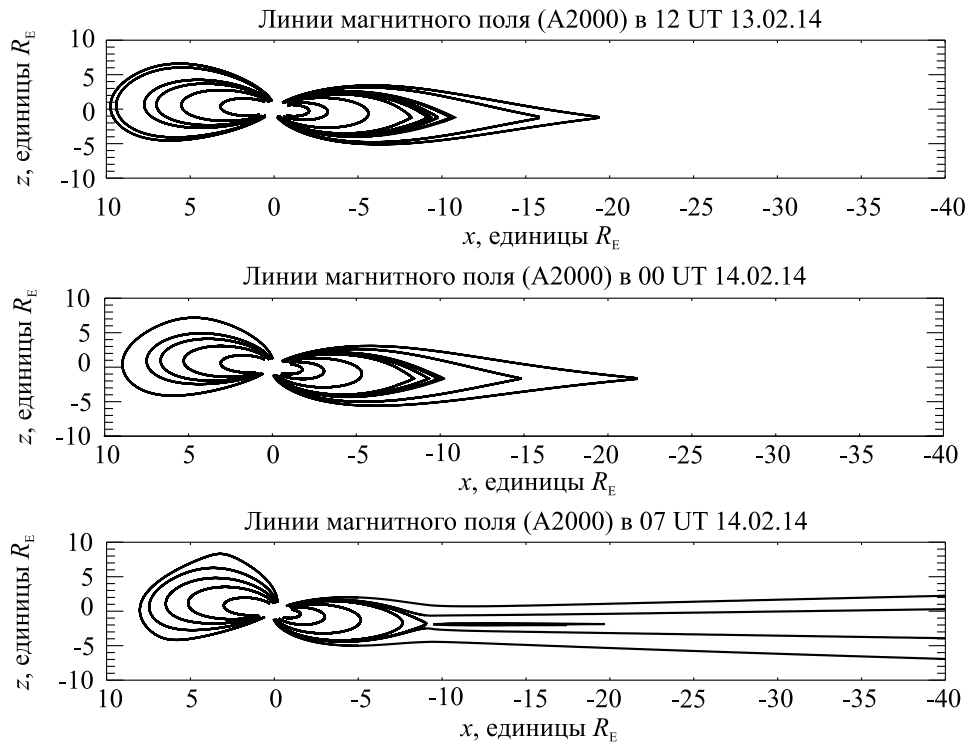


Рис. 4. Распределение  $B_z$ -компоненты магнитного поля вдоль оси  $x_{GSM}$  и структура магнитного поля в 12 UT 13 февраля (вверху), 00 UT (посередине) и 07 UT 14 февраля 2009 г. (внизу), рассчитанная при помощи магнитосферной модели A2000

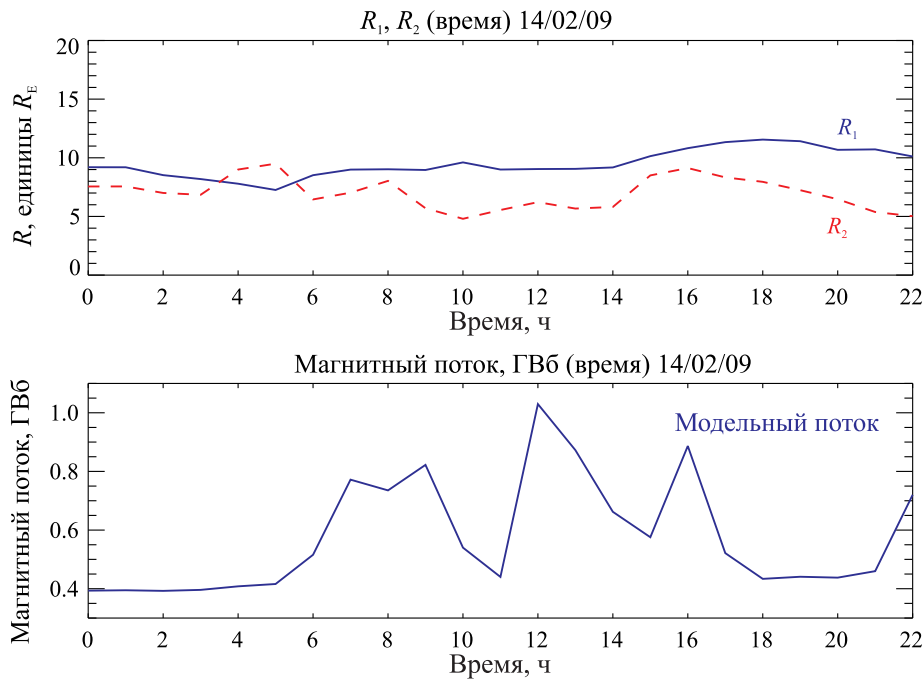


Рис. 5. Вверху — мгновенные значения параметров (расстояние до подсолнечной точки, синяя сплошная линия и расстояние до переднего края токового слоя хвоста, красная пунктирная линия) для каждого часа времени. Внизу — модельный магнитный поток сквозь доли хвоста в течение магнитной бури 14 февраля 2009 г. Временной масштаб — 00:22 UT 14 февраля 2009 г.

14 февраля происходит усиление токов в хвосте, что приводит к возрастанию потока с прекращением компрессии магнитосферы на главной фазе бури. В итоге в начальный момент бури, в 07 UT 14 февраля, мы видим формирование фронта диполизации. Его характерной особенностью является изменение

знака  $B_z$  (как мы видим на рис. 2) с нейтральной точкой X-типа. Слева от X-точки магнитное поле диполизуется, справа формируется плазмод, или магнитный остров. Видно, что образование таких магнитных структур (магнитные острова или плазмоды) — естественный результат глобальной

магнитосферной динамики в условиях резкого усиления магнитного потока в хвосте магнитосферы. В нашем случае этому способствовали увеличенные по сравнению с обычными размеры магнитосферы, в частности удаленное положение переднего края токового слоя хвоста. Похожие структуры могут также возникать вследствие высокой 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. Измерения THEMIS показывают, что во время нескольких суббурь 14 февраля 2009 г. образовывались области с пониженным магнитным полем. Возможно, что они также сопровождались образованием фронтов диполизации около 12 UT и 16 UT.

Хотя мы определили формирование плазмоида по смене знака  $B_z$ -компоненты магнитосферного поля, в действительности только магнитный поток через доли хвоста является ключевым параметром, который может характеризовать интенсивность токовой системы хвоста и служить индикатором формирования магнитных структур типа плазмоида. Изменения магнитного потока долей хвоста как из-за смещения токового слоя, так и из-за его возрастания тока поперек хвоста, ответственны за образования плазмоидов в ночной магнитосфере.

Рассмотрим динамику параметров магнитосферы во время бури 14 февраля 2009 г. Мы рассчитали параметры модели по данным солнечного ветра и геомагнитным индексам через субмодели или использовали прямые измерения параметров, когда это возможно. Значения были рассчитаны проектированием приэкваториальной границы аврорального овала в полночь в токовый слой хвоста в «реальном» магнитном поле по модели A2000. На рис. 5 представлены профили параметров магнитосферы:  $R_1$  (расстояние до подсолнечной точки),  $R_2$  (расстояние до переднего края токового слоя хвоста) и  $\Phi$  (магнитный поток). Можно видеть, что образование плазмоида произошло в условиях, когда произошло резкое увеличение магнитного потока в хвосте на фоне восстановления размеров магнитосферы.

### 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 г. Было показано, что геомагнитные условия в 2009 г., которые способствовали расширению магнитосферы, были благоприятны для образования структур магнитного поля с отрицательной  $B_z$ -компонентой в области геомагнитного хвоста. Магнитные острова возникали, когда магнитный поток сквозь доли хвоста превышал некоторое критическое значение. Этот механизм преобразовывал магнитный поток сквозь доли хвоста в замкнутые магнитные структуры (магнитные острова) и предотвращал сильное развитие магнитного поля в хвосте.

Авторы выражают 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-Анджелеса, Калифорния) за предоставление данных проекта THEMIS.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00098).

### Список литературы

1. Ness N.F. // J. Geophys. Res. 1965. **70**. P. 2989.
2. Kaufmann T.G. // J. Geophys. Res. 1987. **92**. P. 7471.
3. Sergeev V.A., Mitchell D.G., Russell C.T., Williams D.J. // J. Geophys. Res. 1993. **98**. P. 17345.
4. Ganushkina N.Y., Liemoh M., Kubyschkina M. et al. // Ann. Geophys. 2010. **28**. P. 123.
5. Zhou X. et al. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2013. **118**. № 6. P. 3173.
6. Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y. et al. // J. Geophys. Res. 1994. **99**. P. 5771.
7. Ho C.M., Tsurutani B.T. // J. Geophys. Res. 1997. **102**. N A7. P. 14165.
8. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. et al. // J. Geophys. Res. 1996. **101**. P. 7737.
9. Kalegaev V.V., Makarenkov E.V. // J. Atmospheric Solar-Terrestrial Physics. 2008. **70**. P. 519.
10. Shue J.-H., Chao J.K., Fu H.C. et al. // J. Geophys. Res. 1998. **103**. P. 17691.
11. Tsyganenko N.A. // J. Geophys. Res. 2002a. **107**.
12. Kubyschkina M., Sergeev V., Tsyganenko V. et al. // J. Geophys. Res. 2009. **114**. A00C21.
13. Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S. et al. // J. Geophys. Res. 2001. **106**. P. 25683.
14. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Y., Kalegaev V.V. // Space Science Rev. 2003. **107**. P. 7.
15. Kalegaev B.B., Назарков И.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 4. С. 75. (Kalegaev V.V., Nazarkov I.S. // Moscow University Phys. Bull. 2015. **70**, N 4. P. 291.)

**Magnetospheric dynamics during the storm of February 14, 2009****V. V. Kalegaev<sup>a</sup>, I. S. Nazarkov<sup>b</sup>***Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: <sup>a</sup>klg@dec1.sinp.msu.ru, <sup>b</sup>nazarkov@dec1.sinp.msu.ru.*

The structure of the magnetic field in the magnetospheric during the storm of February 14, 2009 is studied. The model parameters that characterize the magnetospheric magnetic field are calculated every hour on the basis of solar wind data and the evolution of the magnetic field during the storm is reproduced using the A2000 model of the Earth's magnetosphere. It is shown that extremely quiet geomagnetic conditions in 2009 promoted the expansion of the magnetosphere and were favorable for the formation of magnetic-island-like structures (plasmoids) in the geomagnetic tail. It is ascertained that negative variations in the  $B_z$  component could occur in the nightside magnetosphere in situations where the magnetic flux through the tail lobes exceeded certain thresholds, which depend on the parameters of the magnetospheric current systems. It is shown that the formation of magnetic islands decreases the magnetic flux through the tail lobes and prevents excessively strong development of the magnetic field in the tail.

*Keywords:* Earth's magnetosphere, magnetic islands, plasmoid, magnetic storm.

PACS: 94.30.-d, 94.30.cl, 91.25.-r, 94.05.-a.

*Received 26 January 2016.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 3. Pp. 291–298.

**Сведения об авторах**

1. Калегаев Владимир Владимирович — докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-19-15, e-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru.
2. Назарков Илья Сергеевич — аспирант, мл. науч. сотрудник; e-mail: nazarkov@dec1.sinp.msu.ru.