

Формирование переходной токовой системы вблизи переднего края тока хвоста магнитосферы

В. В. Калегаев^а, И. С. Назарков^б

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^а klg@dec1.sinp.msu.ru, ^б nazarkov@dec1.sinp.msu.ru

Статья поступила 24.02.2015, подписана в печать 18.03.2015.

На основе данных спутников THEMIS исследуется структура магнитного поля в области вблизи переднего края хвоста магнитосферы во время подготовительной фазы бури 14.02.2009. Магнитное поле токов, протекающих в хвосте магнитосферы, получено вычитанием из измеренного на борту спутников магнитного поля эффекта геомагнитного диполя и магнитного поля магнитосферных токов, отличных от хвоста (главным образом токов на магнитопаузе). Для расчета магнитного поля магнитосферных токов использовалась параболическая модель магнитосферы (A2000). Сопоставление расчетов и одновременных измерений на пяти спутниках в геомагнитно спокойные периоды позволило получить типичные радиальные профили компонент магнитного поля вдоль хвоста магнитосферы. Показано, что необычная структура магнитного поля вблизи переднего края токового слоя хвоста до начала магнитной бури 14.02.2009 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. Определены пространственное положение и интенсивность тока.

Ключевые слова: магнитосфера Земли, передний край токового слоя магнитосферы Земли, магнитная буря, магнитное поле токовой системы хвоста магнитосферы.

УДК: 537.632.636, 621.3.013, 550.383. PACS: 94.30.cl, 94.30.-d, 91.25.-g, 94.30.C.

Введение

Геомагнитный хвост — одна из фундаментальных областей магнитосферы Земли, определяющая ее структуру и динамику [1]. 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 [2–5].

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 [2] 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 $-70R_E$, имеет вид

$$B = \frac{\left(-96.5 + 294.5\sqrt{P_{sw}} + 2.36B_{imf}^2 \sin^2 \theta/2\right)^{1/2}}{B_0} \times$$

$$\times \left[\frac{1659.2}{R^{1.46}} + 7.47 \right],$$

где R — радиальное расстояние до местоположения в R_E , B_0 — среднее поле на расстоянии $30R_E$, которое составляет 19 нТл, P_{sw} — динамическое давление солнечного ветра, B_{imf} — величина ММП, а $\theta = 180^\circ$ при южном направлении ММП и 0° при северном. 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 [2, 4]. 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 [6]. При взаимодействии с ударными волнами большой амплитуды могут возникать неравновесные конфигурации магнитосферного магнитного поля. Такие эффекты, по-видимому, характерны для магнитосфер малых релятивистских объектов, например нейтронной звезды [7].

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 [8]. В активную фазу эксперимента каждые четыре дня одинаково оснащенные спутники в апогее выстраивались в одну линию. Выполнение одновременных измерений пятью спутниками дает 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. В настоящей работе по данным измерений спутников THEMIS будет исследоваться структура магнитного поля в области вблизи переднего края хвоста магнитосферы во время подготовительной фазы бури 14.02.2009. Сочетание экспериментального и теоретического подходов позволяет более детально изучить структуру и динамику магнитного поля в этой области. Магнитное поле токов хвоста магнитосферы будет получено вычитанием из измеренного на борту спутников магнитного поля полей от внутриземных источников и токов магнитосферы, отличных от токового слоя хвоста, главным образом токов на магнитопаузе. Магнитное поле токов в магнитосфере будет рассчитано по параболоидной модели магнитосферного магнитного поля (A2000) [9].

Главная цель настоящей работы — изучить динамику магнитного поля вблизи переднего края геомагнитного хвоста при сжатии магнитосферы на подготовительной фазе бури 14.02.09.

Структура магнитного поля токов хвоста 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_{iac}):

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

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.

Основной целью настоящей работы является изучение динамики поля токов хвоста B_T . Профиль магнитосферного магнитного поля может быть восстановлен по измерениям космических аппаратов. В то же время, поскольку в измерения вносят вклад разные магнитосферные токовые системы, определить структуру магнитного поля от токов хвоста эмпирически не представляется возможным. Поэтому на первом этапе используем модели IGRF и A2000 для вычисления внутреннего и магнитосферного полей соответственно.

На рис. 1 приведены характерные для спокойных условий в магнитосфере (зима в северном полушарии) профили компонент B_x (сплошная синяя линия) и B_z (пунктирная красная линия) магнитного поля в хвосте магнитосферы вдоль линии $y = 0$, $z = -2R_E$. Использовалась 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. На верхнем рисунке (рис. 1) представлена структура суммарного магнитосферного поля. Внутреннее поле доминирует во внутренней магнитосфере и определяет профиль кривых. Вычтем из суммарного поля вклады источников, отличных от токового слоя хвоста. Заметим, что в невозмущенной магнитосфере нет условий для формирования переходных токовых систем, которые не описываются моделью A2000. На среднем рисунке (рис. 1) представлены B_x и B_z после вычитания поля внутриземных источников, на нижнем изображен профиль компонент магнитного поля токового слоя хвоста.

Из рис. 1 видно, что магнитное поле идеализированной 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 для заданного набора параметров солнечного ветра 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, смещенного относительно плоскости xy_{GSM} -координат примерно на $2R_E$. 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. При смещении по оси z характер профилей компонент магнитного поля сохраняется, но становится менее ярко выраженным [10, 11].

Применим предложенную выше процедуру для реконструкции магнитного поля токов хвоста исходя из экспериментальных данных. На рис. 2 пред-

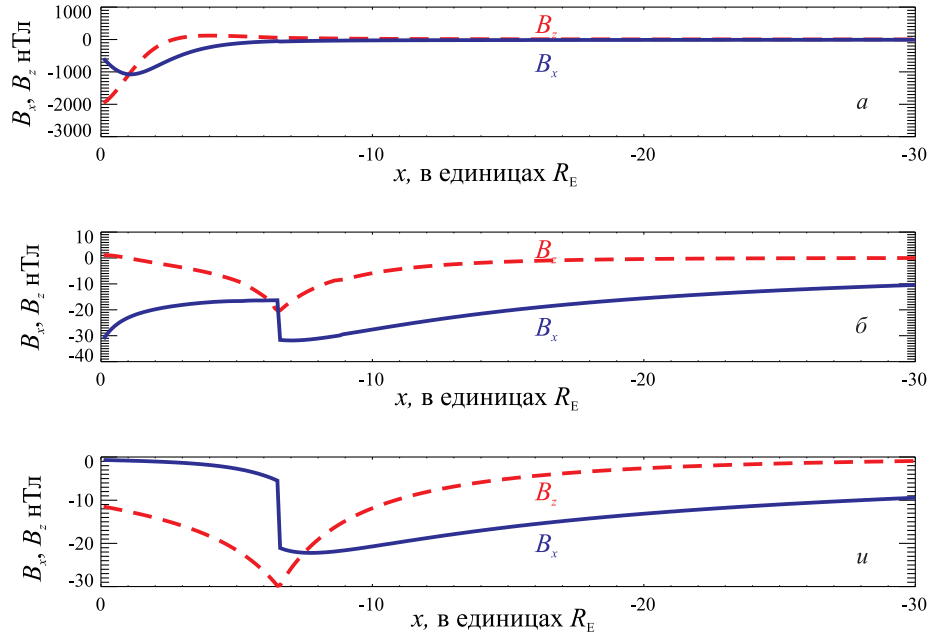


Рис. 1. Характерные для спокойных условий профили компонент B_x (сплошная кривая) и B_z (пунктирная кривая) магнитного поля в ночной магнитосфере вдоль линии $y=0$, $z=-2R_E$, рассчитанные по модели A2000. IGRF — магнитное поле, создаваемое внутриземными токами

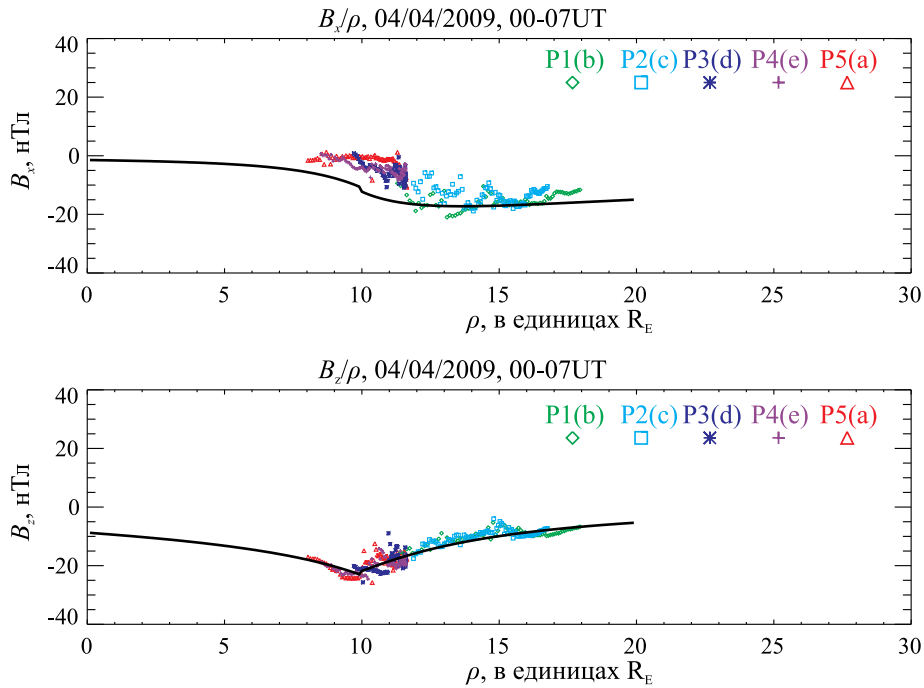


Рис. 2. Данные по магнитному полю B_x и B_z и положение ρ (в R_E) спутников THEMIS в 00–07 UT ч 04.04.2009. Сплошная кривая — магнитное поле, полученное при помощи моделирования (A2000, вычтены вклады от внутриземных токов, кольцевого тока и токов на магнитопаузе)

ставлены профили B_x – и B_z -компонент магнитного поля геомагнитного хвоста, полученные вычитанием магнитного поля внутренних источников и поля от магнитосферных токовых систем, отличных от токов хвоста магнитосферы из измерений, произведенных всеми аппаратами THEMIS в течение 00–07 UT 04.04.2009. В течение семи часов спутники THEMIS располагались примерно вдоль хвоста магнитосферы. В околоземном пространстве регистрировались спокойные условия: плотность протонов в солнечном ветре составляла 5–8 частиц/см³, скорость плазмы

была около 280 км/с, межпланетное магнитное поле изменялось от 1 нТл до 0. Значения Dst- и AE-индексов также соответствовали спокойным условиям. Незначительные вариации солнечного ветра дают основания полагать, что в течение 00–07 UT магнитосфера была стабильна, а все измерения выполнялись спутниками THEMIS при одних и тех же внешних условиях.

Полученные статистические профили показывают типичную структуру магнитного поля токов хвоста магнитосферы при спокойных условиях в сол-

нечном ветре и позволяют определить положение и интенсивность токов хвоста. Можно видеть отмеченные выше 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. Сплошной линией показаны результаты расчетов магнитного поля по модели (A2000) для представленных выше условий в солнечном ветре. Мы можем видеть, что передний край токов хвоста магнитосферы Земли расположен на расстоянии $10\text{--}12 R_E$ в ночную часть магнитосферы. Около переднего края токового слоя хвоста модули B_x - и B_z -компоненты магнитного поля составляют 20 нТл, в то время как в удаленном хвосте магнитное поле становится более слабым.

Можно ожидать, что подобные особенности следует наблюдать и в спутниковых измерениях магнитного поля во время геомагнитных возмущений. Однако в связи с изменчивостью параметров солнечного ветра совместное использование данных от всех пяти спутников требует проведения дополнительного анализа.

На рис. 3 представлены условия в околоземном пространстве 14.02.2009. Плотность солнечного ветра возрастала от 20 частиц/см³ в 1:00 UT, затем до 60 частиц/см³ в 5:00 UT ч; скорость плазмы возрастала в 6:00 UT от 300 до 500 км/с. Вариации Dst-индекса в течение 14.02.2009 характерны для типичной, хотя и миниатюрной магнитной бури: мы видим увеличение Dst во время импульса давления СВ и затем развитие небольшого отрицательного возмущения.

Вычтем из измеренных 14 февраля 2009 значений магнитного поля спутниками THEMIS P3, P4 и P5, рассчитанное по модели A2000 поле источников,

отличных от токов хвоста. На рис. 4,а представлены компоненты магнитного поля токов хвоста, измеренные вдоль орбиты THEMIS P5; на рис. 4,б представлены B_x — синяя сплошная линия, B_z — красная пунктирная. На рис. 4,б представлены эти же компоненты после вычитания из измеренных значений магнитных полей внутренних источников и регулярных токов, рассчитанных по модели A2000. Можно видеть, что спутник удаляется от Земли, на расстоянии около $10 R_E$ произошло пересечение переднего края токового слоя, о чем свидетельствует возрастание B_x , после чего спутник оказывается в области плазменного слоя, откуда выходит на расстоянии около $9.6 R_E$ от центра Земли. Следует учитывать, что вариации компонент магнитного поля связаны не только с движением аппарата в пространстве, но и с изменением внешних условий в солнечном ветре.

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 рис. 4,б 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 рис. 5. 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 преодолевал за время

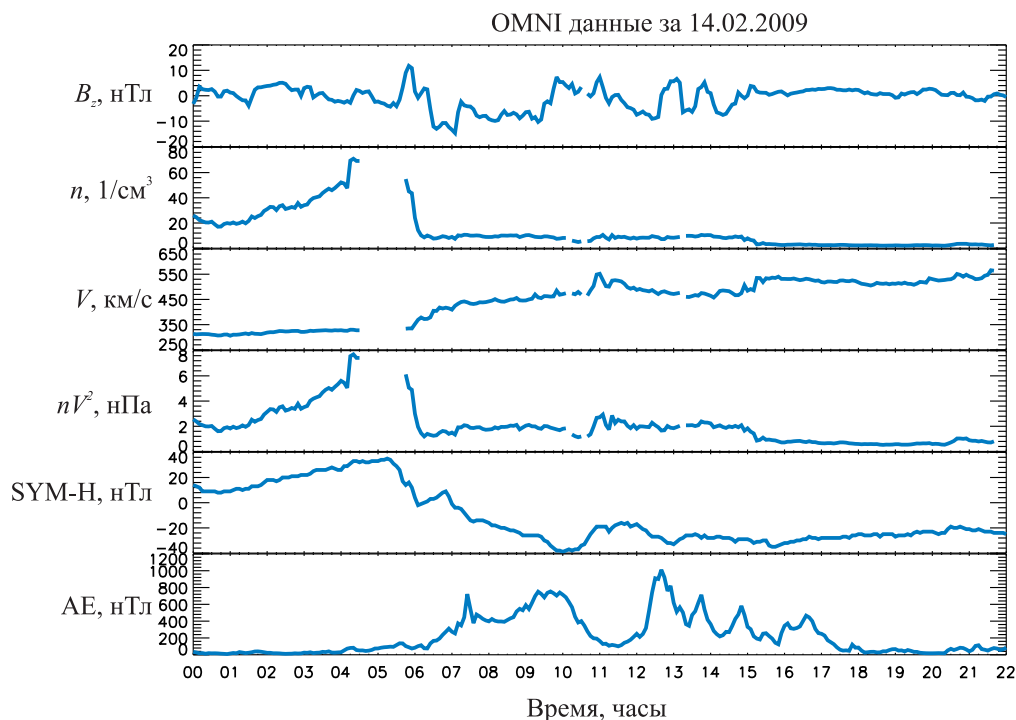


Рис. 3. Параметры солнечного ветра (ММП B_z , плотность протонов и скорость), Dst-индекс и AE-индекс по данным на 14 февраля 2009 г.

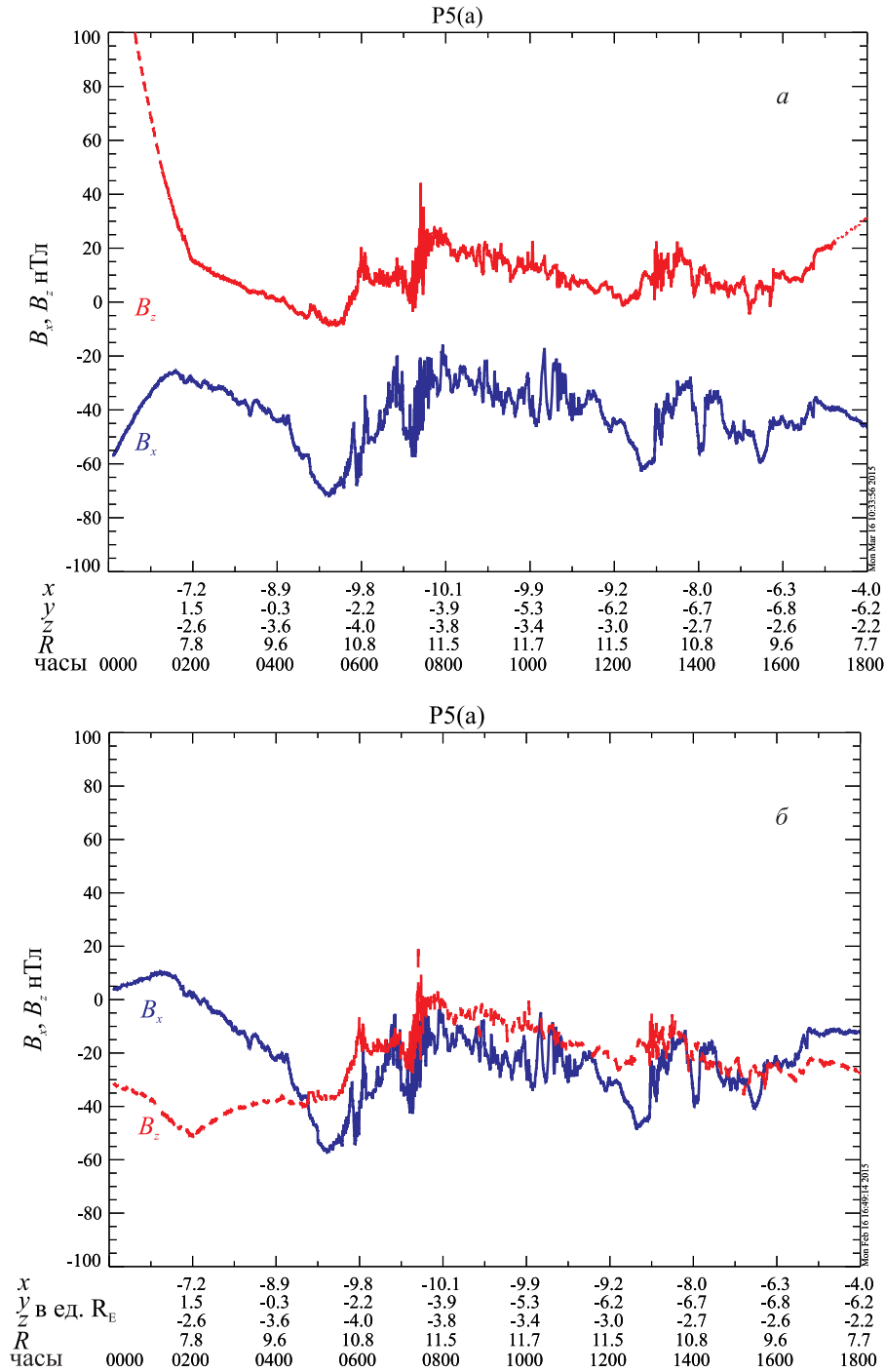


Рис. 4. Компоненты магнитного поля вдоль орбиты THEMIS P5 14.02.2009 (B_x — сплошная кривая, B_z — пунктирная кривая) — измеренные (а) и после вычитания магнитных полей от внутриземных токов и магнитосферных токов, отличных от токов хвоста (б). B_y -компонента магнитного поля не показана

от 2 до 6 UT, когда наблюдался постепенный рост давления солнечного ветра. Из рис. 4, б и 5 видно, что минимумы B_z -компоненты токов хвоста не соответствуют B_x -компоненте вдоль орбит всех трех спутников P3, P4, P5. Минимумы B_z обнаружены в различные моменты времени, но примерно на одинаковом расстоянии от Земли, около $7R_E$ и в $3R_E$ 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_x магнитного поля хвоста вблизи переднего края и увеличил бы ее во внутренней магнитосфере.

На рис. 6 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 образова-

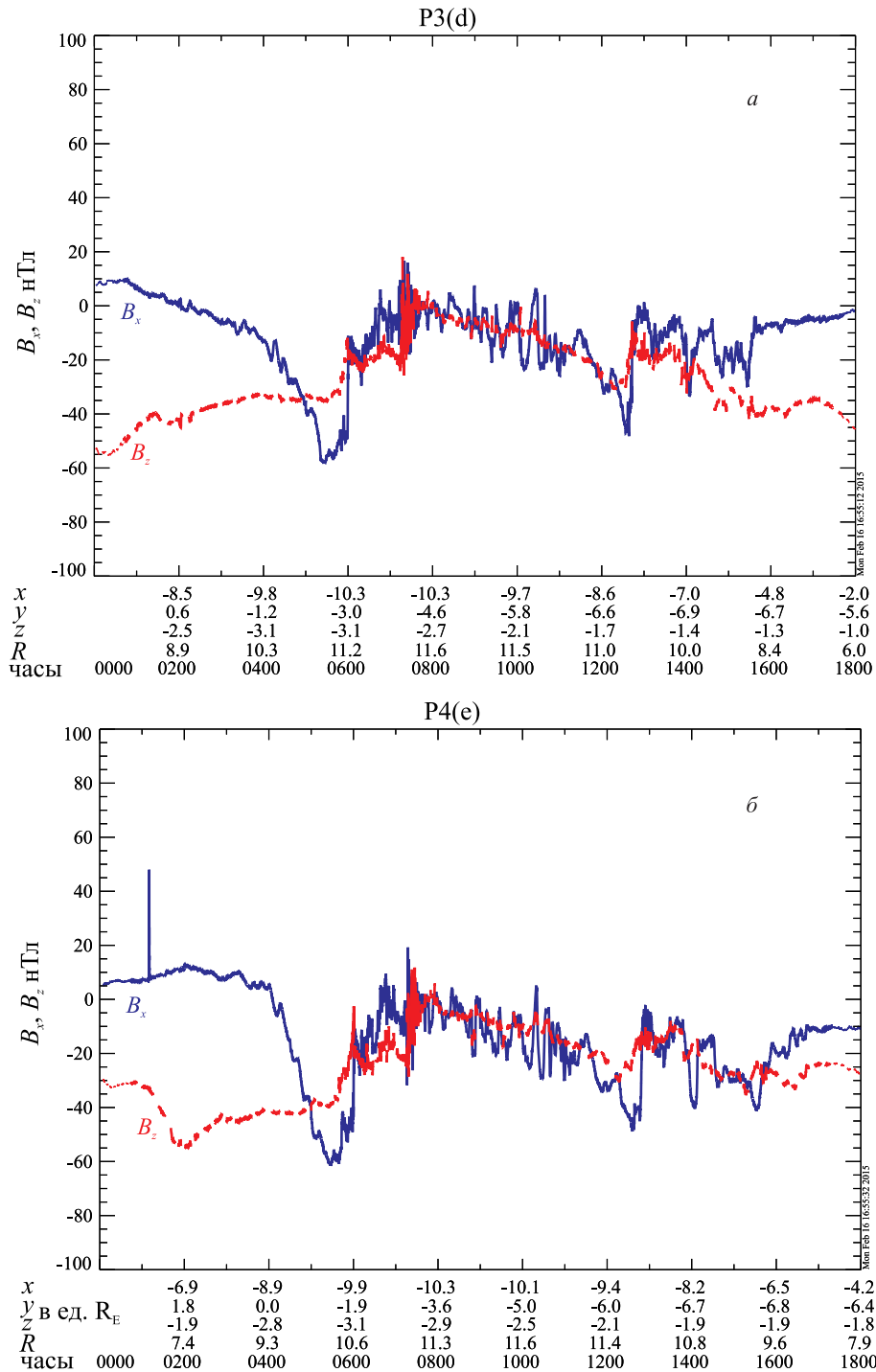


Рис. 5. Компоненты магнитного поля вдоль орбит THEMIS P3, P4 14.02.2009 (B_x — сплошная кривая, B_z — пунктирная кривая) после вычитания магнитных полей от внутриземных токов и токов на магнитопаузе. B_y -компонента магнитного поля не показана

ние специфического распределения магнитного поля (сплошная красная линия) и сдвиг минимума компоненты B_z к Земле с $10R_E$ до $7R_E$ в соответствии с данными THEMIS.

Мы предполагаем, что происхождение такого тока может быть результатом плавного возрастания давления солнечного ветра. Плотность СВ начала расти в 2 UT 14 февраля. Рост давления сопровождался сжатием магнитосферы с ожидаемым уменьшением сечения хвоста магнитосферы. Stern и Alexeev [12] 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 в ночную сторону, по крайней мере, до орбиты Луны и, следовательно, относительно медленно реагирует на внешние изменения в СВ, то можно предположить,

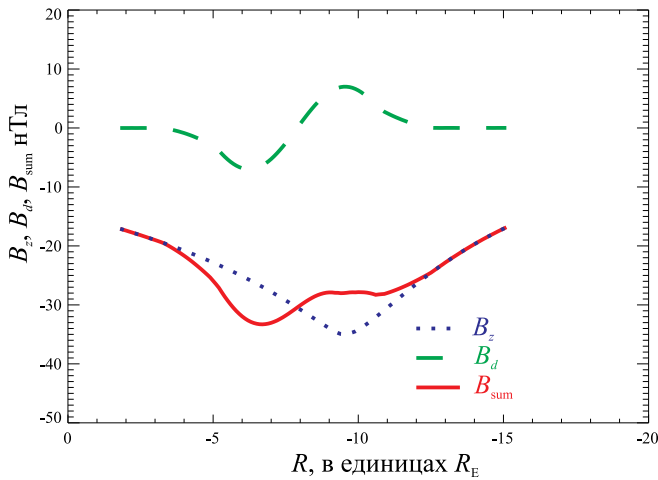


Рис. 6. B_z -компонента магнитного поля (сплошная кривая) вдоль геомагнитного хвоста, полученная при помощи наложения магнитного поля от токов хвоста (пунктирная кривая) и радиально-локализованного тока поперек хвоста (штриховая кривая)

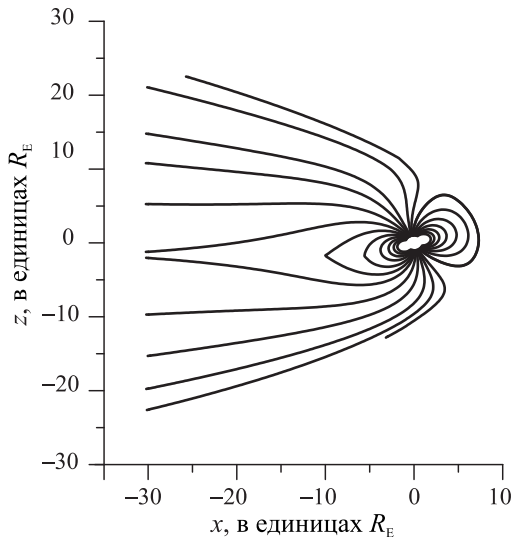


Рис. 7. Силовые линии магнитного поля в плоскости xz_{GSM} , рассчитанные в момент максимального сжатия магнитосферы солнечным ветром

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 [13]. Он создает магнитное возмущение в дополнение 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 рис. 7 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.

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

$$I = \frac{2\pi \delta r \delta B}{\mu_0} \sim 0.5 \text{ MA}.$$

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 [7] 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

Заключение

Изучены структура и динамика магнитного поля вблизи переднего края токового слоя хвоста во время подготовительной фазы бури 14.02.09 на основе данных спутников THEMIS. Восстановлены радиальные профили магнитного поля токов хвоста по данным измерений трех спутников и с использованием моделей (A2000, IGRF), которые позволили рассчитать вклады от токовых систем, отличных от токового слоя хвоста. 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 $7R_{\text{EXGSM}}$ до начала и в течение начальной фазы умеренной бури. Показано, что необычная структура магнитного поля вблизи переднего края токового слоя хвоста 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.

Авторы выражают благодарность В. Ангелополосу и А. Рунову (Университет Лос-Анджелеса,

Калифорния) за предоставление данных проекта Themis.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (контракт RFMEFI60414X0049).

Список литературы

1. Ness N.F. // J. Geophys. Res. 1965. **70**. P. 2989.
2. Fairfield D.H., Jones J. // J. Geophys. Res. 1966. **101**. P. 7785.
3. Калегаев В.В., Алексеев И.И., Фельдштейн Я.И. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. **38**. С. 10.
4. Tanskanen E.I., Slavin J.A., Fairfield D.H. et al. // J. Geophys. Res. 2005. **110**. A03216.
5. Tsyganenko N.A., Fairfield D.H. // J. Geophys. Res. **109**.
6. Бельская Е.С. // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. **43**, N 5. С. 602.
7. Сомов Б.В. // Письма в Астроном. журн. 2011. **37**, № 10. С. 740.
8. Angelopoulos V. // Space Sci. Rev. 2008. **141**. P. 5.
9. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. et al. // J. Geophys. Res. 1996. **101**. P. 7737.
10. Назарков И.С., Калегаев В.В. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2013. **4**. 134802.
11. Kalegaev V.V., Alexeev I.I., Nazarkov I.S. et al. // J. Advances in Space Research. 2014. **54**, N 9. P. 1773.
12. Stern D.P., Alexeev I.I. // Rev. Geophys. 1998. **26**, N 4. P. 782.
13. Kaufmann T.G. // J. Geophys. Res. 1987. **92**. P. 7471.

The formation of a transient current system near the inner edge of the magnetospheric tail current

V. V. Kalegaev^a, I. S. Nazarkov^b

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

E-mail: ^aklg@dec1.sinp.msu.ru, ^bnazarkov@dec1.sinp.msu.ru.

The structure of the magnetic field near the inner edge of the magnetospheric tail during the preliminary phase of the magnetic storm on Feb. 14, 2009 was studied based on the data of THEMIS satellites. The magnetic field of the currents that were flowing in the magnetospheric tail was obtained by subtracting the effect of the geomagnetic dipole and the magnetic field of magnetospheric currents other than the tail currents (mainly magnetopause currents) from the magnetic field measured on board the satellites. The paraboloid model of the magnetosphere (A2000) was used for calculating the magnetic field of magnetospheric currents. The comparison of calculations and measurements at five satellites in geomagnetically quiet periods allows one to obtain typical radial profiles of magnetic-field components along the magnetospheric tail. It was demonstrated that the nonstandard structure of the magnetic field near the inner edge of the tail-current sheet before the onset of the magnetic storm on February 14, 2009 is connected with the formation of the transient current system in the magnetosphere. A circular current in the equatorial plane was formed before the onset of the storm in the course of adiabatic compression of the magnetosphere by the solar wind to maintain the magnetic flux through the tail lobes. The spatial position and intensity of the current were determined.

Keywords: the Earth's magnetosphere, inner edge of the current sheet of the Earth's magnetosphere, magnetic storm, magnetic field of the magnetospheric tail current system.

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

Received 24 February 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2015).

Сведения об авторах

1. Калегаев Владимир Владимирович — докт. физ.-мат. наук, зав. отделом; 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.