

УДК 551.510

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В. Калегаяев

DYNAMIC MODELS OF THE GEOMAGNETIC FIELD

V.V. Kalegaev

Дан обзор современных динамических моделей магнитосферы Земли – параболоидной модели A2000 и модели Цыганенко T01. Для магнитной бури 9–11 января 1997 г. представлены результаты совместных расчетов магнитосферного магнитного поля, выполнен анализ вкладов крупномасштабных токов магнитосферы в D_{st} -вариацию. Показано, что обе модели дают хорошее согласие с измерениями, при этом вклад токовой системы хвоста магнитосферы в D_{st} сопоставим с вкладом кольцевого тока. В то же время относительная динамика магнитосферных токовых систем представляется разными моделями по-разному. Различия в профилях вариаций магнитного поля различных токовых систем, рассчитанных с помощью моделей A2000 и T01, определяются параметризацией моделей.

This paper presents a review of up-to-date dynamic models of the Earth's magnetosphere – the paraboloid model A2000 and the Tsyganenko model T01. We present calculation results of the magnetospheric magnetic field and analysis of contribution of large-scale magnetospheric currents to the D_{st} variation for the magnetic storm on 9–11 January 1997. Both models are shown to be in good agreement with measurements, and contribution of the magnetotail current system to D_{st} is comparable to that of the ring current. At the same time, different models present relative dynamics of magnetospheric current systems in a different way. Differences in profiles of magnetic field variations of different current systems calculated with the use of models A2000 and T01 are determined by the model parametrization.

Введение

Воздействие солнечного ветра на магнитосферу Земли реализуется двояким образом: как прямое воздействие потока солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), приводящее к изменениям размеров и структуры магнитосферы, и опосредованное, выражающееся в несинхронной собственной динамике магнитосферных токовых систем. Динамика магнитосферных токовых систем проявляется в вариациях магнитосферного магнитного поля, изменениях размеров и структуры плазменных образований в магнитосфере, в движении энергичных заряженных частиц. В формировании регулярного магнитосферного поля участвуют следующие источники:

- внутриземные токи, порождающие собственное магнитное поле Земли;
- поверхностные токи на магнитопаузе, экранирующие поле внутренних источников;
- токовая система хвоста магнитосферы, включающая токи поперек геомагнитного хвоста и замыкающие их токи на магнитопаузе;
- кольцевой ток, включающий симметричную и асимметричную компоненты;
- продольные токи, образующие трехмерные токовые системы вместе с замыкающими их токами в ионосфере и магнитосфере.

Крупномасштабное магнитосферное поле подвержено быстрым вариациям, наиболее значительным во время магнитных бурь и магнитосферных суббурь. Для описания таких вариаций магнитосферного магнитного поля используются современные динамические модели магнитосферы.

Современные модели представляют магнитное поле в околоземном космическом пространстве как суперпозицию вкладов крупномасштабных магнитосферных токовых систем. Можно выделить теоретическую параболоидную модель A2000 и семейство эмпирических моделей Цыганенко (T96, T01,

TS05), которые построены на принципиально разных подходах. Модель A2000 [Alexeev et al., 1996, 2001] основана на аналитическом решении уравнения Лапласа с граничным условием $B_n=0$ на магнитопаузе (представлена параболоидом вращения). Параметры магнитосферных токовых систем определяются из эмпирических данных. Модели Цыганенко [Tsyganenko, 1996, 2002a, b] строятся по большому массиву измерений магнитного поля в магнитосфере и одновременных измерений в солнечном ветре. Они являются результатом аппроксимации данных измерений семейством базисных функций, полученных при численном решении уравнения Лапласа внутри магнитопаузы заданной формы.

Оба класса моделей определяют магнитосферное магнитное поле суммой его составляющих, среди которых – магнитное поле токов Чепмена–Ферраро на магнитопаузе, поле кольцевого тока, поле токов магнитосферного хвоста, поле продольных токов. Интенсивности магнитосферных токовых систем и их геометрические размеры являются внутренними параметрами моделей и могут быть определены из наблюдательных данных: параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитных индексов. В каждый момент времени параметры определяют мгновенное состояние магнитосферы, а динамика магнитосферы может быть представлена как последовательность таких состояний. Такой подход позволяет эффективно использовать динамические модели магнитосферы для расчетов вектора магнитного поля [Tsyganenko, 1996, 2002b; Tsyganenko, Sitnov, 2005; Turner et al., 2000; Alexeev et al., 1996, 2001, 2003; Kalegaev et al., 2005].

В настоящей работе приведены общие описания параболоидной модели магнитосферы и модели Цыганенко T01 и методы их параметризации. На основе унифицированной методики расчета D_{st} в рамках моделей проведены расчеты D_{st} для магнитной бури

9–12.01.1997. Исследована роль токовой системы хвоста магнитосферы в развитии магнитных бурь средней интенсивности.

1. Регулярное магнитосферное магнитное поле

Регулярное магнитное поле в магнитосфере Земли может быть представлено в виде суммы:

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{int}} + \vec{B}_{\text{CF}} + \vec{B}_t + \vec{B}_r + \vec{B}_{\text{fac}}, \quad (1)$$

где \vec{B}_{int} – магнитное поле внутриземных токов, \vec{B}_{CF} – магнитное поле токов Чепмена–Ферраро на магнитопаузе, \vec{B}_t – поле кольцевого тока (включая симметричную и асимметричную его части), \vec{B}_r – поле токов магнитосферного хвоста, \vec{B}_{fac} – поле продольных токов.

Имеется существенное различие между задачей математического описания поля внутриземных токов, которое с точностью до вековых вариаций можно считать постоянным, и аналогичной задачей для магнитосферных источников поля. Магнитное поле от магнитосферных источников переменено во времени, что связано с постоянно меняющимися гелиогеофизическими условиями. Под воздействием солнечного ветра и ММП происходит изменение интенсивности и положения магнитосферных токовых систем. Такие изменения приводят к асинхронным изменениям слагаемых в (1), проявляющимся в сложной динамике полного измеряемого в магнитосфере магнитного поля. Необходимость учета влияния факторов межпланетной среды на параметры магнитосферных токовых систем является ключевым требованием к современным моделям магнитосферы.

2. Эмпирические модели магнитосферы

При описании суммарного магнитного поля в невозмущенной магнитосфере наиболее надежные результаты дают эмпирические модели [Mead, Fairfield, 1975; Tsyganenko, 1987, 1989]. Эти модели получены усреднением экспериментальных спутниковых данных. В модели Мида и Файерфилда использованы измерения магнитного поля на четырех ИСЗ серии IMP в области от 4 до $17R_E$ на низких и средних широтах [Mead, Fairfield, 1975]. Эти измерения разделены на четыре набора данных, характеризующихся уровнем геомагнитной активности. Отклонения измеренного поля от поля внутренних источников аппроксимированы квадратичными полиномами. Коэффициенты полиномов определяются минимизацией среднеквадратичного отклонения от массива экспериментальных данных. Величина среднеквадратичной невязки возрастает от 17.4 нТл для очень спокойных условий до 34.8 нТл для сильно возмущенных. Эти величины составляют ~50 % от значений магнитосферного поля.

Эмпирические модели являются хорошим приближением для усредненного магнитного поля во внутренней магнитосфере. В то же время они не могут дать корректного описания динамических процессов в магнитосфере. Их недостатками являются невозможность рассчитать эффекты отдельных токовых систем и грубая зависимость от эмпириче-

ских параметров (как правило, K_p -индекса). Отсутствие магнитопаузы как внешней границы геомагнитного поля делает невозможным корректное описание структуры высокоширотной магнитосферы.

Эмпирические модели Цыганенко T96, T01, [Tsyganenko, 1996, 2002a, b] представляют магнитное поле как суперпозицию вкладов отдельных источников в согласии с (1). Входными данными для моделей являются параметры солнечного ветра и геомагнитные индексы. Источниками магнитосферного магнитного поля в более совершенной модели T01 являются токи на магнитопаузе, токовый слой хвоста, кольцевой ток, частичный кольцевой ток и продольные токи. Токовый слой хвоста изгибается в двух направлениях с изменением угла наклона диполя, его внутренний край может смещаться вдоль линии Солнце–Земля, а толщина слоя меняется вдоль и поперек хвоста. Выражения для магнитного поля магнитосферных токов представляются в виде разложений по гармоническим функциям, а коэффициенты разложений рассчитываются из граничных условий.

Для учета воздействия внешних факторов на магнитосферное поле введена параметрическая зависимость величины магнитного поля каждой токовой системы от параметров солнечного ветра с помощью множителей вида:

$$t^0 + t^1(P_d / P_{d0})^a + t^2 G_1 + t^3 D_{st}^*, \quad (2)$$

где P_d и P_{d0} – текущее и среднее динамическое давление потока солнечного ветра, G_1 – параметр, описывающий предыдущее состояние ММП и солнечного ветра («память» магнитосферы), $D_{st}^* = 0.8 D_{st} - 13 P_d^{0.5}$ – так называемый скорректированный D_{st} -индекс (выражение (2) относится к полю хвоста).

Коэффициенты $\{t^i\}$ в (2) вычисляются для каждого источника магнитного поля путем минимизации среднеквадратичного отклонения от базы данных, включающей в себя измерения на КА «Polar», «Geotail», «CRRES», «DE-1» и др. Форма и положение магнитопаузы зависят от динамического давления солнечного ветра (но не от ММП) и определяются с использованием модели магнитопаузы [Shue et al., 1998].

Модель T01 описывает вариации магнитосферного магнитного поля, связанные с изменениями параметров солнечного ветра и в этом смысле является динамической моделью. В то же время, поскольку базовый набор измерений производился в ограниченной области магнитосферы ($x > -15R_E$), а магнитные бури в непрерывном потоке измерений были сравнительно редкими событиями, применимость модели T01, как и более ранней T96, ограничена областью ближней магнитосферы и значениями параметров D_{st} , P_{sw} , B_z , характерными для спокойных и умеренно возмущенных условий в магнитосфере (B_z – северо-южная компонента ММП).

В модели [Tsyganenko, Sitnov, 2005], предназначенной для описания возмущенной магнитосферы, была использована новая база данных измерений, выполненных во время 37 магнитных бурь 1996–2000 гг. в магнитосфере и одновременных измерений в солнечном ветре. Математический формализм основан на тех же принципах, что и в модели T01,

но предложена новая модель параметризации, в которой, как и в параболической модели A2000 [Alexeev et al., 1996], предполагалось, что каждый источник магнитного поля изменяется на собственном масштабе времени и зависит от собственных параметров. Интенсивность каждого источника магнитного поля масштабировалась величинами вида

$$t^0 + t^1 W / \sqrt{1 + (W / W_c)^2} + t^2 (P_d / P_{d0})^a, \quad (3)$$

где W описывает нелинейную динамику токовой системы как комбинацию процессов ее развития и распада:

$$\frac{dW}{dt} = S - \frac{W - W_0}{\tau}, \quad (4)$$

$S = \alpha N^\lambda V^\beta B_S^\gamma$ (как и выражение (2), формула (3) параметризует поле хвоста). Параметры для каждого источника магнитного поля ($\{t^i\}$, α , β , γ , λ и др., всего около 100 параметров) вычисляются путем минимизации среднеквадратичного отклонения от базы данных. Модель T05 основана на подходах, свойственных как теоретическим, так и эмпирическим моделям. Это успешная попытка привести в эмпирические модели такие идеи, как модульная структура, независимая параметризация токовых систем и насыщение, используемые в теоретических моделях. В результате, несмотря на то, что базовый массив на 68 % состоит из измерений, полученных на геостационарной орбите, и практически не содержит данных в области $R < 4R_E$, модель дает хорошее согласие при расчетах во внутренней магнитосфере.

3. Теоретические модели магнитосферы

Теоретические модели магнитосферы опираются на физически обоснованные предположения о структуре магнитосферного магнитного поля и позволяют рассчитывать эффект от каждого магнитосферного источника. В параболической модели A2000 [Alexeev et al., 1996; Alexeev et al., 2003] используется феноменологический подход, основанный на известных из эксперимента свойствах магнитосферной плазмы. Прежде всего, это наличие тонких (порядка ионного ларморовского радиуса) токовых слоев (токи на магнитопаузе, токовый слой хвоста магнитосферы), возникающих вследствие высокой проводимости космической плазмы. При заданном пространственном распределении токов магнитное поле каждой крупномасштабной токовой системы однозначно находится как решение задачи магнитостатики. В ряде случаев такой подход позволяет получить аналитическое решение. В модели A2000 форма магнитопаузы задается параболической поверхностью вращения. Такая поверхность хорошо описывает переднюю часть магнитопаузы (до $x = -30R_E$), а параболические координаты допускают разделение переменных в уравнении Лапласа, так что решение большинства рассматриваемых задач можно получить, используя интегральные представления на базе функций Бесселя. В то же время, использование параболической геометрии приводит к неограниченному росту поперечника магнитосферы при удалении в антисолнечном направлении. Начиная с $x = -30R_E$ диаметр

магнитосферы становится больше $50R_E$. В удаленном хвосте уместно использовать более простое цилиндрическое приближение для границы и привлекать аппарат численных методов [Denisenko et al., 2004].

Уже в первой версии параболической модели [Алексеев, 1978] был предложен модульный принцип представления магнитного поля в виде суммы (1). Скалярный потенциал магнитного поля токов на магнитопаузе и токов хвоста вычислялся как разложение по гармоническим функциям и функциям Бесселя. Коэффициенты разложений определялись из граничного условия на магнитопаузе $\{B_n\} = 0$, налагаемого на поле от каждой магнитосферной токовой системы. Такой подход позволяет обеспечить необходимую точность при расчетах магнитного поля в окрестности магнитопаузы, что необходимо при исследовании процессов в авроральной ионосфере и в связанных с ней силовыми линиями областях магнитосферы.

В параболической модели A2000 [Alexeev et al., 1996, 2001] поле внутриземных источников представляется текущей моделью IGRF, а магнитное поле магнитосферных токов \vec{B}_m определяется суммой

$$\vec{B}_m = \vec{B}_{CF}(\psi, R_1) + \vec{B}_t(\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty) + \vec{B}_r(\psi, b_r) + \vec{B}_{fac}(\psi, I_{||}). \quad (5)$$

Каждый источник магнитного поля зависит от собственного набора параметров, который определяет его уникальную динамику в условиях меняющейся геомагнитной активности.

Входными параметрами модели являются величины, характеризующие интенсивность, размер и положение магнитосферных токовых систем: угол наклона геомагнитного диполя ψ , расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе R_1 , расстояние до переднего края токового слоя хвоста R_2 , магнитный поток через доли хвоста Φ_∞ , магнитное поле кольцевого тока в центре Земли b_r , максимальная интенсивность $I_{||}$ продольных токов зоны 1.

Параметры магнитосферы могут быть определены независимо из данных измерений плазмы солнечного ветра, ММП и геомагнитных индексов. В каждый момент времени параметры модели определяют мгновенное состояние магнитосферы, а ее динамика может быть представлена как последовательность таких состояний. Для вычисления входных параметров модели используются субмодели, которые связывают параметры модели с величинами, определяемыми экспериментально.

Предлагаемая трехуровневая структура модели позволяет гибко учитывать разнообразие доступной эмпирической информации. Для определения параметров магнитосферных токовых систем можно использовать различные субмодели, при этом собственно модель магнитного поля (5) остается неизменной. Рассмотрим варианты субмоделей, используемых при расчетах.

3.1. Расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе

Расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе является наиболее важным параметром, характеризующим магнитосферу. В настоящее время создан ряд моделей, описывающих форму и средние размеры магнитопаузы в зависимости от давления солнечного ветра и B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (см. работу [Shue et al., 1998] и цитируемую там литературу). В основе моделей лежит аппроксимация массива данных пересечений космическими аппаратами магнитопаузы поверхностью выбранной формы (обычно конические сечения). При вычислениях в рамках параболической модели используется модель магнитопаузы [Shue et al., 1998]:

$$R_1 = (10.22 + 1.29 \tanh[0.184(B_z + 8.14)]) D_p^{-1/6.6}, \quad (6)$$

которая обеспечивает более корректное, по сравнению с другими моделями, описание размеров магнитопаузы в экстремальных условиях в межпланетной среде, регистрируемых в возмущенные периоды. Здесь D_p – динамическое давление солнечного ветра и B_z – северо-южная компонента ММП.

3.2. Параметры токовой системы геомагнитного хвоста

Как видно из (5), основными параметрами, характеризующими интенсивность токовой системы хвоста магнитосферы, являются расстояние от центра Земли до переднего края токового слоя геомагнитного хвоста R_2 и магнитный поток через доли хвоста Φ_∞ на бесконечности. Следует обратить внимание на то, что, несмотря на неограниченный рост поперечника параболической магнитосферы при уходе в ночную сторону, эта величина в параболической модели имеет конечное значение

$$\Phi_\infty = b_t \frac{\pi R_1^2}{2} \sqrt{\frac{2R_2}{R_1} + 1}, \quad (7)$$

определяемое параметрами токовой системы хвоста (здесь b_t – величина магнитного поля в передней части токового слоя, характеризующая интенсивность токовой системы геомагнитного хвоста). Соответствие этому физическому критерию позволяет корректно использовать параболическую модель во внутренней магнитосфере.

Вариации расстояния от центра Земли до переднего края токового слоя геомагнитного хвоста R_2 характеризуют пространственную динамику токовой системы хвоста магнитосферы. В спокойной магнитосфере токовый слой хвоста располагается на расстоянии $(7 \div 10)R_E$ от Земли. Во время геомагнитных возмущений он приближается к Земле, при этом R_2 может достигать значений $(3 \div 5)R_E$ [Lui et al., 1992]. Приближение токового слоя хвоста магнитосферы к Земле проявляется в расширении аврорального овала. В [Pulkkinen et al., 1992; Alexeev et al., 1996] предполагалось, что приэкваториальная граница аврорального овала проектируется магнитными силовыми линиями в передний край токового слоя хвоста магнитосферы.

Силовые линии, выходящие из аврорального овала, терпят излом при пересечении токового слоя хвоста, а проходящие через средне- и низкоширотную ионосферу имеют квазидипольную форму. Таким образом, проходящие через передний край токового слоя силовые линии являются последними квазидипольными силовыми линиями, разделяющими сердцевину магнитосферы и область хвоста. Мы будем использовать выражение

$$R_2 = 1/\cos^2 \varphi_n \quad (8)$$

для определения расстояния до переднего края токового слоя хвоста магнитосферы по положению приэкваториальной границы аврорального овала в полночь φ_n , которая может быть вычислена по эмпирическим моделям:

$$\varphi_n = 74.9^\circ - 8.6^\circ \log_{10}(-D_{st}) \quad [\text{Старков, 1993}];$$

$$\varphi_n = 67.4^\circ - 0.016 |AL| + 0.79 \cdot 10^{-5} |AL|^2 \quad [\text{Воробьев и др., 2000}].$$

Для того чтобы рассчитать магнитный поток Φ_∞ в долях хвоста, в работе [Калегаев и др., 1998] использовались дополнительные теоретические предположения. Будем полагать, что магнитный поток поперек долей хвоста является суммой двух слагаемых:

$$\Phi_\infty = \Phi_0 + \Phi_s, \quad (9)$$

Первое из них, Φ_0 , соответствует медленной, адиабатической эволюции геомагнитного хвоста. При плавных изменениях R_1 , R_2 и b_t Φ_0 остается постоянным. В спокойные периоды $\Phi_0 \approx 3.7 \cdot 10^8$ Вб будет нами использоваться в дальнейших вычислениях. Медленные изменения геометрических размеров магнитосферы, связанные с вариациями давления солнечного ветра и ММП, приводят к слабым изменениям интенсивности токовой системы геомагнитного хвоста в соответствии с выражением (7).

Другое слагаемое связано с проявлениями суббури активности в магнитосфере. Его источниками являются токи в передней части геомагнитного хвоста, возникающие при суббури активизациях во время магнитной бури. В работе [Pulkkinen et al., 1992] отмечалось, что в течение фазы развития суббури часто наблюдаются токи в передней части токового слоя хвоста, значительно превышающие те, что предполагаются в равновесных моделях. Мерой суббури активности является интенсивность западной электроструи и, в конечном счете, величина аврорального индекса AL . В работах [Lui et al., 1992; Lopez, von Rosenvinge, 1993] обсуждалась связь авроральной активности с интенсивностью магнитного поля хвоста. На основании статистического исследования измерений магнитного поля вблизи геостационарной орбиты и на авроральных широтах на поверхности Земли было установлено, что возмущения магнитного поля хвоста строго коррелируют с вариациями величины $(-AL)$, а именно

$$\delta H = 7.2 B_p - 188. \quad (10)$$

Здесь δH – возмущение горизонтальной компоненты

магнитного поля, измеренное на станции авроральной зоны непосредственно под западной электроструей (т. е. фактически $-AL$), а B_p – магнитное поле, измеренное в передней части токового слоя хвоста магнитосферы. При расчетах в параболоидной модели магнитосферы связанное с суббуревыми активизациями магнитное поле хвоста магнитосферы полагалось пропорциональным $-AL/7$ (см., [Alexeev et al., 1996]), так что Φ_s принимает вид:

$$\Phi_s = \frac{-AL}{7} \frac{\pi R_1^2}{2} \sqrt{\frac{2R_2}{R_1} + 1}. \quad (11)$$

В заключение следует добавить, что существуют способы определения R_2 и Φ_{∞} , основанные на прямых измерениях. Положение внутренней границы плазменного слоя может быть получено из пичч-угловых распределений авроральных электронов с энергией 15–25 кэВ [Фельдштейн и др., 2000]. Также для определения параметров геомагнитного хвоста можно использовать измерения вариаций магнитного поля на меридиональной цепочке магнитных станций, наблюдения высыпаний частиц авроральных энергий на полярных низкоапогейных спутниках DMSP, прямые наблюдения ультрафиолетового свечения овала (КА «Image», «Polar»). Предлагаемые методы определения параметров токового слоя хвоста магнитосферы согласуются друг с другом и позволяют адекватно отобразить его динамику.

3.3. Магнитное поле кольцевого тока

Интенсивность магнитного возмущения на поверхности Земли, связанного с кольцевым током, можно определить, используя полную энергию частиц плазмы, переносящих кольцевой ток. Измерения на спутнике AMPTE/CSE потоков энергичных ионов в области кольцевого тока позволяют оценить полную энергию ионов во время рассматриваемых магнитных бурь [Greenspan et al., 1999], а уравнение Десслера–Паркера–Скопке используется для расчетов магнитного поля кольцевого тока.

Другим методом вычисления магнитного поля кольцевого тока в центре Земли b_r является уравнение Бартонна [Burton et al., 1975]:

$$\frac{db_r}{dt} = F(E) - \frac{b_r}{\tau}, \quad (12)$$

которое представляет процесс развития кольцевого тока как результат инжекции, описываемой функцией $F(E)$, которая определяется через компоненту электрического поля солнечного ветра E_y , направленную с утра на вечер, и последующей диссипации, описываемой последним слагаемым (12).

Выбор субмоделей определяет параметризацию модели магнитосферы, а сами субмодели могут изменяться пользователем в зависимости от исследуемой задачи. В отличие от эмпирических моделей, теоретические не имеют ограничений на входные параметры и могут быть использованы для моделирования как спокойных, так и возмущенных условий в магнитосфере. Средня невязка при вычислениях наземных вариаций магнитного поля параболоидной моделью A2000 зависит от выбранного набора субмоделей и составляет величину $\sim 10\%$ от максимума $|D_{st}|$.

4. Тестирование моделей магнитосферы

Тестирование моделей геомагнитного поля наиболее продуктивно на основе исследования отдельных магнитных бурь. Глобальные модели не только позволяют моделировать магнитное поле, измеренное на Земле либо вдоль орбит космических аппаратов, но и воспроизводить общую структуру магнитосферы в зависимости от условий в солнечном ветре [Tsyganenko, Sitnov, 2005; Kalegaev et al., 2005]. Сопоставление расчетов с измерениями, выполненными для разных уровней геомагнитной активности, позволяют оценить точность и области применимости используемых моделей.

Важным аспектом такого исследования является также изучение геомагнитных вариаций на поверхности Земли. Такие работы, связанные с прогнозом геомагнитной активности, ведутся достаточно длительное время [Шеломенцев и др., 1982; Бархатов и др., 2002], однако использование динамических моделей позволяет выполнить значительно более широкий круг исследований, в частности, изучить динамику отдельных магнитосферных источников магнитного поля во время магнитной бури на основе их относительных вкладов в D_{st} . В работах [Alexeev et al., 1996; 2001; Kalegaev и др., 1998; Dremukhina et al., 1999; Tsyganenko, Sitnov, 2005] проводилось исследование динамики магнитосферных токовых систем во время магнитных бурь. Современные динамические модели позволяют рассчитывать магнитосферное магнитное поле в зависимости от условий в солнечном ветре и от уровня геомагнитной активности. В то же время, адекватно представляя магнитное поле в околосреднем космическом пространстве, эти модели часто дают сильно различающиеся оценки вкладов магнитосферных источников в D_{st} даже для одного и того же события [Alexeev et al., 2001; Turner et al., 2000]. При этом авторы часто поразному рассчитывают вклад магнитосферных токовых систем в D_{st} , а сам D_{st} -индекс рассматривается просто как вариация магнитного поля на поверхности Земли. В работе [Kalegaev et al., 2005] предполагалось, что различия зачастую связаны с использованием авторами неодинаковых методик определения D_{st} .

Для получения результатов, допускающих корректное сравнение, следует использовать некий единый унифицированный метод расчета D_{st} . Такой подход был предложен в работе [Калегаяев и др., 2006]. Он основан на общепринятой экспериментальной процедуре вывода D_{st} -вариации [Sugiura and Kamei, 1991], разработанной в Мировом центре данных в Киото.

Предложенная в работе [Калегаяев и др., 2006] процедура вычисления D_{st} с помощью магнитосферных моделей включает в себя:

- вычисление вариации горизонтальной компоненты магнитного поля $\delta H_i(t)$, создаваемой внешними магнитосферными и соответствующими индуцированными токами, на геомагнитном экваторе на долготах соответствующих станций;
- вычисление вариации спокойного дня для параметров, отвечающих спокойным условиям в солнечном ветре $\delta H_i^q(t)$, и вычитание ее из $\delta H_i(t)$ для каждой обсерватории в каждый час;

- усреднение вариаций магнитного поля, рассчитанных на долготах четырех приэкваториальных станций для каждого часа:

$$D_{st}(t) = \frac{1}{4} \sum_i (\delta H_i(t) - \delta H_i^q(t)) = \delta H(t) - \delta H_q(t),$$

где $\delta H(t) \equiv \frac{1}{4} \sum_i \delta H_i(t)$, $\delta H_q(t) \equiv \frac{1}{4} \sum_i \delta H_i^q(t)$ –

средние вариации (возмущенная и спокойная) по всем станциям. Вариации магнитного поля вычисляются сразу на геомагнитном экваторе, чтобы избежать последующего приведения измерений к нулевой широте. При вычислении вариаций магнитного поля мы учитываем вклад индуцированных токов под земной поверхностью, усиливающих поле магнитосферных токов. Эффект индуцированных токов зависит от положения на Земле; при вычислении магнитного поля в средних широтах принято использовать значение 30 % от поля магнитосферных токов [Hakkinen et al., 2002].

Главными источниками D_{st} -вариации являются токи на магнитопаузе, кольцевой ток и токи хвоста магнитосферы. Современные модели магнитосферы позволяют рассчитывать как полное магнитное поле, так и магнитные поля от каждого магнитосферного источника. Рассчитанный по модели D_{st} может быть представлен в виде суммы составляющих:

$$D_{st} = DR + DT + DCF,$$

где DR , DT и DCF (составляющие D_{st}) являются вкладами в D_{st} кольцевого тока, токового слоя хвоста и токов на магнитопаузе соответственно. Кольцевой ток содержит как симметричную, так и асимметричную части (частичный кольцевой ток), а вклад продольных токов зоны 1 незначителен. Представляя вариации магнитного поля $\delta H_i(t)$ и $\delta H_i^q(t)$ как сумму составляющих магнитных полей от внешних источников, получаем:

$$D_{st} = \delta H_{RC} - \delta H_{RC}^q + \delta H_{TC} - \delta H_{TC}^q + \delta H_{CF} - \delta H_{CF}^q = DR + DT + DCF.$$

Отсюда можно определить вклад каждого источника магнитосферного магнитного поля в D_{st} как разность соответствующих вариаций магнитного поля, рассчитанных во время бури и в спокойный день месяца (в частности, $DR = \delta H_{RC} - \delta H_{RC}^q$).

Предложенный метод соответствует экспериментальной процедуре расчета D_{st} по данным магнитометров, описанной в работе [Sugiura and Kamei, 1991]. Он позволяет однозначно вычислить D_{st} -вариацию, основываясь на расчетах магнитосферного магнитного поля с помощью магнитосферных моделей, а также естественным образом обобщается для расчета составляющих D_{st} . Оценки вкладов тока хвоста (ТС) и кольцевого тока (RC) в D_{st} , полученные предложенным методом в различных моделях, имеют один и тот же физический смысл и позволяют определить относительную роль различных токовых систем во время магнитосферных возмущений. Ниже будет показано, что хотя разные модели дают различающиеся вариации магнитного поля на поверхности Земли, они позволяют получить хорошее согласие с профилем измеренного D_{st} .

5. Магнитная буря 9–12 января 1997 г.

Событие 9–12 января 1997 г. связано с приходом в окрестность земной магнитосферы ускоренного потока плотной плазмы солнечного ветра. Более подробно вариации магнитного поля, измеренные на земной поверхности, а также на борту спутников GOES-8 и -9 изучались в работах [Turner et al., 2000; Alexeev et al., 2001]. Здесь мы сопоставим вклады в D_{st} , рассчитанные по моделям T01 и A2000 с использованием методики, описанной в предыдущей главе.

На рис. 1, а, б представлены геомагнитные индексы D_{st} и AL , а также параметры солнечного ветра (B_z ММП, скорость, концентрация протонов), измеренные космическим аппаратом «Wind». Развитие бури началось при повороте B_z ММП к югу и закончилось, когда B_z ММП начала возрастать. Можно видеть, что импульс давления 11 января при северном направлении ММП привел к усилению токов на магнитопаузе, в то время как кольцевой ток и токи хвоста были в невозмущенном состоянии. Результатом стало необычное возрастание D_{st} на фазе восстановления до величин 50 нТл. Суббуревая активность в полдень 11 января привела к очередному спаду D_{st} , но без развития кольцевого тока.

На рис. 2 представлены D_{st} (штриховая линия) и вариации горизонтальной компоненты магнитного поля на поверхности Земли (рис. 2, з), а также магнитные поля от токов на магнитопаузе (рис. 2, а), кольцевого тока (рис. 2, б) и токового слоя хвоста (рис. 2, в), рассчитанные по параболической модели (левая панель) и по модели магнитосферы Цыганенко T01 (правая панель). Видно, что суммарная вариация,

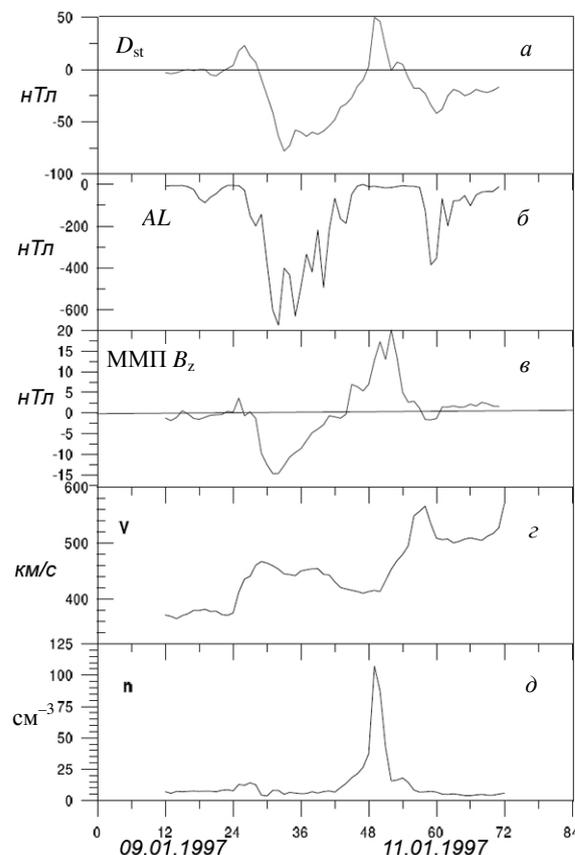


Рис. 1. Параметры солнечного ветра во время магнитной бури 9–12 января 1997 г.

рассчитанная по A2000, хорошо описывает D_{st} , в то время как рассчитанная по T01 сдвинута относительно D_{st} приблизительно на 25 нТл. Максимальные вариации магнитного поля токовой системы хвоста составляют величины порядка 70 нТл и 120 нТл для A2000 и T01 соответственно.

Согласно данным МЦД C2 в Киото, самым спокойным днем января 1997 г. был день 16.01.1997. На рис. 3 показаны вклады токов на магнитопаузе (рис. 3, а), кольцевого тока (рис. 3, б) и токов хвоста (рис. 3, в) в вариацию горизонтальной компоненты магнитного поля на поверхности Земли (рис. 3, г), рассчитанные по параболической модели (слева) и по модели магнитосферы Цыганенко T01 (справа) для средних параметров солнечного ветра, измеренных 16 января 1997 г. Величина $\delta H_q(t)$ имеет временной ход, связанный с изменением угла геомагнитного диполя в течение суток. Амплитуды полученных вариаций составляют около 5 нТл для обеих моделей, но средние магнитные вариации, рассчитанные по A2000 и T01, сильно различаются. Для A2000 спокойная вариация составляет приблизительно -5 нТл, поэтому вариация магнитного поля на поверхности Земли, рассчитанная по этой модели для возмущенных условий, может рассматриваться как хорошее приближение для D_{st} [Alexeev et al., 1996; Калегаяев и др., 1998]. Однако вариации спокойного поля крупномасштабных токовых систем в спокойный день, конечно, не равны нулю, как видно из верхней части рисунка. Для T01 средняя спокойная вариация около -25 нТл, что, по-видимому, связано с особенностями базы данных магнитного поля, используемой при построении модели, в первую очередь, с недостаточным количеством измерений поля внутри геостационарной орбиты. Другой причиной этого является влияние средневозмущенных интервалов на поле спокойного дня, измеряемого с помощью эмпирической модели. Так же как возмущенные, спокойные дни относительно редки, и в наблюдениях преобладают слабозвозмущенные интервалы с D_{st} около -20÷-30 нТл. При моделировании экстремальных событий, равно возмущенных или спокойных, чей статистический вес в наблюдениях невелик, эмпирические модели могут давать значительные погрешности. Важно заметить, что значения спокойного уровня геомагнитной вариации, полученные в расчетах как по теоретическим, так и по эмпирическим моделям, – просто особенности этих моделей, не связанные с реальным спокойным уровнем магнитного поля.

Вычитание поля спокойного дня является существенным элементом в определении составляющих D_{st} . На рис. 4 показаны вклады в D_{st} -индекс токов на магнитопаузе (рис. 4, а), кольцевого тока (рис. 4, б) и токов хвоста (рис. 4, в), рассчитанные по параболической модели (слева) и по модели магнитосферы Цыганенко T01 (справа). Наблюдаемый D_{st} (штриховая линия) и модельные расчеты (сплошная линия) приведены в нижней части рис. 4 (рис. 4, г). D_{st} и составляющие D_{st} вычислены как разность между

рассчитанными 9–12 января 1997 г. вариациями и вариацией спокойного дня для каждой токовой системы. Следует заметить, что обе модели обеспечивают хорошее согласие с наблюдаемым D_{st} -индексом (среднеквадратичное отклонение около 10 нТл), а сдвиг вариаций возмущенного магнитного поля, полученный в расчетах по модели T01, полностью компенсируется вычитанием вариации спокойного дня. Для обеих моделей и токи хвоста, и кольцевой ток дают значительные вклады в D_{st} . Ток хвоста начинает развиваться раньше кольцевого тока, а его вклад в наземное поле изменяется в течение магнитной бури. В расчетах по A2000 он хорошо коррелирует с суббулевой активностью, достигая максимума на начальной стадии бури и быстро спадая до предбулевого уровня. Максимальные вклады TC и RC в D_{st} составляют порядка 60 % и 40 % от минимального значения D_{st} . Из представленных расчетов видно, что источники D_{st} достигают максимума часто в разные моменты времени, что свидетельствует о влиянии различных факторов на развитие разных токовых систем во время магнитной бури.

6. Обсуждение

Анализ магнитных возмущений во время магнитной бури 9–12 января 1997 г. показывает, что в главную фазу магнитной бури вклады в D_{st} -вариацию кольцевого тока и токов в хвосте магнитосферы примерно одного порядка. Сравнение рассчитанного по обеим моделям и измеренного значений D_{st} -вариации демонстрирует хорошее согласие моделей с наблюдениями. В то же время относительная динамика магнитосферных токовых систем представляется разными моделями по-разному. Различия в профилях вариаций магнитного поля различных токовых систем, рассчитанных с помощью моделей A2000 и T01, связаны с разной параметризацией моделей.

Составляющие D_{st} -вариации демонстрируют разную динамику. Вариация, связанная с токами на магнитопаузе, зависит от условий в солнечном ветре. В T01 она контролируется динамическим давлением солнечного ветра, а в случае A2000 еще и B_z -компонентой ММП (см. в [Alexeev et al., 2001]). Значения поля кольцевого тока, рассчитанные по A2000 и T01, приблизительно соответствуют друг другу в максимуме бури, но в момент прихода импульса давления 11.01.1997 модель T01 демонстрирует неожиданную положительную вариацию, обусловленную, по-видимому, выходом параметров модели за пределы ее применимости. Различия наблюдаются и в динамике токовой системы хвоста магнитосферы. Вариации магнитного поля хвоста, рассчитанные по параболической модели, коррелируют с авроральной активностью, в то время как вариации поля хвоста, рассчитанные по T01, определяются главным образом динамическим давлением солнечного ветра в согласии с параметризацией модели [Tsyganenko et al., 2002b].

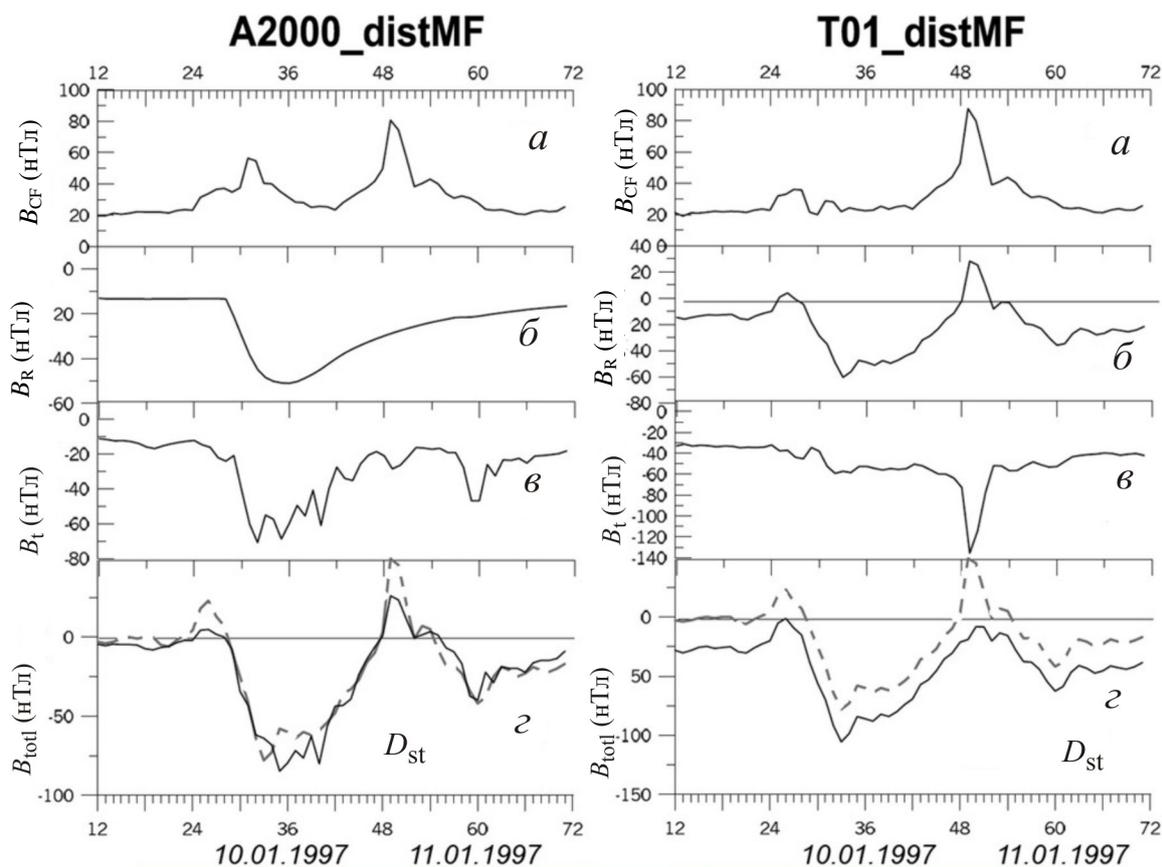


Рис. 2. Вариации горизонтальной компоненты магнитосферного магнитного поля на поверхности Земли, рассчитанные по модели A2000 (левая панель) и по модели Цыганенко T01 (правая панель), во время магнитной бури 9–12 января 1997 г.

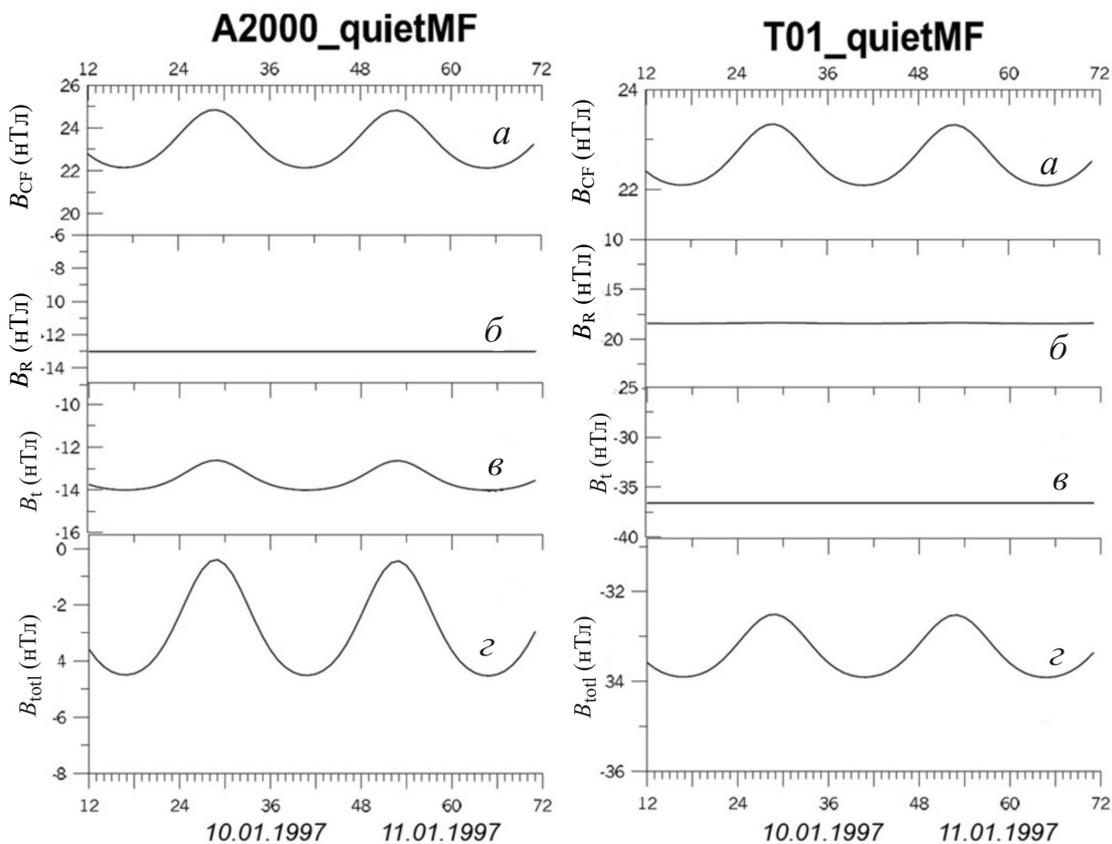


Рис. 3. То же для спокойного дня января 1997 г. (16.01.1997).

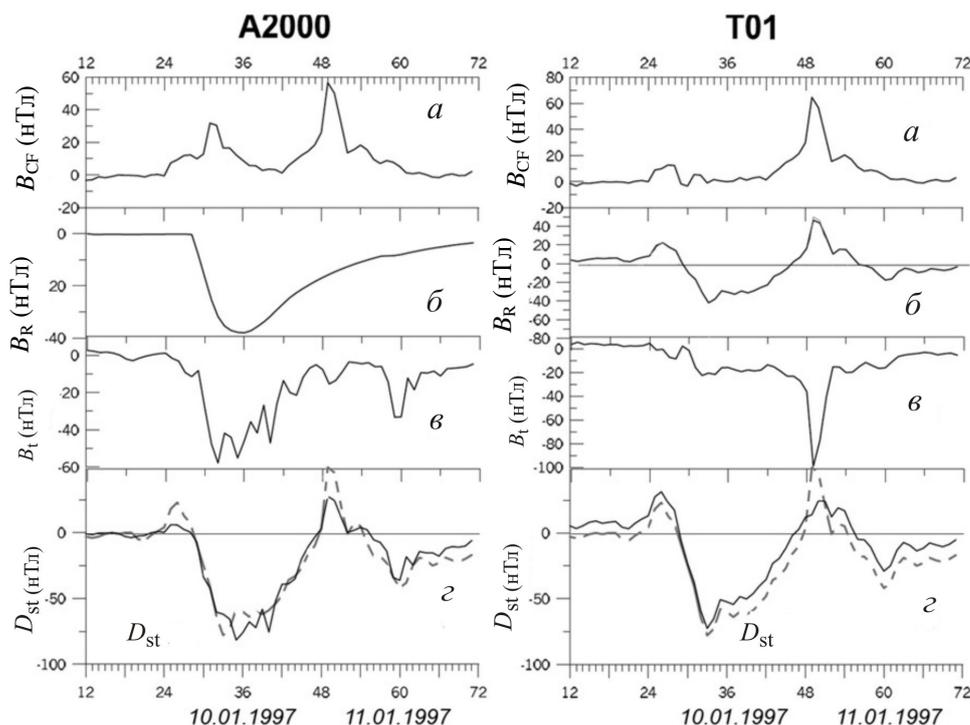


Рис. 4. Вариации составляющих D_{st} , рассчитанные по параболической модели (левая панель) и по модели магнитосферы Цыганенко Т01 (правая панель), во время магнитной бури 9–12 января 1997 г.

Заключение

В настоящее время не существует надежных экспериментальных методов изучения относительной динамики магнитосферных токовых систем для оценки вкладов магнитосферных токов в D_{st} . Модели магнитосферного магнитного поля являются эффективным инструментом таких исследований. В то же время полученные теоретические результаты зачастую зависят от используемой модели.

Следование официальной процедуре вычисления D_{st} позволяет получить в рамках обеих моделей хорошее согласие с наблюдаемыми значениями индекса (среднеквадратичное отклонение около 10 нТл). Однако, согласно расчетам, выполненным с использованием параболической модели, спокойная вариация около нуля с использованием модели Цыганенко Т01 составляет приблизительно -25 нТл. Регулярный сдвиг, который наблюдается при вычислениях магнитосферного поля на поверхности Земли при использовании модели Т01, связан, по-видимому, с особенностями базового массива данных, используемого при ее построении. Он полностью компенсируется вычитанием вариации спокойного дня при расчетах D_{st} .

Расчеты в параболической модели А2000 и в модели Цыганенко Т01 с использованием данных КА «IMP-8» и «Wind» по солнечному ветру и ММП позволили выяснить, что максимальные вклады в D_{st} -вариацию от трех крупномасштабных токовых систем (кольцевого тока, токов на магнитопаузе и токовой системы хвоста) сопоставимы по величине. При этом разные токовые системы характеризуются разной динамикой во время магнитных бурь, что связано с разной параметризацией моделей токовых систем параметрами солнечного ветра. Проведен-

ные расчеты подтверждают тезис о том, что магнитное поле тока хвоста во время магнитной бури может быть достаточно сильным, чтобы давать значительный вклад в вариацию D_{st} [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996]. Динамика магнитосферы в целом во время бури демонстрирует нелинейную зависимость глобальных токовых систем от параметров солнечного ветра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-08-00798.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев И.И. Регулярное магнитное поле в магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1978. Т. 18. С. 656–665.
- Алексеев И.И., Калегаев В.В., Фельдштейн Я.И. Моделирование магнитного поля в сильно возмущенной магнитосфере // Там же. 1992. Т. 32. С. 8–14.
- Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Рябова Г.А. Искусственные нейронные сети для прогнозирования индексов геомагнитной активности по параметрам околоземного космического пространства // Солнечно-земная физика. 2002. Вып. 2 (115). С. 104–106.
- Воробьев В.Г., Громова Л.И., Регенов Б.В. и др. Вариация положения границ плазменных вторжений и аврорального вторжения в ночном секторе // Геомагнетизм и аэронавигация. 2000. Т. 40, № 3. С. 79–85.
- Калегаев В.В., Алексеев И.И., Фельдштейн Я.И. и др. Магнитный поток через доли хвоста магнитосферы и динамика вариаций D_{st} // Там же. 1998. Т. 38. С. 10–16.
- Калегаев В.В., Алексеев И.И., Макаренко Е.В., Ганюшкина Н.Ю. Моделирование D_{st} -вариации во время магнитных бурь // Там же. 2006. Т. 46, № 5. С. 596–603.
- Старков Г.В. Планетарная морфология авроральных явлений в магнитосферно-ионосферной физике. СПб.: Наука, 1993. С. 85–90.

- Фельдштейн Я.И., Дремухина Л.А., Луи А.Т.Ю. Околоземная граница плазменного слоя в хвосте магнитосферы в периоды магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронаука. 2000. Т. 40, № 6. С. 21–24.
- Шеломенцев В.В., Мишин В.М., Сергеева Л.П. О возможности прогноза бурь на основе геомагнитной диагностики всплесков концентрации солнечного ветра // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1982. Вып. 58. С. 15–26.
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 7737–7748.
- Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., et al. 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.
- Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and D_{st} // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 4204–4214.
- Denisenko V.V., Erkaev N.V., Semenov V.S., et al. Calculation of the magnetospheric magnetic field perturbation caused by the cusp currents // Solar-Terrestrial Physics. Proc. Int. Conf. on Phys. of Sol.-Terr. Relations. Irkutsk, 2004. 2005. V. 8. P. 126–128.
- Dremukhina L.A., Feldstein Y.I., Alexeev I.I., et al. Structure of the magnetospheric magnetic field during magnetic storms // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 28351–28362.
- Greenspan M.E., Hamilton D.C. A test of the Dessler–Parker–Scokopke relation during magnetic storms // Ibid. 2000. V. 105. P. 5419–5430.
- Hakkinen L., Pulkkinen T.I., Nevanlinna H., et al. Effect of induced currents on D_{st} and on magnetic variations at mid-latitude stations // Ibid. 2002. V. 107. 10.1029/2001JA900130.
- Kalegaev V.V., Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., et al. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms // Ann. Geophys. 2005. V. 26, N 2. P. 523–533.
- Lopez R.E., von Rosenvinge T. A statistical relationship between the geosynchronous magnetic field and substorm electrojet magnitude // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 3851–3859.
- Lui A.T.Y., Lopez R.E., Anderson B.J., et al. Current disruptions in the near-Earth neutral sheet region // Ibid. 1992. V. 97. P. 1461–1480.
- Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere // Ibid. 1996. V. 101. P. 7697–7704.
- Mead G.D., Fiarfield O.H. A quantitative magnetospheric model derived from spacecraft magnetometer data // Ibid. 1975. V. 80. P. 523–534.
- Pulkkinen T.I., Baker D.N., Pellinen R.J., et al. Particle scattering and current sheet stability in the geomagnetic tail during the substorm growth phase // Ibid. 1992. V. 97. P. 19283–19297.
- Shue J.-H., Chao J.K., Fu H.C., et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions // Ibid. 1998. V. 103. P. 17691–17700.
- Sibeck D.G., Lopez R.E., Roelof E.C. Solar wind control of the magnetopause shape, location, and motion // Ibid. 1991. V. 96. P. 5489–5495.
- Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // Ibid. 2002a. V. 107. doi: 10.1029/2001JA000219.
- Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations // Ibid. 2002b. V. 107. 10.1029/2001JA000220.
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // Ibid. 2005. V. 110. doi: 10.1029/2004JA010798.

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва