

## ТОПОЛОГИЯ ТОКОВ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ И ОТКЛИК МАГНИТОСФЕРЫ НА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

<sup>1,2</sup>Е.Е. Антонова, <sup>2,1</sup>И.П. Кирпичев, <sup>1</sup>И.Л. Овчинников, <sup>1</sup>К.Г. Орлова, <sup>1,2</sup>С.С. Россоленко

## CURRENT TOPOLOGY IN THE HIGH-LATITUDE MAGNETOSPHERE AND MAGNETOSPHERIC RESPONSE TO VARIATIONS OF THE SOLAR WIND PARAMETERS

E.E. Antonova, I.P. Kirpichev, I.L. Ovchinnikov, K.G. Orlova, S.S. Rossolenko

Рассмотрен ряд новых подходов, возникающих при исследовании топологии токов в высокоширотной магнитосфере. Отмечено, что высокий уровень корреляции между магнитосферными процессами и параметрами солнечного ветра является хорошо известной особенностью магнитосферной динамики. Предлагавшиеся объяснения наблюдаемых зависимостей встречаются с трудностями, связанными с высоким уровнем наблюдаемой турбулентности в магнитослое и внутри магнитосферы. Мало исследована также топология высокоширотной магнитосферы в области перехода от dipольных магнитных силовых линий к линиям, вытянутым в хвост. Рассмотрена топология поперечных магнитосферных токов с использованием данных спутниковых измерений распределения давления плазмы. Показано, что токи ближнего плазменного слоя замыкаются внутри магнитосферы. Обсуждены процессы генерации продольных токов зоны 1 Ииджими и Потемры и крупномасштабной магнитосферной конвекции.

Some new approaches which arise when researching into current topology in the high-latitude magnetosphere are considered. As noted, a high correlation between the magnetospheric processes and the solar wind parameters is well-known feature of the magnetosphere dynamics. The proposed explanations encounter some difficulties related with the high level of the observed turbulence in the magnetosheath and inside the magnetosphere. The topology of the high-latitude magnetosphere within the region of transition from dipole magnetic field lines to those elongated into the tail is also insufficiently known. The topology of transverse magnetospheric currents using data of satellite measurements of plasma pressure distribution is considered. Currents of the nearest plasma sheet are shown to be closed inside the magnetosphere. The processes of generation of the field-aligned currents in Iijima and Potemra region 1 and of large-scale magnetospheric convection are discussed.

### Введение

Несмотря на большое число спутниковых наблюдений, область внешней магнитосферы, где плазменный параметр  $\beta = 2\mu_0 p/B^2$  ( $p$  – давление горячей магнитосферной плазмы,  $B$  – минимальная величина магнитного поля на магнитной силовой линии,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума) сравним с единицей, и где текут мощные поперечные и продольные токи, сравнительно плохо исследована. Результаты экспериментальных наблюдений показывают, что геомагнитный хвост является турбулентным следом за обтекаемым препятствием в условиях высокого значения числа Рейнольдса, превышающего в случае магнитосферы Земли  $10^{10}$ . Следует отметить, что высокий уровень корреляции между магнитосферными процессами и параметрами солнечного ветра является хорошо известной особенностью магнитосферной динамики. Предлагавшиеся объяснения наблюдаемых зависимостей, основанные на предположении о ламинарном течении плазмы, встречаются с трудностями, связанными с высоким уровнем турбулентности, наблюдавшейся в магнитослое и внутри магнитосферы. Уровень наблюдаемой турбулентности контролируется параметрами солнечного ветра. В области с  $\beta \sim 1$  происходит переход от спокойной ламинарной конвекции плазмы во внутренней магнитосфере к турбулентному течению в плазменном слое (обзор [1]). Вопрос о топологии токов в области с  $\beta \sim 1$  вызывает большой интерес в связи с решением проблем генерации крупномасштабной магнитосферной конвекции и начала взрывной фазы магнитосферной суббури.

Традиционно при моделировании магнитосферных токовых систем считается, что область с  $\beta \sim 1$  в ночные часы относится к токовой системе магнито-

сферного хвоста, в которой поперечные токи магнитосферы замыкаются токами магнитопаузы. Однако анализ результатов наблюдений распределения давления магнитосферной плазмы и потоков высывающихся частиц противоречит данному предположению. Действительно, на геоцентрических расстояниях, превышающих  $(7\div 8)R_E$ , где  $R_E$  – радиус Земли, давление плазмы близко изотропному. При скоростях движения плазмы, много меньших звуковой и альфвеновской, сила Ампера уравновешивается градиентом давления  $p$  и выполняется условие магнитостатического равновесия:

$$[\mathbf{jB}] = \nabla p, \quad (1)$$

где  $\mathbf{j}$  – плотность тока,  $\mathbf{B}$  – величина магнитного поля. На магнитопаузе в квазистационарных условиях должен выполняться баланс давлений (условие Чепмена–Ферраро). Сумма нормальной к магнитопаузе компоненты динамического давления плазмы, статического и магнитного давления в магнитослое должна равняться сумме магнитного и статического давления плазмы внутри магнитосферы. Динамическое давление плазмы в магнитослое не превышает динамическое давление в солнечном ветре (за исключением отдельных короткоживущих структур, возникающих при развитии турбулентности магнитослоя). Из соотношения (1) следует, что давление постоянно на линии тока. Поэтому давление плазмы на данной токовой линии не должно превышать динамическое давление плазмы в солнечном ветре. Для токовых линий, пересекающих магнитопаузу вдали от подсолнечной точки, верхний предел возможного максимального давления должен быть уменьшен на квадрат синуса угла между направлением солнечного ветра и касательной к магнитопаузе.

Рассмотренное условие ограничивает возможность замыкания токов в ночной части магнитосферы на геоцентрических расстояниях  $\sim(7\div12)R_E$  токами магнитопаузы и предполагает существование на данных расстояниях токовой системы, в которой токи замыкаются внутри магнитосферы [2].

В настоящей работе показано, что текущие на геоцентрических расстояниях  $(7\div12)R_E$  в ночные часы токи могут на геоцентрических расстояниях  $\sim(7\div10)R_E$  замыкаться магнитостатически равновесными дневными токами, сосредоточенными вне экваториальной плоскости. Приводится также краткий анализ роли данной высоколатитной токовой системы в динамике магнитосферы.

### Минимальные значения поля на магнитной силовой линии и распределение поперечных токов в дневные часы

В ночные часы магнитное поле имеет минимальную величину вблизи плоскости экватора, в дневные часы за счет сжатия солнечным ветром магнитное поле принимает минимальные значения вне плоскости экватора. Данная особенность наблюдается экспериментально и отслеживается во всех разработанных моделях магнитосферы. На рис. 1 показан пример расчета изолиний минимальных на силовой линии значений магнитного поля с использованием одной из последних версий модели Цыганенко 2004 г. [3]. Расчет проводился при средних значениях параметров солнечного ветра: динамическом давлении солнечного ветра 2 нПа, компонентах ММП  $B_z = -5$  нТл,  $B_y = B_x = 0$  и нулевом угле наклона земного диполя. Значение магнитного поля на внутреннем кольце составляет 100 нТл, далее 90 нТл и т. д. с интервалом 10 нТл до 40 нТл на внешней линии. Изолинии магнитного поля менее 30 нТл начинают выходить на магнитопаузу, что связано с некоторыми проблемами модели (см. ниже).

В соответствии с соотношением (1) давление плазмы постоянно на магнитной силовой линии. Поэтому измерения давления плазмы в экваториальной плоскости могут быть использованы для вычисления плотности поперечных токов и интегральной величины поперечного тока между соседними магнитными оболочками. В ночные часы магнитное поле минимально на экваторе, поэтому максимальные плотности тока в соответствии с соотношением (1) также имеют место в экваториальной плоскости. В дневные часы минимальные значения магнитного поля локализованы вне экваториальной плоскости, поэтому области максимальных плотностей тока смещены от экваториальной плоскости по направлению к каспам. Величина смещения увеличивается с ростом геоцентрического расстояния.

В [4, 5] было получено распределение давления плазмы на геоцентрических расстояниях до  $9R_E$  с использованием данных наблюдений на спутнике AMPTE/CCE. Полученная в [4] зависимость в дневные часы хорошо аппроксимируется на геоцентрических расстояниях от  $7R_E$  до  $9R_E$  соотношением

$$p = p_0 + p_r \exp(-(r - r_0)/R_E), \quad (2)$$

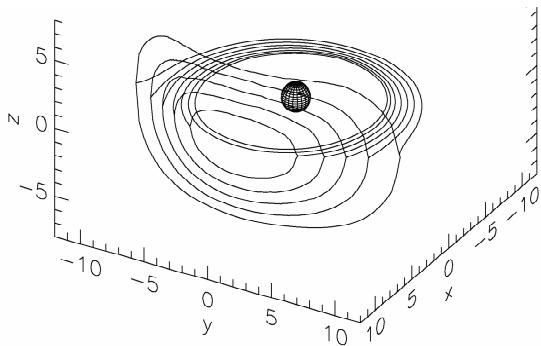


Рис. 1. Пример расчета изолиний минимальных на силовой линии значений магнитного поля с использованием модели Цыганенко 2004 г. при динамическом давлении солнечного ветра 2 нПа, компонентах ММП  $B_z = -5$  нТл,  $B_y = B_x = 0$  и нулевом угле наклона земного диполя.

где  $p_0=0.55$  нПа,  $p_r=1$  нПа,  $r_0=7R_E$ . Предполагалось, что зависимость (2) сохраняется до  $10R_E$ . Соотношение (1) при задании магнитного поля моделью Цыганенко 1996 г. [6] было использовано для вычисления плотностей поперечного тока и определения интегрального тока, текущего в дневные часы на геоцентрических расстояниях от  $7.5$  до  $10R_E$ . Результаты вычислений показывают, что в магнитоспокойных условиях плотности тока в дневные часы в областях минимального поля сопоставимы с плотностями тока в ночные часы на тех же геоцентрических расстояниях. Интегральный ток составляет несколько единиц на  $10^5$  А. Эффективные «центры тяжести» данного тока в дневные часы смещены в направлении каспов вдоль оси Z примерно на  $3R_E$ . В магнитовозмущенных условиях дневной поперечный ток увеличивается на порядок. Полученное значение дневного поперечного тока совпадает с интегральным поперечным током в ночные часы на тех же геоцентрических расстояниях. Данная оценка дает возможность предполагать существование в магнитосфере квазикруговой токовой системы, названной в [7, 8] системой разрезного кольцевого тока (CRC – cut ring current). Схема течения токов в данной токовой системе показана на рис. 2. Она имеет тот же источник, что и обычный кольцевой ток, – радиальные градиенты давления плазмы – и фактически является высоколатитным продолжением кольцевого тока, сжатым в дневные часы давлением плазмы магнитослоя.

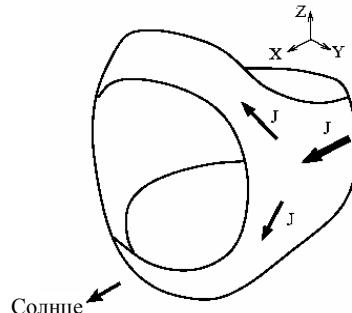


Рис. 2. Схема течения токов в токовой системе разрезного токового кольца (CRC), являющейся высоколатитным продолжением кольцевого тока.

## Обсуждение и выводы

Большинство существующих моделей магнитного поля строится при постулировании существования определенных токовых систем в магнитосфере. До настоящего момента учитывались токи магнитопаузы, токи хвоста, традиционный кольцевой ток, асимметричный кольцевой ток (последний в основном во время магнитной бури) и продольные токи. Величины таких токов вычислялись по данным магнитных спутниковых измерений. Полученные доказательства существования CRC требуют модификации таких моделей. При этом результаты моделирования в ночные часы, видимо, не претерпят значительных изменений. В дневные часы и на магнитосферных флангах возникнут значительные расхождения.

Учет существования CRC приводит также к существенной модификации устоявшихся представлений в области физики магнитосферы. Явления, которые были локализованы на геоцентрических расстояниях до  $(12\div13)R_E$  и рассматривались как часть динамики хвоста магнитосферы, при введении CRC становятся составной частью динамики высокоширотного продления кольцевого тока. К таким явлениям относятся процессы, приводящие к генерации крупномасштабной магнитосферной конвекции, магнитосферных бурь и суббурь.

До настоящего момента неясна локализация источников токов зоны 1 Ииджими и Потемры [9]. В [10] показано, что токи зоны 1 не проецируются на магнитосферные пограничные слои, как это предполагается во многих теоретических работах. При этом проецирование с использованием моделей Цыганенко 1996 и 2001 г. приводит к локализации источников токов зоны 1 на значительно большие геоцентрические расстояния (до  $\sim 60R_E$ ), чем проецирование [11] с использованием ранней модели Файерфилда и Мида [12], в которой токи зоны 1 проецируются на расстояния  $(10\div15)R_E$ . Учет в моделях существования CRC может прояснить вопрос о проецировании токов зоны 1. С учетом результатов [11] генерация токов зоны 1 может являться частью динамики CRC.

Вопрос о природе и локализации токов зоны 1 представляет особый интерес, так как, замыкаясь в ионосфере, токи зоны 1 создают распределение электрических полей, соответствующее двухвихревой магнитосферной конвекции. В полярной шапке возникает поле утро–вечер. Крупномасштабные продольные токи образуются в результате ответвления в ионосферу крупномасштабных поперечных токов. Возможность возникновения значительной части токов зоны 1 при ответвлении в ионосферу токов CRC означает существование локализованного на сравнительно небольших геоцентрических расстояниях источника двухвихревой магнитосферной конвекции.

Ответвление в ионосферу поперечных магнитосферных токов возникает в условиях магнитостатического равновесия в аксиально-несимметричной части магнитосферы при пересечениях линиями тока изоповерхностей равного объема магнитных силовых трубок [13, 14], что делает возможным квазистационарное поддержание крупномасштабной магнитосферной конвекции за счет асимметрии высокоширотной части магнитосферы, включая CRC. Изменение магнитной конфигурации при изменениях

параметров ММП дает возможность объяснить зависимость поля утро–вечер от величины и направления ММП. К данному выводу в первом приближении можно прийти, анализируя соотношение (1). Уменьшение  $\mathbf{B}$  при южной ориентации ММП приводит к росту как поперечных, так и продольных токов при фиксированном градиенте давления, увеличение  $\mathbf{B}$  при северном ММП – к падению токов. Соответственно изменяется и поле утро–вечер.

Связь генерации продольных токов с азимутальными градиентами давления рассматривалась в большом числе работ (обзор [15]). Результаты анализа распределения давления плазмы и магнитного поля, приведенные в [16], подтвердили существование необходимых для генерации токов зоны 1 градиентов давления. При получении градиентов давления в экваториальной плоскости в [16] была использована модель Цыганенко 1989 г. Неоднократно отмечалась избыточная вытянутость данной модели (магнитные силовые линии пересекают экваториальную плоскость на больших геоцентрических расстояниях по сравнению с реальными). При учете CRC данная вытянутость должна исчезнуть. Реальное распределение давления, получаемое по данным низколетящих спутников, видимо, будет соответствовать результатам измерений на спутнике «Geotail», по данным которого было построено распределение поперечных токов в [17]. При этом область генерации токов зоны 1 должна сместиться к Земле в область квазидипольных магнитных силовых линий.

Гипотеза о генерации поля утро–вечер в результате проникновения электрического поля из солнечного ветра при пересоединении солнечного и магнитосферного магнитных полей, основанная на предположении о ламинарном течении плазмы, сталкивается с трудностями, связанными с постоянно наблюдаемым высоким уровнем турбулентности в магнитослое, магнитосферных погранслоях и внутри магнитосферы. Гипотеза о генерации поля утро–вечер в результате действия МГД-генератора в магнитосферных погранслоях также сталкивается с рядом трудностей. Основная часть токов зоны 1 не проецируется на погранслои. Параметры спектров частиц в областях продольных токов зоны 1 не соответствуют спектрам частиц в погранслоях (например, [18]). Рассмотренное объяснение генерации поля утро–вечер дает возможность преодоления данных трудностей.

Начало взрывной фазы магнитосферной суббури локализовано на геоцентрических расстояниях, не превышающих  $9R_E$  (обзор [19]). При учете CRC неустойчивость, отвечающая за начало взрывной фазы магнитосферной суббури, становится не неустойчивостью хвоста магнитосферы, а неустойчивостью, связанной с процессами в кольцевом токе. Развитие данной точки зрения позволяет объяснить ряд закономерностей развития суббури [20], при этом наблюдаемые изменения топологии магнитных силовых линий в хвосте магнитосферы во время суббури (процессы пересоединения) рассматриваются как следствие процессов вблизи геостационарной орбиты (изменения величины поперечного тока), а не как причина начала взрывной фазы суббури. Оконча-

тельное прояснение ситуации ожидается в связи с реализацией проекта «Themis» («Фемида»).

В заключение хотелось бы отметить, что наметившиеся в середине 90-х гг. новые подходы к рассмотрению магнитосферных процессов получили в последнее время многочисленные экспериментальные подтверждения, что открывает новые возможности при планировании будущих спутниковых проектов.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Antonova E.E. Magnetostatic equilibrium and turbulent transport in Earth's magnetosphere: A review of experimental observation data and theoretical approach // International J. of Geomagnetism and Aeronomy. 2002. V. 3, N 2. P. 117–130.
2. Антонова Е.Е. Радиальные градиенты давления в магнитосфере Земли и величина  $D_{st}$ -вариации // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 2. С. 148–156.
3. Tsyganenko N.N., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 2007. V. 110, N A3. Doi:10.1029/2004JA010798.
4. Lui A.T.Y., Hamilton D.C. Radial profile of quite time magnetospheric parameters // Ibid. 1992. V. 97, N A12. P. 19325–19332.
5. De Michelis P., Daglis I.A., Consolini G. An average image of proton plasma pressure and of current systems in the equatorial plane derived from AMPTE/CCE-CHEM measurements // Ibid. 1999. V. 104, N A12. P. 28615–28624.
6. Tsyganenko N.A., Stern D.P. A new generation global magnetosphere field model, based on spacecraft magnetometer data // ISTP newsletter. 1996. V. 6, N 1. P. 21.
7. Antonova E.E., Ganushkina N.Yu. Inner magnetospheric currents and their role in the magnetosphere dynamics // Phys. Chem. Earth (C). 2000. V. 25, N 1–2. P. 23–26.
8. Antonova E.E. Magnetostatic equilibrium and current systems in the Earth's magnetosphere // Adv. Space Res. 2004. V. 33. P. 752–760.
9. Iijima T., Potemra T.A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, N 13. P. 2165–2174.
10. Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V. Field-aligned current mapping and the problem of the generation of magnetospheric convection // Adv. in Space Res. 2006. V. 38. P. 1637–1641.
11. Potemra T.A. Large-scale characteristics of field-aligned currents determined from the Triad magnetometer experiment // Dynamics and Chemical Conpliny / Eds. B. Grandal, J.P. Holter, 1977. P. 337–352.
12. Fairfield D.H., Mead G.D. Magnetospheric mapping with quantitative geomagnetic field models // J. Geophys. Res. 1975. V. 80, N 4. P. 535–548.
13. Антонова Е.Е., Ганюшкина Н.Ю. Геометрия магнитного поля магнитосферы Земли и генерация продольных токов // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35, № 5. С. 9–15.
14. Antonova E.E., Ganushkina N.Yu. Azimuthal hot plasma pressure gradients and dawn-dusk electric field formation // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, N 11. P. 1343–1354.
15. Антонова Е.Е., Тверской Б.А. О природе электрических полей во внутренней магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 2. С. 1–18.
16. Wing S., Newell P.T. Quite time plasma sheet ion pressure contribution to Birkeland currents // J. Geophys. Res. 2000. V. 10, N A4. P. 7793–7802.
17. Wang C.-P., Lyons L.R., Weygand J.M., et al. Equatorial distribution of the plasma sheet ions, their electric and magnetic drifts, and magnetic fields under different interplanetary magnetic field  $B_z$  conditions // Ibid. 2006. V. 111, N A4. Doi:101029/2005JA011545.
18. Iijima T., Potemra T.A., Zanetti L.J. Contribution of pressure gradients to the generation of downside region 1 and region 2 currents // Ibid. 1997. V. 102, N A12. P. 27069–27081.
19. Lui A.T.Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets // Space Sci. Rev. 2004. V. 113, N 1. P. 127–206.
20. Antonova E.E. Onset of substorm expansion phase: Theory predictions and results of experimental observations // Proceedings of 8-th International Conference on Substorms (ICS8). Banff, Canada, April 26–30. 2006. P. 1–6.

<sup>1</sup>НПП ядерной физики имени Д.В. Скobelцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва.