

УДК 550.383

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ 6 ДО $10R_E$ ПО ДАННЫМ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОЕКТА THEMIS

© 2011 г. И. П. Кирпичев^{1,2}, Е. Е. Антонова^{2,1}

¹Учреждение РАН Институт космических исследований, Москва

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва

e-mail: ikir@iki.rssi.ru; antonova@orearm.msk.ru

Поступила в редакцию 28.12.2010 г.

Определена структура усредненного распределения давления плазмы в окружающем Землю на геоцентрических расстояниях от ~ 6 до $\sim 10R_E$ плазменном кольце. Использовались данные измерений моментов функций распределения на спутниках международного проекта THEMIS. Произведено статистическое исследование распределения плазменного давления в экваториальной плоскости плазмы на меридианах день–ночь и утро–вечер. Показано, что окружающее Землю кольцо плазмы имеет структуру близкую к азимутально-симметричной. Проведено сравнение полученных результатов с полученными ранее данными по распределению давления. Показано, что в пределах ошибок определения давления, в перекрывающихся областях полученные результаты согласуются с результатами, полученными ранее.

1. ВВЕДЕНИЕ

Давление плазмы относится к основным параметрам, определяющим распределение токов в плазменных системах и устойчивость плазмы. При отсутствии баланса градиента давления и силы ампера плазма начинает быстро двигаться, и происходит разрушение плазменной конфигурации. На настоящий момент не существует общепризнанной модели, описывающей механизмы формирования, а также динамику характерных крупномасштабных областей внутренней магнитосферы. Для выявления общих закономерностей динамических и стационарных плазменных процессов внутри магнитосферы, становится необходимым знание давления, понимаемого как второй момент функции распределения. Определение давления плазмы внутри магнитосферы может иметь и непосредственное практическое значение в связи с проблемой предсказания “Космической погоды” (см. [Antonova et al., 2003]).

В гиротропной плазме тензор давления является диагональным, и вводятся давления вдоль и поперек магнитных силовых линий (p_{\parallel} , p_{\perp}). Несмотря на большое количество спутниковых измерений в околоземной космической плазме, полная картина распределения плазменного давления в магнитосфере до сих пор не получена. Большое число работ посвящено измерениям давления плазмы в хвосте

магнитосферы (см. обзор [Spence et al., 1989]). Tsyganenko and Mukai [2003] создали модель давления плазмы в хвосте магнитосферы на базе данных спутника GEOTAIL. Глобальное распределение давления во внутренних областях магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях $< 8.8 R_E$ было получено по данным экваториального спутника AMPTE/CSE в работах [DeMichelis et al., 1997; 1999; Milillo et al., 2001; Lui, 2003]. Давление восстанавливалось на основе ионной функции распределения в энергетическом интервале от ~ 1 кэВ до 4 МэВ. Сравнительно плохо исследована область перехода от дипольных к вытянутым в хвост магнитным силовым линиям. Ряд профилей давления в данной области был получен на спутнике Интербол/Хвостовой зонд в работах [Antonova et al., 2002; Pisarenko et al., 2003; Кирпичев 2004; Kirpichev et al., 2005].

С запуском 5 спутникового проекта THEMIS (см. специальный выпуск Space Science Review, v. 141, 2008) появилась возможность решить многие проблемы физики магнитосферы. Так, например, в работе [Xing et al., 2009] изучалась азимутальная асимметрия давления плазмы по данным THEMIS за период с декабря 2007 по май 2008 на геоцентрических расстояниях от 10 до $12R_E$. Было показано, что вытекающие продольные токи в ночном секторе могут поддерживаться за счет измеренных азимутальных градиентов давления.

К актуальным проблемам относится получение распределения давления плазмы в окружающем Землю плазменном кольце, характеристики плазмы в котором соответствуют характеристикам плазменного слоя. Проект THEMIS работал в период низкой геомагнитной активности. Инжекция плазмы во внутренние области магнитосферы во время магнитосферных суббурь и формирование асимметричного кольцевого тока во время магнитных бурь приводит к азимутальной асимметрии давления с максимумом в районе полуночи. При статистическом анализе распределения давления вклад асимметричной компоненты минимален в периоды низкой геомагнитной активности. Поэтому результаты измерений давления плазмы за более чем 3 года работы спутников проекта THEMIS позволяют получить картину распределения давления соответствующую невозмущенному состоянию магнитосферы.

В настоящей работе будет получена статистически усредненная картина распределения p_{\parallel} и p_{\perp} в экваториальной плоскости по данным проекта THEMIS и проведен ее анализ. Будет показано, что на геоцентрических расстояниях от 6 до $10R_E$ распределение давления близко к азимутально-симметричному. Будет обсуждена конфигурация поперечных токов в рассматриваемой области поддерживаемых радиальными градиентами давления.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ ОБРАБОТКИ

В работе были использованы данные, полученные в ходе многоспутникового эксперимента THEMIS (<http://themis.ssl.berkeley.edu/>, <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) (см. [Angelopoulos, 2008]) за период с августа 2007 по сентябрь 2010 г. Анализировались моменты функций распределения ионов и электронов, восстанавливаемые двумя различными приборами:

- ESA – электростатический анализатор ионов в диапазоне энергий от 1.6 эВ до 25 кэВ и электронов от 2 эВ до 32 кэВ,
- SST – твердотельный телескоп, регистрирующий ионы в диапазоне энергий от 25 кэВ до 6 МэВ и электроны от 25 кэВ до ~900 кэВ.

Период вращения спутников вокруг собственной оси позволял вычислять моменты функций распределения каждые 3 секунды. Локальное магнитное поле с таким же временным разрешением в 3 сек было получено по данным магнитометра FGM [Auster et al., 2008].

Ионный состав в данном эксперименте не определялся, поэтому далее предполагается, что основной вклад в давление вносят протоны, что является хорошим приближением в магнитоспокойные периоды [Daglis et al., 1999]. Рассматриваемый в статье интервал соответствует данному условию. Большая

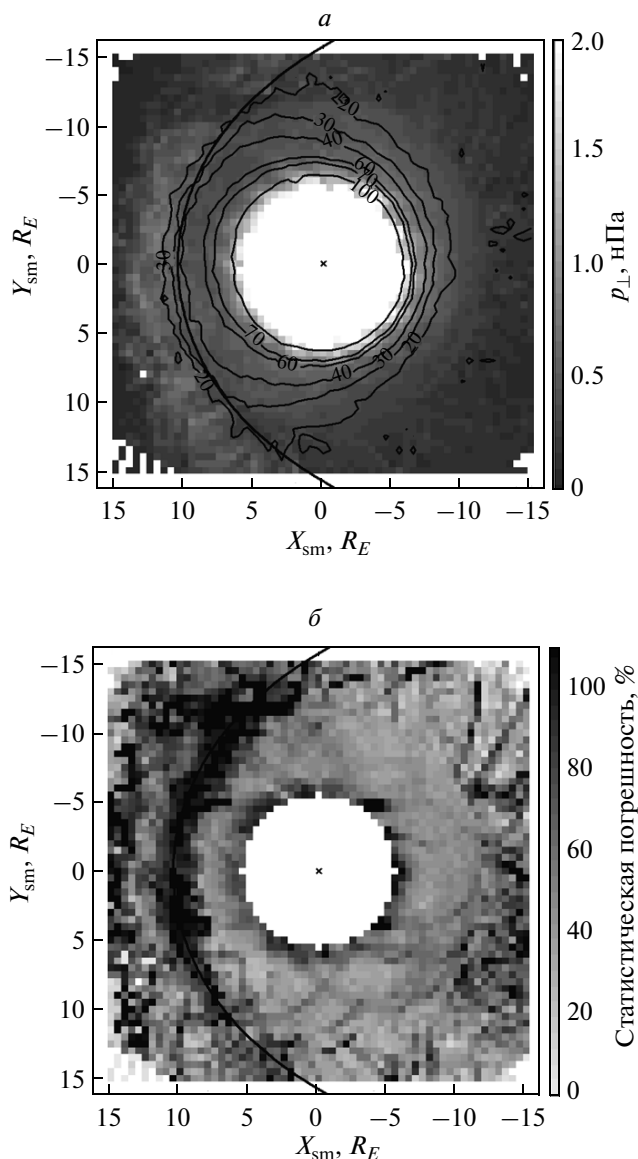


Рис. 1. Распределение p_{\perp} – среднего значения перпендикулярных к магнитному полю составляющих тензора полного плазменного давления (ионов и электронов) (а). Дополнительно нанесены – среднее положение магнитопаузы по модели [Shue et al., 1998] и уровни постоянной величины модуля локального магнитного поля (нТл); отношение стандартного отклонения к среднему значению для величины p_{\perp} , выраженное в процентах (б).

часть времени характеризовалась тем, что D_{ST} было больше -40 нТ, а минимальное значение составляло $D_{ST} \sim -80$ нТ. Для построения двумерного распределения полного плазменного давления (сумма по ионам и электронам ESA и SST) проводилось разбиение экваториальной плоскости (XY) на ячейки по $0.5R_E$ в солнечно-магнитосферной (SM) системе координат. Допустимый интервал по координате

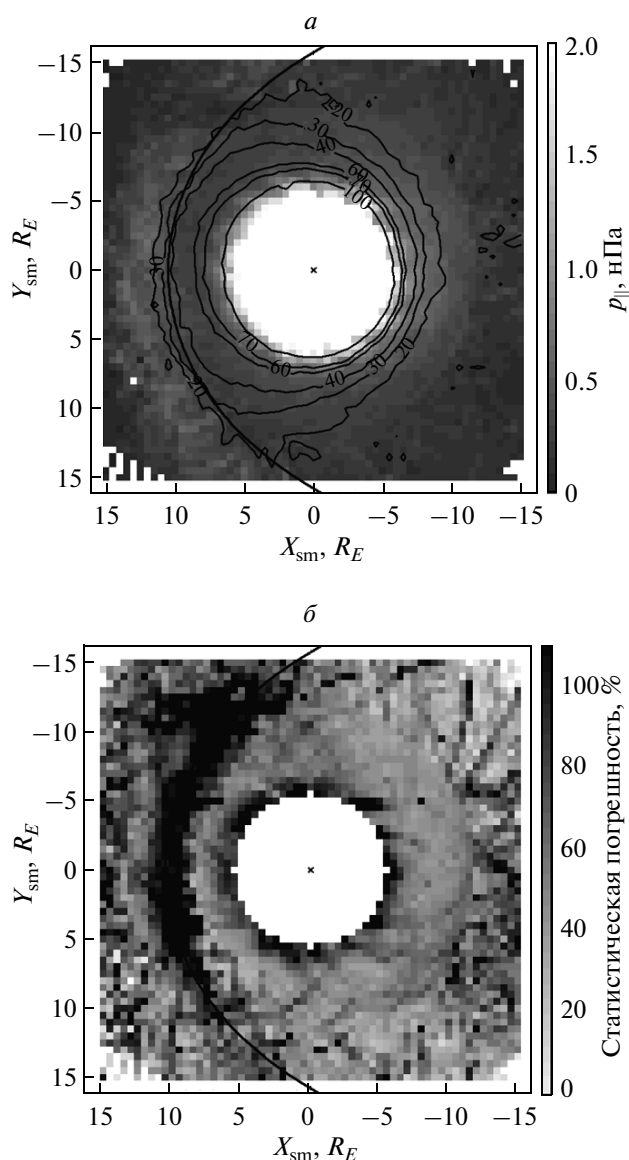


Рис. 2. То же, что на рисунке 2, но для $p_{||}$ – компонента вдоль магнитного поля.

Z_{SM} : $-4R_E < Z_{SM} < 4R_E$. В каждой ячейке накапливались и усреднялись измерения со всех пяти спутников.

При приближении к Земле (ближе $6R_E$) проникающая радиация приводит к искажению показаний ESA (см. [McFadden et al., 2008]). Поэтому в качестве внутренней границы анализируемой области была выбрана окружность с радиусом $5.5R_E$. Вариации положения магнитопаузы затрудняют выбор положения внешней границы магнитосферы при статистическом анализе. Поэтому в качестве внешней границы построения распределения давления выбирался квадрат со стороной равной $15R_E$ с центром, совпадающим с центром Земли. При этом

значения давления за пределами магнитопаузы соответствуют усредненным значениям давления плазмы в магнитослое. Вблизи подсолнечной точки такое давление может почти полностью компенсировать давление магнитного поля внутри магнитосферы (см. [Знаткова и др., 2011] и ссылки в данной работе). Поэтому усредненное положение магнитопаузы в дневные часы должно проявляться при анализе радиального профиля давления.

Анализируются диагональные компоненты тензора давления в системе координат, привязанной к локальному магнитному полю, т.е. компонента давления вдоль магнитного поля $p_{||}$ и компонента давления перпендикулярно магнитному полю p_{\perp} . Орбиты всех пяти спутников THEMIS имеют наклонение, которое наиболее подходит для изучения явлений, происходящих в экваториальной плоскости. При пересечении спутником каждой из ячеек в плоскости (XU) в каждой из рассматриваемых ячеек проводилось усреднение давления по 5 минутному интервалу времени.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВБЛИЗИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

На рис. 1 и 2 показаны двумерные картины распределения перпендикулярной и параллельной компонент давления (рис. 1а и 2а) и отношения стандартного отклонения к среднему значению, выраженные в процентах (рис. 1б и 2б). Шкала справа на рис. 1а и 2а показывает значения давления, соответствующие оттенкам серого цвета. При этом, минимальным значениям давления отвечает черный цвет, а максимальным белый. Шкала справа на рис. 1б и 2б показывает значение статистической погрешности (отношения стандартного отклонения к среднему значению) в процентах. При этом белый цвет соответствует минимальной статистической погрешности. Результаты представлены без проведения сглаживания. Дополнительно нанесены контуры среднего значения модуля локального магнитного поля, измеренного на спутниках и положение магнитопаузы по модели [Shue et al., 1998] для средних за период наблюдений значений параметров межпланетного магнитного поля $B_z = 0.5$ нТл и динамического давления солнечного ветра $p_{dyn} = 2$ нПа.

Из рис. 1б и 2б следует, что статистическая достоверность полученных значений давления на геоцентрических расстояниях до $\sim 8R_E$ достаточно велика. Большие значения статистической погрешности в районе магнитопаузы связаны с резкими изменениями положения магнитопаузы и, соответственно, резкими колебаниями давления в соответствующих ячейках.

Из рис. 1а и 2а следует, что магнитосфера полностью заполнена плазмой. Статистически усреднен-

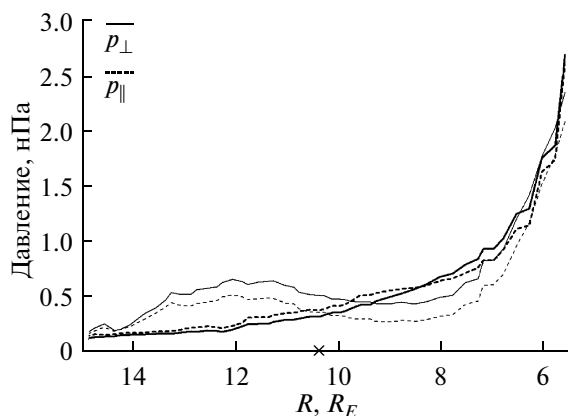


Рис. 3. Радиальные профили двух составляющих давления – параллельной и перпендикулярной для выделенных локальных магнитных времен MLT на меридиане полдень–полночь. 12 MLT – тонкие кривые, 0 MLT – толстые кривые.

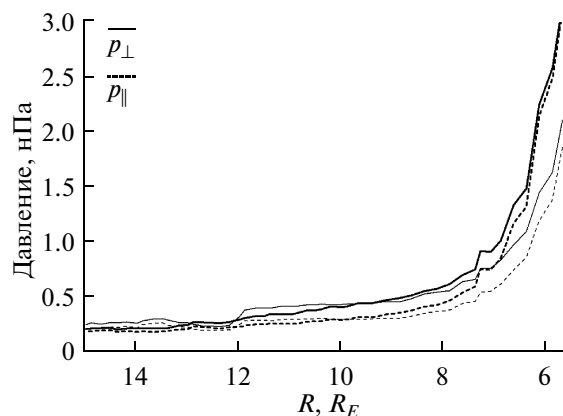


Рис. 4. Радиальные профили двух составляющих давления – параллельной и перпендикулярной для выделенных локальных магнитных времен MLT на меридиане утро–вечер. 06 MLT – тонкие кривые, 18 MLT – толстые кривые.

ное распределение давления непрерывно, начиная с хвоста внутренней магнитосферы, вдоль флангов и вплоть до подсолнечной точки магнитопаузы, заполняет всю экваториальную плоскость. Не наблюдается каких-либо провалов, свидетельствующих о пространственном разделении различных магнитосферных доменов.

На рис. 3 и 4 показаны радиальные профили параллельной и перпендикулярной компонент давления на меридианах день–ночь и утро–вечер, позволяющие провести анализ асимметрии распределения давления. Такую асимметрию трудно оценить только по рис. 1а и 2а. Рис. 3 и 4 построены при усреднении в определенном направлении в азимутальном секторе $\pm 10^\circ$. Сплошные кривые показывают значения поперечной компоненты, пунктир – параллельной компоненты. Тонкие кривые на рис. 3 соответствуют дневному сектору, толстые – ночному. Звездочкой на оси абсцисс показано положение магнитопаузы по модели [Shue et al., 1998]. Рис. 3 подтверждает выводы предыдущих исследований. Анизотропия давления зависит от геоцентрического расстояния, но она невелика на геоцентрических расстояниях, превышающих $7.5R_E$, что позволяет, в первом приближении, пользоваться при расчетах приближением изотропного давления. В целом радиальный профиль давления в дневном секторе очень близок к профилю в ночном секторе. На рис. 4 показаны профили перпендикулярной и параллельной компонент давления на меридиане утро–вечер. Тонкими кривыми показаны значения давлений в утреннем секторе, толстыми – в вечернем. Заметна утренняя–вечерняя асимметрия давления. Давление в вечернем секторе превышает давление в утреннем. Однако необходимо отметить, что асимметрия утро–вечер заметно проявляется

только начиная с расстояния $\sim 7R_E$ и увеличивается ближе к Земле. Полученные результаты не противоречат результатам [Xing et al., 2009], но наблюдаемая асимметрия невелика. Таким образом на больших геоцентрических расстояниях давление близко к изотропному и азимутально симметричному.

На рис. 3, 4 не нанесены, чтобы не загромождать рисунки, статистические ошибки определения значений давления. Такие ошибки нанесены на рис. 5, где сплошной кривой показан радиальный ход поперечной компоненты давления в ночные часы. Сопоставление рис. 5 с рис. 3 и 4 показывает, что по данным результатам различия перпендикулярных и параллельных компонент давления и азимутальная асимметрия давления, показанные на рис. 3 и 4 не превышают статистических ошибок определения среднего давления. На рис. 5 нанесены также давления в ночном меридиане, полученные по данным спутников AMPTE/CCE (звездочки) и GEOTAIL (треугольники). Результаты AMPTE/CCE взяты из работы [Lui et al., 2003], GEOTAIL – из работы [Wang et al., 2009]. Необходимо отметить, что точки, соответствующие измерениям на GEOTAIL были получены усреднением по слою шириной $|Y| < 5R_E$. Поэтому точка, расположенная ближе $10R_E$ фактически является фланговой. Из рис. 5 следует, что полученные по данным THEMIS значения давления в ночные часы хорошо согласуются с данными GEOTAIL и в пределах ошибок измерений согласуются с данными AMPTE/CCE на геоцентрических расстояниях не превышающих $\sim 8R_E$. Можно отметить, что давление плазмы в ночные часы по AMPTE/CCE и GEOTAIL несколько превышают значения давления, полученные по данным THEMIS, что связано с малым уровнем геомагнитной активности в период измерений THEMIS.

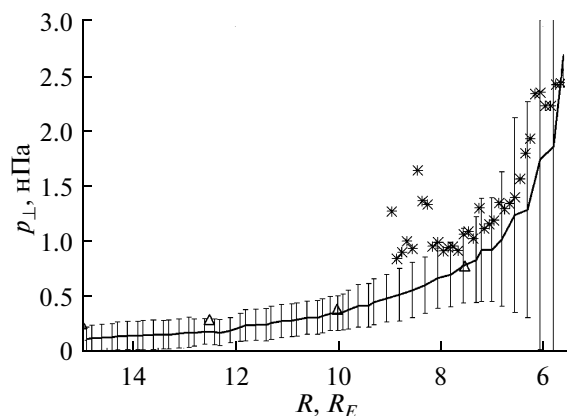


Рис. 5. Сопоставление профиля давления по данным THEMIS на ночном меридиане (сплошная кривая) с данными, полученными на спутниках AMPTE/CSE (*) и GEOTAIL (Δ).

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе анализа результатов наблюдений на спутниках проекта THEMIS удалось получить распределение давления на геоцентрических расстояниях, превышающих $\sim 6R_E$ с высокой статистической точностью. В результате были подтверждены результаты, полученные с использованием данных спутника GEOTAIL в ночные часы и спутника AMPTE/CSE на геоцентрических расстояниях не превышающих $8.8R_E$ (апогей спутника). Необходимо отметить, что в настоящем исследовании определялось полное давление с учетом вклада не только ионов, но и электронов в широком диапазоне энергий, что позволило в перекрывающихся областях существенно уточнить картины распределения давлений, полученные ранее. Удалось также получить картину давлений в дневные часы от $8.8R_E$ до магнитопаузы, что не было сделано ранее.

Анализ полученных результатов позволяет выделить окружающую Землю вплоть до дневной магнитопаузы близкую к кольцевой область, в которой давление практически монотонно нарастает с уменьшением геоцентрического расстояния. Необходимо отметить, что в течение длительного времени ночная область окружающего Землю на геоцентрических расстояниях от ~ 6 до $\sim 10R_E$ плазменного кольца считалась частью плазменного слоя. Однако данные по распределению давления свидетельствуют о том, что эту область надо считать продолжением окружающего Землю кольцевого тока. Рассмотрение ночной части данной области как области хвоста во многих работах связано с анализом плотности токов в экваториальной плоскости (см., например, результаты расчетов [DeMichelis et al., 1999]). В ночные часы минимумы магнитного поля лежат вблизи экваториальной плоскости. Соответственно интегральный поперечный ток сосредото-

чен вблизи экваториальной плоскости. Дневные силовые линии сжаты в результате взаимодействия магнитосферы Земли с солнечным ветром. Поэтому в дневные часы минимальные значения магнитного поля локализованы вне экваториальной плоскости. [Antonova et al., 2009a, b] показали, что в дневные часы значительная часть поперечного тока течет вне экваториальной плоскости. Соответственно в области высокоширотного продолжения кольцевого тока в дневные часы интегральный поперечный ток не сосредоточен вблизи плоскости экватора, и формируется токовая система “разрезного кольца”. Поэтому полученное в настоящей работе усредненное распределение давления плазмы в окружающем Землю плазменном кольце можно использовать для уточнения структуры поперечных токов в высокоширотной магнитосфере в магнитоспокойных условиях.

Авторы благодарят NASA contract NAS5-02099 и V. Angelopoulos за использование данных миссии THEMIS. Особенно: D. Larson и R.P. Lin за использование SST данных, C.W. Carlson и J.P. McFadden за использование ESA данных, K.H. Glassmeier, U. Auster and W. Baumjohann за использование FGM данных, распространяемых под руководством Technical University of Braunschweig и с финансовой поддержкой German Ministry for Economy and Technology and the German Center for Aviation and Space (DLR) under contract 50 OC 0302.

Работа частично поддержана программой президиума РАН № 16, грантами РФФИ 10-05-91001, 10-05-00247.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Знаткова С. С., Антонова Е. Е., Застенкер Г.Н., Кирпичев И. П. Баланс давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки по данным наблюдений спутников проекта THEMIS // Космич. исслед. Т. 49. № 1. С. 5–23. 2011.
- Кирпичев И.П. Распределение давления плазмы в геомагнитном хвосте в области перехода от дипольных к квазидипольным и вытянутым магнитным силовым линиям: событие 13 ноября 1995 г. // Космич. исслед. Т. 42. № 4. С. 352–362. 2004.
- Angelopoulos V. The THEMIS mission // Space Sci. Rev. V. 141. P. 5–34. doi:10.1007/s11214-008-9336-1. 2008.
- Antonova E.E., Budnik E.Yu., Lutsenko V.N., Pissarenko N.F. Interball/Tail observations of high latitude pressure distribution // Adv. Space Res. V. 30. № 10. P. 2289–2293. 2002.
- Antonova, E.E., Budnik E. Yu., Kirpichev I.P., Lutsenko V.N., Pissarenko N.F. Magnetospheric plasma pressure and space weather // Adv. Space Res. V. 31. № 4. P. 1093–1098. 2003.
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V., Orlova K.G., Ovchinnikov I.L. Topology of the high latitude magnetosphere during large magnetic storms and the main

- mechanisms of relativistic electron acceleration // *Adv. Space Res.* V. 43. P. 628–633. 2009a.
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Orlova K.G., Stepanova M.V. High latitude magnetospheric topology and magnetospheric substorm // *Ann. Geophys.* V. 27. P. 4069–4073. 2009b.
- Auster H.U. et al. // The THEMIS Fluxgate Magnetometer // *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 235–264. doi:10.1007/s11214-008-9365-9. 2008.
- Daglis J.A., Thorne R.M., Baumjohann W., Orsini S. The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay // *Rev. of Geophys.* V. 37. P. 407–438. 1999.
- DeMichelis P., Daglis I.A., Consolini G. Average terrestrial ring current derived from AMPTE/CCE-CHEM measurements // *J. Geophys. Res.* V. 102. No A7. P. 14103–14111. 1997.
- DeMichelis 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 // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A12. P. 28615–28624. 1999.
- Kirpichev I.P., Antonova E.E., Borodkova N.L., Budnik E.Yu., Lutsenko V.N., Pisarenko N.F., Morozova E.I., Yermolaev Yu. I. The features of the ion plasma pressure distributions in the near Earth plasma sheet // *Planetary and Space Science.* V. 53. P. 209–215. 2005.
- Lui A. T. Y. Inner magnetospheric plasma pressure distribution and its local time asymmetry // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. № 16. 1846. doi:10.1029/2003GL017596. 2003.
- McFadden J.P., Carlson C.W., Larson D., Bonnell J., Mozer F., Angelopoulos V., Glassmeier K.-H., Auster U. THEMIS ESA First Science Results and Performance Issues // *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 477–508. doi:10.1007/s11214-008-9433-1. 2008.
- Millino, A., Orsini S., Daglis I.A. Empirical model of proton flux in the equatorial inner magnetosphere: Development // *J. Geophys. Res.* V. 101. № A11. P. 25713–25729. 2001.
- Pisarenko N.F., Budnik E.YU., Ermolaev YU.I., Kirpichev I.P., Lutsenko V.N., Morozova E.I., Antonova E.E. The main features of the ion spectra variations in the transition region from dipole to tailward stretched field lines // *Adv. Space Res.* V. 31. № 5. P. 1347–1352. doi:10.1016/SO273-1177(03)00018-8. 2003.
- Tsyganenko N.A., Mukai T. Tail plasma sheet models derived from Geotail data // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A3. doi: 10.1029/2002JA009707. 2003.
- Shue J.-H. et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A8. doi:10.1029/98JA01103. 1998.
- Spence H.E., Kivelson M.G., Walker R.J., McComas D.J. Magnetospheric plasma pressures in the midnight meridian: observations from 2.5 to 35 Re // *J. Geophys. Res.* V. 94. № A5. P. 5264–5272. 1989.
- Wang C.-P., Lyons L.R., Wolf R.A., Nagai T., Weygand J.M., Lui A.T.Y. Plasma sheet $PV^{5/3}$ and nV and associated plasma and energy transport for different convection strengths and AE levels // *J. Geophys. Res.* V. 114. doi:10.1029/2008JA013849. P. A00D02. 2009.
- Xing, X., Lyons L. R., Angelopoulos V., Larson D., McFadden J., Carlson C., Runov A., Auster U. Azimuthal plasma pressure gradient in quiet time plasma sheet // *Geophys. Res. Lett.* V. 36. L14105, doi:10.1029/2009GL038881. 2009.