

УДК 550.383

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ПОДСОЛНЕЧНОЙ ТОЧКИ МАГНИТОСФЕРЫ ОТ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА THEMIS

© 2012 г. М. С. Пулинец¹, М. О. Рязанцева^{1,2}, Е. Е. Антонова^{1,2}, И. П. Кирпичев^{2,1}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва

²ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва

e-mail: cotopaxu@gmail.com, oream@gmail.com

Поступила в редакцию 24.06.2011 г.

После доработки 06.12.2011 г.

Проведен анализ зависимости амплитуды магнитного поля, трех его компонент и часового угла в магнитослое непосредственно перед магнитопаузой от аналогичных величин в солнечном ветре перед ударной волной по данным эксперимента THEMIS. Учтена временная задержка прихода солнечного ветра к подсолнечной точке магнитопаузы. Получены зависимости компонент магнитного поля у магнитопаузы и часового угла от аналогичных величин в солнечном ветре при различных временах усреднения. Выделены события, при которых направление магнитного поля у магнитопаузы сильно отличается от направления магнитного поля в солнечном ветре вплоть до изменения знака.

1. ВВЕДЕНИЕ

При анализе влияния солнечного ветра (СВ) на геомагнитную активность используются измерения параметров магнитного поля (ММП) на спутниках, находящихся в солнечном ветре (Wind, ACE и др.). Однако магнитосфера Земли взаимодействует не с плазмой солнечного ветра, а с плазмой магнитослоя. Характерной особенностью плазмы магнитослоя является высокий уровень турбулентности [Shevryev and Zastenker, 2005; Savin et al., 2005; Borovsky and Gary, 2007; Россоленко и др., 2008; Знаткова и др., 2011], обзор [Вайсберг и др., 2008]. Существующие теории взаимодействия магнитосферы Земли с солнечным ветром исходят из предположения о ламинарном характере течения при соблюдении условия вмерзности, нарушаемом только в точках или линиях пересоединения. Наиболее популярной моделью течения плазмы в магнитослое является модель Спрайтера. Проверка данной модели, выполненная в работах [Němeček et al., 2000; Zastenker et al., 2002] показала, что в целом данная модель описывает характер течения, хотя могут наблюдаться и значительные отклонения. Такие отклонения особенно заметны в поведении магнитного поля. В численных МГД моделях, как правило, не удается воспроизвести флуктуации магнитного поля в магнитослое (см., например, работу [Li et al., 2009]). В работе [Gutynska et al., 2008] определен корреляционный масштаб флуктуаций модуля магнитного поля в магнитослое в меридиональной плоскости утро–вечер по данным проекта CLUSTER. Было показано, что корреляционная длина не превышает $1 R_E$ в диапазо-

не 0.001–0.125 Гц и не зависит от направлений магнитного поля и течения плазмы. При скорости течения плазмы в магнитослое ~ 200 км/с данное расстояние проходит плазмой за время ~ 30 с.

Развитие теории взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли требует учета существования высокого уровня турбулентности в магнитослое. Поэтому большой интерес представляет сравнение параметров магнитного поля непосредственно перед магнитопаузой с магнитным полем в солнечном ветре (ММП). Большое число измерений ММП проведено в точке либрации. Время распространения солнечного ветра от точки либрации до Земли составляет порядка часа. Солнечный ветер сам является турбулентной средой (см. [Riazantseva et al., 2005, 2007] и ссылки в этих работах). Поэтому его параметры могут изменяться при распространении до орбиты Земли. Для оценки влияния турбулентности магнитослоя на изменение параметров магнитного поля при распространении через магнитослой до магнитопаузы надо проводить сравнение таких параметров непосредственно перед ударной волной и около магнитопаузы. При этом измерения в солнечном ветре должны проводиться выше по потоку области форшока, который вносит сильные возмущения в поток солнечного ветра перед ударным фронтом. Возможность проведения такого сравнения появилась только с реализацией пятиспутникового проекта THEMIS [Angelopoulos, 2008; Sibeck and Angelopoulos, 2008], в котором в период с июня по октябрь один из спутников значительное время проводил измерения в солнеч-

ном ветре, в то время как другой пересекал магнитопазу в дневные часы.

В настоящей работе будет проведено сравнение параметров магнитного поля вблизи магнитопазы, измеренных за 3 с (время оборота спутника), 30 с (интервал \sim характерного корреляционного времени в соответствии с оценками Gutynska et al. [2008]) и 90 с (интервал в 3 раза превышающий характерное корреляционное время). Целью работы является определение усредненных зависимостей параметров магнитного поля у магнитопазы от соответствующих параметров в солнечном ветре при выбранных временах усреднения. При этом необходимо будет выделить события, при которых направление магнитного поля у магнитопазы сильно отличается от направления магнитного поля в солнечном ветре вплоть до изменения знака.

2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Данные для анализа были взяты с сайта <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>, где находятся в открытом доступе результаты работы различных проектов, в том числе проекта THEMIS. В ходе работы был проведен анализ данных THEMIS за период времени с 25 июня по 10 октября 2008 года. В этот период орбиты спутников в результате прецессии развернулись таким образом, что их апогеи располагались недалеко от линии Земля–Солнце, т.е. наблюдалась конфигурация, удобная для изучения взаимодействий на дневной стороне магнитосферы Земли. Были отобраны моменты времени, когда один из спутников вел регистрацию в солнечном ветре (СВ), а другой пересекал магнитопазу вблизи подсолнечной точки. Выбирались события, когда отклонение спутника от оси x не превышало $7 R_E$ по координатам y и z : при таком отклонении телесный угол, под которым спутник, пересекающий магнитопазу, виден с Земли, не превышает $\pi/3$. Момент пересечения магнитопазы фиксировался по характерным изменениям параметров плазмы и магнитного поля, определяемым по данным электростатического анализатора ESA [McFadden et al., 2008] и феррозондового магнетометра FGM [Auster et al., 2008] на спутнике. Параметры межпланетного магнитного поля (ММП) также определялись по данным FGM. Точность измерений FGM составляет 0.01 нТл. Были отобраны события, в которых солнечный ветер не испытывал существенных вариаций: величина среднеквадратичного отклонения значения модуля магнитного поля от среднего за исследуемый период не превышает 2 нТл, скорость потока не превышает 650 км/с, а вариации скорости не превышают 10 км/с.

Было проведено сравнение параметров магнитного поля, зарегистрированных одним из спутников после пересечения магнитопазы, с параметрами

межпланетного магнитного поля, зарегистрированными другим спутником. В качестве анализируемых параметров использовались следующие величины: амплитуда и три компоненты магнитного поля и часовой угол вектора магнитного поля (угол между векторной суммой B_y и B_z и осью z_{GSM}). Для каждой из величин были подсчитаны средние значения и дисперсия.

Для параметров магнитного поля вблизи магнитопазы усреднение проводилось за период 30 и 90 с с момента пересечения магнитопазы (который фиксировался одновременно по изменениям параметров плазмы и магнитного поля). Приведены также значения магнитного поля, усредненные за оборот спутника, равный 3 с, т.е. поле непосредственно у магнитопазы. Для параметров солнечного ветра усреднение проводилось за максимальный период 90 с с учетом сдвига на время распространения солнечного ветра от спутника, проводящего измерения в солнечном ветре, до магнитопазы. Сдвиг рассчитывался как время прохождения солнечным ветром разности x -координат спутников в приближении радиального распространения солнечного ветра. Скорость солнечного ветра определялась по данным спутника проекта THEMIS, находящегося в солнечном ветре, а при отсутствии плазменных данных по данным базы данных OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Было учтено, что в результате термализации в магнитослое скорость солнечного ветра уменьшается примерно в два раза. Считалось, что толщина магнитослоя составляет $\sim 2 R_E$. Для каждого случая временной сдвиг рассчитывался отдельно для конкретных координат спутников. Т.к. при расчете временного сдвига возможны ошибки порядка десятка секунд, усреднение величин в солнечном ветре производилось за максимальный период 90 с с целью их минимизации. Всего было проанализировано 26 событий.

На рисунке 1 в качестве примера типичного события приведено пересечение магнитопазы спутниками проекта THEMIS 30 июля 2008 г. Справа (панель *в*) приведены спектрограммы электронов и ионов со спутника THEMIS-C, пересекавшего магнитопазу. Слева – спектрограммы со спутника THEMIS-B, находившегося за ударной волной (см. панель *б*), вертикальными линиями выделен участок, соответствующий интервалу времени на второй спектрограмме, полученной спутником THEMIS-C (см. панель *в*) (учтен сдвиг по времени на распространение СВ до магнитопазы). Ниже приведены соответствующие графики для амплитуды магнитного поля, трех его компонент и часового угла (данные со спутника, находившего в СВ, смещены по времени, чтобы соответствовать данным у магнитопазы). Черные кривые соответствуют измерениям в магнитослое, серые – в солнечном ветре. Пересечение 30 июля 2008 г. было достаточно четким,

области различных популяций плазмы на энергетических спектрограммах хорошо разделены. Наблюдался низкоширотный погранслои (LLBL) толщиной около 20 км (толщина LLBL определялась как разность x -координат спутника на внутренней и внешней его границах). Сначала спутник THEMIS-C находился в магнитосфере, о чем свидетельствуют потоки электронов с энергией ~ 1 кэВ и ионов с энергией ~ 10 кэВ. В правой части спектрограммы наблюдаются ионы и электроны магнитослоя, характеризующиеся высокой концентрацией и средней энергией < 1 кэВ. LLBL характеризуется как область переходных значений параметров плазмы и магнитного поля. По данным THEMIS-B наблюдался спокойный солнечный ветер. По OMNI скорость потока составляла 356 км/с, рассчитанный временной сдвиг 320 с. Амплитуда межпланетного магнитного поля составляла ~ 4.1 нТл, стандартное отклонение (SD) < 0.1 нТл (см. панель g). B_z в солнечном ветре ~ -2.7 нТл (SD ~ 0.1 нТл), B_z у магнитопаузы сразу после пересечения ~ -20 нТл (см. панель $ж$), при усреднении за 30 с ~ -13 нТл (SD ~ 4 нТл), при усреднении за 90 с ~ -16 нТл (SD ~ 4 нТл). Часовой угол в СВ составлял $\sim 147^\circ$ (SD $\sim 3^\circ$), сразу после пересечения $\sim 131^\circ$, а при усреднении за 90 с $\sim 146^\circ$ (SD $\sim 18^\circ$) (см. панель z). Видно, что в данном случае знак z -компоненты магнитного поля у магнитопаузы совпадает со знаком B_z в солнечном ветре.

На рисунке 2 приведен другой пример типичного пересечения магнитопаузы — событие 4 августа 2008 года. По сравнению с предыдущим случаем наблюдается LLBL с шириной ~ 130 км (см. панель $в$). Солнечный ветер также был спокойным, скорость потока 337 км/с, смещение по времени 338 с. Амплитуда межпланетного магнитного поля составляла ~ 3.1 нТл, SD ~ 0.3 нТл (см. панель g). Однако в отличие от события 30 июля знак B_z в данном случае меняется на противоположный по сравнению с солнечным ветром. В солнечном ветре величина B_z в среднем за 90 с составляет 2.0 нТл, а у магнитопаузы сразу после пересечения достигается значение ~ -33 нТл, среднее значение за 30 с после пересечения составляет ~ -27 нТл (SD ~ 4 нТл), а при усреднении за 90 с ~ -21 нТл (SD ~ 6 нТл). Часовой угол в СВ составлял $\sim -47^\circ$ (SD $\sim 15^\circ$), сразу после пересечения $\sim -162^\circ$, а при усреднении за 90 с $\sim -156^\circ$ (SD $\sim 5^\circ$) (см. панель z). Таким образом, в данном случае наблюдалось существенное несоответствие ориентации магнитного поля в солнечном ветре и у магнитопаузы.

Ниже приводятся результаты статистического анализа 26 подобных событий.

3. ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

На рисунках 3–8 приведены статистические результаты для параметров магнитного поля: модуля вектора, трех его компонент и часового угла. Рисунок 3 содержит гистограммы распределений параметров магнитного поля (модуля, компонент и часового угла): слева — распределения в солнечном ветре, справа — распределения величин у магнитопаузы с интервалом усреднения равным 30 с после пересечения (10 отсчетов прибора). Статистические распределения также строились для значений параметров через 3 с (т.е. одно измерение спутника) после пересечения границы магнитопаузы, и для усреднения за период 90 с (30 отсчетов). Эти распределения достаточно близки к приведенным на рис. 3, и мы не приводим из здесь ввиду ограниченного объема публикации. Для параметров солнечного ветра усреднение проводилось за период 90 с с учетом сдвига на время распространения солнечного ветра до магнитопаузы. Выбор интервала усреднения связан с возможными ошибками в определении времени распространения солнечного ветра от одного спутника до другого. При этом усреднение проводилось за максимальный используемый период.

Проведем сравнение статистических распределений в солнечном ветре и у магнитопаузы. Амплитуда магнитного поля в солнечном ветре имеет максимум распределения ~ 4 –5 нТл (рис. 3а), а в магнитослое ~ 15 –20 нТл (рис. 3б), т.е. усиление составляет 4–5 раз. Для x -компоненты магнитного поля (рис. 3в) наблюдается преобладание отрицательных значений в солнечном ветре для рассматриваемого периода. У магнитопаузы (рис. 3г) распределения также несколько смещены в отрицательную сторону, но максимумы лежат около нуля, что соответствует представлению о магнитопаузе как о тангенциальном разрыве. Распределения для y -компоненты магнитного поля у магнитопаузы (рис. 3е) в целом соответствуют распределению в солнечном ветре (рис. 3д) по количеству положительных и отрицательных событий. Наиболее интересны гистограммы для z -компоненты магнитного поля. В то время как в солнечном ветре наблюдается примерно одинаковое число событий с положительным и отрицательным B_z (15 отрицательных и 11 положительных событий) (рис. 3ж), в распределениях у магнитопаузы отрицательные события явно преобладают (20 против 6) (рис. 3з). Максимум распределения в СВ лежит около нуля (рис. 3ж), у магнитопаузы максимум приходится на ~ -10 –15 нТл (рис. 3з). Для часового угла наблюдается равномерное распределение событий в солнечном ветре (рис. 3и), и преобладание углов, близких к 180 градусам, у магнитопаузы (рис. 3к).

На рисунках 4–8 приведены графики зависимостей параметров магнитного поля у магнитопаузы

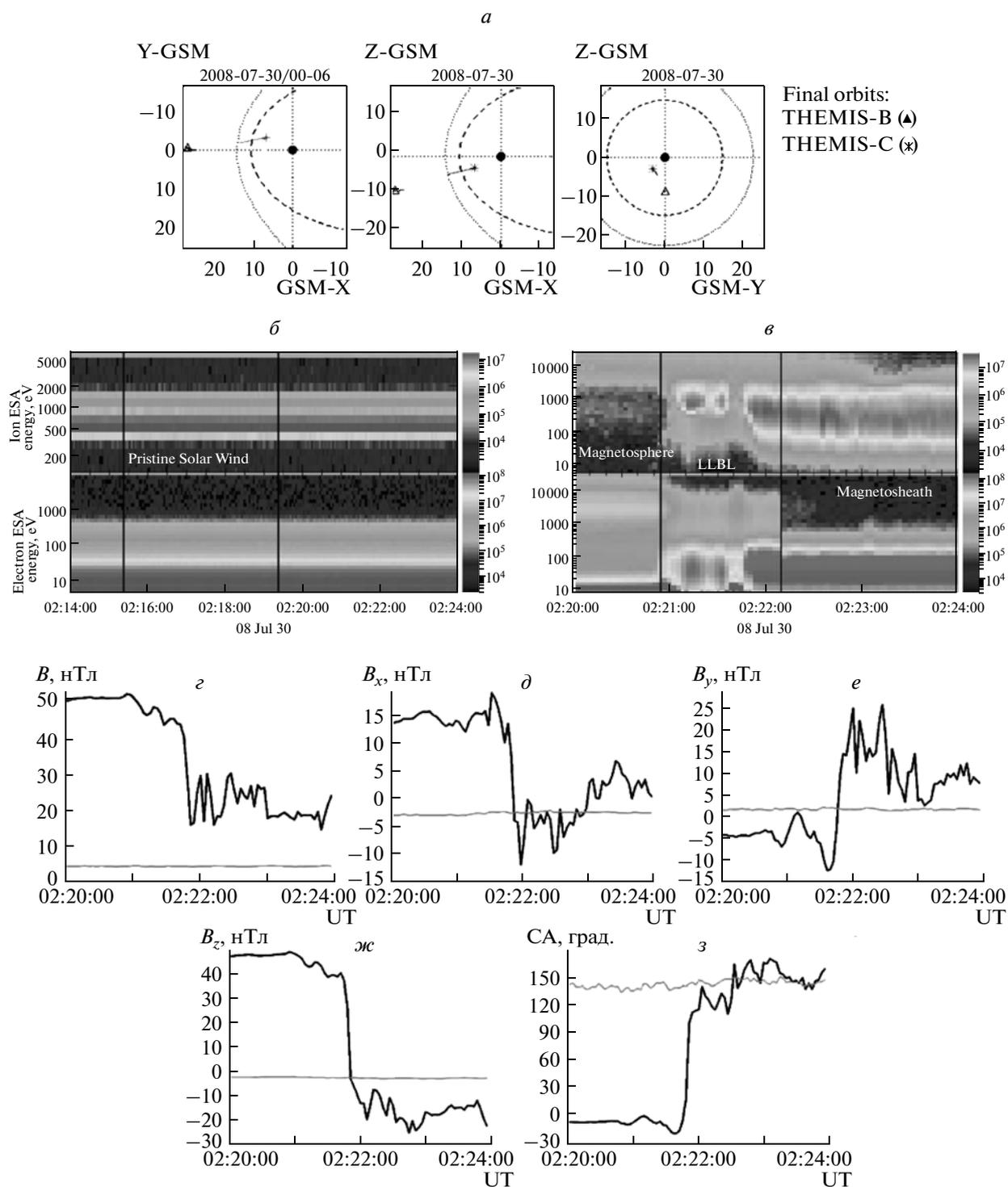


Рис. 1. Пересечение магнитопаузы спутниками THEMIS 30 июля 2008 г.: (*a*) — орбиты спутников, (*б*) — спектрограммы ионов (верхняя) и электронов (нижняя) со спутника THEMIS-B, (*в*) — спектрограммы с THEMIS-C справа — температура, (*г*) — $|B|$, (*д*) — B_x , (*е*) — B_y , (*ж*) — B_z , (*з*) — часовой угол магнитного поля. Значения магнитного поля, его компонент и часового угла у магнитопаузы показаны черной линией, в солнечном ветре серой.

узы от параметров солнечного ветра. Для каждого параметра приведен набор из трех зависимостей. Первое распределение построено для мгновенных значений параметра через 3 с после пересече-

ния спутником магнитопаузы (одно измерение прибора), второе — для значений, усредненных за период 30 с после пересечения магнитопаузы, третье — для значений, усредненных за период 90 с.

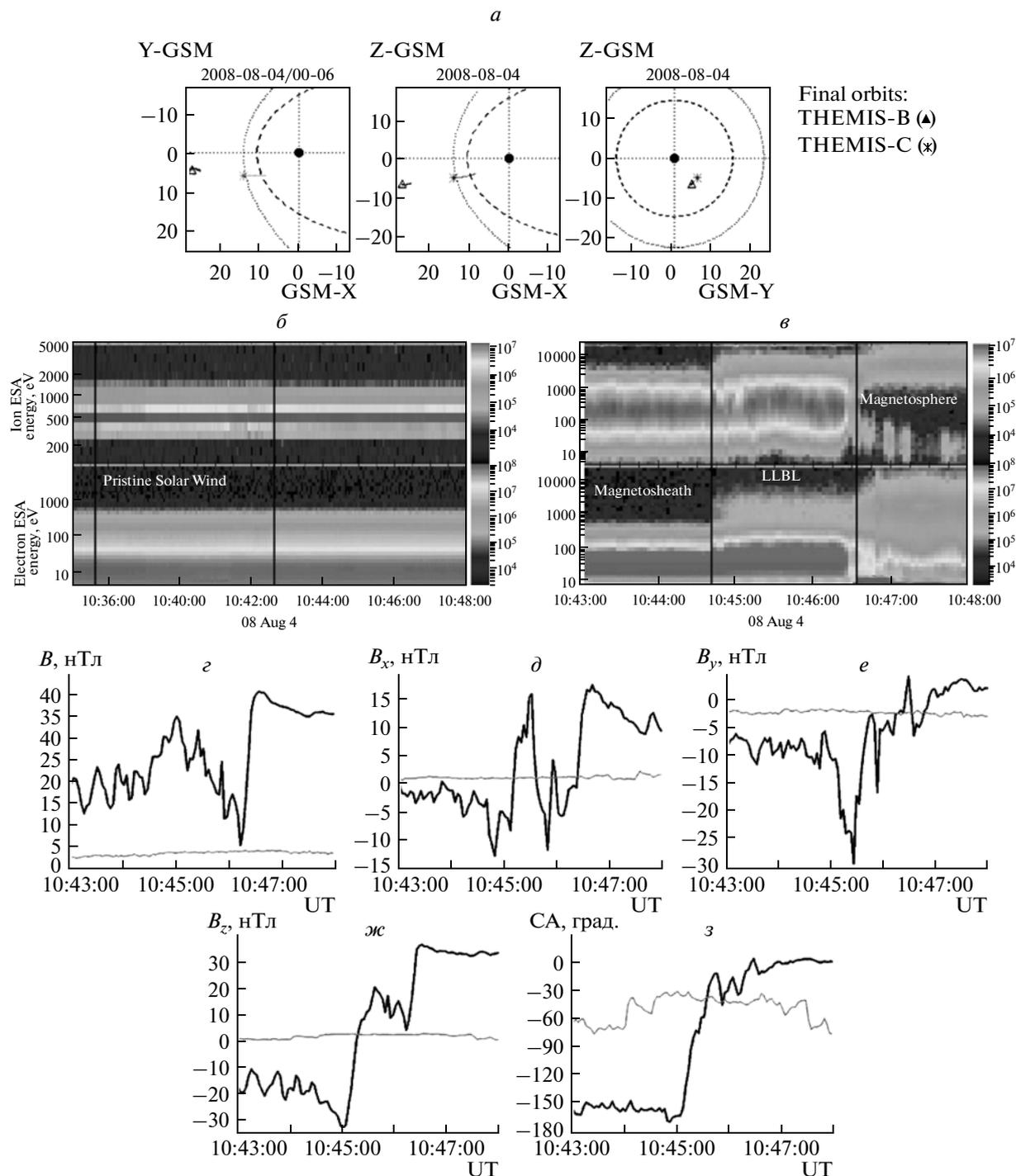


Рис. 2. Пересечение магнитопаузы спутниками проекта THEMIS 4 августа 2008 г. Обозначения те же, что и на рис. 1.

Приведены зависимости от соответствующих усредненных параметров солнечного ветра. Усреднение в солнечном ветре проведено за максимальный период 90 с (с учетом сдвига на время распространения солнечного ветра до магнитопаузы) с целью минимизировать ошибки за счет отклонения расчетного времени задержки СВ от реально-го. Для каждой точки также приведены ошибки,

рассчитанные как среднеквадратичное отклонение за период усреднения. На графиках для мгновенных значений нанесены только ошибки для усреднения в солнечном ветре, т.к. усреднения вблизи магнитопаузы не проводилось.

Для амплитуды магнитного поля (рис. 4) выявлена тенденция к увеличению значений у магни-

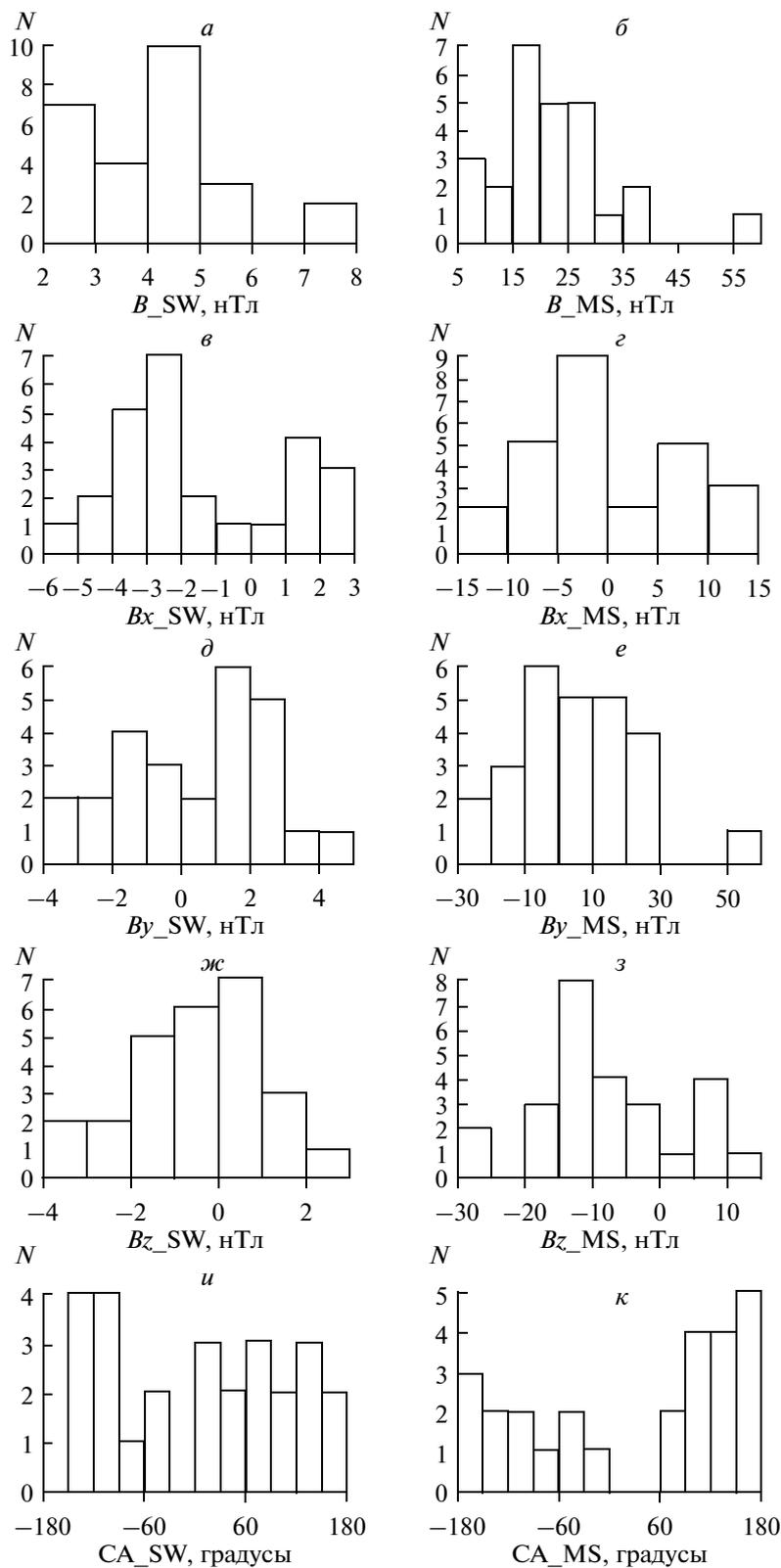


Рис. 3. Гистограммы распределения величины модуля и компонент магнитного поля и часового угла для рассмотренного набора событий в солнечном ветре: $|B|$ – (*a*), B_x – (*в*), B_y – (*д*), B_z – (*ж*), часового угла – (*и*); и в магнитослое у магнитопаузы (усреднение за период 30 с с момента пересечения магнитопаузы): $|B|$ – (*б*), B_x – (*г*), B_y – (*е*), B_z – (*з*), часового угла – (*к*).

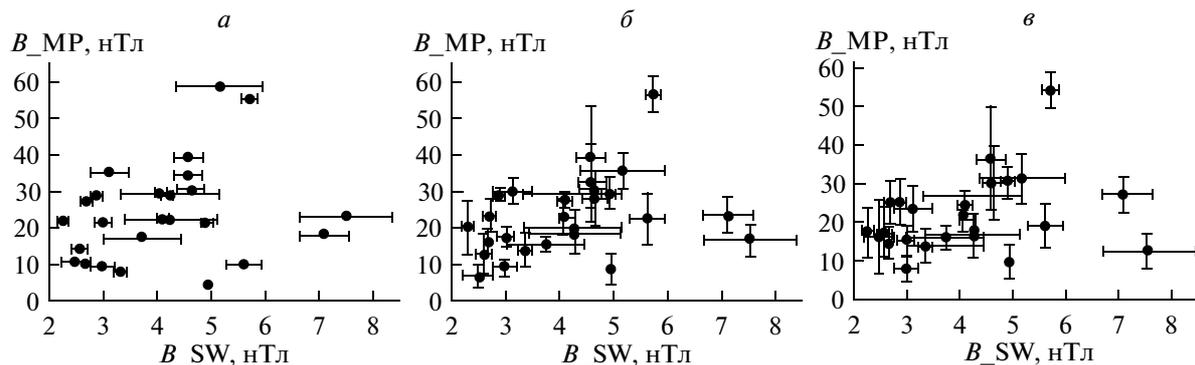


Рис. 4. Зависимость амплитуды магнитного поля у магнитопаузы для рассмотренного набора событий: (а) – через 3 с после пересечения магнитопаузы; (б) – усреднение за период 30 с с момента пересечения; (в) – усреднение за период 90 с – от амплитуды в солнечном ветре.

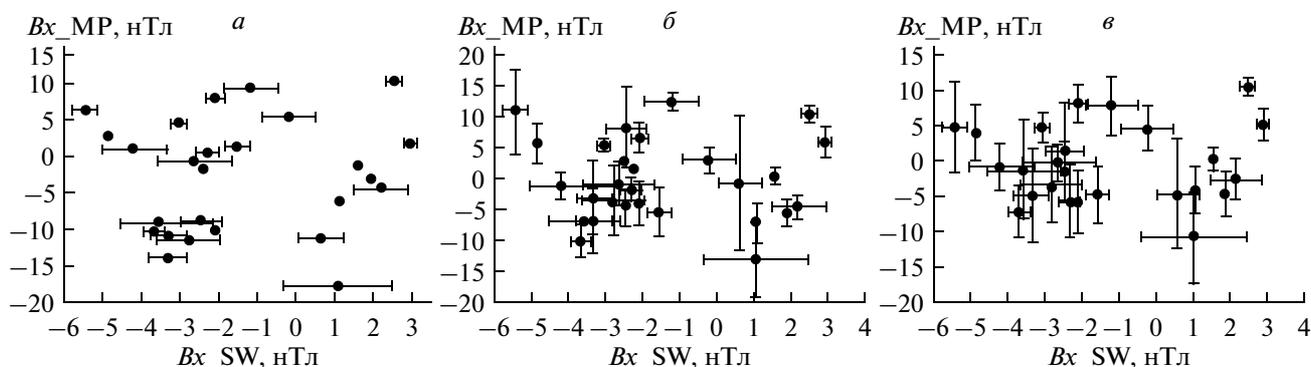


Рис. 5. Зависимость V_x у магнитопаузы для рассмотренного набора событий от V_x – в солнечном ветре. Обозначение панелей аналогичное рис. 4.

топаузы при больших значениях амплитуды в солнечном ветре. С увеличением времени усреднения картина распределения принципиально не меняется.

По результатам исследования x -компонента магнитного поля (рис. 5) у магнитопаузы не зависит от соответствующей величины в солнечном ветре и в среднем колеблется около нуля, что соответствует представлению о магнитопаузе как о тангенциальном разрыве. Так же, как и для амплитуды магнитного поля, увеличение времени усреднения не изменяет характера распределения точек на графике.

Для y -компоненты магнитного поля у магнитопаузы (рис. 6) получена хорошая линейная зависимость от ее величины в солнечном ветре, причем с увеличением периода усреднения увеличивается коэффициент корреляции, и уменьшаются ошибки параметров аппроксимации и стандартное отклонение. Для мгновенных значений после пересечения для аппроксимации по модели $B_{y_MP} = a + bB_{y_SW}$ получены значения параметров $a = 1.1 \pm 2.3$ нТл, $b = 6.7 \pm 1.1$, $SD = 11.6$ нТл,

коэффициент корреляции $r = 0.79$ (рис. 6а). Для усредненных за 30 с значений $a = 0.9 \pm 0.6$ нТл, $b = 6.9 \pm 0.3$, $SD = 2.3$ нТл, $r = 0.92$ (рис. 6б). Для усредненного за период 90 с распределения $a = 0.6 \pm 0.8$ нТл, $b = 6.5 \pm 0.3$, $SD = 1.5$ нТл, $r = 0.94$ (рис. 6в). Все три аппроксимации совпадают в пределах ошибок.

Наиболее интересны результаты, полученные для z -компоненты магнитного поля (см рис. 7). Наблюдается нечеткая тенденция к возрастанию величины этой компоненты с увеличением соответствующего значения в солнечном ветре. Однако в не менее четверти случаев (8 из 26 для мгновенных значений параметров, и 7 из 26 для усредненных за периоды 30 с и 90 с величин) знак z -компоненты поля у магнитопаузы меняется по сравнению со знаком поля в солнечном ветре с положительного значения (в СВ) на отрицательное (у МП), и в нескольких случаях (1 для мгновенных значений и 2 для усредненных за 30 и 90 с величин) с отрицательного на положительное.

При рассмотрении изменения часового угла у магнитопаузы по сравнению с его значением в

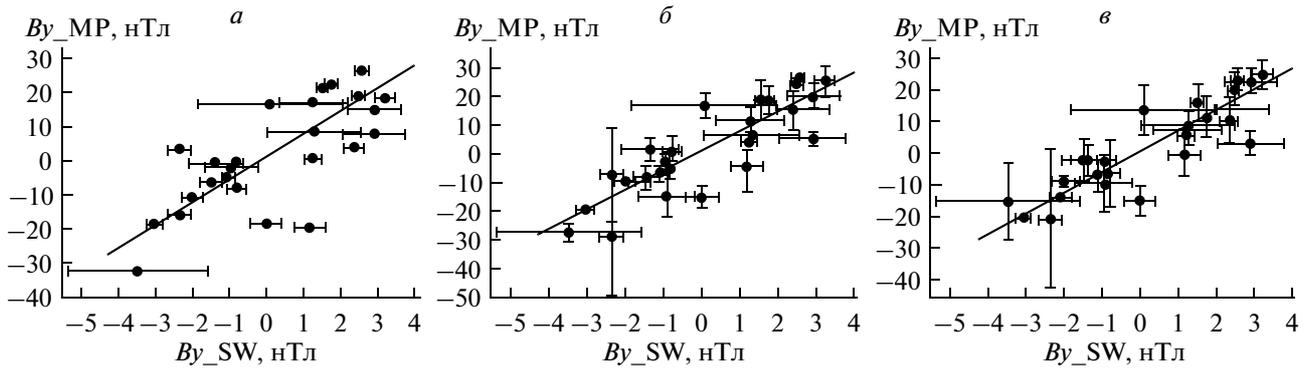


Рис. 6. Зависимость B_y у магнитопаузы для рассмотренного набора событий от B_y в солнечном ветре. Обозначение панелей аналогичное рис. 4. На всех графиках нанесена линейная аппроксимация и указаны значения ее параметров.

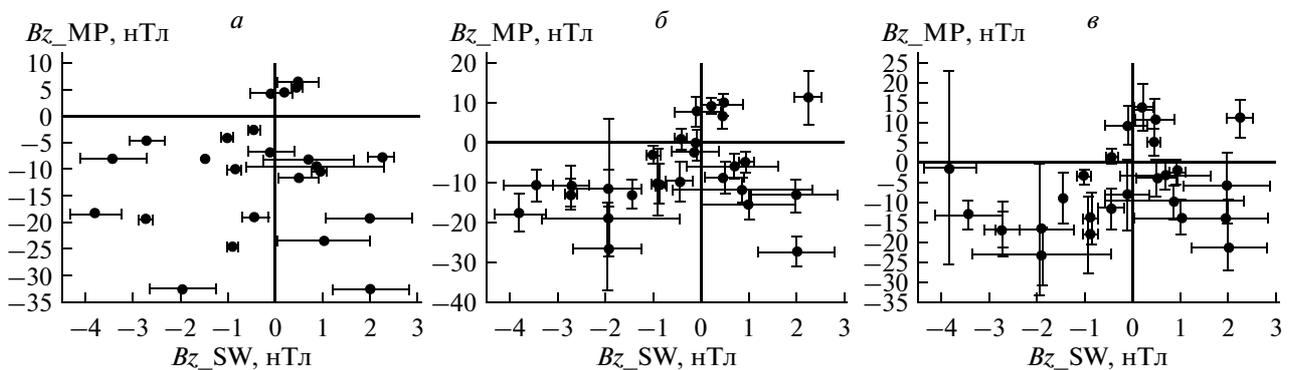


Рис. 7. Зависимость B_z у магнитопаузы для рассмотренного набора событий от B_z в солнечном ветре. Обозначение панелей аналогичное рис. 4.

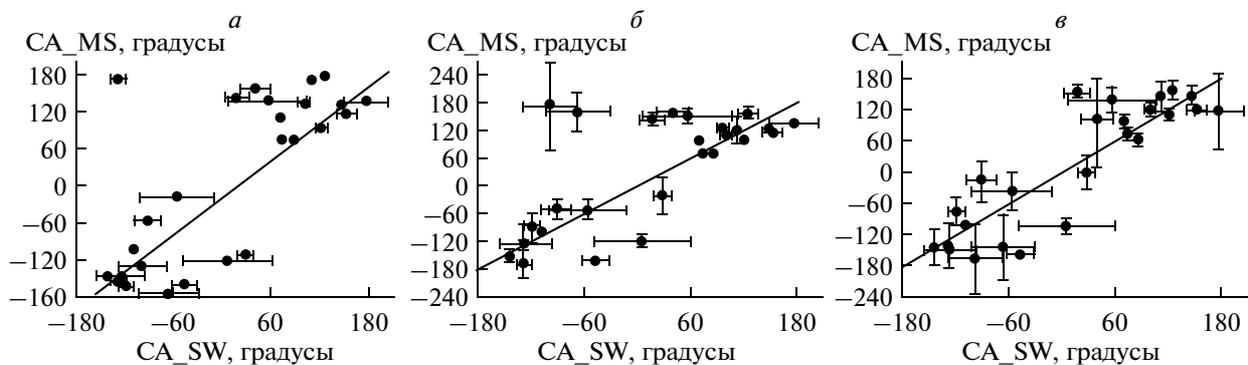


Рис. 8. Зависимость часового угла магнитного поля у магнитопаузы для рассмотренного набора событий от часового угла в солнечном ветре. Обозначение панелей аналогичное рис. 4. На всех графиках нанесена прямая, соответствующая равенству часовых углов.

солнечном ветре были получены графики, отображенные на рис. 8. Для наглядности на всех графиках приведена линия равных значений часовых углов в солнечном ветре и у магнитопаузы. Несмотря на изменение знака z -компоненты магнитного поля в ряде случаев, значения часового угла у магнитопаузы в целом неплохо ложатся на эквивалентную зависимость, в пределах ошибок. Случаев, не соответствующих принципу равен-

ства часовых углов, отмечено не более 27% (7 из 26 на первых двух графиках и 4 из 26 на третьем).

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенный выше анализ данных наблюдений на спутниках THEMIS согласуется с результатами работ, демонстрирующих существование высокого уровня турбулентности магнитного по-

ля в магнитослое. В отличие от проводившихся ранее исследований в данной работе проводилось сравнение параметров магнитного поля непосредственно перед магнитопаузой вблизи ее носовой части с параметрами ММП, измеренными перед ударной волной. Удалось показать, что V_x -компонента у магнитопаузы колеблется вблизи нуля независимо от времени усреднения, что хорошо стыкуется с существованием на магнитопаузе разрыва с характеристиками, близкими к тангенциальному разрыву. V_y -компонента у магнитопаузы, как было показано еще в стадии первоначальных исследований [Fairfield, 1967], сравнительно хорошо коррелирует с V_y ММП. При этом с ростом времени усреднения повышается коэффициент корреляции V_y ММП с V_y у магнитопаузы. Такие корреляции практически отсутствуют для V_z -компоненты. Наблюдаются события (~30% для усредненных значений в исследованных 26 событиях), когда знаки V_z -компоненты магнитного поля в солнечном ветре не совпадают со знаком V_z у магнитопаузы. События, не удовлетворяющих принципу равенства часовых углов, составляют <27%. Плохая корреляция магнитного поля в магнитослое с ММП отмечалась и ранее [Coleman, 2005; Šafránková et al., 2009] и ссылки в этих работах. Наблюдаемый слабый уровень корреляций даже при сравнительно длительном усреднении с периодом усреднения в 90 с, сравнимым со временем пересечения магнитослоя плазмой солнечного ветра, видимо, связан с турбулизацией магнитослоя. В настоящей работе в силу ограниченности статистики (ограниченное число пересечений магнитопаузы одним из спутников, когда другой проводил измерения перед ударной волной и форшоком) не проводилось разграничение между случаями, связанными с квазиперпендикулярной и квазипараллельной ударными волнами. В соответствии с результатами Shevryev and Zastenker [2005] можно ожидать, что средний уровень флуктуаций за квазиперпендикулярной и квазипараллельной ударными волнами будет отличаться примерно в 2 раза.

ММП, особенно его V_z -компонента, относится к основным факторам, контролирующим геомагнитную активность. При этом обычно считается, что данный контроль осуществляется за счет процессов пересоединения ММП на магнитопаузе с полем внутри магнитосферы. Результаты многочисленных исследований турбулентности магнитослоя, включая приведенный выше анализ, дают основание пересмотреть такие представления. Высокий уровень флуктуаций магнитного поля в магнитослое даже в случае сравнительно большего времени усреднения свидетельствует в пользу того, что V_z -компонента магнитного поля у магнитопаузы плохо коррелирует с ММП вплоть до изменения знака, что делает необходимым

учет данного эффекта при рассмотрении динамики процессов на магнитопаузе.

Необходимо отметить, что представления о роли процессов крупномасштабного пересоединения на магнитопаузе и образования крупномасштабных нейтральных линий привлекались для объяснения сравнительно хорошей корреляции ММП с крупномасштабной магнитосферной конвекцией. Однако, коэффициенты корреляции ММП с геомагнитными индексами, как правило, сравнительно невелики [Newell et al., 2009; Troshichev et al., 2011] и наблюдается высокий уровень флуктуаций электрического поля в полярной шапке ([Головчанская и Козеллов, 2010] и ссылки в данной работе). Результаты сравнения ММП с магнитным полем у магнитопаузы помогают объяснить такие наблюдения.

За последнее время накопилось достаточно много экспериментальных доказательств поддержания системы продольных токов в магнитосфере и крупномасштабной конвекции азимутальными градиентами давления магнитосферной плазмы (см. обзоры [Антонова и Тверской, 1996; Antonova, 2004; Xing et al., 2009] и ссылки в этих работах). Данный механизм возбуждения конвекции не требует проникновения электрического поля солнечного ветра внутрь магнитосферы в результате процессов крупномасштабного пересоединения. При этом возникает ряд вопросов, решение которых требует анализа поддержании баланса давлений на магнитопаузе. Соответствующий анализ предполагается провести в следующих работах, анализируя базы данных многоспутниковых экспериментов.

Авторы выражают благодарность группе разработчиков проекта THEMIS и группе поддержки сайта спутниковых данных http://www.nasa.gov/mission_pages/themis/.

Авторы признательны V. Angelopoulos и участникам NASA-гранта NAS5-02099 за использование и подготовку данных проекта THEMIS. В особенности: С.W. Carlson и J.P. McFadden за использование данных прибора ESA, К.-Н. Glassmeier, U. Auster и W. Baumjohann за использование данных инструмента FGM, подготовленных под руководством Technical University of Braunschweig и с финансовой поддержкой Германского Министерства Экономики и Технологии, а так же Германским Центром Авиации и Космоса (DLR) в рамках контракта 50 ОС 0302. Авторы признательны проф. Г.Н. Застенкеру за советы и замечания в ходе выполнения работы.

Данная работа частично поддержана грантом Президента РФ № МК-1579.2010.2, грантами РФФИ № 10-02-01063-а, 10-05-00247-а, 12-02-00217-а, 12-05-00984-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е., Тверской Б.А. О природе электрических полей во внутренней магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 36. № 2. С. 1–18. 1996.
- Вайсберг О.Л., Смирнов В.Н., Застенкер Г.Н., Савин С.П., Веригин М.И. Взаимодействие солнечного ветра с внешней магнитосферой Земли. Раздел 4.2. Главы 4. Магнитосфера Земли (под ред. В.Ю. Трахтенгерца, А.Г. Демехова). Плазменная гелиофизика, т. 1., под ред. Л.М. Зеленого, М.: Физматлит, С. 378–422. 2008.
- Головчанская И.В., Козеллов Б.В. Свойства электрической турбулентности в ионосфере полярной шапки // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 5. С. 603–615. 2010.
- 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.
- Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И., Веригин М.И., Кирпичев И.П., Бородкова Н.Л. Турбулентные флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое и формирование низкоширотного погранслоя: многоспутниковые наблюдения 2 марта 1996 г. // Космич. исслед. Т. 46. № 5. С. 387–397. 2008.
- Angelopoulos V. The THEMIS Mission // Space Sci. Rev. V. 141. P. 5–34. doi: 10.1007/s11214-008-9336-1. 2008.
- Antonova E.E. Magnetostatic equilibrium and current systems in the Earth's magnetosphere // Adv. Space Res. V. 33. P. 752–760. 2004.
- Auster H.U., Glassmeier K.H., Magnes W., Aydogar O. et al. The THEMIS fluxgate magnetometer // Space Sci. Rev. V. 141. P. 235–264. doi: 10.1007/s11214-008-9365-9. 2008.
- Borovsky J.E., Gary S.P. On shear viscosity and the Reynolds number of magnetohydrodynamic turbulence in collisionless magnetized plasmas: Coulomb collisions, Landau damping, and Bohm diffusion // Physics of plasmas. V. 16, 082307. doi: 10.1063/1.3155134. 2009.
- Gutynska O., Němeček Z., Šafránková J. Correlation length of magnetosheath fluctuations: Cluster statistics // Ann. Geophys. V. 26. P. 2503–2513. 2008.
- Fairfield D.H. The ordered magnetic field of the magnetosheath // J. Geophys. Res. V. 72. № 23. P. 5865–5877. 1967.
- Li W., Raeder J., Øieroset M., Phan T.D. Cold dense magnetopause boundary layer under northward IMF: Results from THEMIS and MHD simulations // J. Geophys. Res. V. 114. A00C15. doi:10.1029/2008JA013497. 2009.
- McFadden J.P., Carlson C.W., Larson D., Ludlam M., Abiad R., Elliott B., Turin P., Marckwordt M., Angelopoulos V. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration // Space Sci. Rev. V. 141. P. 277–302. doi: 10.1007/s11214-008-9440-2. 2008.
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // J. Geophys. Res. V. 112. A01206. doi:10.1029/2006JA012015. 2007.
- Němeček Z., Šafránková J., Zastenker G.N., Pišoft P., Paularena K.I., Richardson J.D. Observations of the radial magnetosheath profile and a comparison with gasdynamic model predictions // Geophys. Res. Lett. V. 27. № 17. P. 2801–2804. 2000.
- Riazantseva M.O., Zastenker G.N., Richardson J.D., Eiges P.E. Sharp boundaries of small- and middle-scale solar wind structures // J. Geophys. Res. V. 110. A12110. doi:10.1029/2005JA011307. 2005.
- Riazantseva M.O., Khabarova O.V., Zastenker G.N., Richardson J.D. Sharp boundaries of solar wind plasma structures and their relationship to solar wind turbulence // Adv. Space Res. V. 40. P. 1802–1806. 2007.
- Šafránková J., Hayosh M., Gutynska O., Němeček Z., Prech L. Reliability of prediction of the magnetosheath B_z component from interplanetary magnetic field observations // J. Geophys. Res. V. 114. A12213. doi:10.1029/2009JA014552. 2009.
- Savin S., Skalsky A., Zelenyi L., Avakov L. et al. Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause // Surveys in Geophysics. V. 26. P. 95–133. doi:10.1007/s10712-005-1874-4. 2005.
- Shevryev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // Planet. Space Sci. V. 53. P. 95–102. 2005.
- Sibeck D.G., Angelopoulos V. THEMIS science objectives and mission phases // Space Sci. Rev. V. 141. P. 35–59. doi: 10.1007/s11214-008-9393-5. 2008.
- Troshichev O., Sormakov D., Janzhura A. Relation of PC index to the geomagnetic storm Dst variation // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. P. 611–622. doi:10.1016/j.jastp.2010.12.015. 2011.
- 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. № 14. L14105. doi:10.1029/2009GL038881. 2009.
- Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., Němeček Z. et al. Multispacecraft measurements of plasma and magnetic field variations in the magnetosheath: Comparison with Spreiter models and motion of the structures // Planet. Space Sci. V. 50. № 5–6. P. 601–612. 2002.