

УДК 550.383

## ПЛАТО ПЛАЗМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В НОЧНОМ СЕКТОРЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ

© 2023 г. И. П. Кирпичев<sup>1, \*</sup>, Е. Е. Антонова<sup>1, 2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

\*e-mail: [ikir@iki.rssi.ru](mailto:ikir@iki.rssi.ru)

\*\*e-mail: [elizaveta.antonova@gmail.com](mailto:elizaveta.antonova@gmail.com)

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 21.07.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Рассмотрен ход радиального распределения давления плазмы, магнитного поля и плазменного параметра в ночном секторе магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 7 до 12  $R_E$ , полученный с использованием измерений миссии THEMIS. Проведен анализ результатов измерений на спутниках THEMIS-D и -A в феврале 2009 г., когда спутники находились вблизи экваториальной плоскости. Выделены интервалы времени, когда плазменное давление фактически не изменялось при изменении расстояния до Земли. Показано, что профили с плато давления могут устойчиво существовать в течение суток, разрушаются в период возмущения и восстанавливаются после разрушения. Обсуждается роль плато давления в формировании структуры магнитосферных токовых систем.

DOI: 10.31857/S001679402260034X, EDN: ADMOKV

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При магнитогидродинамическом (МГД) описании плазменной системы давление плазмы является основным параметром, определяющим характерные особенности динамики системы и ее устойчивости [Кадомцев, 1988]. При нарушении условия магнитостатического равновесия, когда градиент давления не уравновешивает силу Ампера, плазма начинает двигаться с альвеновскими скоростями. В лабораторных условиях такое движение, как правило, приводит к разрушению плазменной конфигурации. В магнитосфере Земли условие баланса давлений плазмы и магнитного поля, несмотря на высокий уровень флуктуаций в магнитослое и плазменном слое, соблюдается на магнитопаузе [McFadden et al., 2008; Знаткова и др., 2011 и др.] и поперек плазменного слоя в хвосте магнитосферы [Baumjohann et al., 1990; Petrukovich et al., 1999 и др.]. Распределение давления внутри магнитосферной ловушки во время магнитных бурь определяет величину  $Dst/SYM-H$  вариации [Parker, 1996; Antonova et al., 2018 и др.]. МГД-модели успешно используются при глобальном моделировании крупномасштабной магнитосферной динамики [Raeder et al., 2021], включая формирование магнитосферной плазменной популяции, но имеют серьезные

ограничения, связанные с практически неустрашимой “численной проводимостью”. Идеальные МГД-модели, основанные на постулируемой применимости уравнения в замороженности магнитного поля в бесстолкновительную плазму, могут быть использованы в условиях магнитосферы только при описании процессов, при которых скорость движения плазмы сравнима с альвеновской скоростью [Antonova and Stepanova, 2021]. Такие модели неприменимы для описания магнитостатически равновесных процессов. Описание медленных процессов, когда усредненная скорость движения плазмы намного меньше звуковой и альвеновской, может быть проведено в рамках подхода, основанного на соблюдении условия магнитостатического равновесия [Antonova, 2000; Овчинников и Антонова, 2017; Antonova and Stepanova, 2021] даже в условиях высокого уровня турбулентных флуктуаций плазмы. Описание и моделирование крупномасштабной магнитосферной динамики требует совершенствования существующих моделей распределения давления плазмы в магнитосфере во всех областях магнитосферы Земли. Такая информация позволяет решать проблему о проекции аврального овала на экваториальную плоскость [Антонова и др., 2014; Antonova et al., 2015] и создания системы крупномасштабных продольных

токов [Antonova and Tverskoy, 1998; Antonova, 2003] Iijima and Potemra [1976, 1978].

При сравнительно небольшом числе одновременно работающих спутниковых миссий, были получены только усредненные распределения давления плазмы вблизи экваториальной плоскости внутри магнитосферы [Кирпичев и Антонова, 2011; Antonova et al., 2013, 2014; Wang et al., 2011, 2013 и др.] и в геомагнитном хвосте [Tsyganenko and Mukai, 2003 и др.]. В процессе усреднения в таких моделях, как правило, пропадают локальные особенности распределения давления, такие как, например, локальные увеличения давления, приводящие к появлению локальных ям магнитного поля. Локальные ямы магнитного поля и вызвавшие их образование локальные увеличения давления были зарегистрированы, например, в работе [Vovchenko et al., 2018] по данным спутника AMPTE/CSE вблизи экваториальной плоскости на геоцентрическом расстоянии, не превышающем  $8.8 R_E$ . Обнаруженные на эксперименте локальные минимумы и максимумы магнитного поля [Saito et al., 2010; Petrukovich et al., 2013], которые в соответствии с работой [Vovchenko et al., 2018] могли образоваться в условиях магнитостатического равновесия за счет неоднородного распределения плазменного давления, также не воспроизводятся стандартными моделями магнитного поля и при МГД-моделировании [Sergeev et al., 2018]. Усредненные картины распределения  $B_z$ -компоненты магнитного поля могут содержать локальные максимумы и минимумы магнитного поля в экваториальной плоскости (см. рис. 10 в работе [Wang et al., 2013]).

К сравнительно мало изученным особенностям распределения давления относятся области плато, впервые выделенные по результатам наблюдений на спутнике Интербол/Хвостовой зонд в работах [Кирпичев, 2002; Писаренко и др., 2002]. Плато в распределении давления наблюдались 17 ноября 1995 г. и 13 марта 1996 г. при движении спутника почти вдоль  $X$ -координаты с геоцентрических расстояний  $\sim 11 R_E$  до внешней границы радиационного пояса при сравнительно спокойных геомагнитных условиях. Считалось, что вклад давления электронов невелик по сравнению с давлением ионов, а давление ионов в этих работах восстанавливалось по данным одновременных измерений приборов КОРАЛЛ, ДОК-2, и СКА-2 после интеркалибровки приборов [Pisarenko et al., 2003].

Существование квазистационарных плато давления в условиях магнитостатического равновесия могло означать отсутствие поперечных, а значит и магнитостатических равновесных продольных токов в области плато. Результаты наблюдений указывали на возможность объяснить возникновение зазора в картине продольных токов Iijima

and Potemra [1978]. Но позже данный эффект не исследовался. В настоящей работе проводится предварительный анализ результатов наблюдений в ночной магнитосфере, позволивших выделить области плато давления вблизи экваториальной плоскости в феврале 2009 г. и исследовать их динамику.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные, предоставляемые миссией THEMIS [Angelopoulos, 2008; Sibeck and Angelopoulos, 2008] и находящиеся в открытом доступе (<http://themis.ssl.berkeley.edu/>, <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Орбиты спутников миссии преимущественно расположены вблизи плоскости геомагнитного экватора. Для восстановления ионных и электронных функций распределения использовались плазменные приборы ESA [McFadden et al., 2008] и SST [Angelopoulos, 2008] в диапазоне энергий от 1.6 эВ до 6 МэВ, находящиеся на борту зондов D и A. Магнитное поле измерено прибором FGM [Auster et al., 2008]. Ионный состав в данных экспериментах не анализировался. Предполагалось, что основной вклад в давление ионов вносят ионы водорода. Расчет моментов функций распределения основан на применении программных кодов, предоставляемых командой THEMIS – SPEDAS 4.1. Использовалась мода регистрации потоков full, что позволяло получать разрешение данных плазменного давления (ионное плюс электронное) с разрешением от 1 до 10 мин. Параметры геомагнитной активности были получены с использованием базы данных OMNI (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/>). Проводился подробный анализ результатов наблюдений с 01 до 21 февраля 2009 г., когда спутники проводили измерения вблизи экваториальной плоскости. Во время исследованного временного интервала зонд А двигался с запаздыванием в среднем примерно на полчаса, практически, по той же орбите, что спутник D, что давало возможность отслеживать динамику распределения давления на коротком временном интервале. Сравнение наблюдений во время периодов низкой и высокой геомагнитной активности на фиксированных геоцентрических расстояниях позволяло анализировать динамику изменений давления на временных интервалах в несколько суток.

## 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

На рисунке 1 приведены параметры, представляющие основной интерес при анализе выделенного временного интервала: динамическое давление солнечного ветра  $p_{\text{dyn}}$ ,  $B_z$ GSM-компонента межпланетного магнитного поля,  $AL$ -индекс и исправленный с удалением вклада токов на магнитопаузе в аксиально-симметричное возмущение

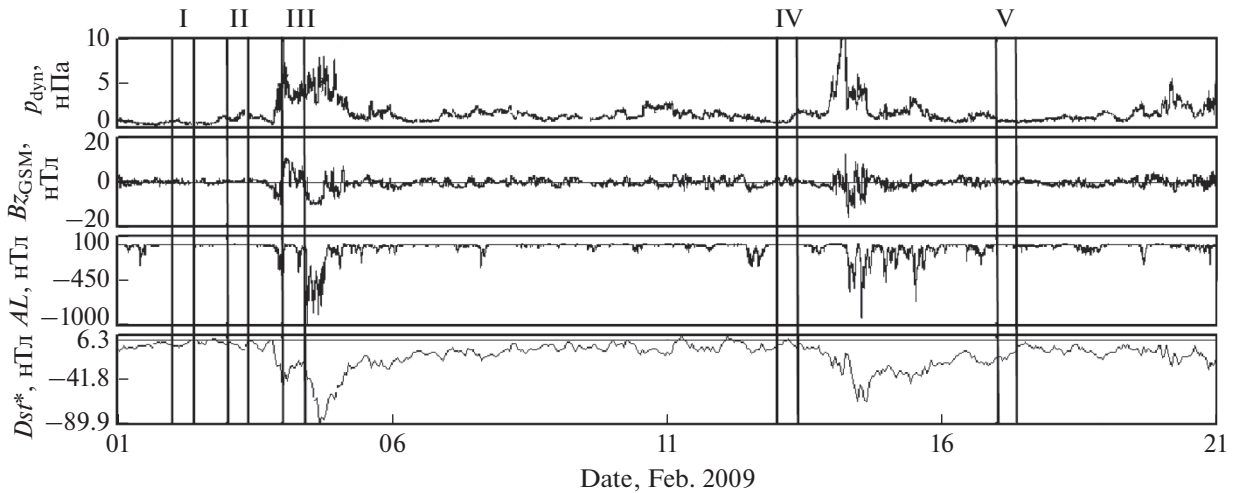


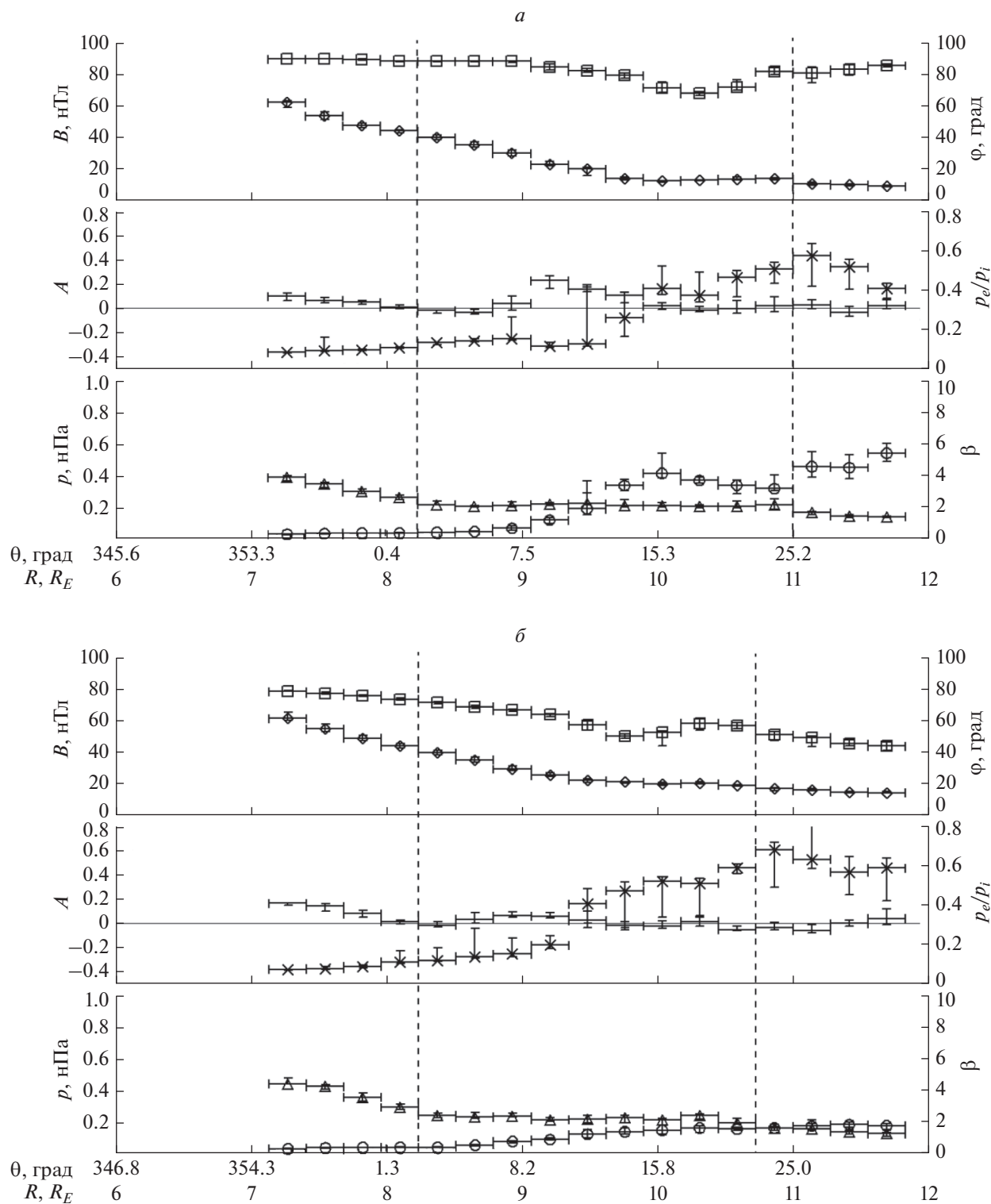
Рис. 1. Временной ход параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов. Сверху вниз. Динамическое давление солнечного ветра  $p_{\text{dyn}}$ ,  $B_{z\text{GSM}}$ -компонента межпланетного магнитного поля,  $AL$ ,  $Dst^*$ .

ние магнитного поля у Земли геомагнитный индекс  $Dst^*$  в соответствии с базой данных OMNI. Геомагнитный индекс  $Dst$  исправлен в соответствии с результатами, полученными в работе [Burton et al., 1975], ( $Dst^* = Dst + b(1.6p_{\text{dyn}})^{1/2} - c$ , где  $p_{\text{dyn}}$  в нПа,  $b = 20$  нТл,  $c = 20$  нТ). В рассматриваемый период времени можно выделить две бури 04 февраля с  $Dst^* = -90$  нТл и 14 февраля  $Dst^* = -65$  нТл. Параметр  $AL$  при этом достигал  $\sim -900$  нТл. Также наблюдались скачки динамического давления солнечного ветра от  $\sim 7$  до более чем 10 нПа. Вертикальными линиями обозначены временные интервалы (для спутника D), выделенные для более подробного анализа. Сравнительно спокойные геомагнитные условия наблюдались во время интервалов I, II, IV и V. Интервал III соответствовал периоду бурового возмущения.

На рисунках 2–6 последовательно приведены анализируемые величины, полученные по данным со спутника D (2a–6a) и со спутника A (2б–6б) в зависимости от величины геоцентрического расстояния в  $R_E$  и угла  $\theta$ , характеризующего величину отклонения орбиты от радиального направления (угол  $\theta$  отсчитывается от  $-X$  оси к  $-Y$  в солнечно-магнитосферной (SM) системе координат). На верхних панелях рисунков ромбами показаны значения модуля магнитного поля  $B$  (левая шкала), квадратами – угол  $\phi$  (правая шкала), характеризующий ориентацию магнитного поля относительно плоскости  $XY$  в SM-системе координат. Компоненты локального магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  вычислялись в SM-системе координат,  $\phi = \arctg(B_z / (B_x^2 + B_y^2)^{1/2})$ . При  $B_z \gg (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$  угол  $\phi$  близок к  $90^\circ$ , что характерно для положения спутника вблизи экваториальной плоскости. На нижних панелях рисунков 2–6 (левые шкалы)

треугольниками показаны медианные значения давления плазмы  $p$  и кружками – плазменный параметр  $\beta = 2\mu_0 p / B^2$ , где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума (правые шкалы). На средних панелях (левые шкалы) точками указаны значения анизотропии давления  $A = \frac{p_\perp}{p_\parallel} - 1$  (где  $p_\perp$  и  $p_\parallel$  – перпендикулярная и параллельная составляющие полного плазменного давления по отношению к магнитному полю) и крестами (правые шкалы) – отношение давления электронов  $p_e$  к давлению ионов  $p_i$ . Каждый значок соответствует медианному значению, рассчитанному на интервале  $\sim 0.28 R_E$ . Вертикальные черточки показывают среднеквадратичное отклонение от этого значения.

Во время интервала I на рис. 1 THEMIS D пересекал ночной сектор вблизи полуночи при  $\theta$  от 0 до  $\sim 25^\circ$  на расстояниях 8–11  $R_E$ . Этот период характеризовался очень спокойными геомагнитными условиями:  $AL \sim -4$  нТл,  $p_{\text{dyn}}$  менялось от  $\sim 0.9$  до 0.5 нПа. В интервале I модуль магнитного поля уменьшался от 60 до 10 нТл, а угол ненамного отличался от  $90^\circ$  на всем интервале наблюдений, что свидетельствует о нахождении вблизи экваториальной плоскости. Нижняя панель на рис. 2a показывает, что давление на расстояниях от 8.25 до 11  $R_E$  (между вертикальными штриховыми линиями, что соответствует временному интервалу от 02:03 до 06:14 02 февраля 2009 г.) фактически не менялось и составляло  $\sim 0.20$  нПа, что по результатам анализа в работе [Antonova et al., 2018] соответствует усредненному давлению на полярной границе внешней области кольцевого тока (CRC) и экваториальной границе тока хвоста магнитосферы, замыкающегося на магнитопаузе. При этом, за счет изменения магнитного



**Рис. 2.** Радиальные профили параметров, характеризующих плазму при пересечении временного интервала I. Верхняя панель: квадраты – угол  $\phi$ , ромбы – модуль локального магнитного поля. Средняя панель: точки – анизотропия давления  $A$  (горизонтальная линия – нулевое значение анизотропии), кресты (x) – отношение электронного давления к ионному  $p_e/p_i$ . Нижняя панель: кружки – плазменный параметр  $\beta$ , треугольники – плазменное давление. (a) THEMIS-D, (б) THEMIS-A.

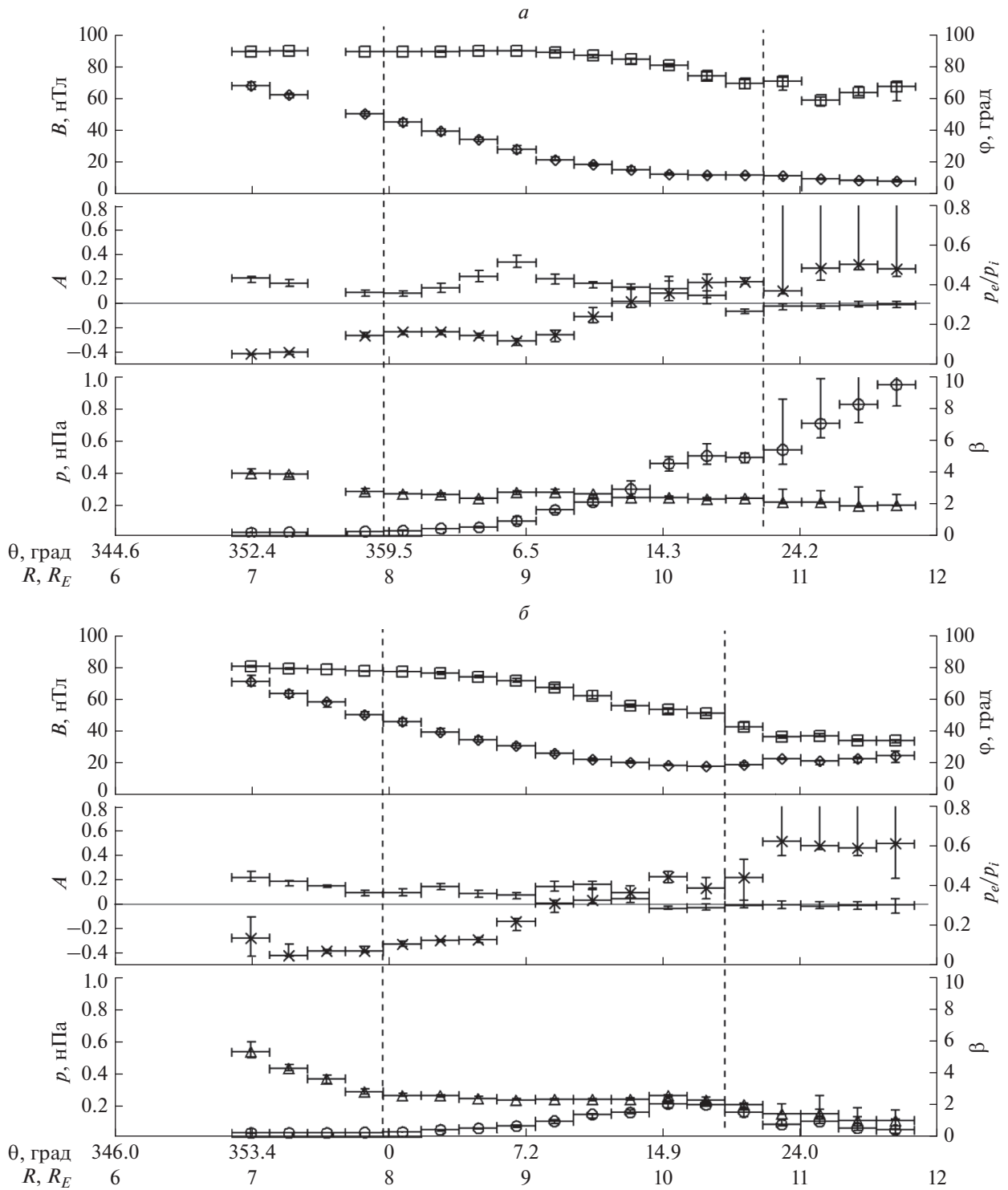


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для временного интервала II.

поля, плазменный параметр увеличился от 0.5 до 4, т.е. почти на порядок величины. Среднее значение анизотропии давления на данном интервале составляло  $\sim 0.04$ , что говорит о малости вклада эффектов, связанных с анизотропией давления. Вклад электронов в полное давление мож-

но оценить по графику отношения давления электронов к давлению ионов. На расстояниях от 7 до 10  $R_E$  вклад давления электронов в общее давление невелик и отношение давления электронов к давлению ионов составляет  $\sim 0.1$ . При увеличении геоцентрического расстояния нарас-

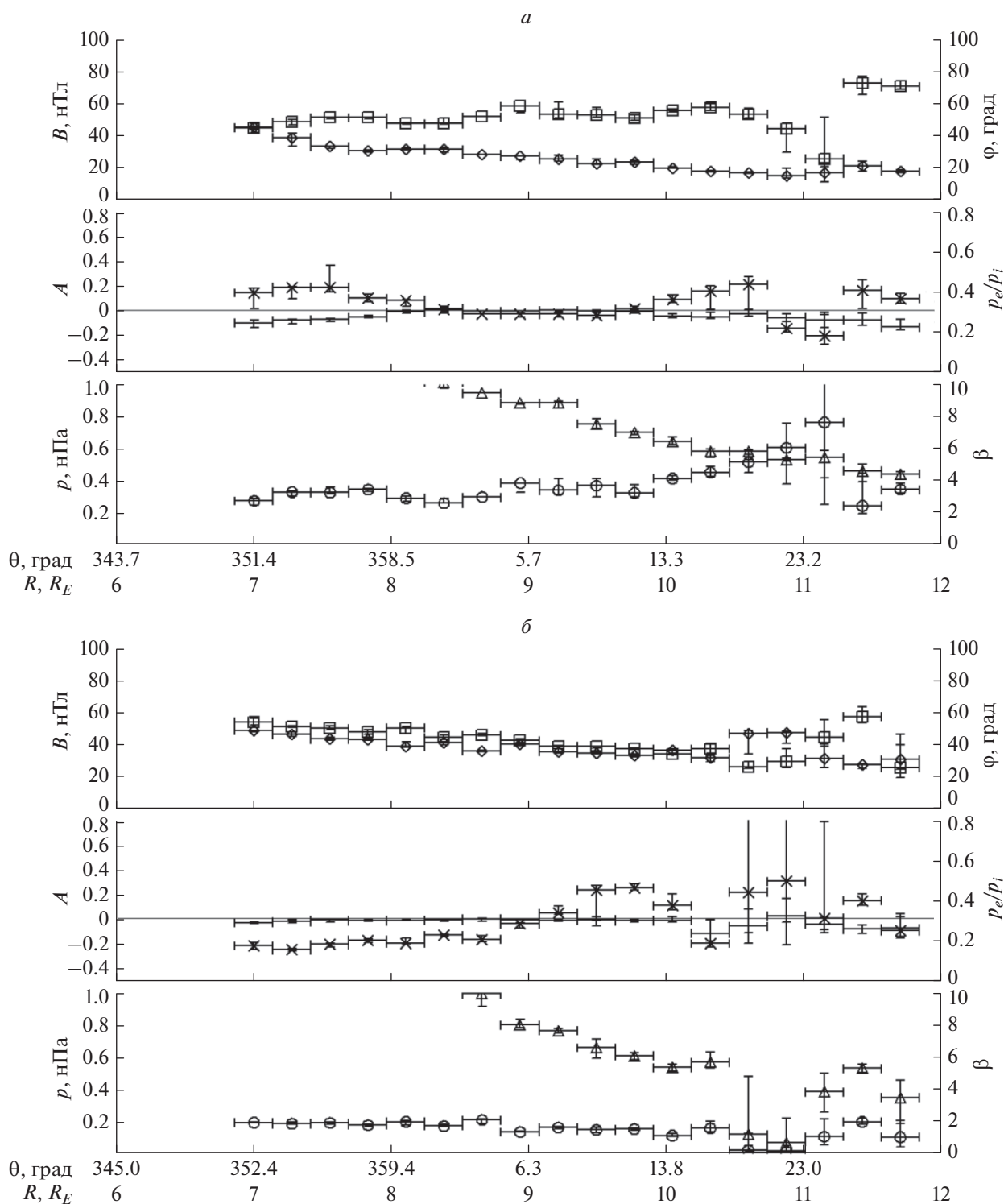


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для временного интервала III.

тает электронное давление до половины ионного давления.

Приблизительно в среднем через полчаса эту же область пересекает спутник THEMIS-A. На рисунке 2б приведены те же параметры, что и для

спутника THEMIS-D. Отличия угла  $\phi$  от  $90^\circ$  связаны со сдвигом орбиты THEMIS-A от орбиты THEMIS-D по оси  $Z$ , который составляет до  $2 R_E$ . Можно отметить, что анизотропия давления была зафиксирована на уровне 0.03. Плато наблюда-

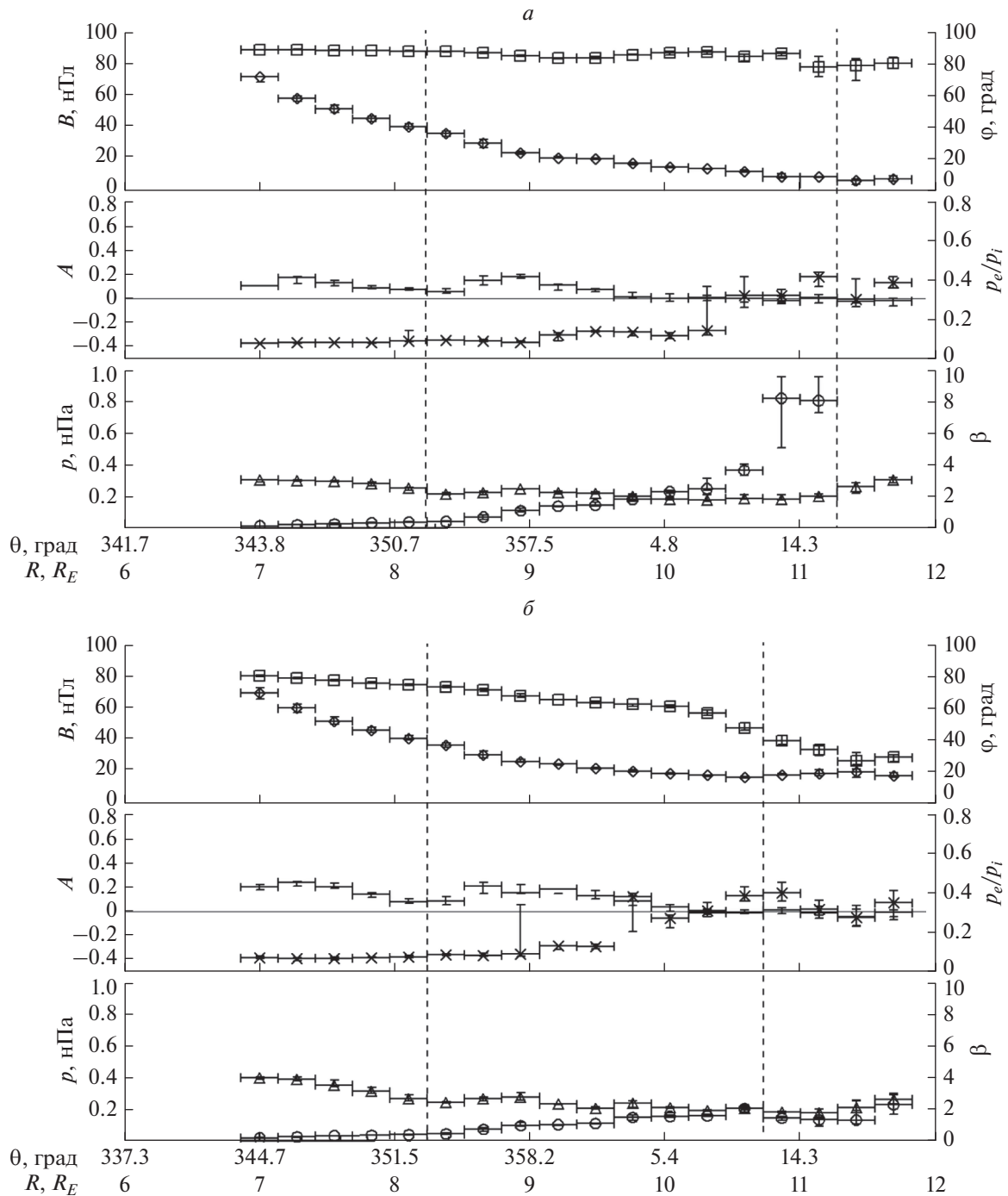


Рис. 5. То же, что и на рис. 2, но для временного интервала IV.

лось в пределах границ от  $8.25 R_E$  до  $10.7 R_E$  (что соответствует временам от 02:56 до 06:14). Величина давления  $\sim 0.23$  нПа. Таким образом подтверждается устойчивость данного образования на временном масштабе в пределах нескольких десятков минут.

Через сутки (интервал II) приблизительно на тех же геоцентрических расстояниях и по показа-

ниям двух спутников (рис. 3а, 3б) регистрируется близкий к показанному на рис. 2а, 2б профиль давления с четко выделяемым плато в давлении величиной  $\sim 0.25$  нПа (01:41–05:33 03 февраля 2009 г.) для спутника D и  $\sim 0.26$  нПа (02:37–05:44) для спутника A. Сохраняются также особенности изменения магнитного поля, угла  $\phi$  и плазменного параметра. Этот интервал времени также ха-

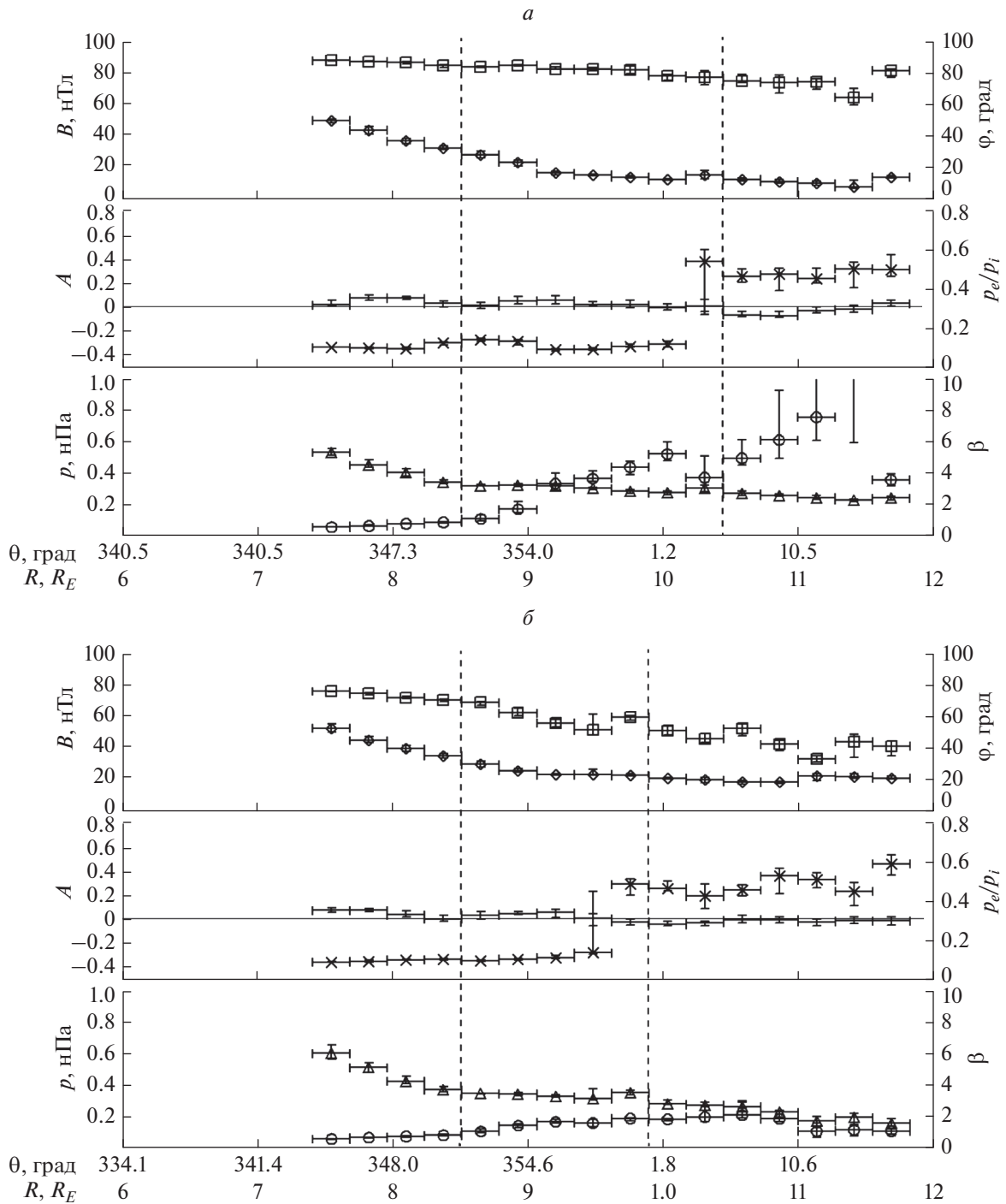


Рис. 6. То же, что и на рис. 2, но для временного интервала V.

рактируется очень спокойной геомагнитной обстановкой:  $AL \sim -2$  нТл,  $p_{\text{dyn}}$  возрастало от  $\sim 0.9$  до 1.8 нПа.

При последующих пролетах спутников в этой области в возмущенные периоды буровой активности 4 февраля 2009 г. наблюдаются нерегулярные структуры в профилях давления, магнитного

поля, связанных как с самими возмущениями, так и с вылетами спутника в доли хвоста. Более-менее регулярная картина наблюдалась во время выделенного интервала III (рис. 4а, 4б), который соответствовал началу магнитной бури с минимальным  $Dst^* = -90$  нТл. Суббуревое возмущение перед началом рассматриваемого периода приве-



**Таблица 1.** Оценка скорости роста плазменного давления для выделенных интервалов

Дата	THEMIS-D			THEMIS-A		
	перед плато	на участке плато (расстояние, на котором наблюдается плато)	после плато	перед плато	на участке плато (расстояние, на котором наблюдается плато)	после плато
02.02.2009	0.53	-0.06 (8.25–11. $R_E$ )	0.43	0.59	0.15 (8.25–10.7 $R_E$ )	0.41
03.02.2009	0.48	0.12 (7.95–10.75 $R_E$ )	0.20	0.73	0.06 (7.95–10.45 $R_E$ )	0.97
13.02.2009	0.32	0.24 (8.25–11.25 $R_E$ )	-0.51	0.50	0.27 (8.25–10.7 $R_E$ )	-0.41
17.02.2009	0.50	0.17 (8.5–10.45 $R_E$ )	0.22	0.48	0.10 (8.5–9.9 $R_E$ )	0.68

ло к понижению  $Dst^* \sim -40$  нТл, что в соответствии с выводами работы [Воробьев и др., 2018] характерно для сравнительно больших магнитосферных суббурь. Повышение динамического давления солнечного ветра привело к сжатию магнитосферы при преимущественно северном ММП, за которым изменение знака ММП привело к развитию кольцевого тока. Во время периода III плато в распределении давления не наблюдалось. Абсолютная величина давления монотонно росла при приближении к Земле и на расстояниях  $\sim 10 R_E$  составляла  $\sim 0.65$  нПа, т.е. наблюдался типичный для магнитных бурь рост давления с уменьшением геоцентрического расстояния [Кирпичев и др., 2018]. Значение  $\beta$  превышало  $\sim 3$  на THEMIS-D и  $\sim 1$  на THEMIS-A и продолжало увеличиваться. Угол  $\phi$  при этом уменьшается до  $\sim 55^\circ$ , что могло соответствовать вытягиванию в хвостовом направлении магнитных силовых линий. Профиль магнитного поля становился более пологим. Все это свидетельствовало о перестройке геометрии магнитного поля во время бури.

Рисунок 5а, 5б (13 февраля 2009 г.) показывает особенности распределения исследуемых параметров приблизительно через 9 сут (интервал IV) после бури 4 февраля. Из рисунка 5а следует, что произошло восстановление области плато в распределении давления с величиной  $\sim 0.22$  нПа на геоцентрических расстояниях от 8.25 до 11.25  $R_E$  (01:22–06:18 UT) по спутнику THEMIS-D и  $\sim 0.24$  нПа от 8.25 до 10.7  $R_E$  (02:28–05:46 UT) THEMIS-A. Плазменный параметр  $\beta$  превышает 1 и растет с ростом геоцентрического расстояния, угол  $\phi$  близок к  $90^\circ$  (по данным THEMIS-D), что указывает на локализацию спутника вблизи экваториальной плоскости.  $AL \sim -4$  нТл,  $p_{dyn}$  возросло от  $\sim 0.7$  до 1.5 нПа.

Развитие бури 14 февраля с  $Dst^* = -65$  нТл вновь привело к разрушению плато давления. На рис. 6а, 6б (17 февраля 2009 г.) можно видеть тенденцию к восстановлению плато как по спутнику D (со значением  $\sim 0.31$  нПа в пределах расстояний от 8.5 до 10.45  $R_E$  и временного интервала

01:23–04:05 UT), так и по A (давление  $\sim 0.34$  нПа 8.5 до 9.9  $R_E$  02:34–04:16 UT). Наблюдается медленный рост плазменного давления с уменьшением геоцентрического расстояния и возрастание плазменного параметра с увеличением расстояния от Земли.  $AL$  изменяется от  $\sim -5$  до  $-50$  нТл,  $p_{dyn} \sim 0.8$  нПа. Можно отметить, что с уменьшением интенсивности бури потребовался меньший временной интервал для восстановления тенденции к образованию плато давления.

Выделение области плато проводилось методом вычисления скоростей изменения давления при увеличении геоцентрического расстояния. На рисунках 2, 3, 5 и 6 слева и справа от плато визуально хорошо фиксируется смена трендов. Для выделения тренда на рассматриваемом участке с плато проводилась аппроксимация радиального хода давления линейной функцией. По этой аппроксимации вычислялось приращение давления в крайних точках (значения для расстояний см. в табл. 1). Отношение приращения к среднему значению давления дает величину скорости роста. Скорость роста перед и после плато оценивалась на расстояниях порядка 1  $R_E$ .

Необходимо отметить, что измеренные низкие значения давления плазмы характерны для спокойных геомагнитных условий при наблюдаемых значениях динамического давления солнечного ветра. При этом точность вычисления давления позволяет в каждом исследованном случае выделять области плато. Сложности при оценке скорости роста давления связаны с локальными возмущениями в магнитосфере, наблюдаемыми в виде локальных возростаний и падений величины от среднего значения.

Низкие значения динамического давления солнечного ветра в рассматриваемые интервалы времени могут объяснить только относительно низкое абсолютное значение плазменного давления в области перехода от дипольных к вытянутым в хвост магнитным силовым линиям. Смену характера трендов таким образом объяснить нельзя. Тем более, для одних интервалов динамическое

давление падает, а для других нарастает. Но в обоих случаях можно выделить плато.

Интересной особенностью является то, что во всех рассмотренных событиях в области плато давления наблюдалось возрастание вклада давления электронов в полное давление. На участках плато ближе к  $10 R_E$  вклад электронов становится сравним с ионным (до  $\sim 50\%$ ). Данная особенность может быть связана с процессами формирования плато давления. Ее было бы интересно проанализировать в будущих работах.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенный анализ одновременных наблюдений на спутниках THEMIS-D и -A в магнитоспокойных условиях в феврале 2009 г. подтвердил ранее полученные результаты, демонстрировавшие возможность формирования плато в профиле давления [Кирпичев, 2002; Писаренко и др., 2002], и позволяет прийти к следующим выводам.

- В ночном секторе магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от  $\sim 8$  до  $\sim 11 R_E$  может стабильно наблюдаться плато в распределении давления в магнитоспокойное время.

- Плато давления последовательно прослеживается на двух спутниках с близкими параметрами орбит.

- Плато разрушается с началом геомагнитного возмущения, и возникает традиционно наблюдаемый рост давления с уменьшением геоцентрического расстояния.

- Плато восстанавливается после окончания возмущения, при этом характерное время восстановления зависит от уровня возмущения (величины  $Dst^*$  в настоящем анализе).

Представленные результаты можно рассматривать в качестве составной части исследований, направленных на выделение особенностей в распределении давления магнитосферной плазмы в магнитоспокойных условиях. Области с плато давления плазмы могут сравнительно стабильно возникать в ночной магнитосфере в области перехода от окружающего Землю плазменного кольца к плазменному слою. Во время магнитной бури был зарегистрирован традиционно наблюдаемый рост давления с уменьшением геоцентрического расстояния. Несмотря на ограниченный временной интервал, результаты анализа интересны для определения структуры распределения давления магнитосферной плазмы и формирующихся в условиях магнитостатического равновесия систем поперечных и продольных токов.

Уже первые наблюдения крупномасштабных продольных токов показывали существование трапециевидных профилей возмущения магнитного поля (верхняя панель на рис. 1а в работе [Iijima and Potemra, 1976]), что означало возмож-

ность возникновения зазора между втекающими и вытекающими продольными токами. Усредненные крупномасштабные картины продольных токов [Iijima and Potemra, 1978] содержали вытянутые по широте области зазора между листами продольного тока. Распределение продольных токов в статистической модели Iridium [Anderson et al., 2008] также содержит области зазоров между токовыми листами. В условиях магнитостатического равновесия при малой анизотропии давления  $[\mathbf{jB}] = \nabla p$ , т.е. в областях, где малы градиенты давления, малы поперечные и продольные токи. Возникновение областей с плато давления сравнительно просто объясняет возникновение зазоров между областями крупномасштабных продольных токов, так как в изученных событиях области плато регистрировались при движении спутников как преимущественно в радиальном направлении, так и в азимутальном направлении.

Естественно было бы связать формирование плато давления с повышенным уровнем турбулентности, типичном для наблюдений в хвосте магнитосферы [Antonova and Stepanova, 2021], где невелики радиальные градиенты давления. Но хорошо известно, что во время магнитных бурь нарастает уровень турбулентных флуктуаций в магнитосфере, когда авроральный овал сдвигается к экватору, и быстро движущиеся авроральные дуги можно наблюдать в низких широтах, что трудно связать с увеличением уровня турбулентного транспорта из хвоста. Однако во время магнитных бурь наблюдается сдвиг аврорального овала в низкие широты и бездисперсионные суббуревые инъекции на малых геоцентрических расстояниях (см., например, Runov et al. [2021]). Развитие суббурь во время бури приводит к возрастанию давления плазмы и перестройке магнитного поля, что может объяснить рост радиального градиента давления на проанализированных геоцентрических расстояниях. Описанный сценарий не совпадает с традиционным подходом, в соответствии с которым во время бури плазма поступает из хвоста на малые геоцентрические расстояния, но хорошо стыкуется с результатами регистрации резкого повышения количества ионов ионосферного происхождения (в основном  $O^+$ ) в буревом кольцевом токе. Радиальная диффузия во время фазы восстановления магнитной бури в области, где  $\beta > 1$ , могла бы приводить к выравниванию давления. Однако, необходимы дальнейшие исследования, которые смогли бы прояснить как процессы во время бури, так и в магнитоспокойное время.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят NASA contract NAS5-02099 и V. Angelopoulos за использование данных миссии THEMIS. Особенно: D. Larson и R.P. Lin за использо-

вание SST-данных, С.W. Carlson и J.P. McFadden – за использование ESA-данных, К.Н. Glassmeier, U. Austerand, 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. Авторы также благодарят R. Lepping за возможность использовать данные спутника WIND и WDC for Geomagnetism, Kyoto – за предоставление геомагнитных индексов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е., Воробьев В.Г., Кирпичев И.П., Ягодкина О.И. Сравнение распределения давления плазмы в экваториальной плоскости и на малых высотах в магнитоспокойных условиях // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 3. С. 300–303. 2014.  
<https://doi.org/10.7868/S001679401403002X>
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. Влияние скорости и плотности солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 3. С. 311–323. 2018.  
<https://doi.org/10.7868/S001679401803001X>
- 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.
- Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 304 с. 1988.
- 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. 2002.
- Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до 10  $R_E$  по данным международного проекта THEMIS // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 4. С. 456–461. 2011.
- Кирпичев И.П., Ягодкина О.И., Воробьев В.Г., Антонова Е.Е. Положение проекций экваториальной и полярной кромок ночного аврорального овала в экваториальной плоскости магнитосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 4. С. 437–444. 2016.  
<https://doi.org/10.7868/S0016794016040064>
- Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Профили давления плазмы в ночном секторе магнитосферы во время магнитной бури 29 мая 2010 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 6. С. 740–748. 2018.  
<https://doi.org/10.1134/S001679401806007X>
- Овчинников И.Л., Антонова Е.Е. Турбулентный транспорт магнитосферы Земли: Обзор результатов наблюдений и моделирования // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 6. С. 706–714. 2017.  
<https://doi.org/10.7868/S0016794017060086>
- Писаренко Н.Ф., Кирпичев И.П., Луценко В.Н., Будник Е.Ю., Морозова Е.И., Антонова Е.Е. Структура спектров ионов во внешних областях кольцевого тока: Событие 13 ноября 1995 г. // Космич. исслед. Т. 40. С. 17–27. 2002.
- Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Stauning P. Statistical Birkeland current distributions from magnetic field observations by the Iridium constellation // Ann. Geophysicae. V. 26. P. 671–687. 2008.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-26-671-2008>
- Angelopoulos V. The THEMIS mission // Space Sci. Rev. V. 141. № 1–4. P. 5–34. 2008.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-008-9336-1>
- Antonova E.E., Tverskoy B.A. On the nature of electric fields in the Earth's inner magnetosphere (a review) // Geomagnetism and Aeronomy International. V. 1. № 1. P. 9–21. 1998.
- Antonova E.E. Large scale magnetospheric turbulence and the topology of magnetospheric currents // Adv. Space Res. V. 25. № 7–8. P. 1567–1570. 2000.  
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00669-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00669-9)
- Antonova E.E. Investigations of the hot plasma pressure gradients and the configuration of magnetospheric currents from Interball // Adv. Space Res. T. 31. № 5. P. 1157–1166. 2003.  
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00077-2)
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Vovchenko V.V., Stepanova M.V., Riazantseva M.O., Pulinet M.S., Ovchinnikov I.L., Znatkova S.S. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances  $\sim 7$ – $10 R_E$ , and magnetospheric current systems // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 99. № 7. P. 85–91. 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.08.013>
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V. Plasma pressure distribution in the surrounding the Earth plasma ring and its role in the magnetospheric dynamics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 115. P. 32–40. 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.005>
- Antonova E.E., Vorobjev V.G., Kirpichev I.P., Yagodkina O.I., Stepanova M.V. Problems with mapping the auroral oval and magnetospheric substorms // Earth Planets Space. 67. 166. 2015.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0336-6>
- Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P. et al. Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 177. P. 103–114. 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.013>
- Antonova E.E., Stepanova M.V. The impact of turbulence on physics of the geomagnetic tail // Front. Astron. Space Sci. V. 8. Id:622570. 2021.  
<https://doi.org/10.3389/fspas.2021.622570>
- Auster H.U., Glassmeier K.H., Magnes W. et al. The Themis fluxgate magnetometer // Space Sci. Rev. V. 141. № 1–4. P. 235–264. 2008.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-008-9365-9>
- Baumjohann W., Paschmann G., Lühr H. Pressure balance between lobe and plasma sheet // Geophys. Res. Lett. V. 17. № 1. P. 45–48. 1990.  
<https://doi.org/10.1029/GL017i001p00045>
- Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // J. Geophys. Res. V. 80. № 31. P. 4204–4214. 1975.  
<https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204>

- *Iijima T., Potemra T.A.* The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad // *J. Geophys. Res.* V. 81. P. 2165–2174. 1976. <https://doi.org/10.1029/JA081i013p02165>
- *Iijima T., Potemra T.A.* Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms // *J. Geophys. Res.* V. 83. P. 599–615. 1978. <https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00599>
- *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 // *Planet. Space Sci.* V. 53. № 1–3. P. 209–215. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.046>
- *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. № 1–4. P. 277–302. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9440-2>
- *Parker E. N.* The alternative paradigm for magnetospheric physics // *J. Geophys. Res.* V. 101. № A5. P. 10587–10625. 1996. <https://doi.org/10.1029/95JA02866>
- *Petrakovich A.A., Mukai T., Kokubun S. et al.* Substorm-associated pressure variations in the magnetotail plasma sheet and lobe // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A3. P. 4501–4513. 1999. <https://doi.org/10.1029/98JA02418>
- *Petrakovich A.A., Artemyev A.V., Nakamura R., Panov E.V., Baumjohann W.* Cluster observations of dBz/dx during growth phase magnetotail stretching intervals // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 118. P. 5720–5730. 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50550>
- *Pisarenko N.F., Budnik E.Yu., Yermolaev 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. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00018-8)
- *Raeder J., Germaschewski K., Cramer W.D., Lyon J.* Global Simulations // *Magnetosphere in the solar system, Space Physics and Aeronomy Collection, Geophysical Monograph 259, AGU.* V. 2. P. 595–606. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch37>
- *Runov A., Angelopoulos V., Henderson M.G., Gabrielse C., Artemyev A.* Magnetotail dipolarizations and ion flux variations during the main phase of magnetic storms // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 126. CiteID e2020JA028470. 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JA028470>
- *Sibeck D.G., Angelopoulos V.* THEMIS Science Objectives and Mission Phases // *Space Sci.-Rev.* V. 141. № 1–4. P. 35–59. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9393-5>
- *Saito M.H., Hau L.-N., Hung C.-C., Lai Y.-T., Chou Y.-C.* Spatial profile of magnetic field in the near-Earth plasma sheet prior to dipolarization by THEMIS: Feature of minimum B // *Geophys. Res. Lett.* V. 37. CiteID L08106. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010GL042813>
- *Sergeev V.A., Gordeev E.I., Merkin V.G., Sitnov M.I.* Does a local B-minimum appear in the tail current sheet during a substorm growth phase? // *Geophys. Res. Lett.* V. 45. № 6. P. 2566–2573. 2018. <https://doi.org/10.1002/2018GL077183>
- *Tsyganenko N.A., Mukai T.* Tail plasma sheet models derived from Geotail data // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A3. CiteID 1136. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009707>
- *Vovchenko V.V., Antonova E.E., Stepanova M.* Magnetic holes observed in the ring current region near the equatorial plane // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 177. P. 141–147. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.024>
- *Wang C.-P., Gkioulidou M., Lyons L.R., Wolf R.A., Angelopoulos V., Nagai T., Weygand J.M., Lui A.T.Y.* Spatial distributions of ions and electrons from the plasma sheet to the inner magnetosphere: comparisons between THEMIS-Geotail statistical results and the Rice convection model // *J. Geophys. Res.* V.116. CiteID A11216. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011JA016809>
- *Wang C.-P., Yue C., Zaharia S., Xing X., Lyons L., Angelopoulos V., Nagai T., Lui T.* Empirical modeling of plasma sheet pressure and three-dimensional force-balanced magnetospheric magnetic field structure: 1. Observation // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 118. P. 6154–6165. 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50585>