

УДК 523.62-726

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АНОМАЛИИ ГОРЯЧЕГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ У ФРОНТА ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

© 2012 г. А. Ю. Шестаков, О. Л. Вайсберг

Учреждение РАН Институт космических исследований, г. Москва

e-mail: sartiom1@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.06.2010 г.

После доработки 18.05.2011 г.

Работа посвящена исследованию аномалии горячего потока (АГП), образовавшейся на фронте околоземной ударной волны. Из данных со спутника ИНТЕРБОЛ определена ориентация токового слоя, образовавшего аномалию. По динамическому спектру ионов в области аномалии выделено несколько характерных областей. С использованием 3-х мерной модели ударной волны получены данные о направлении электрического поля в области аномалии. В соответствии с представлениями о причинах возникновения этого явления, поля направлены к токовому слою по обе его стороны. Так же была составлена картина движения аномалии по ударной волне и вычислена скорость этого движения. Из данных о скоростях частиц в теле АГП показано, что образование расширяется. Этот вывод подтвердился при оценке давлений, создаваемых частицами плазмы и магнитным полем. При изучении динамического спектра частиц в аномалии замечено, что аномалия неоднородна и состоит из двух основных частей. Исследованы функции распределения ионов в различных областях аномалии. Сопоставление функций распределения с магнитным полем и динамическими спектрами дало более четкую картину явления и позволило выделить область — источник тепловой и конвективной энергии.

1. ВВЕДЕНИЕ

В середине 80-х годов XX века были открыты области сильно разогретой плазмы вблизи околоземной ударной волны, в которых направление движения частиц сильно отклонено от направления солнечного ветра и от направления потока плазмы перед и за фронтом ударной волны (в магнитослое) [Burgess, 1989; Schwarz et al., 2000]. В этой области магнитное поле часто имеет меньшую величину по сравнению с магнитным полем солнечного ветра. Эти аномалии горячего потока стали связывать с прохождением межпланетных токовых слоев, внутри которых распространялись ионы, отраженные от ударной волны.

Эта теория вкупе с наблюдениями, а так же изменчивой природой АГП вскоре привели к некоторой потере интереса к данному явлению. Однако после того, как в 1999 году была зарегистрирована АГП с быстрым (длительностью около 7 мин) смещением магнитопаузы на расстояние порядка 5 радиусов Земли, которое оказало заметное влияние на ионосферу планеты [Sibeck et al. 1998; Sibeck, 1999], интерес к аномалиям вновь возрос.

Формирование аномалии горячего потока (АГП) зависит от параметров окружающей среды, а так же от ориентации магнитного поля и токового слоя в солнечном ветре. Ранее была исследована [Burgess, 1989] связь АГП с межпланетными

токовыми слоями посредством наблюдения за частицами солнечного ветра, отраженными зеркально ударной волной. Когда межпланетная среда обладает такими параметрами, что вектор напряженности электрического поля $E = -\frac{1}{c}[V \times B]$ направлен к токовому слою, эти частицы выбрасываются обратно вдоль слоя против направления потока солнечного ветра. Burgess также отметил, что ключевую роль в образовании АГП играет электрическое поле, возникающее в результате движения частиц в магнитном поле, что подтвердилось при моделировании. Условившись и предположив, что $n_{cs} \cdot V_{sw} < 0$ (cs — current sheet, sw — solar wind), угол между электрическим полем и n_{cs} должен быть меньше 90° в области перед прохождением АГП и больше 90° в области после прохождения. Позже, в 1991 году, моделирование подтвердило необходимость данного условия и показало, что образование находится на ударной волне, а так же воспроизвело все описанные процессы. Также эти модели подтвердили ранние предположения о том, что АГП образуются в области тангенциального, а не вращательного разрыва [Thomas et al., 1991].

Таким образом, было установлено, что необходимыми условиями для возникновения АГП являются:

- Межпланетный токовый слой с электрическим полем, направленным к плоскости слоя, по крайней мере с одной стороны (в лабораторной системе координат).

- Нормаль токового слоя образует большой угол ($>60^\circ$) с направлением движения солнечного ветра.

- Наличие тангенциального разрыва.

- Разрыв со сравнительно небольшим скачком величины магнитного поля.

- Квазиперпендикулярная форма ударной волны хотя бы с одной стороны.

Данная работа посвящена изучению основных характеристик аномалии горячего потока (АГП), образовавшейся на фронте ударной волны земной магнитосферы при взаимодействии межпланетного токового слоя с ударной волной. Явление было зафиксировано хвостовым зондом проекта Интербол 14.03.1996. Это событие частично было рассмотрено в работе [Vaisberg et al., 1999].

Целью данной работы является исследование условий образования аномалии, ее структуры, характеристик различных областей в ней.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения были проведены на хвостовом зонде проекта Интербол 13 апреля 1996 г. Используются измерения трехмерного ионного спектрометра СКА-1 [Vaisberg et al., 1995], спектрометра электронов ЭЛЕКТРОН [Sauvaud et al., 1995] и магнитометра МИФ-М [Klimov et al., 1995]. СКА-1 проводил измерения интенсивности потока ионов в 960 точках пространства скоростей в шкале энергий E/q от 50 эВ/с до 5 кэВ/с за время ~ 10 с. Феррозондовый магнитометр МИФ-М измерял три компонента магнитного поля с частотой 1 Гц.

Для визуализации данных измерений плазмы и магнитного поля используется пакет прикладных программ lkstdv и lk3ds, разработанных Л.А. Авановым на основе языка IDL. Рисунок 1 представляет собой участок сеанса работы спутника, зафиксировавший АГП. На нем изображены (сверху вниз) две диаграммы энергия-время (динамические спектры) ионов, полученные датчиком, регистрирующим ионы с солнечного направления (солнечным датчиком) и датчиком, регистрирующим ионы с антисолнечного направления (антисолнечным датчиком).

Этот интервал времени можно условно разбить на 7 частей:

- Первая: от начала, до приблизительно 12:56:00 UT – поток солнечного ветра.

- Вторая часть: область, захватывающая весь скачок величины магнитного поля, значитель-

ный прирост Y и Z -компонент скорости частиц и температуры частиц, 12:56:00–12:56:27 UT.

- Третий интервал, ведущая часть аномалии горячего потока: область, зарегистрированная с 12:56:27 приблизительно до 12:57:13 UT.

- Четвертая часть: 12:57:13–12:57:18 UT, промежуточная область между ведущей и замыкающей частями аномалии потока.

- Пятый интервал: 12:57:18–12:59:08 UT, замыкающая часть аномалии потока.

- Шестая часть: 12:59:08–12:59:34 UT – обтекающий поток за фронтом ударной волны.

- Седьмая часть – область солнечного ветра.

Указанные участки обсуждаются более подробно в следующих разделах.

Слабо флуктуирующие значения параметров потока плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в интервале до 12:55:56 UT соответствуют нахождению спутника в области солнечного ветра перед квазиперпендикулярной ударной волной. Сильно флуктуирующие значения параметров потока плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в интервале после 12:59:34 UT соответствуют нахождению спутника в области потока перед квазипараллельной ударной волной. Переход от близких к стационарным значений параметров плазмы и магнитного поля перед АГП к сильно флуктуирующим значениям этих величин наводит на мысль, что рассматриваемом интервале через местоположение спутника прошел межпланетный токовый слой. Таким образом, событие, зарегистрированное в интервале 12:55:59–12:59:34 UT, вполне вероятно является АГП.

Необходимо отметить, что значения концентрации и температуры в солнечном ветре, рассчитанные по данным СКА-1, не являются надежными. Это связано с тем, что сильный поток ионов в узком телесном угле приводит к перегрузке детектора частиц в приборе, предназначенном для измерения в магнитосфере и в переходной области. В то же время, расчетным значениям скорости в солнечном ветре можно доверять.

3. МЕЖПЛАНЕТНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ

Как было описано ранее, одной из ключевых причин формирования АГП, является межпланетный токовый слой. Определим численные компоненты вектора напряженности межпланетного магнитного поля по данным Интербола в интервале, предшествующем прохождению предполагаемого токового слоя, и последующем, выбрав интервалы таким образом, чтобы в них не было резких скачков. После усреднения значений, выбранных в интервалах 12:50:00–12:55:00 UT до пересечения АГП и 13:01:00–13:06:00 UT после ее пересечения, получим:

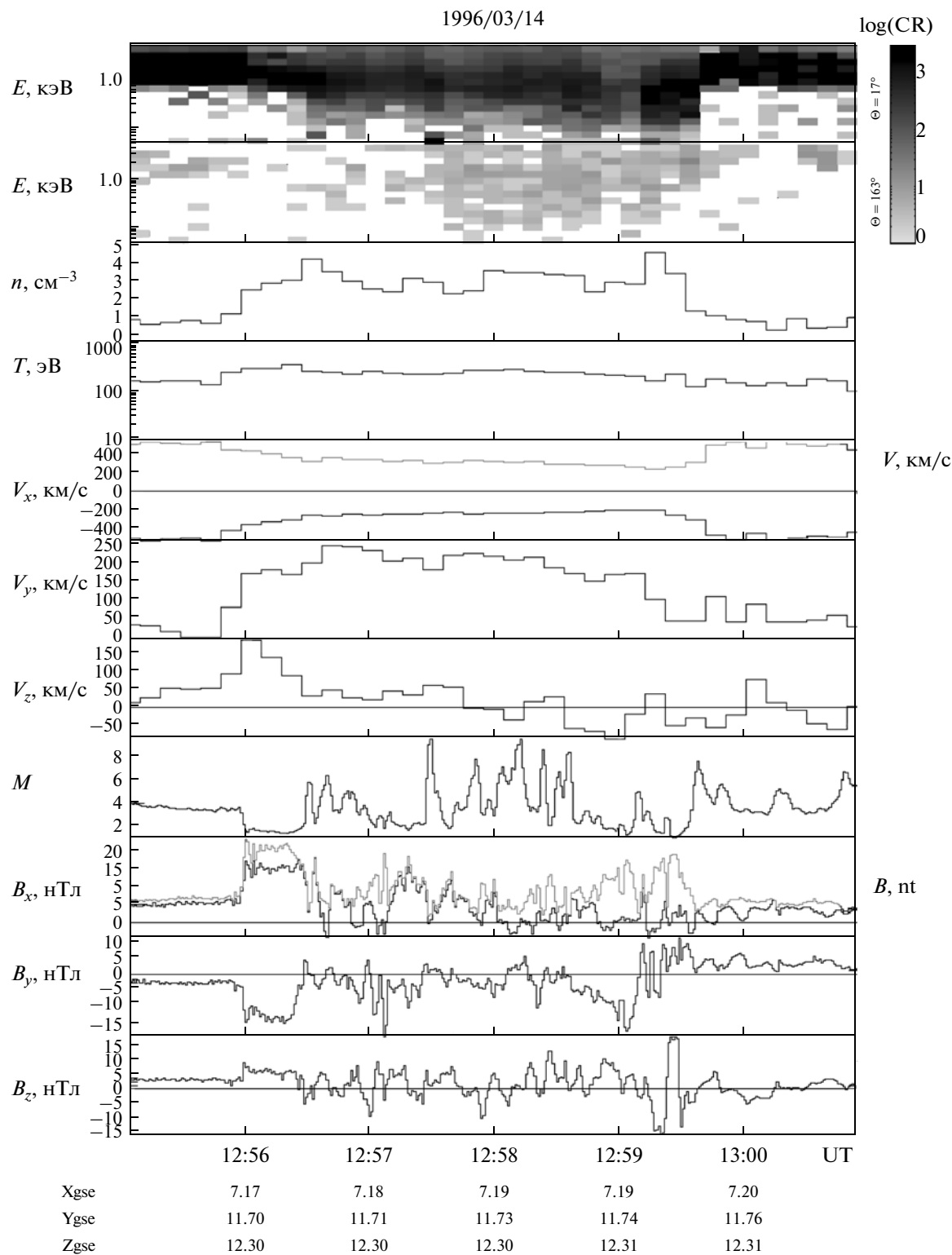


Рис. 1. Данные прибора СКА-1 и магнитного поля со спутника Интербол, полученные 14.03.96. На шкале B_x совмещены графики x -компоненты магнитного поля (черным) и его абсолютного значения (серым). Внизу приведены координаты в системе GSE , геомагнитное время и геомагнитная широта спутника.

– до прохождения АГП единичный вектор направления магнитного поля

$$n_B = (0.782; -0.417; 0.462),$$

– после прохождения АГП

$$n_B = (0.915; 0.401; 0.044).$$

По векторному произведению $[\mathbf{B} \times \mathbf{B}']$ получим нормаль к токовому слою в предположении, что токовый слой является тангенциальным разрывом

$$n_{\text{int}} = (-0.22; 0.50; 0.83).$$

Для возможного отождествления межпланетного токового слоя обратимся к данным космического аппарата (КА) Wind, находящегося в точке либрации на расстоянии порядка 1.5 млн. км перед Землей. Он, возможно, зарегистрировал данный токовый слой. Для этого нам необходимо оценить время, необходимое солнечному ветру с замороженным в поток токовым слоем для преодоления расстояния между КА Wind и спутником Интербол. Сделав временную поправку, можно вычислить примерное время прохождения интересующего нас токового слоя от КА Wind.

Координаты КА Wind в системе GSE для этого временного интервала составляют $X = 7.53 \times 10^5$ км, $Y = 2.66 \times 10^5$ км и $Z = 9320$ км. Учитывая положение спутника Интербол в момент регистрации аномалии, можно оценить расстояние между спутниками вдоль оси X . Оно составляет порядка 700000 км. Скорость солнечного ветра в данном интервале составляет 515–520 км/с. Таким образом, время пролета токового слоя от одного спутника до другого составляет примерно 23 минуты. Приведем данные КА Wind, характеризующие магнитное поле солнечного ветра в этом временном интервале. Для наглядности сопоставим с данными спутника Интербол (рис. 2).

При рассмотрении профилей магнитных полей можно отметить некоторое соответствие характерных скачков полей в обоих случаях. Так, компоненты B_x и B_y положительны на двух КА, а B_z меняет знак с отрицательного на положительный.

Определим нормаль к токовому слою уже из данных КА Wind. По интервалам времени 12:20:00–12:23:00 UT и 12:30:00–12:35:00 UT определим средние значения магнитного поля и из них единичные вектора их направления: до регистрации токового слоя

$$n = (0.777; -0.562; 0.281)$$

и после него $n' = (0.978; 0.058; 0.199)$.

В предположении тангенциального разрыва получим направление нормали по векторному произведению единичных векторов: $n_{\text{wind}} = (-0.21; 0.10; 0.96)$. Направление этого вектора не сильно

отличается от направления вектора, рассчитанного по данным спутника Интербол:

$$n_{\text{int}} = (-0.22; 0.50; 0.83).$$

Таким образом, аномалию, обнаруженную спутником Интербол, потенциально мог бы сформировать токовый слой аналогичной конфигурации. К сожалению, токовый слой, обнаруженный спутником Wind не может быть с уверенностью определен, как слой, послуживший причиной формирования АГП, поскольку он переместится к области аномалии приблизительно за 10 минут до обнаружения аномалии спутником Интербол. Кроме того, его продолжительность (толщина) не соответствует предположению о тангенциальном разрыве.

4. ВЕКТОР НОРМАЛИ К МОДЕЛИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Воспользуемся трехмерной моделью околоземной ударной волны [Formisano, 1979]. Согласно этой модели, ударная волна представима в виде поверхности, описываемой уравнением вида

$$z^2 + k_1 y^2 + k_2 xy + k_3 x^2 + k_4 y + k_5 x + k_6 = 0,$$

где коэффициенты, соответственно, равны:

$$k_1 = 1, \quad k_2 = 0.12, \quad k_3 = 0.06, \quad k_4 = -4.92, \\ k_5 = 43.9, \quad k_6 = -634.$$

Используя эту модель, из геометрических соображений получим вектор нормали к ударной волне в области аномалии:

$$n_{\text{bs}} = (0.83; 0.35; 0.44).$$

Теперь, когда есть возможность анализировать трехмерную систему, имеет смысл записать уравнение плоскости токового слоя. Средние значения магнитного поля до и после ударной волны:

$$\text{– до: } \mathbf{B} = (4.50; -2.39; 2.66), \\ \text{– после: } \mathbf{B}' = (3.46; 1.86; 0.61).$$

Перемножив их векторно (в предположении о том, что имеет место тангенциальный разрыв), получим направление нормали к токовому слою.

$$n_{\text{cs}} = \frac{[\mathbf{B} \times \mathbf{B}']}{|\mathbf{B} \times \mathbf{B}'|} = (-0.34; 0.34; 0.88).$$

Таким образом, уравнение плоскости токового слоя, проходящей через область местонахождения спутника (7.19; 11.74; 12.3) GSE, выглядит следующим образом:

$$-0.337x + 0.34y + 0.877z - 12.355 = 0.$$

5. ГЕОМЕТРИЯ ЛИНИИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ТОКОВОГО СЛОЯ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Для начала оценим скорость движения линии сечения ударной волны токовым слоем вдоль

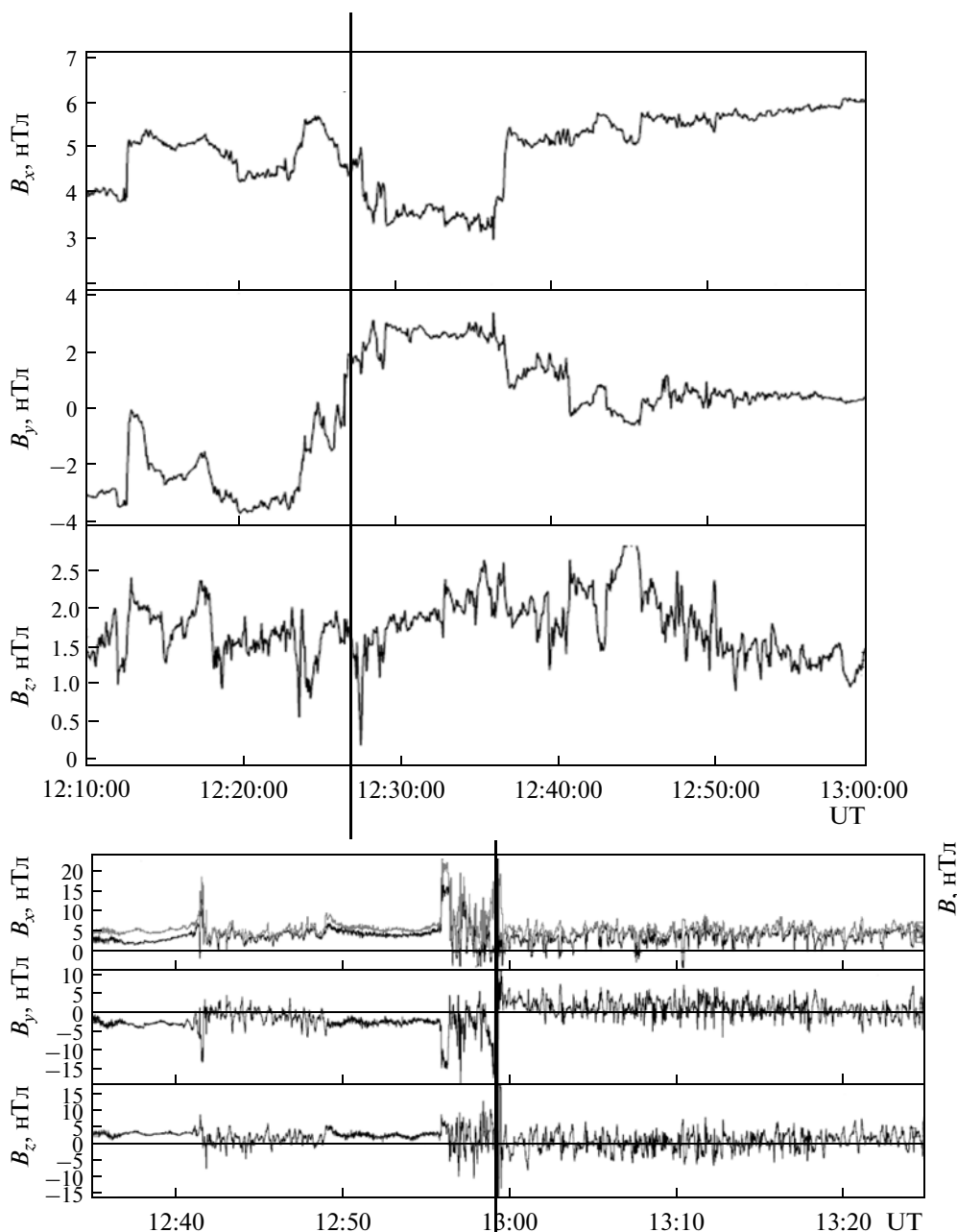


Рис. 2. Сопоставленные графики изменений межпланетного магнитного поля по данным КА Wind (вверху) и Интербол (внизу). На шкале B_x совмещены графики x -компоненты магнитного поля (черным) и его абсолютного значения (серым). Данные сопоставлены по расчетному времени распространения между двумя КА.

ударной волны (в месте нахождения спутника). Геометрия этого процесса схематично показана на рис. 3. Воспользуемся формулой, выведенной ранее, [Schwartz et al., 2000].

$$V_{tr} = \frac{V_{n_{cs}}}{\sin^2 \Theta_{cs:bs}} (n_{cs} - \cos \Theta_{cs:bs} n_{bs}). \quad (1)$$

Здесь $V_{n_{cs}}$ — проекция вектора скорости солнечного ветра V_{sw} на нормаль к токовому слою,

$\Theta_{cs:bs}$ — угол между нормалью к токовому слою n_{cs} и нормалью к ударной волне n_{bs} .

Вектор скорости солнечного ветра до ударной волны по усредненным значениям данных определяется, как $V_{sw} \sim (-490; 26; -11)$ км/с в системе координат GSE .

Векторы нормалей к токовому слою по данным обоих спутников:

$$n_{wind} = (-0.21; 0.19; 0.96),$$

$$n_{int} = (-0.22; 0.50; 0.83),$$

$$V_{n_{cs}} = V_{sw} \cdot n_{cs} \text{ [Schwartz et al., 2000].}$$

Углы, которые составляют векторы нормали и скорость солнечного ветра – соответственно для двух КА:

$$\alpha_{wind} \approx 79.3^\circ \text{ и } \alpha_{wind} \approx 77.5^\circ.$$

Вычислим угол между векторами n_{bs} и n_{cs}

$$\Theta_{cs:bs} = \arccos(n_{bs} \cdot n_{cs}) = 67.2^\circ,$$

$$\text{а также } V_{n_{cs}} \equiv V_{sw} \cdot n_{cs} \sim 110.$$

Теперь мы можем найти скорость смещения токового слоя вдоль ударной волны по формуле (1): $V_{tr} \approx (-70; 45; 86)$ км/с, $|V_{tr}| \sim 120$ км/с.

Поскольку все вектора были нормализованы, то полученный результат являет собой не что иное, как компонент скорости токового слоя вдоль касательной к ударной волне.

Оценим размер аномалии вдоль ее траектории относительно спутника Интербол. Обратим внимание, что зафиксированная длительность прохождения тела АГП составляет порядка 160 секунд, вычисленная скорость перемещения – порядка 119 км/с, таким образом, поперечный размер области можно оценить как 1.9×10^4 км (~3 радиуса Земли).

6. ОБРАТНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ИОНОВ

Еще один существенный момент в формировании АГП – явление обратной инжекции ионов солнечного ветра, зеркально отраженных ударной волной. Определяющим фактором в этом явлении является электрическое поле $E = -\frac{1}{c}[V \times B]$, возникающее в результате движения солнечного ветра. Рассмотрим нашу ситуацию. Нам известны вектора напряженности магнитного поля до и после прохождения токового слоя, таким образом, можно оценить электрические поля по обе стороны от токового слоя:

– вектор электрического поля до прохождения АГП:

$$E_1 = -\frac{1}{c}[V \times B_1] = (-1.4; -41.6; -35.1) \cdot 10^{-8} \text{ ед.}$$

СГСЭ, или $|E_1| = 54.4 \times 10^{-8}$ ед. СГСЭ, с направлением $(-0.03; -0.77; -0.65)$, то есть, с компонентом по направлению к токовому слою (отрицательное значение по оси Y , см. рис. 4).

– вектор электрического поля после прохождения АГП:

$$E_2 = -\frac{1}{c}[V \times B_2] = (-1.1; -8.5; 32.1) \cdot 10^{-8} \text{ ед.}$$

СГСЭ, или $|E_2| = 33.1 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ, с направлением $(-0.03; -0.26; 0.97)$, то есть, также направ-

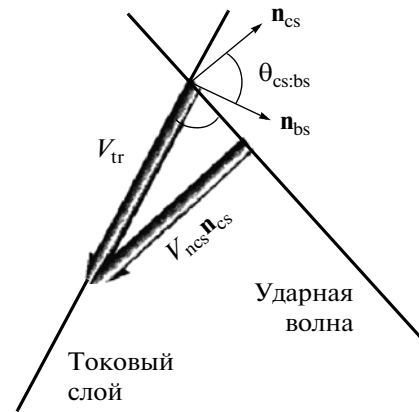


Рис. 3. Схематическое изображение фрагмента ударной волны (bow shock), токового слоя (current sheet), их нормальных векторов (n_{bs} и n_{cs} соответственно), скоростей солнечного ветра (V_{sw}) и скорости перемещения токового слоя вдоль ударной волны (V_{tr}) [Schwartz et al., 2000].

$$E_1 = -1/c[V_1 \times B_1] \text{ поле до ударной волны}$$

$$E_2 = -1/c[V_2 \times B_2] \text{ поле после ударной волны}$$

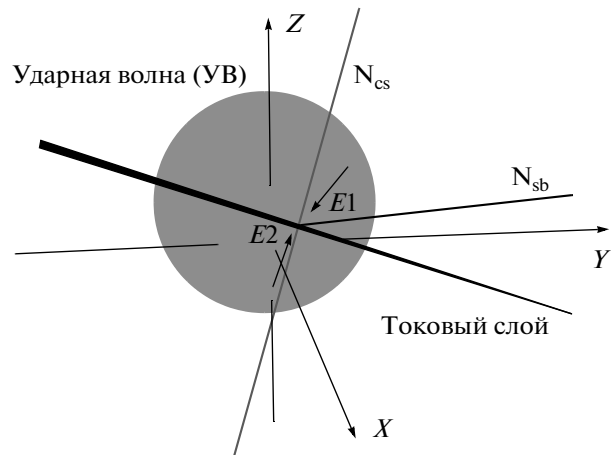


Рис. 4. Схематическое изображение взаимной ориентации околосветной ударной волны, токового слоя, нормали к ударной волне (N_{sb}), нормали к токовому слою (N_{cs}) и направлений электрического поля до и после прохождения токового слоя (стрелки E_1 и E_2). Оси: от плоскости рисунка – $X(GSE)$, вправо – $Y(GSE)$, вверх – $Z(GSE)$.

лен к токовому слою (отрицательное значение по оси Y , но существенное положительное значение по оси Z , см. рис. 4).

Таким образом, электрическое поле в системе координат, связанной с околосветной ударной волной, имеет компонент, направленный в сторону токового слоя с обеих сторон от него (рис. 4). Это означает, что ионы, отраженные от ударной волны, будут двигаться в направлении токового слоя и образуют в окрестности токового слоя 2-х или 3-х компонентное распределение ионов по скоростям. Известно, что 2-х пучковое распре-

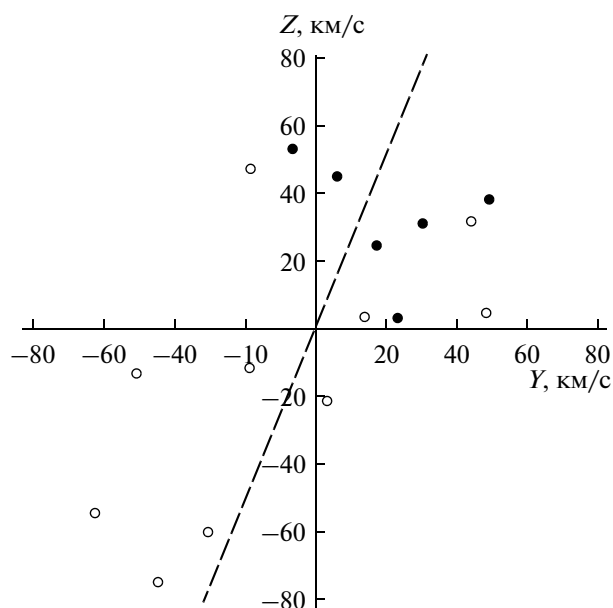


Рис. 5. Значения скорости конвекции плазмы в АГП в координатах $YZ(GSE)$. Черные точки — значения скоростей в ведущей части аномалии, белые — в замыкающей. Штриховой линией указано направление нормали к токовому слою.

ление ионов по скоростям приводит к неустойчивости. Свободная энергия в плазме, связанная с таким распределением по скоростям, возбуждает мощные ЭМ волны, которые приводят к разогреву плазмы.

Отклонения скоростей в теле аномалии от среднего значения

Время	dV_x	dV_y	dV_z
12:56:30	-39.1	23.0	2.9
12:56:41	-50.5	48.9	37.8
12:56:48	-30.6	30.3	31.0
12:56:59	-38.8	17.0	24.6
12:57:10	-28.8	-6.0	51.4
12:57:18	-34.9	6.0	44.4
12:57:29	-6.6	-18.3	47.3
12:57:39	25.7	43.6	31.6
12:57:48	10.00	48.2	4.5
12:57:59	27.3	14.0	3.6
12:58:07	29.4	-4.1	-44.0
12:58:17	9.0	3.5	-21.2
12:58:28	19.6	-18.6	-11.4
12:58:36	13.8	-30.2	-59.9
12:58:47	29.0	-62.5	-54.4

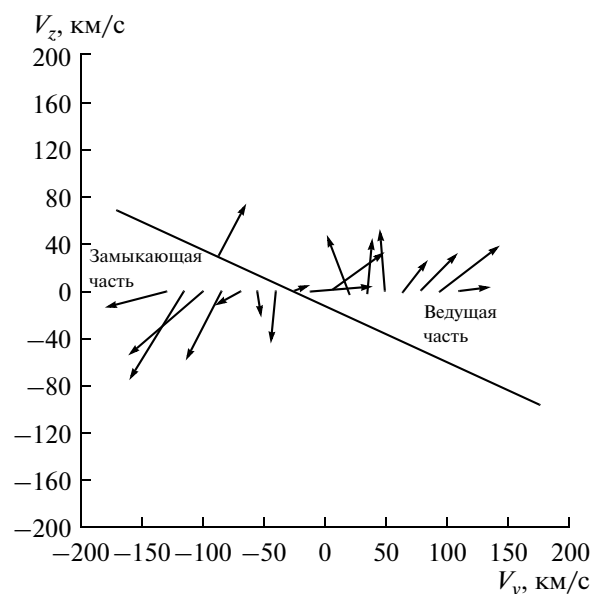


Рис. 6. Направления скоростей конвекции вдоль траектории пересечения спутником области АГП. Длинной линией показана примерная ориентация токового слоя, стрелкой — направление его перемещения. Справа отмечены векторы скорости в ведущей части аномалии (leading), слева — в замыкающей (trailing). График нарисован в осях $YZ(GSE)$.

7. ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ ВНУТРИ АГП

Рассмотрим подробнее, как движется плазма внутри АГП. Обратимся к данным. Усредним покомпонентно скорости, зарегистрированные в области аномалии. Средние, вдоль разреза АГП спутником, значения скоростей составляют в координатах GSE :

$$V_x \sim -240 \text{ км/с}, V_y \sim 200 \text{ км/с}, V_z \sim 6 \text{ км/с}.$$

Легко убедиться из данных таблицы, что в данном случае мы имеем дело с разлетом плазмы в направлении от токового слоя.

Как видно из рис. 5, вектора скоростей конвекции плазмы лежат в направлениях от центра к краям аномалии как в ведущей, так и в замыкающей ее частях.

Рассмотрим подробнее скорости движения плазмы внутри аномалии. Проекция этих скоростей на плоскость $YZ(GSE)$ приведены на рис. 6.

Из рисунка 6 видно, что вдоль линии пересечения спутником области аномалии направления векторов остаточных скоростей показывает движение плазмы вдоль нормали к токовому слою в направлении от слоя. Это соответствует картине расширения в той области, где проведены измерения.

Также имеет смысл рассмотреть поведение скоростей расширения в более наглядной системе координат.

1. Началом координат выберем точку положения спутника М (7.19; 11.74; 12.3).

2. Вдоль нормали к токовому слою n_{cs} введем ось y' . Направление этой оси совпадает с направлением нормали и задается в системе GSE вектором $(-0.34; 0.34; 0.88)$.

3. Далее, через векторы n_{cs} и n_{bs} и точку М проведем плоскость. Уравнение плоскости записывается следующим образом $-0.16x + 0.87y - 0.40z - 4.24 = 0$.

4. Выберем направление нормали к плоскости $(-0.16; 0.87; 0.40)$ в качестве отрицательного направления оси z' .

5. Поскольку оси y' и z' перпендикулярны по определению, из их векторного произведения мы можем получить ось x' , перпендикулярно обоим и дополняющую систему до правого ортогонального базиса, $x' = [y' \times z'] = (0.90; 0.27; 0.24)$.

В получившейся системе координат обратимся к плоскости $x'y'$. Спроектируем на нее полученные данные о скоростях внутри аномалии. Результаты изобразим на рис. 7.

Как и на рис. 6, мы получили характерную для расширяющейся области картинку. На рис. 7 разлет плазмы от токового слоя выражен еще четче. Стоит заметить, что в середине области просматривается участок, который может являться потоком солнечного ветра, поскольку имеет значительную дополнительную компоненту скорости в направлении от Солнца.

8. СООТНОШЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ В ОБЛАСТИ АГП

Сравним полное и внутреннее давление в АГП с внешним давлением. Внутреннее давление определяется суммой газокINETического (теплового) давления плазмы $P_{TK} = n_i k T_i + n_e k T_e$ и магнитного давления $P_{MAGN} = B^2/8\pi$. Внешнее давление на фланге АГП определяется суммой теплового давления плазмы солнечного ветра $P_{T.C.B} = P_{э.с.в.} + P_{и.с.в.}$ и магнитного давления $P_{M.C.B.}$. На рисунке 8 представлен график теплового и магнитного давлений в аномалии. Со стороны направления на Солнце основным является динамическое давление $P_d = \rho \cdot m_p \cdot V^2$.

Оценим давление, оказываемое солнечным ветром на аномалию. Усреднив данные по солнечному ветру в интервале 12:50:03–12:54:53 UT, сделаем оценку теплового давления солнечного ветра. Тепловое давление ионов:

$$P_{и.с.в.} \sim 3.17 \cdot 10^{-10} \text{ эрг/см}^3.$$

Для оценки электронного давления воспользуемся данными прибора ЭЛЕКТРОН. Как известно, при измерении частиц с изотропным

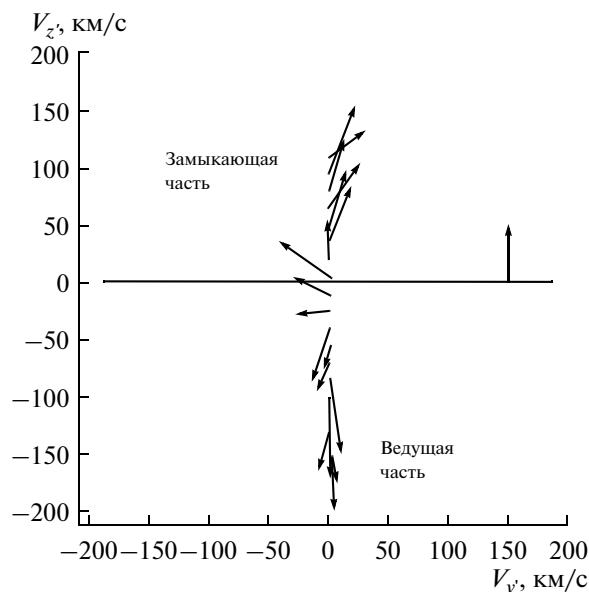


Рис. 7. Скорости конвекции плазмы в аномалии в системе координат, связанной с нормальными к ударной волне и токовому слою. Длинной серой линией отмечена ориентация токового слоя, стрелкой указано направление его движения. В верхней части рисунка отмечены скорости в ведущей части АГП, в нижней – в замыкающей.

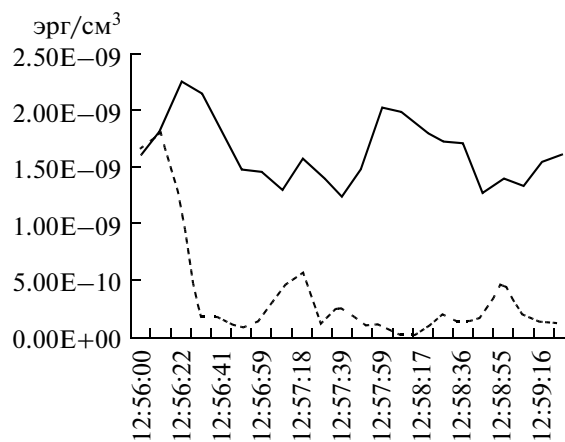


Рис. 8. График магнитного и теплового давлений внутри АГП. Штриховой линией показано магнитное давление, а сплошной – тепловое.

Максвелловским распределением с помощью электростатического анализатора максимальная скорость счета регистрируется на энергии, равной $2T$. Поэтому мы можем оценить температуру электронов из данных, показанных на рис. 9. Согласно этим данным, максимальная скорость счета электронов в теле АГП (~12:58:00 UT) приходится на энергию порядка 100 эВ. Для солнечного ветра эта величина оценивается, как 35 эВ. Тогда

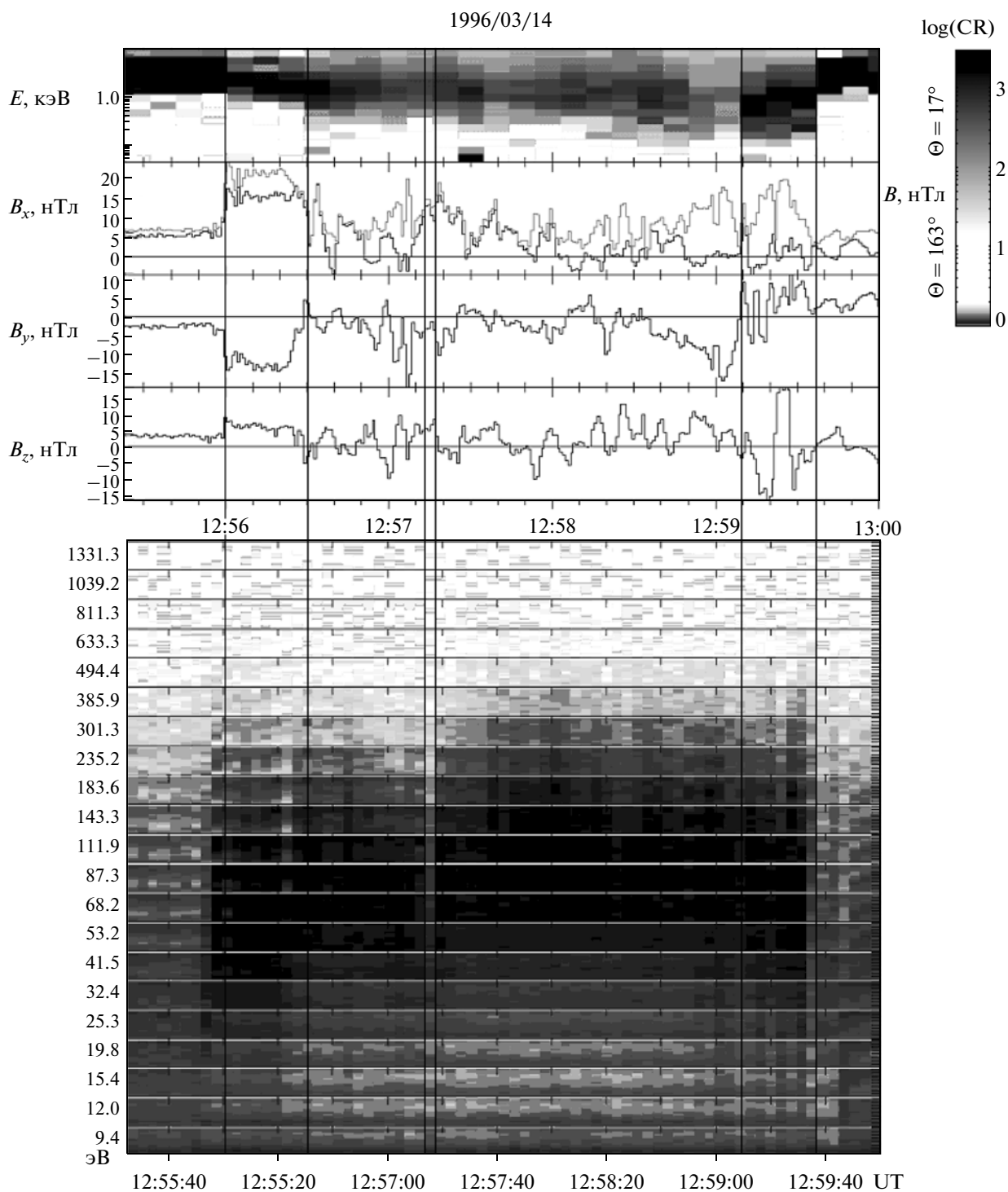


Рис. 9. Вверху: динамический спектр ионов и характеристики магнитного поля. На шкале B_x совмещены графики x -компоненты магнитного поля и его абсолютного значения. Внизу: динамический спектр электронов. Вертикальные линии ограничивают области аномалии, определенные по динамическим спектрам ионов и электронов, а так же по характеристикам магнитного поля.

температура электронов составит в солнечном ветре ~ 17 эВ, а в теле АГП ~ 50 эВ.

Концентрация электронов в плазме с большой точностью соответствует концентрации прото-

нов. Из данных Интербола в области тела аномалии горячего потока концентрация ионов составляет 3.5 см^{-3} . В солнечном ветре, по данным Wind концентрация меньше — 2.5 см^{-3} .

Теперь мы можем оценить тепловое давление в солнечном ветре:

$$P_{\text{э.с.в.}} \sim 9.52 \cdot 10^{-11} \text{ эрг/см}^3$$

$$P_{\text{т.с.в.}} = P_{\text{э.с.в.}} + P_{\text{и.с.в.}} = 4.122 \cdot 10^{-10} \text{ эрг/см}^3.$$

Оценим магнитное давление в солнечном ветре

$$P_{\text{магн}} = \frac{B^2}{8\pi} \sim 1.33 \cdot 10^{-10} \text{ эрг/см}^3.$$

Теперь оценим динамическое давление солнечного ветра. Проанализировав данные с КА Wind, относящиеся к соответствующему временному интервалу, оценим среднюю плотность протонов в ветре, как 2.5 см^{-3} , а скорость ветра, как $\sim 500 \text{ км/с}$. В то же время, сама АГП движется в антисолнечном направлении со средней скоростью 240 км/с , а значит, при расчетах следует использовать относительную скорость. Тогда динамическое давление на АГП составит:

$$P_d = \rho \cdot m_p \cdot V^2 \sim 7.33 \times 10^{-9} \text{ эрг/см}^3.$$

Проанализировав данные в интервале от 12:56:00 до 12:59:24 UT, мы получили следующую картину для магнитного и теплового давлений внутри самой аномалии горячего потока:

В сумме давление солнечного ветра на фланге АГП оценивается, как $4.45 \times 10^{-10} \text{ эрг/см}^3$. Суммарное давление внутри АГП, определяется величиной $2.02 \times 10^{-9} \text{ эрг/см}^3$, что почти в 3 раза превышает давление в солнечном ветре и вполне согласуется с выводом о расширении плазмы в теле аномалии.

9. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ПО СКОРОСТЯМ ВНУТРИ АГП

Графические изображения функций распределения ионов по скоростям являются весьма наглядным материалом для описания переходных процессов в области аномалии. На рисунке 10 показаны характерные функции распределения ионов по скоростям в солнечном ветре в локальной магнитной системе координат. Для построения такого сечения используются измерения плотности потока ионов в 15 энергетических интервалах от 50 до 5000 электронвольт на заряд в 64 направлениях, по которым вычисляется плотность частиц в пространстве скоростей. По этим измерениям вычисляются параметры потока: плотность n (в предположении, что все ионы являются протонами), температура T и вектор скорости V . Измерения магнитного поля усредняются за цикл измерений распределения ионов ($\sim 10 \text{ сек}$). Используется локальная магнитная цилиндрическая система координат в пространстве скоростей с основной осью вдоль вычисленного направления магнитного поля и началом в точке $V_{\perp B}$. По горизонтальной оси на графиках рисунка 10 отло-

жены параллельные вектору магнитного поля компоненты скорости, по вертикальной оси — перпендикулярные компоненты. Градациями серого — плотность в пространстве скоростей (более темный цвет соответствует большей плотности). Рассмотрим несколько характерных областей внутри аномалии и в ее окрестностях:

1. Первая область — солнечный ветер, зарегистрированный аппаратом до 12:56:00 UT и после 12:59:34 UT (рис. 10). Об этом говорит сравнительно узкий энергетический спектр регистрируемых ионов (рис. 10а), магнитное поле, практически не претерпевающее изменений и слабо флуктуирующие скорости. На границах этих областей наблюдаются скачки концентрации частиц, скачкообразные изменения магнитного поля и некоторое снижение скорости.

2. Вторая часть — область, захватывающая весь скачок величины магнитного поля, значительный прирост Y и Z -компонент скорости частиц и температуры частиц (12:56:00–12:56:27 UT). Фронт этой области соответствует ударной волне, а сама эта область, как мы увидим позже, является обтекающим препятствие потоком. На это указывают характерный скачок магнитного поля, примерно в 4 раза (величина, соответствующая сильной квази-перпендикулярной ударной волне), разогрев заторможенного потока плазмы и его отворот потока в направлении OY и OZ (рис. 10б).

3. Третий интервал, ведущая часть аномалии горячего потока — область, зарегистрированная с 12:56:27 приблизительно до 12:57:13 UT, характеризующаяся горячей плазмой, с заметным потоком частиц в антисолнечном направлении (рис. 10в), повышенной концентрацией частиц, а так же сильными флуктуациями магнитного поля.

4. Четвертая часть — 12:57:13–12:57:18 UT промежуточная область между ведущей и замыкающей частями аномалии потока. Выделяется контрастом энергий частиц. Это особенно заметно по динамическому спектру электронов (рис. 10г, рис. 11).

5. Пятый интервал, 12:57:18–12:59:08 UT, замыкающая часть аномалии потока. Основное отличие от ведущей части аномалии — большой поток ионов с антисолнечного направления (рис. 10д).

6. Шестая часть — 12:59:08–12:59:34 UT, которая по параметрам ионов соответствует обтекающему потоку за фронтом ударной волны (рис. 10е). Она отождествляется по обратному резкому скачку концентрации и магнитного поля.

По мере пролета через аномалию наблюдается сильная термализация частиц солнечного ветра, что является характерной картиной при взаимодействии потока с препятствием, в виде ударной волны земной магнитосферы.

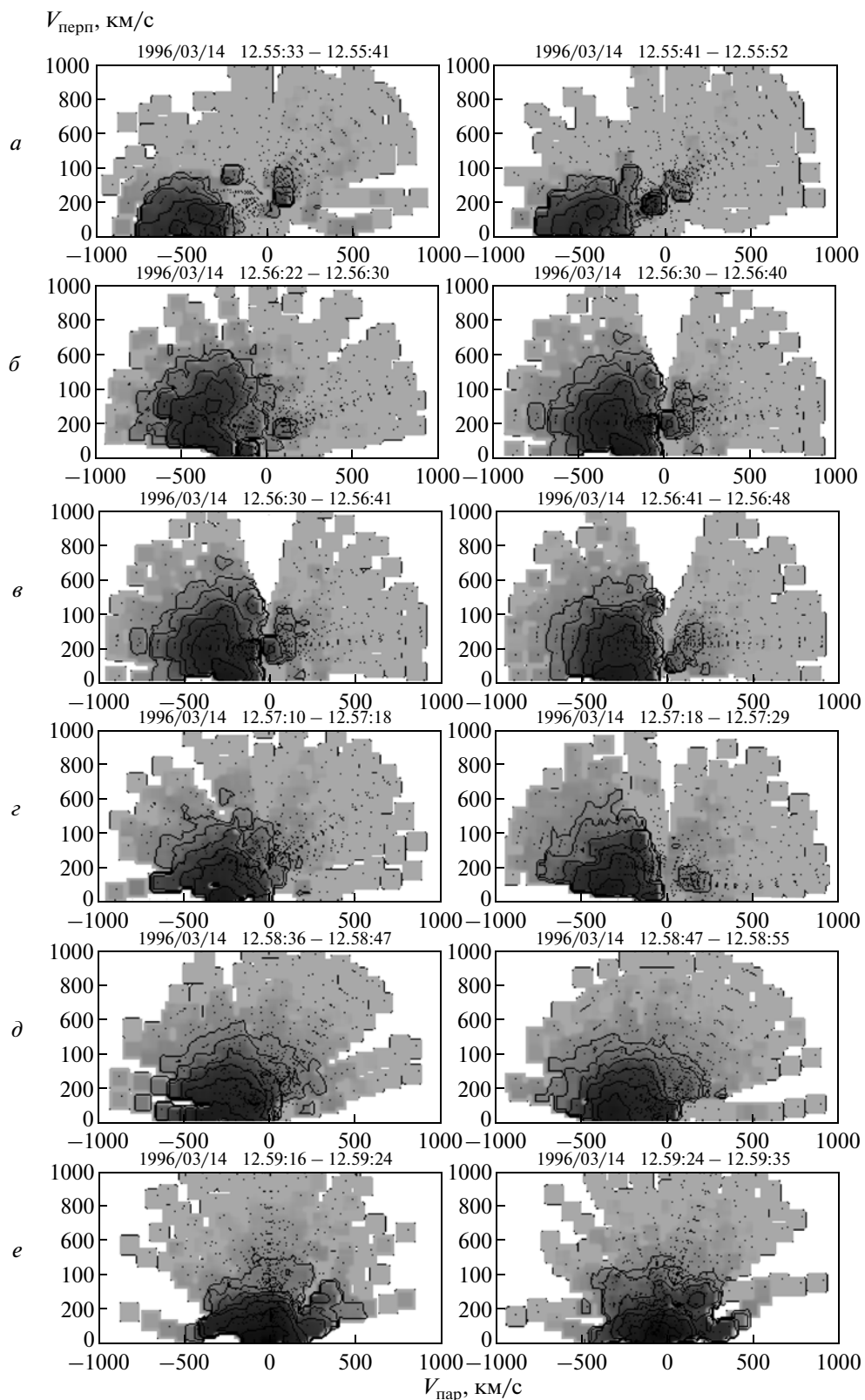


Рис. 10. Функции распределения ионов по скоростям в исследуемой аномалии. Временной интервал 12:55:33–12:59:35 UT (слева направо, сверху вниз). В локальной магнитной системе координат ($V_{\text{пар}}-V_{\text{перп}}$) приведена плотность ионов в пространстве скоростей (от серого к черному).

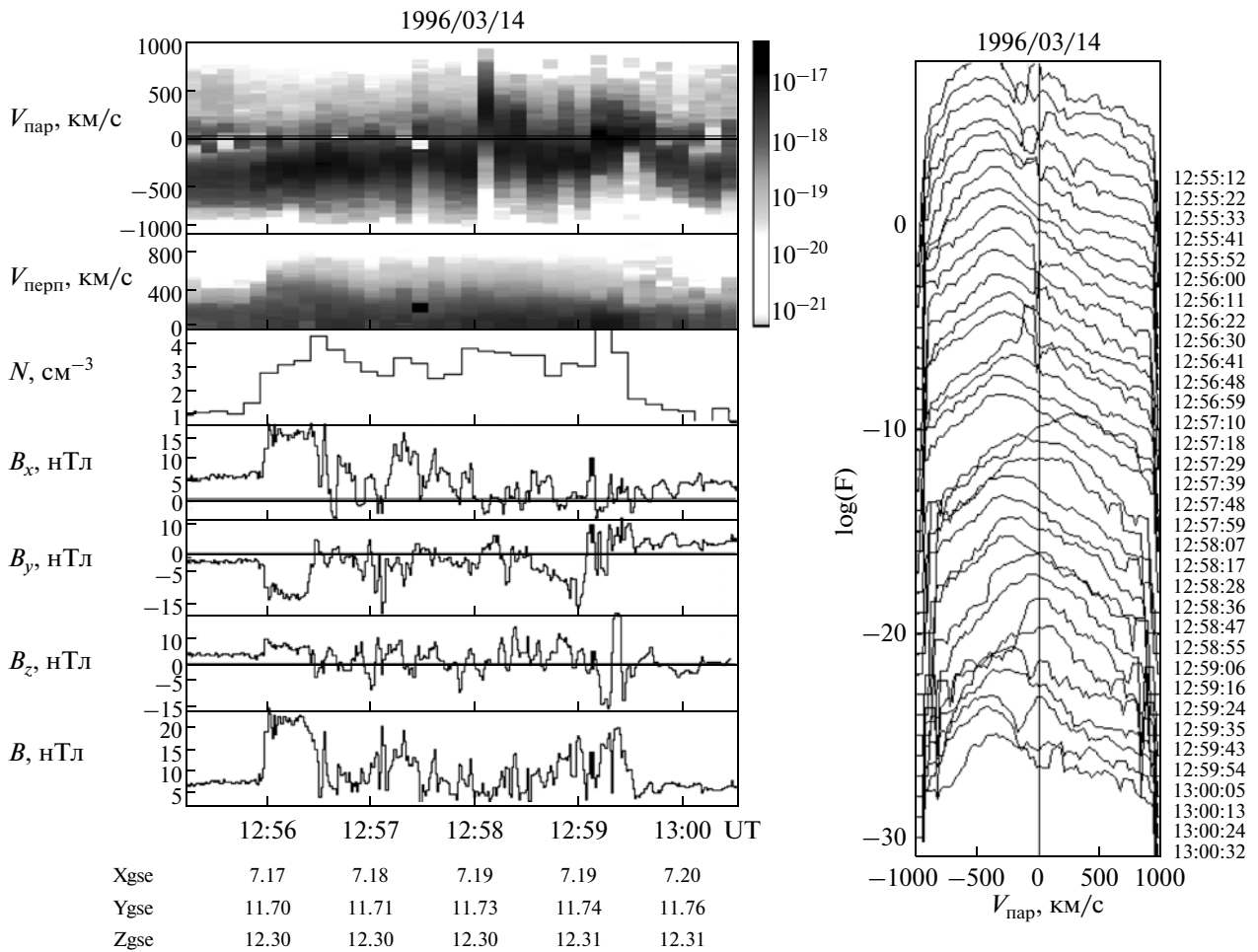


Рис. 11. Слева – сводный график: (сверху вниз) динамический спектр по параллельным и перпендикулярным компонентам скоростей частиц во времени с градацией по скорости счета частиц, концентрация, 3 компонента магнитного поля, абсолютное значение магнитного поля. Справа – динамика распределения ионов по параллельным скоростям.

10. ВЫВОДЫ

В работе была исследована аномалия горячего потока (АГП) вблизи околоземной ударной волны, зафиксированная спутником Интербол 14 марта 1996 года. На основании данных измерений плазмы и магнитного поля были изучены геометрия взаимодействия межпланетного токового слоя с околоземной ударной волной, свойства плазмы в ней и структура потока плазмы внутри аномалии.

Оценка величины и направления электрического поля в солнечном ветре с двух сторон от токового слоя, взаимодействующего с околоземной ударной волной, показывает, что отраженные от ударной волны ионы должны инжектироваться в сторону токового слоя, что обычно рассматривается как условие образования аномалии.

АГП представляет собой область разогретой плазмы с температурой порядка нескольких сотен электрон-вольт (в нашем случае ~260 эВ). В работе исследована структура аномалии, состоя-

щей из трех областей с различными характеристиками. Аномалия состоит из двух областей, ведущей и замыкающей, в которых плазма распространяется в стороны от узкой внутренней области. Эта область отличается как от двух основных областей аномалии, в частности, по направлению движения плазмы. Это, а также растекание плазмы от нее в две противоположные стороны, указывает на нее как на область основного энерговыделения. Давление плазмы внутри аномалии заметно превышает фланговое давление в солнечном ветре, что объясняет расширение плазмы внутри аномалии от центральной области. Но так как лобовое динамическое давление солнечного ветра значительно больше внутреннего давления АГП, можно заключить, что в плазме внутри образования происходят конвективные процессы. Функции распределения ионов по скоростям внутри аномалии дополняют построенную картину развития событий, включая образо-

вание 2-х компонентной структуры потока внутри аномалии.

По измерениям плазмы была подсчитана скорость и направление смещения АГП вдоль ударной волны, находящиеся в согласии с ориентацией межпланетного токового слоя относительно ударной волны. По величине и направлению скорости аномалии и продолжительности ее наблюдения оценен поперечный размер АГП как $2.5 R_E$ (радиуса Земли).

По обе стороны от аномалии зарегистрированы ударные волны: квазипараллельная ударная волна со стороны ведущей части АГП и квазиперпендикулярная со стороны замыкающей ее части. Направления нормалей к этим ударным волнам показывают, что область аномалии выступает перед фронтом околоземной ударной волны.

Таким образом, в результате анализа было показано, что аномалия расширяется.

Также был построен примерный сценарий поведения аномалии горячего потока, образовавшейся на фронте околоземной ударной волны, который не только качественно, но и количественно характеризует рассматриваемое явление.

Авторы выражают благодарность за возможность использования данных измерений магнитного поля С.И. Климову, а также Т.А. Шахвердяну за помощь в оформлении и обработке графических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Burgess D.* On the effect of a tangential discontinuity on ions specularly reflected at an oblique shock // *J. Geophys. Res.* V. 94, № A1. P. 472–478. 1989.
- *Formisano V.* Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions // *Planetary and Space Science.* V. 27. Sept. P. 1151–1161. 1979.
- *Klimov S., Romanov S., Amata E. et al.* ASPI experiment: measurements of field and waves onboard Interball Tail mission, in: INTERBALL mission and payload // *Ann. Geophys.* V. 15. № 5. P. 514–527. 1997.
- *Sauvaud J.-A., Koperski P., Beutier T. et al.* The ELECTRON spectrometer experiment: a top hat spectrometer for the Tail Probe in: Interball Mission and Payload // *Ann. Geophys.* V. 15. № 5. P. 587–595. 1997.
- *Schwartz S.J., Paschmann G., Scopke N., Bauer T.M., Dunlop M., Fazakerley A.N., Thomsen M. F.* Conditions for the formation of hot flow anomalies at Earth's bow shock // *J. Geophys. Res.* V. 105. № A6. P. 12.639–12.650. 2000.
- *Sibeck D.G., Borodkova N.L., Zastenker G.N., Romanov S.A., Sauvaud J.-A.* Gross deformation of the dayside magnetopause // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. № 4. P. 453–456. 1998.
- *Sibeck D.G., Borodkova N.L., Schwartz S.J. et al.* Comprehensive study of the magnetospheric response to a hot flow anomaly // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A3. P. 4577–4593. 1999.
- *Thomas V.A., Winske D., Thomsen M.F., Onsager T.G.* Hybrid simulation of the formation of a hot flow anomaly // *J. Geophys. Res.* V. 96. № A7. P. 11.625–11.632. 1991.
- *Vaisberg O.L., Waite J.H., Avakov L.A., Smirnov V.N., Dempsey D., Burch J.L., Skalsky A.A.* HFA-like signatures observed with Interball-Tail spacecraft, in: *Proceeding of the Solar wind 9 conference*, American Institute of Physics. V. 471. P. 551–554. 1999.
- *Vaisberg, O.L., Leibov A.W., Avakov L.A. et al.* Complex plasma analyzer SCA-1 // *Interball Mission and Payload, RSA-IKI-CNES.* P. 170–177. 1995.