

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АНОМАЛИИ ГОРЯЧЕГО ПОТОКА (АГП) ПЛАЗМЫ У
ФРОНТА ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ.
A STUDY OF HOT FLOW ANOMALY (HFA) STRUCTURE OBSERVED NEAR
EARTH'S BOW SHOCK**

А.Ю.Шестаков и О.Л.Вайсберг

Институт Космических Исследований ИКИ РАН, iki@cosmos.ru

This work is a study of Hot Flow Anomaly (HFA), formed near the Earth's bow shock on 03/14/96. This phenomenon was observed by Interball Tail spacecraft, data retrieved with ion spectrometer SCA-1, fluxgate magnetometer MIF-M, and electron spectrometer ELECTRON. Using these data we determined orientation of interplanetary current sheet, considered to form the anomaly. We calculated motional electric fields on both sides of HFA. It turned out that these fields were directed towards the current sheet on its both sides what corresponds to previous ideas on the reasons for HFA formation. It is considered that HFA are formed as a result of sun-directional ion reflection from the bow shock front in the direction of the current sheet. With magnetic field and plasma data we distinguished several regions within the anomaly. Using the model of Earth's bow shock we determined the speed and direction of anomaly motion. From velocities measured inside anomaly we analyzed plasma convection within HFA. It was shown than plasma velocities are directed away from the current sheet. This motion allows us to conclude that energy source is located near the current sheet. This expansion is in agreement with estimated pressure value inside HFA. Analysis of electron dynamic spectra and ion velocity distributions confirms that the anomaly consists of two parts: leading and trailing that appears to be separated current sheet as the source of heating and convective energy.

Наблюдения были проведены на хвостовом зонде проекта Интербол 13 апреля 1996 г. Использованы измерения 3-мерного ионного спектрометра СКА-1 [1], спектрометра электронов ЭЛЕКТРОН [2] и магнитометра МИФ-М [3]. СКА-1 проводил измерения интенсивности потока ионов в 960 точках пространства скоростей в шкале энергий E/q от 50 эВ/к до 5 кэВ/к за время ~ 10 с. Феррозондовый магнитометр МИФ-М измерял три компонента магнитного поля с частотой 1 Гц.

В работе использована 3-мерная модель ударной волны, полученная Formisano в 1979 г. [4]. Основываясь на этой модели была построена картина взаимной ориентации ударной волны, токового слоя, соответствующих нормальных векторов к ним, а также рассчитано направление и величина электрического поля, возникающего в результате движения заряженных частиц в замагниченном потоке солнечного ветра. Полученные результаты представлены на Рисунке 1.

С использованием формулы, полученной ранее Schwartz, 2000 [5], была составлена скорость перемещения токового слоя вдоль фронта ударной волны.

$$\vec{V}_{tr} = \frac{V_{ncs}}{\sin^2 \Theta_{cs:bs}} (\vec{n}_{cs} - \cos \Theta_{cs:bs} \cdot \vec{n}_{bs})$$

Здесь V_{ncs} – проекция вектора скорости солнечного ветра V_{sw} на нормаль к токовому слою, $\Theta_{cs:bs}$ - угол между нормалью к токовому слою \vec{n}_{cs} и нормалью к ударной волне \vec{n}_{bs} .

Вектор скорости солнечного ветра до ударной волны по усредненным значениям данных определяется как $V_{sw} = (-487,6; 25,6; -11,0)$ км/с в системе координат GSE (солнечно-эклиптической).

Вектор нормали к токовому слою, определенный по данным Интербола:

$$\vec{n}_{int} = (-0,22; 0,50; 0,83)$$

Угол, между вектором нормали и скоростью солнечного ветра:

$$\alpha_{int} = \arccos\left(\frac{503,2}{4,6 \cdot 504,23}\right) \approx 77,5^\circ$$

Таким образом, скорость смещения токового слоя вдоль ударной волны по формуле (1).

$$\vec{V}_{tr} = \frac{110,95}{0,85} \left(\vec{n}_{cs} - 0,39 \vec{n}_{bs} \right) = 130,53(-0,53; 0,34; 0,66) = (-69,18; 44,38; 86,15) \text{ км/с.}$$

$$|\vec{V}_{tr}| = 119 \text{ км/с.}$$

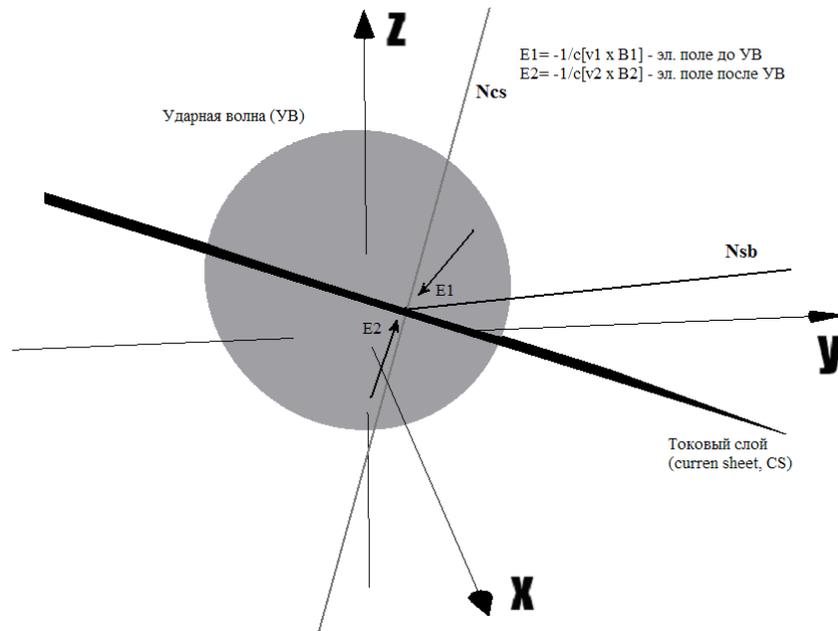


Рис. 1. Изображение взаимной ориентации токового слоя, нормали к ударной волне (Nsb), нормали к токовому слою (Ncs) и направлений электрического поля до и после прохождения токового слоя (стрелки E1 и E2). Оси: от плоскости рисунка – X(GSE), вправо – Y(GSE), вверх – Z(GSE). Околосземная ударная волна показана схематически.

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

Произведём оценку размера аномалии вдоль ее траектории относительно спутника Интербол. Обратим внимание, что зафиксированная длительность тела АГП составляет порядка 160 секунд, вычисленная скорость перемещения – порядка 119 км/с; таким образом, поперечный размер области можно оценить, как $1,9 \cdot 10^4$ км (~ 3 радиуса Земли).

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:

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

Вычитая эти значения из измеренных скоростей плазмы во время пересечения АГП, получим скорости конвекции плазмы внутри нее вдоль направления сечения спутником. Полученные результаты представлены на Рисунке 2.

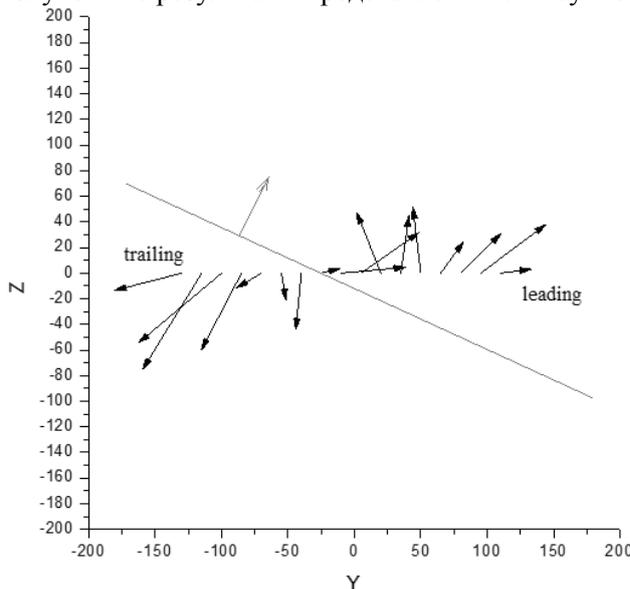


Рис. 2. Данный график показывает проекции скоростей конвекции на плоскость YZ. Начала векторов размещены вдоль горизонтальной линии последовательно по времени их регистрации от начала (справа) к концу события (слева). Длинной наклонной линией показана вычисленная ориентация токового слоя, стрелочкой – направление его смещения. Справа показаны вектора скорости в ведущей части аномалии (leading), слева – в замыкающей (trailing). График нарисован в осях YZ(GSE).

На основании спутниковых данных была произведена оценка давлений плазмы внутри аномалии и снаружи. Внутреннее давление определяется суммой газокINETического (теплового) давления плазмы $P_{гк} = n_i k_i T + n_e k_e T_e$ и магнитного давления $P_{магн} = \frac{B^2}{8\pi}$. Внешнее давление на фланге АГП определяется суммой теплового давления плазмы солнечного ветра $P_{т.с.в.} = P_{э.с.в.} + P_{и.с.в.}$ и магнитного давления $P_{м.с.в.}$.

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:

$$P_{и.с.в.} \approx 2,5 \text{ см}^{-3} \cdot 9,2 \cdot 10^5 \text{ эВ} \cdot 1,38 \cdot 10^{-16} \left(\frac{\text{эрг}}{\text{К}} \right) = 3,17 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} \right)$$

Для оценки электронного давления воспользуемся данными прибора ЭЛЕКТРОН. Согласно этим данным температура электронов составит в солнечном ветре ~ 17 эВ, а в теле АГП ~ 50 эВ.

Концентрация электронов в плазме с большой точностью соответствует концентрации протонов. Из данных Интербола в области тела аномалии горячего потока концентрация ионов составляет $3,5 \text{ см}^{-3}$. В солнечном ветре, по данным космического аппарата Wind концентрация меньше – $2,5 \text{ см}^{-3}$.

Теперь мы можем оценить тепловое давление в солнечном ветре:

$$P_{э.с.в.} = 17 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} (\text{эрг}) \cdot 3,5 (\text{см}^{-3}) \approx 9,52 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} \right)$$

$$P_{т.с.в.} = P_{э.с.в.} + P_{и.с.в.} = 4,12 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} \right)$$

Оценим магнитное давление в солнечном ветре: $P_{магн} = \frac{B^2}{8\pi} \approx 1,33 \cdot 10^{-10} \left(\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} \right)$

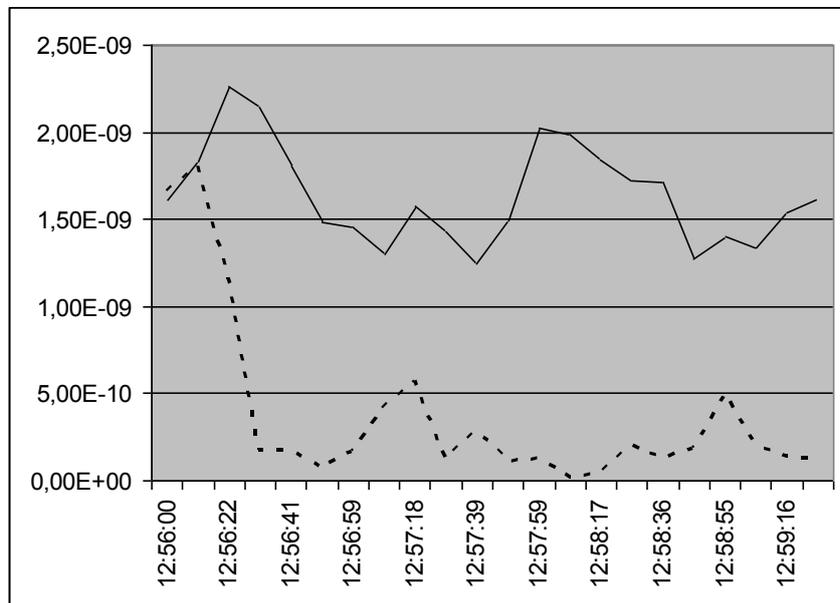


Рис. 3. График магнитного и теплового давлений внутри АГП. Штрихованной линией отмечено магнитное давление, а сплошной – тепловое.

В сумме давление солнечного ветра на фланге АГП оценивается, как $4,45 \cdot 10^{-10}$ эрг/см³. Суммарное давление внутри АГП, определяется величиной $\sim 2 \cdot 10^{-9}$ эрг/см³, что почти в 3 раза превышает внутреннее давление в солнечном ветре и вполне согласуется с выводом о расширении плазмы в теле аномалии в обе стороны от токового слоя.

Со стороны направления на Солнце основным является динамическое давление $P_d = \rho \cdot m_p \cdot V_{sw}^2$, где V_{sw} – скорость солнечного ветра. Мы используем полную скорость солнечного ветра, так как АГП является квази-стационарным образованием. Теперь оценим динамическое давление солнечного ветра. Проанализировав данные с КА Wind, относящиеся к

соответствующему временному интервалу, оценим среднюю плотность протонов в ветре как $2,5 \text{ см}^{-3}$, а скорость ветра как $\sim 500 \text{ км/с}$. Тогда динамическое давление на АГП составит:

$$P_d = \rho \cdot m_p \cdot V^2 = 2,5 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} \cdot (5 \cdot 10^7)^2 \approx 1,04 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} \right)$$

Лобовое давление солнечного ветра на АГП значительно (примерно в 5 раз) превышает давление внутри самой аномалии.

Литература

1. Vaisberg, O.L., A.W.Leibov, L.A.Avanov, V.N.Smirnov, et al., Complex plasma analyzer SCA-1, in: Interball Mission and Payload, RFA-IKI-CNES, 1995 pp. 170-177.
2. Sauvaud, J.A., H.Barthe, C.Aoustin, J.J.Tocaven, J.Rouzaud, J.Bouyssou, M.Cassignol, P.Souleille, J.M.Bosqued, T.Beutier, J.Crasnier, J.Dandouras, C.Jacquey, H.Reme, O.Vaisberg, N.Borodkova, L.Avanov, The ELECTRON spectrometer experiment: a top hat spectrometer for the Tail Probe, in: Interball Mission and Payload, RKA-IKI-CNES, 1995 pp. 153-169.
3. Klimov, S., S.Romanov, E.Amata, J.Blecki, et al., ASPI experiment: measurements of field and waves onboard Interball Tail mission, in: INTERBALL mission and payload. IKI-CNES, p.120,1995.
4. Formisano, V., Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions, Planet. Space Sci., 27, 1151-1161, 1979.
5. Schwartz, S. J., G. Paschmann, N. Sckopke, T. M. Bauer, M. Dunlop, A. N.Fazakerley, and M. F. Thomsen (2000), Conditions for the formation of hot flow anomalies at Earth's bow shock, J. Geophys. Res., 105, 12,639