

УДК 533.6.011.72:537.84:550.385.41

ТРЕХМЕРНОЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СКАЧКООБРАЗНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ГОЛОВНУЮ УДАРНУЮ ВОЛНУ И МАГНИТОСЛОЙ

© 2011 г.

Е.А. Пушкарь

Московский государственный индустриальный университет

pushkar@msiu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

В трехмерной постановке исследовано воздействие на околоземную головную ударную волну и магнитослой плоского фронта разрывного возмущения солнечного ветра в виде быстрой магнитогиродинамической ударной волны или вращательного разрыва с круговой поляризацией. Рассмотрены характерные значения параметров солнечного ветра на орбите Земли. Найдены трехмерная глобальная волновая картина течения, как функция широты и долготы точки на головной ударной волне, и интенсивности всех волн, возникающих при взаимодействии, которые существенно зависят от числа Маха ударной волны или угла поворота магнитного поля во вращательном разрыве. Полученные решения необходимы для интерпретации измерений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, проводимых на космических аппаратах, расположенных вблизи точки Лагранжа L_1 и магнитосферы Земли.

Ключевые слова: взаимодействие между разрывами, солнечный ветер, МГД модель, ударные волны, вращательные разрывы, магнитосфера Земли, головная ударная волна, магнитослой, измерения на спутниках.

В настоящее время группы спутников вблизи околоземной головной ударной волны, во внешней магнитосфере и магнитослое (THEMIS, Cluster, Double Star) и космические аппараты в солнечном ветре около точки Лагранжа L_1 на расстоянии $\sim 250R_E$ от Земли (Wind, SOHO, ACE) измеряют и передают на Землю данные о состоянии межпланетной среды и магнитного поля. Данные измерений используются для идентификации резких скачкообразных изменений в солнечном ветре, связанных с ударными волнами, вращательными и тангенциальными разрывами и их проявлениями, которые наблюдаются на спутниках вблизи Земли, с целью предсказания космичес-

кой погоды в виде неожиданного начала магнитной бури, магнитных суббурь и неожиданных импульсов в магнитосфере Земли [1, 2].

Для правильной интерпретации измерений на спутниках необходимо иметь точные решения задачи о взаимодействии разрыва солнечного ветра и околоземной головной ударной волны S_b , в которых волновая картина течения есть функция широты α и долготы τ точки на S_b . Эти решения могут служить граничными условиями для расчета течения в магнитослое и последующего воздействия на магнитосферу Земли. На рис. 1 показаны положения разрыва солнечного ветра S_{fi} ($i = 1, 2$) и линии L_{SfSb} пересечения S_{fi} с поверхно-

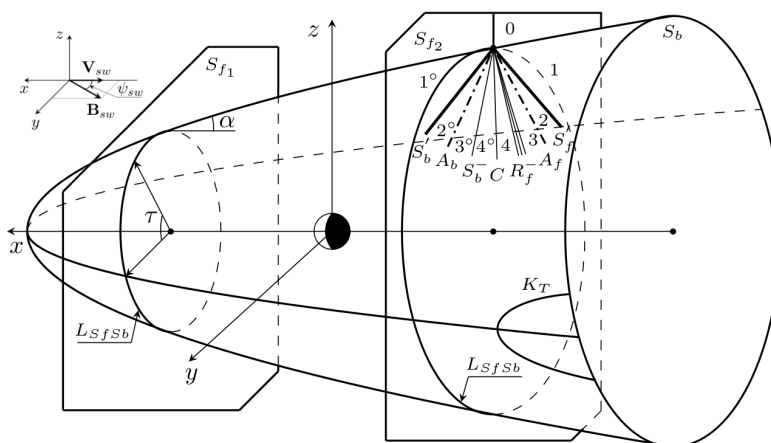


Рис. 1

стью S_b при перемещении S_f .

В рамках приближения идеальной магнитной гидродинамики (МГД) в трехмерной постановке впервые исследовано воздействие плоского фронта ударной волны S_f [3] или вращательного разрыва A_f [4], движущегося по линии Солнце–Земля, на S_b и магнитослой (см. рис. 1). Выбраны характерные значения параметров солнечного ветра на орбите Земли и межпланетного магнитного поля \mathbf{V}_{sw} (для определенности – в плоскости эклиптики XU): число Маха $M_{sw} = V_{sw}/a_0 = 8$, газокINETическое и магнитное давления равны ($\beta = 8\pi r/B_{sw}^2 \approx 1$), угол ψ_{sw} между \mathbf{V}_{sw} и \mathbf{B}_{sw} равен 45° . Скорость S_f варьировалась: число Маха $M_{sf} = V_{sf}/a_0 = 2, 3, 5$ и 8 . Вращательный разрыв A_f имеет круговую поляризацию, в нем \mathbf{B}_{sw} поворачивается вокруг нормали на заданный угол ν_A . Рассмотрены значения ν_A , равные $25, 45, 90, 135, 180^\circ$. Плоскополяризованный разрыв A_f соответствует $\nu_A = 180^\circ$, однако и в этом случае всюду вне плоскости XU задача неплюскополяризованная с трехмерным магнитным полем.

Картина взаимодействия, в которой каждая волна выделена отдельно и вычисляется с заданной точностью, найдена как функция α и τ с помощью оригинального численно-аналитического метода в результате точного решения на компьютере задачи о распаде произвольного МГД-разрыва на линии L_{SfSb} (рис. 1, $i = 2$). Состояния за S_f или A_f фиксированы, а за S_b зависят от α и τ , так что зависимость от времени при перемещении S_f или A_f по S_b преобразуется в параметрическую зависимость от α и τ . Линия L_{SfSb} движется со сверхзвуковой скоростью, поэтому взаимодействие можно рассматривать локально.

Глобальная волновая картина взаимодействия S_f и S_b [3] существенно зависит от M_{sf} (рис. 2). При распространении S_f (уменьшении широты α)

волновая картина подвержена непрерывным и скачкообразным перестройкам, различным вдоль разных меридианов $\tau = \text{const}$. Определяющую роль играет угол ψ между \mathbf{B}_{sw} и переносной скоростью \mathbf{V}_{st} точки взаимодействия S_f и S_b : в окрестности $\tau = 180^\circ$ (на фланге заря) $\psi \approx 90^\circ$ и взаимодействие квазиперпендикулярное [5]. При $M_{sf} = 2$ альфвеновская и медленная магнито-звуковая скорости совпадают при $\alpha \approx 34^\circ$, от медленной ударной волны отщепляется альфвеновский разрыв конечной интенсивности. Волновая картина течения перестраивается несколько раз в узкой зоне (рис. 2а), магнитное поле изменяется скачкообразно (локальная катастрофа K_L) [5]. В окрестности $\tau = 0^\circ$ реализуются условия квазипараллельного взаимодействия ($\psi \approx 0^\circ$) [5]. При $M_{sf} = 8$ (рис. 2б) проекции \mathbf{B}_{sw} и \mathbf{V}_{st} на плоскость, ортогональную L_{SfSb} , коллинеарны на линии K_T (см. рис. 1), где альфвеновские разрывы и медленные волны сливаются с контактным разрывом C и образуют тангенциальный разрыв T , ему параллельны скорость и напряженность магнитного поля. По обе стороны T альфвеновские и медленные волны разные: на соответствующей границе решений на рис. 2б обе S^- трансформируются в R^- , вращательные разрывы изменяются скачком. Состояние среды и магнитное поле резко меняются из-за смены направлений электрического поля $\mathbf{E} = -(\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}$, электрических токов и пондеромоторных сил на противоположные. При $M_{sf} = 8$ рост напряженности магнитного поля на линии K_T равен $(2-4)|\mathbf{B}_{sw}|$, что сопровождается падением давления и плотности. В отличие от K_L , присущей плоскополяризованным течениям [5] и реализующейся на фланге заря в точке при $\tau = 180^\circ$, катастрофа K_T имеет неплюскополяризованную природу и происходит на фланге сумерки на линии, пересекающей плоскость эклиптики.

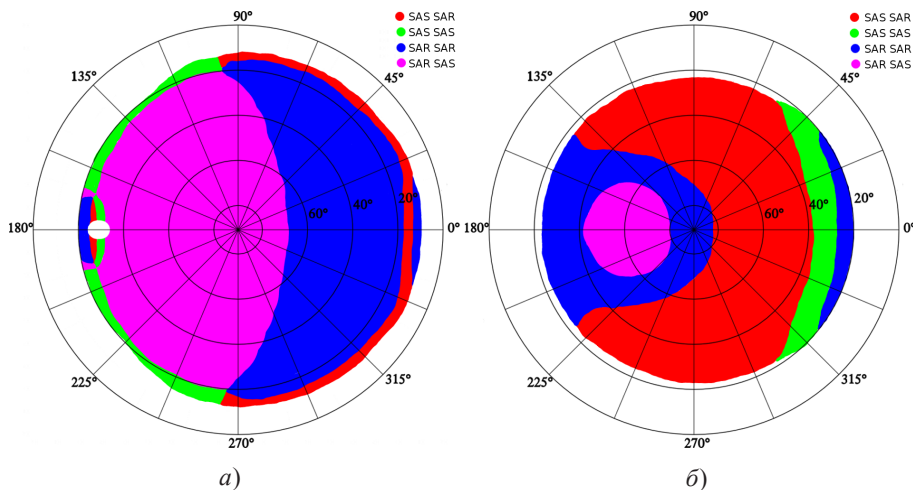


Рис. 2

Взаимодействие A_f и S_b [4] существенно зависит от угла ν_A поворота \mathbf{B}_{sw} в A_f . Примерно на половине поверхности S_b быстрая волна, возникающая при падении A_f и проникающая первой в магнитослой, является ударной волной S_f^+ , а на другой половине генерируется быстрая волна разрежения R_f^+ . Граница между S_f^+ и R_f^+ на широтах от $\alpha = 90^\circ$ до $\sim 50^\circ$ близка к меридианам $\tau = 180^\circ - 0.5\nu_A$ и $\tau = 360^\circ - 0.5\nu_A$. За S_f^+ или R_f^+ в магнитослой проникает преломленный вращательный разрыв A'_f , который в процессе взаимодействия усиливается в несколько раз на широтах от 90° до $\sim 50^\circ$. На меньших широтах его интенсивность $|A'_f|$ может локально убывать на флангах, при этом имеются узкие зоны шириной несколько градусов, в которых $|A'_f| \approx 0$. В этих зонах A'_f не проникает в магнитослой и воздействие A_f на магнитосферу реализуется за счет быстрых и медленных магнитогидродинамических волн. Одна из зон более широкая, она расположена на фланге заря вблизи плоскости XU (долгота τ от 180° до 190°) на широтах $\alpha < 40^\circ$. В другой зоне (ее положение на S_b существенно зависит от ν_A) исчезновение A'_f происходит на угловом расстоянии менее 1° и связано с перераспределением электрических токов между A'_f и отраженным вращательным разрывом и медленными волнами. Найдены точки на S_b , в которых волновая картина взаимодействия скачкообразно пере-

страивается, при этом параметры среды и магнитное поле резко меняются в процессе взаимодействия. Вне плоскости эклиптики решения для $\nu_A = 180^\circ$ принципиально отличаются от найденных ранее [5] в плоскополяризованной постановке и подчиняются другим закономерностям.

Полученные решения являются яркой иллюстрацией необходимости учета трехмерности, неплюскополяризованного характера взаимодействия и асимметрии влияния межпланетного магнитного поля на процессы, происходящие при падении скачкообразных возмущений солнечного ветра на околоземную ударную волну и проникновении их в магнитослой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №08-01-00191 и 11-01-00235) и грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-4810.2010.1).

Список литературы

1. Keika K. et al. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A00C26, doi:10.1029/2008JA013481.
2. Pallochia G. et al. // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 1141–1156.
3. Пушкарь Е.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2009. №6. С. 139–156.
4. Пушкарь Е.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2011. №2. С. 166–187.
5. Бармин А.А., Пушкарь Е.А. // Изв. РАН. МЖГ. 1992. №4. С. 140–155.

3D MAGNETO-HYDRODYNAMIC DESCRIPTION OF THE IMPACT OF A JUMP-WISE SOLAR WIND PERTURBATION ON THE EARTH'S BOW SHOCK AND MAGNETIC SHEATH

E.A. Pushkar

The impact of the plane front of a discontinuous solar wind perturbation in the form of a fast MHD shock wave or a rotational discontinuity with a circular polarization on the Earth's bow shock and the magnetic sheath is investigated in the three-dimensional formulation within the framework of the MHD model. The characteristic values of the solar wind parameters and the interplanetary magnetic field strength in the Earth's orbit are considered. The global three-dimensional flow pattern is constructed as a function of the latitude and longitude of points on the bow shock and the intensities of all the waves appearing in the interaction which significantly depend on shock wave Mach number or the angle of rotation of the magnetic field in the rotational discontinuity are found. The solutions obtained are necessary to interpret the measurements of the solar wind parameters and the interplanetary magnetic field carried out on spacecraft located in the neighborhood of the Lagrange point L_1 and the Earth's magnetosphere.

Keywords: interaction between discontinuities, solar wind, MHD model, shock waves, rotational discontinuities, Earth's magnetosphere, bow shock, magnetosheath, spacecraft measurements.