

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВНЕЗАПНОГО ИМПУЛЬСА В МАГНИТОСФЕРЕ

М.В. Шатров

PROPAGATION OF A SUDDEN IMPULSE IN THE MAGNETOSPHERE

M.V. Shatrov

В статье представлены результаты исследования распространения внезапного импульса в магнитосфере, зафиксированного по скачку *SYM*-индекса в 13:22 UT 29 июля 2002 г. и связанного с приходом к Земле межпланетной ударной волны. Проанализированы плазменные колебания, наблюдавшиеся на спутнике «Polar», и приведено сравнение результатов численного МГД-моделирования со спутниковыми данными в магнитосфере.

This paper presents study of propagation of a sudden impulse in the magnetosphere; it was registered due to the increase in *SYM-H* (13:22 UT on 29 July 2002) and was related to the arrival of interplanetary shock wave. We analyze plasma oscillations observed by “Polar” and compare results of numerical MHD modeling with spacecraft observations in the magnetosphere.

Введение

Солнечный ветер – это поток намагниченной плазмы, воздействующий на магнитосферу Земли. Характерной особенностью солнечного ветра является наличие в нем разрывов – скачков макроскопических параметров среды. Хотя солнечный ветер представляет собой бесстолкновительную плазму, его поведение в большинстве случаев хорошо описывается в рамках идеальной магнитной гидродинамики (МГД).

Из уравнений Рэнкина–Гюгонио получают четыре вида разрывов: контактный, тангенциальный, вращательный и ударные волны (УВ). УВ называется разрыв, при переходе через который поток вещества и плотность меняются. УВ подразделяются на быстрые, медленные и промежуточные. Межпланетная ударная волна (МУВ) – это распространяющийся относительно потока солнечного ветра разрыв, на котором происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости [1]. Взаимодействие МУВ с магнитосферой приводит к появлению внезапных импульсов в наземных геомагнитных наблюдениях и вариаций в спутниковых данных [4].

Межпланетная ударная волна

По данным *SYM*-индекса (описывающего вариации магнитного поля на среднеширотных станциях) в 13:22–13:25 UT 29 июля 2002 г. было отмечено увеличение *H*-компоненты поля (рис. 1). Данный импульс был вызван приходом к Земле МУВ, зарегистрированной в солнечном ветре (WIND, ACE, SOHO) и в магнитосфере (GOES 8, GOES 10, «Geotail», «Polar») (см. таблицу).

На рис. 2 и 3 показано поведение модуля магнитного поля и плазменных параметров по данным ACE и WIND.

Время регистрации ударной волны на спутнике и координаты спутника (в радиусах Земли) в этот момент

Спутник	T	X_GSM	Y_GSM	Z_GSM	R
SOHO	12.43	201.2	51.7	-7.3	208.0
WIND	13.15	26.7	77.9	-28.4	87.1
ACE	12.40	243.1	-21.6	36.0	246.7
GOES 8	13.21	3.4	-5.6	-0.3	6.6
Geotail	13.22	5.7	-8.9	2.4	10.9
GOES 10	13.21	-2.7	5.7	1.9	6.6
Polar	13.22	-6.2	-6.7	2.7	9.6

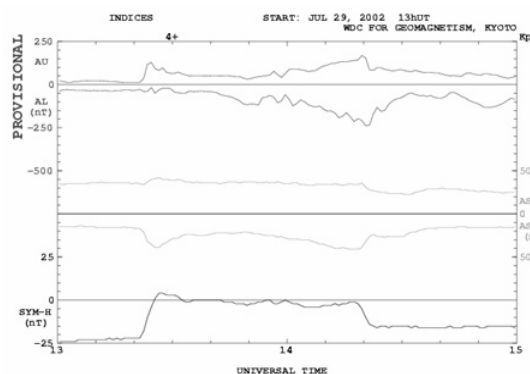


Рис. 1. Данные *SYM*-индекса за 22 июля 2009 г.

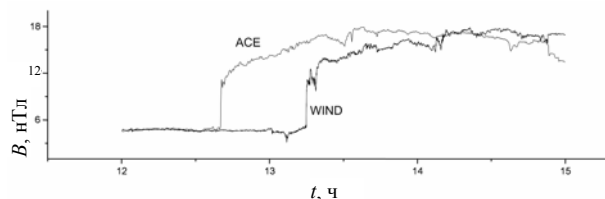


Рис. 2. Изменение модуля магнитного поля, регистрируемого на спутниках WIND и ACE.

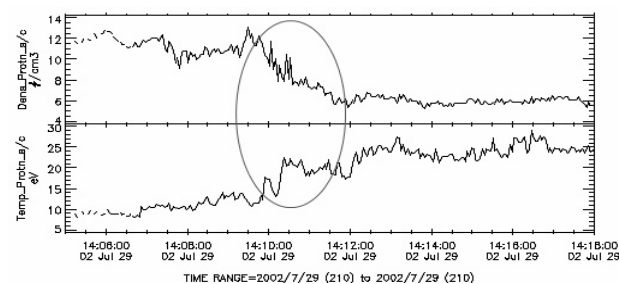


Рис. 3. Изменения плазменных параметров во время прихода тангенциального разрыва по данным спутника WIND.

Уменьшение *SYM-H*-индекса в ~14:20 UT вызвано приходом к Земле тангенциального разрыва (время регистрации на WIND 14:10–14:12 UT).

Определение нормали к ударной волне

Направление нормали к МУВ будем искать трехспутниковым методом. Найдем решение системы уравнений

$$\begin{cases} \Delta R_{21} \vec{n} = \Delta t_{21} \vec{V}_{sh}, \\ \Delta R_{31} \vec{n} = \Delta t_{31} \vec{V}_{sh}, \\ |n|^2 = 1, \\ \Delta \vec{B} n = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta \vec{R}$ – расстояние между спутниками (берем данные по спутникам WIND, ACE, SOHO), Δt – разность между временами регистрации МУВ на спутниках, \vec{V}_{sh} – скорость разрыва, $\Delta \vec{B}$ – разность модуля магнитного поля до разрыва и после него (используются данные со спутника ACE). Усреднены значения магнитного поля за минуту до регистрации МУВ и после нее, мы получили координаты нормали: $\vec{N} = (0.8851; -0.0542; -0.4622)$.

Зная координаты нормали, можно найти скорость ударной волны по формуле

$$\vec{V}_{sh} = \frac{n_{up} \vec{V}_{up} - n_d \vec{V}_d}{n_{up} - n_d} \vec{N}, \quad (2)$$

где n_{up} и n_d , \vec{V}_{up} и \vec{V}_d – концентрация и скорость плазмы до и после разрыва.

Таким образом, мы получаем скорость МУВ $|\vec{V}_{sh}| = 544.3$ км/с и оценку времени прихода разрыва на поверхность Земли 13:24.

Сравнивая данное время и время регистрации внезапного импульса по данным SYM-индекса, можно утверждать, что оба значения довольно хорошо согласуются.

Анализ данных со спутника «Polar»

Взаимодействие МУВ с магнитосферой часто приводит к возникновению длиннопериодных колебаний магнитного поля [2]. Однако в нашем случае на спутнике «Polar» были зарегистрированы колебания плазменных параметров при отсутствии явных периодических изменений магнитного поля (рис. 4).

Для точного определения частоты колебаний компонент скорости V_x и V_y было сделано фурье-преобразование (рис. 5).

Средняя частота колебаний компонент скорости равна 0.0032 Гц, что соответствует периоду в 5 мин. Колебания магнитного поля с данными периодами находятся в диапазоне Pc 5, но выявить явную периодичность в вариациях магнитного поля в данном случае не удалось. Это может быть связано с тем, что «Polar» во время прихода МУВ находился вблизи экваториальной плоскости (см. таблицу) и мог оказаться в окрестности узловой точки, в которой колебания магнитного поля наблюдать невозможно [3].

Результаты МГД-моделирования

Мы промоделировали этот случай при помощи глобальной МГД-модели земной магнитосферы BATS-R-US, доступной по адресу <http://ccmc.gsfc.nasa.gov>, и сравнили полученные результаты с наблюдениями спутников «Geotail», «Polar», GOES 8, GOES 10.

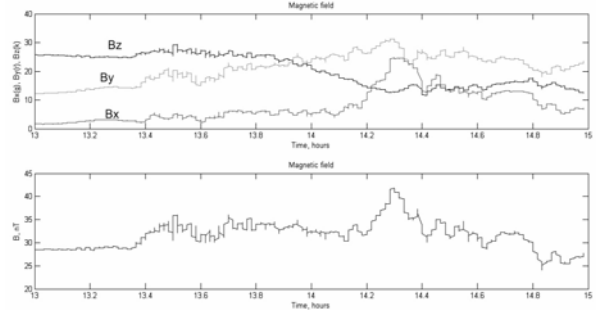
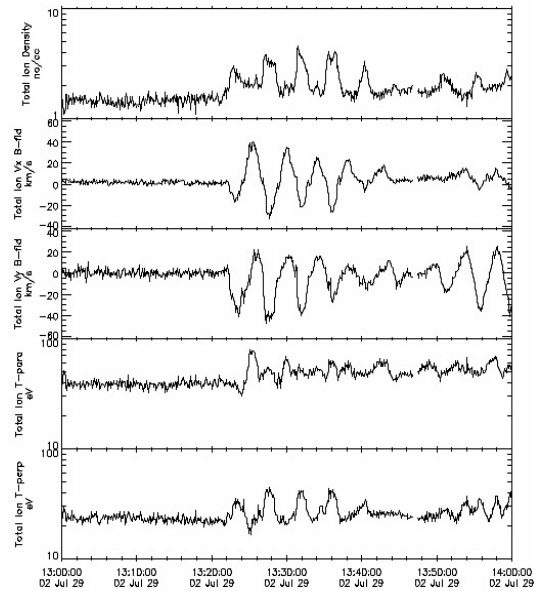


Рис. 4. Параметры плазмы и магнитного поля по данным спутника «Polar».

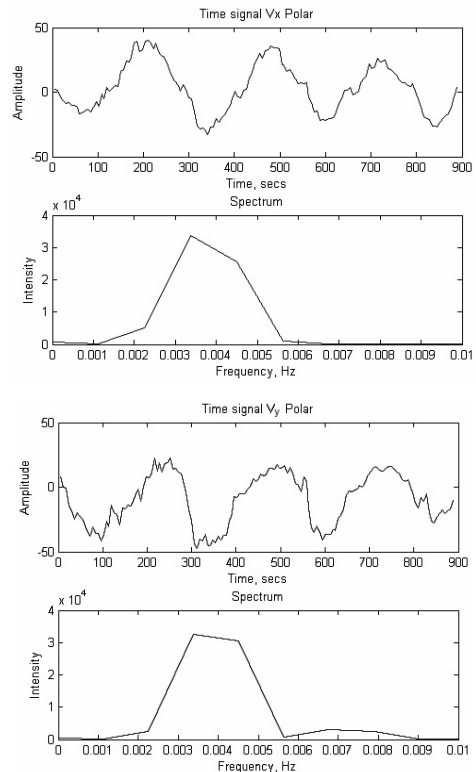


Рис. 5. Фурье-анализ компонент скорости V_x и V_y по данным спутника «Polar» в 13:22–13:41 UT.

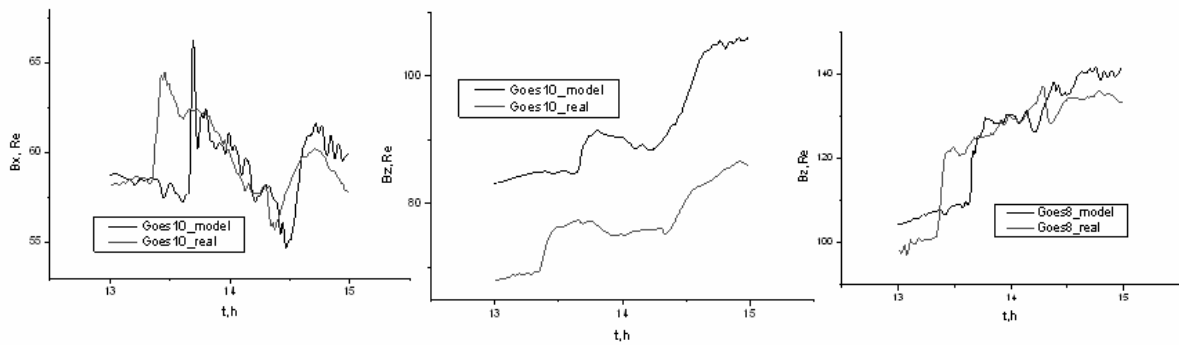


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования с данными спутников GOES 8 и GOES 10.

Время прихода внезапного импульса, полученное по результатам моделирования, отстает на 16–17 мин от времени по наблюдениям магнитосферных спутников. Это связано с тем, что при моделировании производится пересчет параметров солнечного ветра от положения спутника (обычно вблизи лагранжевой точки) к координате $X=33 R_E$, являющейся в модели границей втекания. Пересчет осуществляется в предположении, что структуры солнечного ветра движутся со скоростью потока. В действительности МУВ движутся со скоростью большей, чем скорость плазмы. Плазменные колебания, зарегистрированные на спутнике «Polar», в результатах моделирования не наблюдались. Тем не менее, моделирование качественно воспроизводит большинство крупномасштабных вариаций в магнитосфере, связанных с приходом МУВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутько Н., Зайцев А. и др. Космическая среда вокруг нас. Троицк, 2006. 232 с.
2. Wilson C.R., Sugiura M. Hydromagnetic Interpretation of Sudden Commencements of Magnetic Storms // J. Geophys. Res. 1961. V. 66, N 12, P. 4097–4111.
3. Kivelson M.G. Pulsations of magnetospheric ultra-low-frequency waves // Introduction to space physics / Ed. M.G. Kivelson, C.T. Russell. Cambridge University Press, 1995. 568 p.
4. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург