

## АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В МАГНИТОСФЕРНОМ ХВОСТЕ ЮПИТЕРА

И. Ю. Васько, А. В. Артемьев, Л. М. Зеленый

Институт Космических Исследований РАН

E-mail: [vaskoiy@yandex.ru](mailto:vaskoiy@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе представлены наблюдения на аппарате Galileo стоящих альфвеновских волн большой амплитуды с периодом 10 ч в магнитосферном хвосте Юпитера (на расстоянии порядка 40-70  $R_J$ , где  $R_J$  - радиус Юпитера). Наблюдения волн сопряжены с наблюдением плоского профиля плотности плазмы поперек магнитосферного хвоста. Предложен механизм генерации данных волн, объясняется механизм выравнивания профиля плотности.

### 1. Введение

Исследования магнитосферы Юпитера имеют первостепенное значение для понимания механизмов формирования и динамики магнитосфер планет [1] и пульсаров [2]. Важнейшим элементом магнитосферы является магнитосферный хвост, который можно условно разделить на ближнюю (до  $\sim 40 R_J$ ) и дальнюю (после  $\sim 40 R_J$ ) области. В ближней области магнитное поле является, главным образом, дипольным. В дальней области магнитное поле поддерживается плазменными токами. Суточная прецессия диполя приводит к возмущению магнитного поля в ближней области. Данные возмущения проникают в дальнюю область в виде альфвеновских волн.

В работе [3] было показано, что колебания диполя в меридиональной плоскости (далее используется система координат JSO: ось X - направление на Солнце, ось Z - перпендикуляр к плоскости эклиптики) приводят к генерации альфвеновской волны, распространяющейся вдоль хвоста и вызывающей его колебания относительно плоскости эклиптики с амплитудой  $\sim 5 R_J$  (флаппинг колебания). Флаппинг колебания были зафиксированы в первых спутниковых миссиях к Юпитеру [4] в виде периодических пересечений нейтральной плоскости магнитосферного хвоста (плоскость, в которой магнитное поле меняет направление на противоположное).

В работе [3] рассматривалась альфвеновская волна, которая возникает за счет возмущения в ближней области компонент магнитного поля  $B_x$  и  $B_z$ . Однако, прецессия диполя приводит также к возмущению компоненты магнитного поля  $B_y$ . Распространение альфвеновских волн с соответствующей поляризацией вдоль хвоста возможно лишь в долях магнитосферного хвоста на открытых силовых линиях [5]. С другой стороны, на замкнутых силовых линиях могут устанавливаться стоящие волны. В настоящей работе приведены наблюдения стоящих альфвеновских волн в дальней области на аппарате Galileo. Разработана модель, описывающая распределение амплитуды данных волн, которая более чем удовлетворительно объясняет наблюдения.

## 2. Спутниковые наблюдения

Мы используем данные магнитометра [6], а также данные измерений высокочастотных колебаний электрического поля [7]. Последние используются для определения плотности плазмы по идентификации плазменных колебаний. На рис. 1а приведены наблюдения магнитного поля на аппарате Galileo 11 сентября 1996 г в течение ~45 ч.

В ходе наблюдений аппарат смещался вдоль оси  $X$  с  $x \sim -40 R_J$  до  $x \sim -52 R_J$ . Периодические вариации магнитного поля  $B_x$  соответствуют флаппинг колебаниям магнитосферного хвоста. Магнитное поле  $B_z$ , перпендикулярное нейтральной плоскости, остается постоянным в течение всего интервала наблюдений и составляет порядка -2 нТ. Магнитное поле  $B_y$  не имеет четко выраженной структуры, осциллирует в окрестности нуля и не превосходит 2.5 нТ. Рис.1б показывает, что плотность плазмы имеет максимум  $\sim 0.05 \text{ см}^{-3}$  в нейтральной плоскости и падает до величины  $\sim 0.01 \text{ см}^{-3}$  с удалением от нейтральной плоскости.

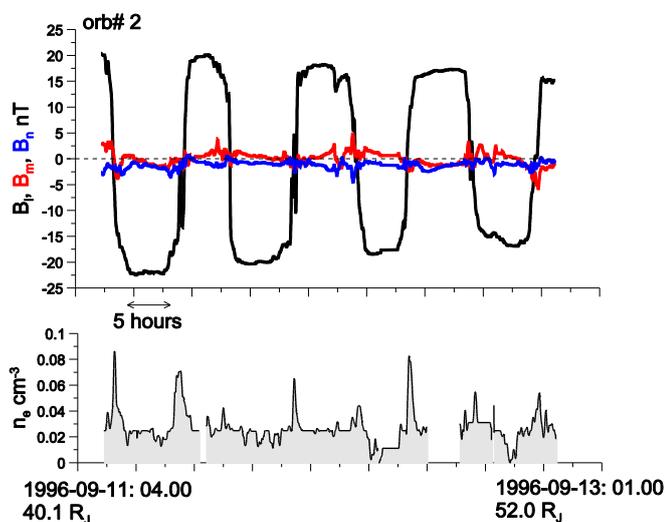
На рис. 2а приведены наблюдения магнитного поля 14 марта 1997 года в течение 55 ч. В ходе наблюдений аппарат смещается вдоль оси  $X$  с  $x \sim -55 R_J$  до  $x \sim -65 R_J$ . В отличие от наблюдений на рис. 1 в данном случае наблюдаются периодические вариации магнитного поля  $B_y$ , смещенные по фазе на четверть периода относительно вариаций магнитного  $B_x$ . Амплитуда  $B_y$  составляет порядка 7 нТ, т.е. сравнима с амплитудой  $B_x$ . Отметим, что амплитуда магнитного поля постепенно падает с удалением спутника от планеты от 7 нТ до 2 нТ. Рис. 2б показывает, что в

отличие от наблюдений на рис. 1, наличие вариаций  $B_y$  сопряжено с выравниванием профиля плотности плазмы поперек магнитосферного хвоста.

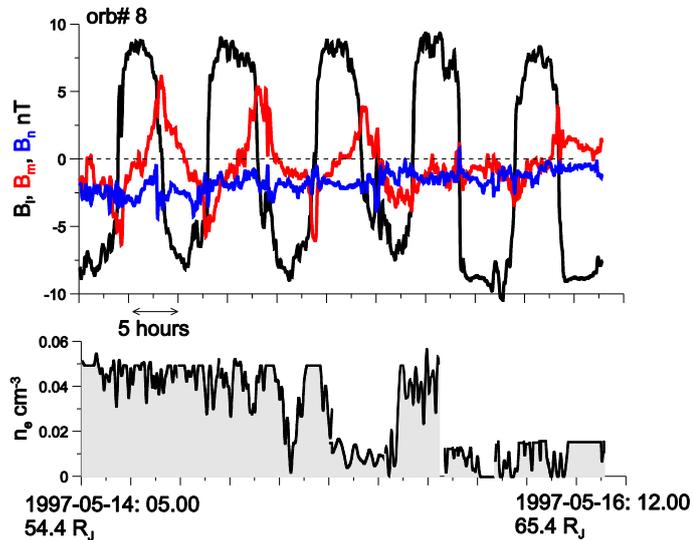
Представленные наблюдения могут быть интерпретированы следующим образом. Рис. 1 представляет невозмущенную конфигурацию магнитосферного хвоста Юпитера. Рис. 2 соответствует наблюдению низкочастотных (период равен 10 ч) стоящих альфвеновских волн, которые генерируются за счет суточной прецессии магнитного диполя Юпитера.

### 3. Модель

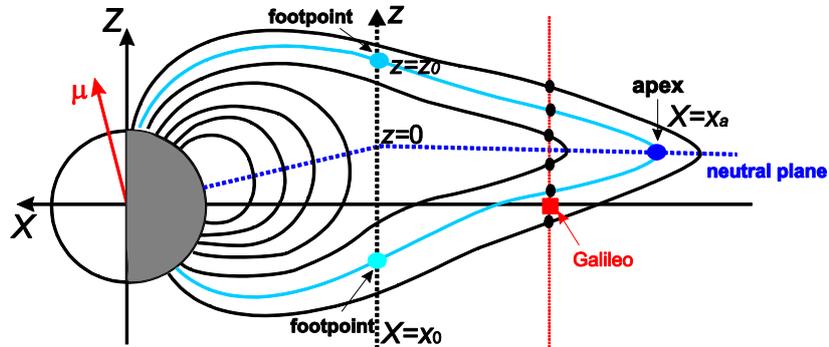
На рис. 3 представлено схематическое изображение магнитосферы Юпитера. Рассмотрим конкретную силовую трубку в дальней области хвоста. Концами силовой трубки будем называть точки, в которых силовая трубка пересекает границу между дальней и ближней областями ( $x \sim -40 R_J$ ). Вершиной силовой трубки будем называть точку ее пересечения с нейтральной плоскостью.



**Рис.1.** Наблюдения магнитного поля (верхняя панель) и плотности плазмы (нижняя панель) на аппарате Galileo с 11 по 13 сентября 1996 г.



**Рис.2.** Наблюдения магнитного поля (верхняя панель) и плотности плазмы (нижняя панель) на аппарате Galileo с 14 по 16 марта 1997 г.



**Рис.3.** Схематическое изображение магнитосферы Юпитера в меридиональной плоскости. Представлены магнитный диполь Юпитера ( $\square$ ), нейтральная плоскость, силовые линии магнитного поля, выделена конкретная силовая трубка (бирюзовый цвет), показаны ее концы (footpoints) и вершина (apex), красная линия, вдоль которой аппарат Galileo пересекает магнитосферный хвост в ходе флаппинг колебаний.

Возмущения магнитного поля  $B_y$  на концах силовой трубки приводит к установлению стоящей волны вдоль силовой трубки

$B_y(s,t)=B_y(s)e^{-i\omega t}$ , где  $s$  - длина силовой трубки, отсчитываемая от вершины. Уравнения идеальной МГД позволяют получить уравнение, описывающее распределение амплитуды  $B_y(s)$  стоящей волны вдоль силовой трубки

$$B_0 \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{B_0}{4\pi\rho_0} \frac{\partial B_y}{\partial s} \right) + \omega^2 B_y = 0$$

где  $B_0(s)$ ,  $\rho_0(s)$  - невозмущенные магнитное поле и плотность плазмы,  $\omega$  - частота суточного вращения Юпитера. Граничные условия задаются на концах силовой трубки,  $s=s_0$ . Будем считать, что плотность плазмы в силовой трубке постоянна. В этом случае распределение амплитуды стоящей волны дается выражением

$$B_y = B_y(s_0) \cos \left( \int_0^s k(s) ds \right) \cos^{-1} \left( \int_0^{s_0} k(s) ds \right)$$

где  $k(s)=\omega(4\pi\rho_0)^{1/2}/B_0$  - локальное волновое число. Стоящие волны, возбуждаемые на силовых трубках, которые удовлетворяют резонансному условию

$$\int_0^{s_0} k(s) ds = \pi(m + 1/2), \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

имеют амплитуду, существенно превосходящую амплитуду на концах силовой трубки. Величина амплитуды на резонансных трубках ограничена лишь нелинейными эффектами, которые не учитывались в изложенном подходе.

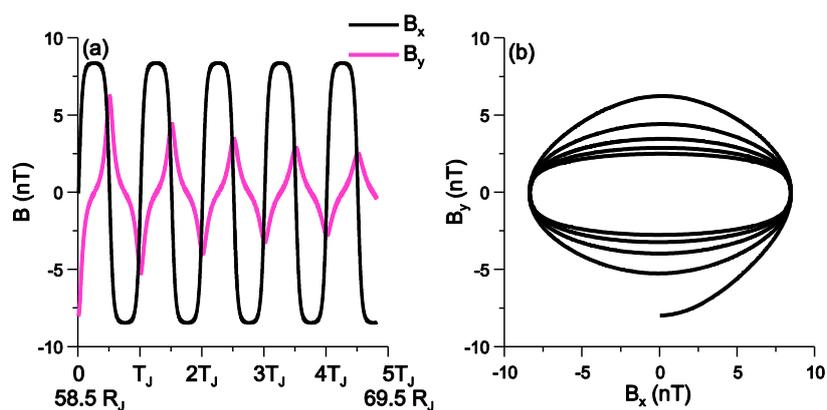
Стоящая альфвеновская волна создает пондеромоторную силу  $\sim B_y^2$  [8], которая приводит к перераспределению плотности плазмы вдоль силовой трубки. Плазма вытесняется из вершины силовой трубки, где амплитуда волны максимальна, к концам силовой трубки. Возмущение плотности плазмы описывается уравнением

$$\delta\rho = \frac{\langle B_y^2 \rangle - B_y^2}{8\pi v_s^2}$$

где скобки обозначают усреднение по вдоль всей силовой трубки, а  $v_s$  - невозмущенная скорость звука.

#### 4. Сравнение модели с наблюдениями

Представленная модель позволяет смоделировать магнитное поле, которое наблюдается на аппарате Galileo в присутствии стоящей волны (см. рис. 4). Мы полагали, что магнитное поле  $B_x$  в магнитосферном хвосте описывается моделью Харриса,  $B_x = B_0 \tanh(z/L)$ , а временной профиль  $B_x(t)$  на рис. 4 получен, учитывая, что положение аппарата  $z(t)$  относительно нейтральной плоскости меняется за счет флаппинг колебаний хвоста  $z(t) = A \cos(\omega t)$ , где  $A \sim 5R_J$  - амплитуда флаппинг колебаний хвоста. Временной профиль  $B_y(t)$  получен с учётом того, что в ходе флаппинг колебаний на аппарате наблюдаются волны, стоящие вдоль различных силовых трубок. Амплитуда магнитного поля  $B_y$  на концах силовой трубки полагалась равной 2 нТ. Можно видеть, что модельное поле на рис. 4 вполне удовлетворительно согласуется с наблюдениями.



**Рис.4.** (а) Модель магнитного поля, которое должно наблюдаться в случае наличия в магнитосферном хвосте стоящей альфвеновской волны. (б) Годограф модельного магнитного поля.

При наблюдаемой плотности плазмы на рис. 4 силовая трубка с вершиной в точке  $x \sim -54 R_J$  удовлетворяет резонансному условию с  $m=0$ , т.е. ее длина равна четверти длины волны. Таким образом, в начальный момент времени спутник находится вблизи резонансной трубки, что объясняет большую амплитуду волны. С удалением спутника от резонансной трубки амплитуда волны падает. Наконец отметим, что перераспределение плазмы за счет

действия пондеромоторной силы объясняет наблюдаемое выравнивание профиля плотности плазмы.

### **5. Выводы**

В настоящей работе показано, что суточная прецессия магнитного диполя Юпитера приводит к генерации стоящих альфвеновских волн в магнитосферном хвосте Юпитера. Амплитуда волн сопоставима с величиной магнитного поля в невозмущенном магнитосферном хвосте благодаря резонансному механизму. Пондеромоторная сила индуцированная стоящими альфвеновскими волнами приводит к выравниванию профиля плотности плазмы поперек магнитосферного хвоста.

Работа поддержана программой президиума РАН П-22.

### **Литература**

- [1]. F. Bagenal. Giant planet magnetospheres. Annual review of Earth and planetary sciences. 1992, v.20, p.289.
- [2]. C. Kennel, F. Coroniti. Is Jupiter magnetosphere like a pulsar or Earth? Space Science Reviews. 1975, v. 17, p.857.
- [3]. A. Eviatar, A.Erschkovich. Plasma density in the outer Jovian magnetosphere. Journal of Geophysical Research. 1976, v. 81, p. 4027.
- [4]. E. Smith et.al. The planetary magnetic field and magnetosphere of Jupiter: Pioneer 10. Journal of Geophysical Research. 1974, v. 79, p. 3051.
- [5]. J. Isbell et.al. Magnetospheric energization by interaction between planetary spin and the solar wind. Journal of Geophysical Research. 1984, v. 89, p. 10716.
- [6]. M. Kivelson et.al. The Galileo magnetic field investigation. Space Science Review. 1992, v. 60, p. 357.
- [7]. D. Gurnett et.al. The Galileo plasma wave investigation. Space Science Review. 1992, v. 60, p. 341.
- [8] V. Farahani et.al. Nonlinear long-wavelength torsional Alfvén waves. Astronomy and Astrophysics, v. 526, p.4.