

УДК 550.38

ИОННЫЙ ОРЕОЛ И ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛН ПЕРЕД ФРОНТОМ ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

© 2010 г. О.А. Похотелов, О.Г. Онищенко

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Исследуется устойчивость изотропного распределения ионов (ионного ореола) перед фронтом околоземной ударной волны. Показано, что полученное ранее в рамках магнитогиродинамического приближения условие его устойчивости нарушается для возмущений с длинной волны, сравнимой с ларморовским радиусом ионов. Возникающая при этом неустойчивость может служить причиной генерации быстрых магнитозвуковых волн в плазме солнечного ветра. Выведено общее дисперсионное соотношение и исследована неустойчивость наиболее быстро нарастающих возмущений. Полученные в работе теоретические результаты используются для интерпретации современных спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: магнитозвуковые волны, ударные волны, неустойчивость, ионная функция распределения.

Введение

Известно, что в солнечном ветре распределение ионов по скоростям значительно отличается от максвелловского. В частности, в плазме перед фронтом головной ударной волны присутствуют две компоненты – фоновая плазма с относительно невысокой температурой и высокоэнергичный изотропный ионный ореол или гало (*halo*) [Paschmann et al., 1979; Scholer, 1985; Thomsen et al., 1990]. Ореол является результатом формирования так называемого “квазилинейного плато” на функции распределения при питч-угловой диффузии частиц, возникающей при циклотронном взаимодействии ионов солнечного ветра с магнитогиродинамическими волнами (далее – МГД волны). Конкретная форма функции распределения частиц существенно зависит от угла между нормалью к фронту ударной волны и внешним магнитным полем. В локально квазиперечной ударной волне распределение быстрых частиц вдоль магнитного поля имеет вид пучка, в то время как за квазипродольной ударной волной оно имеет форму диффузного ореола. Принято считать, что ионный ореол МГД волн устойчив, т.е. его существование не приводит к излучению ультранизкочастотных волн [Shevchenko et al., 2004].

В данной работе пересматриваются результаты исследований в рамках кинетической теории возмущений зеркальной моды с характерным масштабом, сравнимым с ларморовским радиусом ионов в плазме большого давления (больших β) с распределением частиц, которое отличается от максвелловского. Показано, что полное дисперсионное уравнение низкочастотных волн в анизотропной плазме большого давления имеет решение, соответствующее неустойчивости возмущений даже в условиях, когда плазма устойчива относительно возмущений зеркальной моды. Этот новый тип неустойчивости мы назовем “гало неустойчивостью” (ГН). Новая неустойчивость, связанная с генерацией быстрых магнитозвуковых волн (БМЗ волн), как и неустойчивости зеркальной моды, обусловлена резонансным взаимодействием низкочастотных волн с ионами, имеющими малые продольные скорости. Источником свободной энергии этой неустойчивости является немонотонный характер распределения ионов по скоростям.

Можно ожидать, что эта новая неустойчивость способна играть важную роль в генерации низкочастотных сжимаемых волн, часто наблюдаемых на космических аппаратах перед околоземной ударной волной.

Анализ дисперсионного уравнения

В изотропной плазме большого давления быстрые магнитозвуковые волны описываются дисперсионным уравнением

$$\varepsilon_{22} - N^2 = 0, \quad (1)$$

где ε_{22} – компонента диэлектрического тензора, определяемая выражением [Pokhotelov et al., 2002, 2008]

$$\varepsilon_{22} = 1 + \sum_j \frac{q_j^2 \omega_{cj}^2}{\varepsilon_0 m_j \omega^2 k_{\perp}^2} \left\langle \frac{G \xi^2 J_1^2}{\omega - k_{\parallel} v_{\parallel}} \right\rangle - \sum_j \frac{2q_j^2}{\varepsilon_0 m_j \omega^2 k_{\perp}^2} \left\langle G \xi^2 (\omega - k_{\parallel} v_{\parallel}) J_1'^2 \right\rangle. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) $N^2 = k^2 c^2 / \omega^2$ – квадрат коэффициента преломления; k – волновое число; q_j – заряд частиц сорта j (для электронов $q_e = -e$, для ионов $q_i = e$); c – скорость света в вакууме; ω – частота волны; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $k_{\parallel(\perp)}$ – компонента волнового вектора \mathbf{k} вдоль (поперек) внешнего магнитного поля; $J_1(\xi)$ – функция Бесселя первого рода; m_j – масса частиц сорта j ; $\xi = k_{\perp} v_{\perp} / \omega_{cj}$, $v_{\parallel(\perp)}$ – продольная (поперечная) скорость частиц; ω_{cj} – циклотронная частота частиц сорта j . В выражении (2) суммирование проводится по всем сортам частиц, угловые скобки $\langle \dots \rangle$ соответствуют усреднению по пространству скоростей. Все возмущенные величины зависят от пространства и времени по закону $\propto \exp(-i\omega t + i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$. Выражение G имеет вид

$$G = (\omega - k_{\parallel} v_{\parallel}) \frac{\partial F_j}{v_{\perp} \partial v_{\perp}} + k_{\parallel} \frac{\partial F_j}{\partial v_{\parallel}}, \quad (3)$$

где F_j – функция распределения частиц сорта j .

Компонента тензора диэлектрической проницаемости ε_{22} состоит из двух частей, первая из которых соответствует плазме солнечного ветра, вторая – плазме ионного ореола:

$$\varepsilon_{22}^{sw} = \frac{c^2}{c_A^2} \left(1 - \frac{k_{\perp}^2 v_{Ti}^2}{\omega^2} \right), \quad \varepsilon_{22}^h = \frac{4i\pi^2 c^2 \omega_{ci}^2 n_h}{\omega |k_{\parallel}| c_A^2 n_i} I, \quad (4)$$

где v_{Ti} – тепловая скорость частиц солнечного ветра; c_A – скорость Альфвена; n_h и n_i – плотности частиц ореола и солнечного ветра; параметр I определен выражением

$$I = \frac{\int_0^{\infty} (J_1^2 + \xi J_1 J_1') F_i v dv}{\langle F_i \rangle}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (1), получаем искомое дисперсионное уравнение

$$\omega^2 = k^2 (c_A^2 + v_{Ti}^2 \sin^2 \theta) - \frac{4i\pi^2 \omega_{ci}^2 \omega n_h}{|k_{\parallel}| n_i} I. \quad (6)$$

Из соотношения (6) находим в приближении $n_h/n_i \ll 1$ действительную и мнимую части:

$$\operatorname{Re} \omega = \omega_R = k(c_A^2 + v_{Ti}^2 \sin^2 \theta)^{1/2}, \quad \operatorname{Im} \omega = \gamma = -\frac{2\pi^2 \omega_{ci}^2 n_h}{|k_{\parallel}| n_i} I, \quad (7)$$

где $k_{\perp}/k = \sin \theta$. Отсюда видно, что гало неустойчивость (положительный инкремент) возникает при условии $\int_0^{\infty} (J_1^2 + \xi J_1 J_1') F_i dv < 0$.

Инкремент неустойчивости

Для получения количественных оценок зададимся конкретной формой функции распределения ионов в ореоле

$$F = \frac{n_h}{4\pi v_0^2} \delta(v - v_0), \quad (8)$$

где n_h – плотность частиц ореола; v_0 – характерная скорость ореола; $\delta(x)$ – дельта функция Дирака. Используя (8), получаем необходимое условие неустойчивости $J_1^2(\xi_0) + \xi_0 J_1(\xi_0) J_1'(\xi_0) < 0$, где $\xi_0 = k_{\perp} v_0 / \omega_{ci}$. Левая часть этого неравенства положительна при малых $\xi_0 \ll 1$ и достаточно большой скорости ореола. Минимальное пороговое значение соответствует $\xi_0 = 2.4$. Инкремент положителен, если характерная скорость ореола лежит в интервале $3.8\omega_{ci}/k_{\perp} > v_0 > 2.4\omega_{ci}/k_{\perp}$. Возмущения с характерным масштабом, соответствующим $k_{\perp} = k_{\perp}^{\max} = 3.1\omega_{ci}/v_0$, обладают максимальным инкрементом

$$\frac{\gamma^{\max}}{\omega_R} \approx 0.1 \frac{n_h}{n_i} \frac{1}{|k_{\parallel}| \rho_i}. \quad (9)$$

Наблюдения быстрых магнитозвуковых волн с такими свойствами обсуждались в работе [Hobara et al., 2007].

Резюме

В данной работе проведен анализ низкочастотной устойчивости немаксвелловской плазмы большого давления с учетом эффектов конечного ларморовского радиуса ионов в рамках полного кинетического рассмотрения. Показано, что перед фронтом околосредней ударной волны, где плазма состоит из сравнительно холодной (надепловой) фоновой компоненты солнечного ветра и ионного ореола, возможна генерация быстрых магнитозвуковых волн. Генерация возможна, когда средняя скорость ореола достаточно велика и лежит в диапазоне $3.8\omega_{ci}/k_{\perp} > v_0 > 2.4\omega_{ci}/k_{\perp}$. При этом ионный ореол оказывается неустойчивым, а перекачка энергии в волновые возмущения служит причиной его постепенного охлаждения. Отношение длины волны нарастающих колебаний к среднему ларморовскому радиусу ионного ореола должно иметь конечное значение. Рост амплитуды колебаний продолжается до тех пор, пока в игру не включатся эффекты дисперсионного расплывания пакета. Баланс дисперсии и нелинейности приводит к появлению стационарных уединенных волн (солитонов), форма которых зависит от знака дисперсии. Следует отметить, что форма солитонов, в случае быстрых магнитозвуковых волн, существенно зависит от деталей функции распределения фоновой плазмы. В частности, в максвелловской плазме дисперсия волн отрицательна,

т.е. фазовая скорость волн с ростом волнового числа уменьшается [Pokhotelov *et al.*, 2007a,b]. Стационарному состоянию нелинейных волн с таким законом дисперсии соответствует горб (вспучивание) магнитного поля. Это отличает рассмотренную неустойчивость от известной диамагнитной (зеркальной) неустойчивости, нелинейная стадия которой заканчивается образованием провалов (ям) магнитного поля [Pokhotelov *et al.*, 2002, 2008]. Другим характерным признаком, отличающим неустойчивость ионного ореола от диамагнитной (зеркальной) неустойчивости, является то, что для первой инкремент неустойчивости пропорционален числу резонансных протонов, а для второй он обратно пропорционален этому числу.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08–05–00617), МНТЦ и Программ Президиума РАН № 4 и ОНЗ РАН № 7.

Литература

- Hobara Y.S., Walker S.N., Balikhin M., Pokhotelov O.A., Dunlop M., Nilsson H., Rème H. Characteristics of terrestrial foreshock ULF waves: Cluster observations // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P.A07202 doi:10.1029/2006JA012142.
- Scholer M. Diffusive acceleration // “Collisionless Shocks in the Heliosphere: Reviews of Current Research”, American Geophysical Union, Washington D.C., 1985. V. 35. P.287–301.
- Shevchenko V.I., Galinsky V., Sagdeev R.Z., Winske D. Macro-scale instability of the ion shell distribution function in the divergent solar wind // *Phys. Plasmas.* 2004. V. 11. P.4290–4294.
- Thomsen M.F., Gosling J.T., Bame S.J., Russell C.T. Magnetic pulsations at the quasi-parallel hock // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P.957–962.
- Paschmann G., Sckopke N., Bame S.J., Asbridge J.R., Gosling J. T., Russell C.T., Greenstadt E.W. Association of low-frequency waves with suprathermal ions in the upstream solar wind // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. P.209–212.
- Pokhotelov O.A., Balikhin M.A., Onishchenko O.G., Walker S.N. Non-Maxwellian effects in magnetosonic solitons // *Planet. Space Sci.* 2007a. V. 55. P.2310–2314. doi:10.1016/j.pss.2007.019.
- Pokhotelov O.A., Onishchenko O.G., Balikhin M.A., Stenflo L., Shukla P.K. Magnetosonic solitons in space plasmas: dark or bright solitons // *J. Plasma Phys.* 2007b. V. 73. P.967–980. doi:10.1017/S0022377807006526.
- Pokhotelov O.A., Sagdeev R.Z., Balikhin M.A., Onishchenko O.G., Fedun V.N. Nonlinear mirror waves in non-Maxwellian space plasmas // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A04225 doi:10.1029/2007JA012642.
- Pokhotelov O.A., Treumann R.A., Sagdeev R.Z., Balikhin M.A., Onishchenko O.G., Pavlenko V.P., Sandberg I. Linear theory of the mirror instability in non-Maxwellian space plasmas // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P.1312 doi: 1029/2001JA009125.

Сведения об авторах

ПОХОТЕЛОВ Олег Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 499-254-88-05. E-mail: pokh@ifz.ru

ОНИЩЕНКО Олег Григорьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 499-254-88-05. E-mail: onish@ifz.ru

ION HALO AND GENERATION OF MHD WAVES DOWNSTREAM OF THE EARTH'S BOW SHOCK

O.A. Pokhotelov, O.G. Onishchenko

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The stability of isotropic ion velocity distribution (the ion halo) upstream the terrestrial bow shock is investigated. It is shown that previously obtained in the framework of MHD approximation stability condition is violated for perturbations with the wavelengths of the order of the ion Larmor radius. The instability that arises during this process may serve as the cause of generation of the fast magnetosonic wave in the solar wind plasma. A general dispersion relation is obtained and the excitation of the most growing perturbations is investigated. The theoretical results obtained are applied to interpretation of recent satellite data.

Keywords: Magnetosonic waves, shock waves, instability, ion velocity distribution.