Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 121–122.

УДК 533.951
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-121
Orcid 0000-0002-9373-6660

ПЕРЕСТАНОВОЧНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И СЦЕПЛЕНИЕ МГД-ВОЛН

А.В. Петращук, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
petrashchuk@iszf.irk.ru

INTERCHANGE INSTABILITY AND COUPLING OF MHD WAVES

A.V. Petrashchuk, D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
petrashchuk@iszf.irk.ru

Аннотация. Данный доклад посвящен исследованию перестановочных (желобковых) мод в дипольной магнитосфере. Возмущения плазмы и магнитного поля описываются системой волновых уравнений для сцепленных альфвеновских волн и медленных магнитозвуковых волн. Граничные условия на ионосфере предполагают низкую проводимость ионосферной плазмы. В этом случае могут возникать возмущения нулевой гармоники, когда силовая линия перемещается как единое целое. Неустойчивые решения для данной задачи соответствуют перестановочной моде.

Ключевые слова: Перестановочная неустойчивость, медленный магнитный звук, альфвеновский резонанс.

Abstract. This report is devoted to the study of interchange modes in the dipole magnetosphere. Disturbances of the plasma and magnetic field are described by a system of wave equations for coupled Alfvén waves and slow magnetosonic waves. The boundary conditions at the ionosphere assume low conductivity of the ionospheric plasma. In this case, zero-harmonic disturbances may arise when the field line moves as a single entity. Unstable solutions to this problem correspond to interchange instability.

Keywords: Interchange modes, slow magnetosonic wave, Alfvén resonance.

ВВЕДЕНИЕ

Перестановочная неустойчивость возникает в плазме, если в ней присутствуют резкие градиенты давления, направленные вдоль кривизны силовых линий магнитного поля [Кадомцев, 1963; Загородний, Черемных, 2014]. Данная неустойчивость напоминает конвективную неустойчивость в нейтральном газе, возникающую под действием гравитации, только роль силы тяжести в этом случае выполняет натяжение магнитных силовых линий. Такая неустойчивость может возникнуть для азимутально-малых возмущений, у которых азимутальный пространственный масштаб λ_a существенно меньше как радиального масштаба λ_r [Cheremnykh, Danilova, 2011; Petrashchuk et al., 2025], так и параллельного масштаба $\lambda_\parallel$. Подобные возмущения могут наблюдаться в магнитосфере Земли [Dai et al., 2013; Chelpanov et al., 2016; Mager, 2021; Rubtsov et al., 2021; Mikhailova et al., 2022].

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Работа посвящена теоретическому исследованию пространственной структуры неустойчивостей на сцепленных МГД-модах в двумерно-неоднородной модели магнитосферы Земли. Для реализации этой цели поставлены две задачи:

1. Исследовать продольную структуру собственных функций, сцепленных альфвеновских волн и медленных магнитозвуковых (ММЗ) мод в неустойчивом режиме.

2. Определить, при каких значениях плазменного давления развивается перестановочная неустойчивость для нулевой гармоники.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ

В работе исследуется дипольная модель магнитного поля Земли. Эта модель характеризуется азимутальной симметрией, что значительно упрощает математическое описание волновых процессов. В свою очередь, данная модель позволяет использовать систему уравнений для совместного описания сцепленных альфвеновских и медленных магнитозвуковых (ММЗ) мод с заданной частотой ω. Соответствующая система уравнений имеет вид [Klimushkin, 1998]

$$\left[\frac{\partial}{\partial l_\parallel}\frac{k_r^2+k_a^2}{B}\frac{\partial}{\partial l_\parallel}+\frac{k_r^2+k_a^2}{B}\frac{\omega^2}{V_A^2}-\frac{k_a^2}{B}\frac{\beta}{RD}\right]\Phi = 4\pi\gamma P\frac{k_a}{B^2}\frac{\omega}{R}\Theta, \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial l_\parallel}\frac{V_S^2}{B}\frac{\partial}{\partial l_\parallel}+\frac{\omega^2}{B}\frac{V_S^2}{V_C^2}\right]\Theta = 4\pi\gamma P\frac{k_a}{B^2}\frac{\omega}{R}\Phi, \quad (2)$$

k_r и k_a — радиальная и азимутальная составляющие волнового вектора; γ — показатель адиабаты; β — отношение плазменного давления P к магнитному; D — характерный радиальный масштаб неоднородности; B — равновесное магнитное поле; R — локальная кривизна силовой линии; $\partial l_\parallel$ — элемент длины силовой линии; Φ — электрический потенциал альфвеновской волны; Θ — величина, пропорциональная дивергенции смещения (отвечает за ММЗ-моду); V_A, V_S и V_C — альфвеновская, звуковая и касповая скорости.

Граничные условия на ионосфере соответствуют случаю низкой проводимости и и высокой плотности плазмы. При таких условиях величины Φ и Θ принимают вид

$$\frac{\partial \Phi}{\partial l_{\parallel}} = 0 \text{ и } \frac{\partial \Theta}{\partial l_{\parallel}} = 0.$$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Уравнения (1) и (2) могут быть представлены в виде задачи на собственные значения. В этом случае собственным значением служит отношение радиальной компоненты к азимутальной составляющей k_r/k_a при заданных ω и L.

Численные расчеты выполнены для геостационарной орбиты $L=6.6$. В модели предполагается, что давление плазмы $P = (B_{eq}^2/8\pi)\beta_{eq}$ остается постоянным вдоль силовых линий магнитного поля. При этом радиальный градиент $\partial P/\partial L$ отрицателен. Это соответствует ситуации, когда давление плазмы уменьшается с удалением от Земли, что является необходимым и достаточным условием для развития перестановочной неустойчивости. На основе проведенных расчетов становится возможным определить соответствующие собственные векторы Φ и Θ системы (1) и (2), а также собственные значения k_r/k_a.

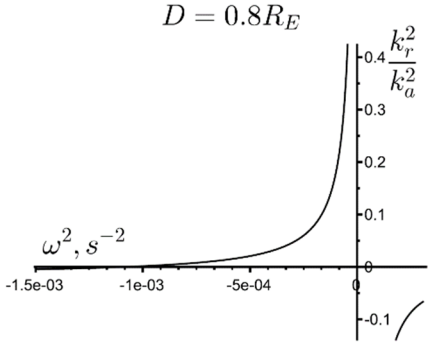

Рис. 1. Отношение k_r/k_a для нулевой гармоники в зависимости от ω

Условие возникновения перестановочной неустойчивости выражается через связь между двумя ключевыми параметрами β и D. Критический порог соответствует предельному случаю k_r=0, что физически означает отсутствие возмущений. Перестановочная неустойчивость развивается при умеренном градиенте давления [Cheremnykh, Danilova, 2011]. Для сравнения — баллонная неустойчивость в этом случае возникает даже при нулевом давлении, что указывает на принципиально иные физические причины ее возникновения.

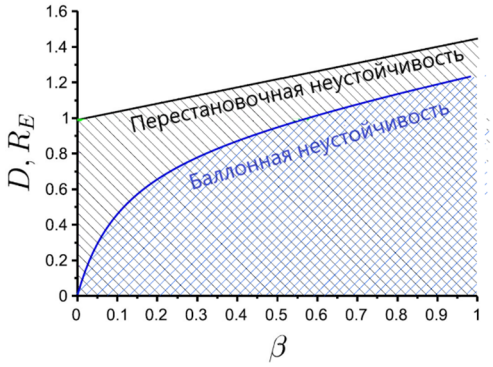

Рис. 2. Зависимость масштаба радиальной неоднородности давления плазмы D от β на экваторе. Область неустойчивости расположена ниже соответствующих кривых.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кадомцев Б.Б. Вопросы теории плазмы. 1963. Вып. 2. С. 175.

Загородний А.Г., Черемных О.К. Введение в физику плазмы. Киев: Наукова думка, 2014. С. 696.

Dai L., Takahashi J.R, Wygant L., et al. Excitation of poloidal standing Alfvén waves through drift resonance wave-particle interaction // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40, P. 4127–4132.

Klimushkin D.Yu. Theory of azimuthally small-scale hydromagnetic waves in the axisymmetric magnetosphere with finite plasma pressure // Ann. Geophys. 1998. V. 16. P. 303–321.

Cheremnykh O.K., Danilova V.V. Transversal small-scale MHD perturbations in space plasma with magnetic surfaces // Kinematics Phys. Celestial Bodies. 2011. V 27. P. 98–108.

Petrashchuk A.V., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Interchange modes in the dipole magnetosphere: The finite transverse wavelength influence // Phys. Plasmas. 2025. V. 32, 112902. DOI: 10.1063/5.0292537.

Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., et al. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 1315–1326.

Rubtsov A.V., Mikhailova O.S., Mager P.N. et al. Multi-spacecraft observation of the pre-substorm long-lasting poloidal ULF wave // Geophys. Res. Lett. 2021. V. 48, e2021GL096182.

Mager O.V. Alfvén waves generated through the drift-bounce resonant instability in the ring current: A THEMIS multi-spacecraft case study // J. Geophys. Res. 2021. V. 126, N 11, e29241.

Mikhailova O.S., Smotrova E.E., Mager P.N. Resonant generation of an Alfvén wave by a substorm injected electron cloud: A Van Allen Probe case study // Geophys. Res. Lett. 2022. V. 49, N 19, e2022GL100433.