

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН ПО ФАЗОВОМУ СДВИГУ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Власов А.А., Леонович А.С., Козлов Д.А.,
ИСЗФ СО РАН

Иркутск, 2022

Введение

Виды МГД-колебаний:

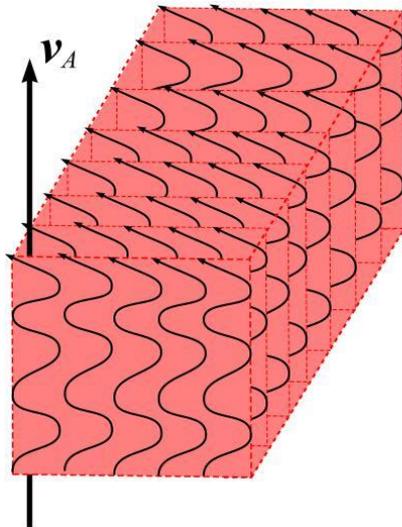
- Альфвеновская волна (а)
- Быстрый магнитный звук (БМЗ, b)
- Медленный магнитный звук (ММЗ, c)

$$\omega^2 = k_{\parallel}^2 v_A^2 \quad v_s = \sqrt{\bar{\gamma} p_0 / \rho_0}$$

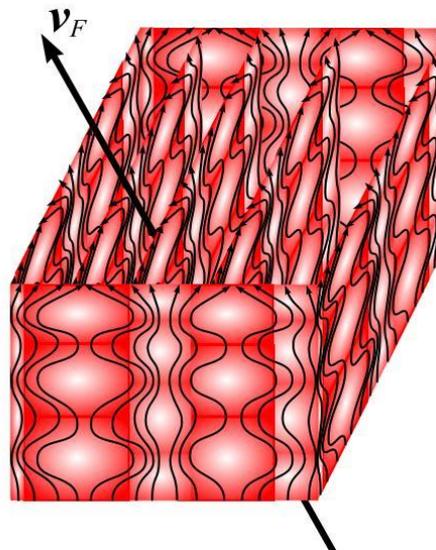
$$\omega^2 = k^2 v_A^2 \quad v_A = B_0 / \sqrt{4\pi\rho_0}$$

$$\omega^2 \approx k_{\parallel}^2 c_s^2 \quad c_s = v_A v_s / \sqrt{v_A^2 + v_s^2}$$

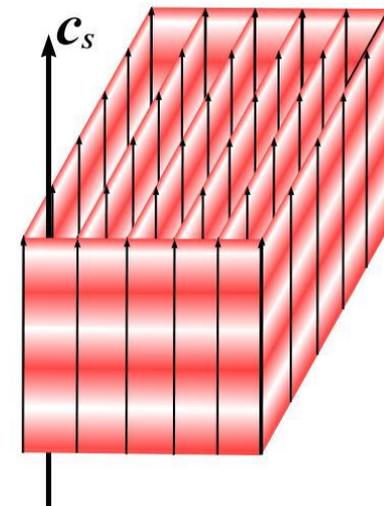
a



b



c



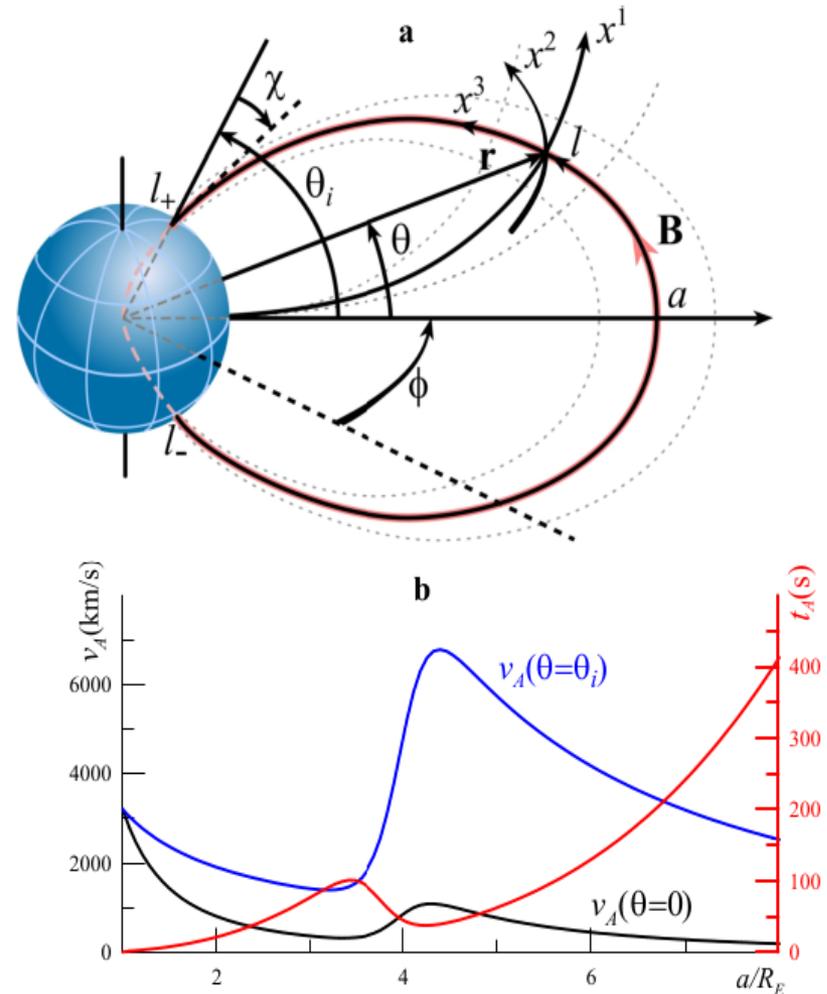
Проблематика

- Существует несколько способов определить тип наблюдаемых геомагнитных колебаний, среди которых можно выделить: **1)** наличие/отсутствие определённой компоненты электромагнитного поля. **2)** соотношение между поперечной и продольной компонентой магнитного поля. **3)** наличие/отсутствие возмущения давления и.т.д.
- Однако те же альфвеновские волны имеют очень разнообразную мелкомасштабную структуру в направлении поперёк магнитных оболочек. Для определения такой структуры метод **«фазовых портретов»** и предлагается.

Модель среды

Введём ортогональную систему координат x_1, x_2, x_3 и неортогональную a, φ, θ . В ней x_1 направлена поперёк магнитных оболочек, x_3 – вдоль магнитной силовой линии, а x_2 дополняет систему координат до правосторонней

$$t_A(a) = 2 \int_0^{\theta_i} \frac{\sqrt{g_\theta(a, \theta)} d\theta}{v_A(a, \theta)},$$



Основные уравнения

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = i \frac{\omega}{c} \mathbf{B}; \quad \operatorname{rot} \mathbf{B} = -i \frac{\omega}{c} \hat{\varepsilon} \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E}_{\perp} = -\nabla_{\perp} \varphi + [\nabla_{\perp} \times \mathbf{\Psi}]. \quad \mathbf{\Psi} = (0, 0, \psi)$$

$$E_1 = -\nabla_1 \varphi + ik_2 \frac{g_1}{\sqrt{g}} \psi, \quad E_2 = -ik_2 \varphi - \frac{g_2}{\sqrt{g}} \nabla_1 \psi,$$

$$E_3 \approx ik_3 \Lambda^2 \Delta_{\perp} \varphi,$$

$$B_1 = \frac{c}{\omega} \frac{g_1}{\sqrt{g}} \nabla_3 \left(k_2 \varphi - i \frac{g_2}{\sqrt{g}} \nabla_1 \psi \right), \quad B_2 = \frac{c}{\omega} \frac{g_2}{\sqrt{g}} \nabla_3 \left(i \nabla_1 \varphi + k_2 \frac{g_1}{\sqrt{g}} \psi \right)$$

$$B_3 = i \frac{c}{\omega} \frac{g_3}{\sqrt{g}} \left(\nabla_1 \frac{g_2}{\sqrt{g}} \nabla_1 \psi - k_2^2 \frac{g_1}{\sqrt{g}} \psi \right).$$

Разность фаз между компонентами электромагнитного поля

- Скалярный потенциал для альфвеновской волны можно представить в следующем виде:

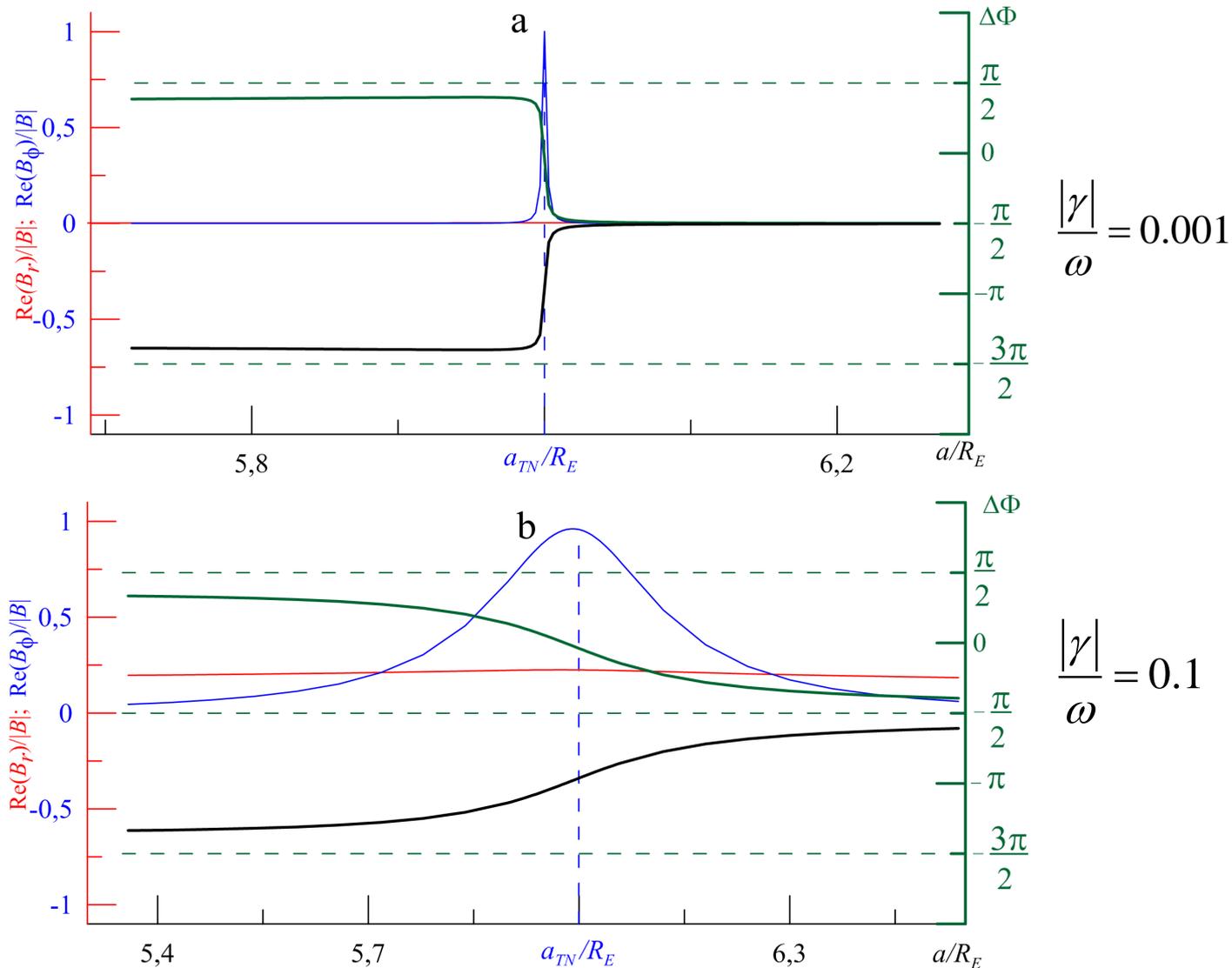
$$\varphi(x^1, x^3, k_2, \omega) = U(x^1, \omega)H(x^1, x^3, \omega)e^{ik_2x^2 - i\omega t}$$

- Разность фаз:

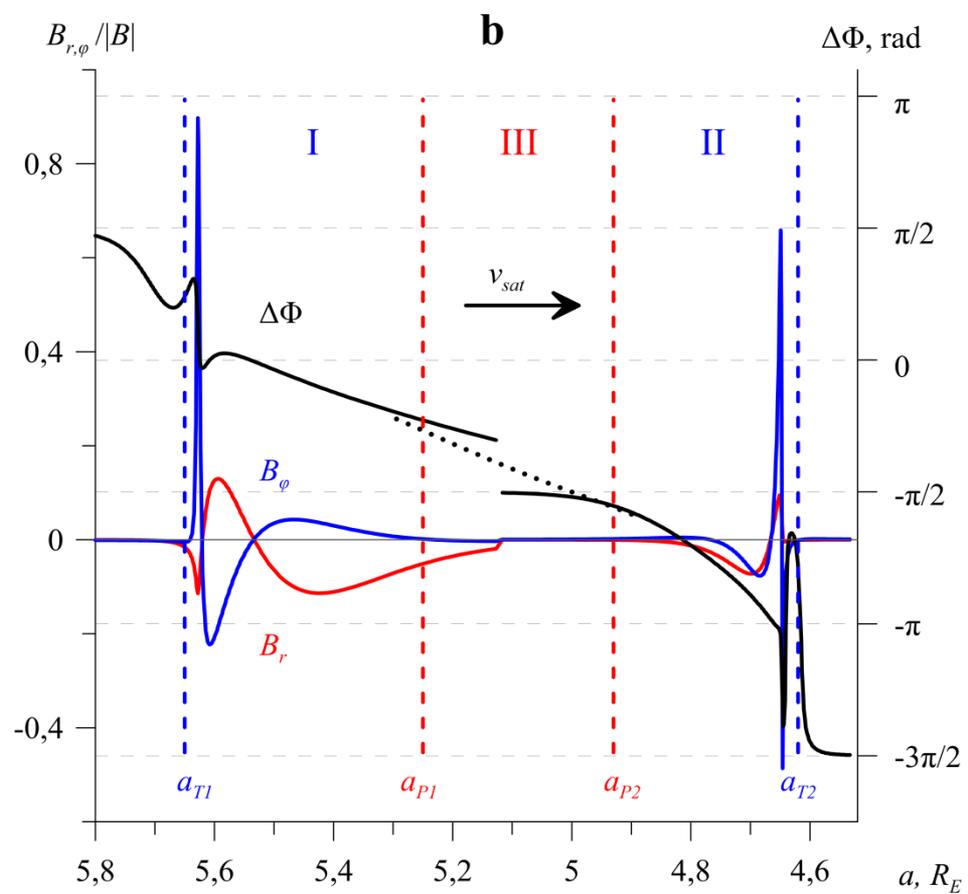
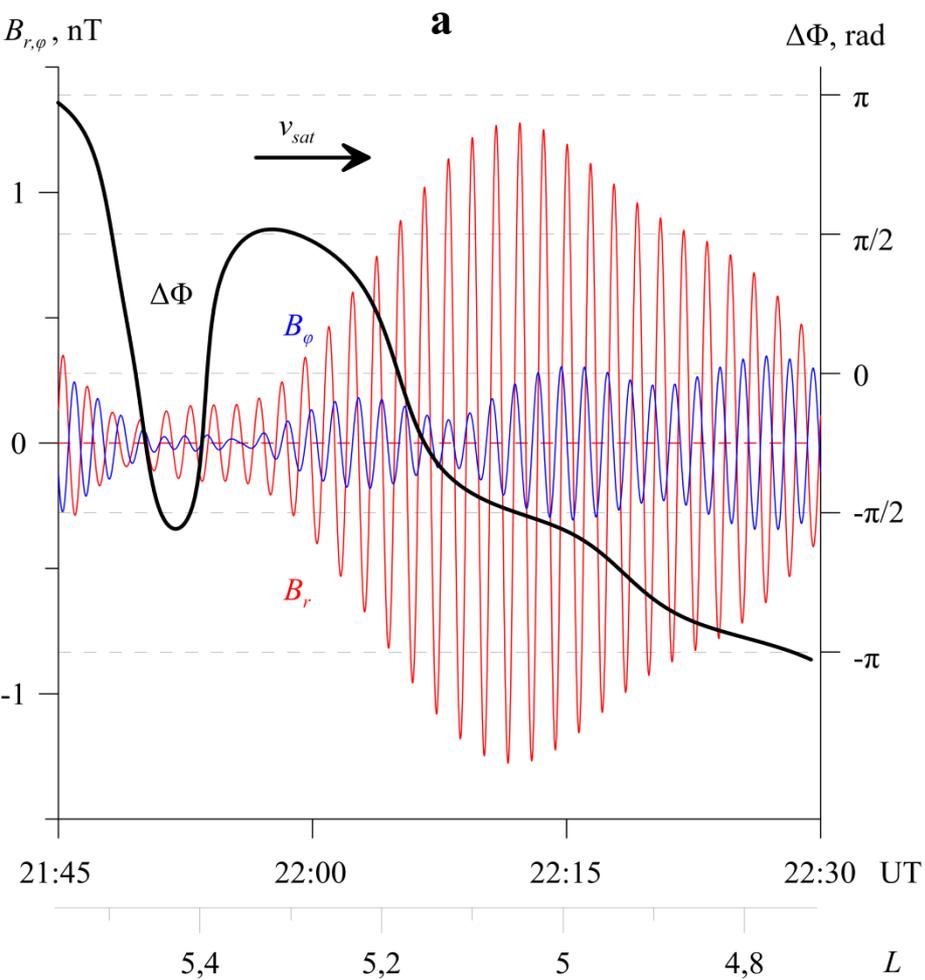
$$\tan \tilde{\Delta}\Phi = \frac{\text{Im}(E_r/E_\phi)}{\text{Re}(E_r/E_\phi)}. \quad \tan \tilde{\Delta}\Phi = \frac{\text{Im}(B_\phi/B_r)}{\text{Re}(B_\phi/B_r)}.$$

$$\Delta\Phi(x^1, \omega) = -\arctan \frac{\text{Re} \left[\nabla_1 U(x^1, \omega) / U(x^1, \omega) \right]}{\text{Im} \left[\nabla_1 U(x^1, \omega) / U(x^1, \omega) \right]}$$

Диссипативная тороидальная альфвеновская волна



Применение метода на примере события 23 октября 2012 года



Заключение

- Разработан метод фазовых портретов для альфвеновских волн, который позволяет однозначно определить поперечную структуру монохроматических альфвеновских волн, а также их разновидность.
- Данный метод потенциально может облегчить анализ геомагнитных пульсаций, наблюдаемых в магнитосфере Земли.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**

Статьи

- Dai, L., Takahashi, K., Wygant, J. R., Chen, L., Bonnell, J. W., Cattell, C. A., Spence, H. E. (2013). Excitation of poloidal standing Alfvén waves through drift resonance wave-particle interaction. *Geophysical Research Letters*, 40, 4127-4132. (первое описание события 23 октября 2012 года)
- Leonovich, A. S., Klimushkin, D. Y., & Mager, P. N. (2015). Experimental evidence for the existence of monochromatic transverse small-scale standing Alfvén waves with spatially dependent polarization. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, 5443 – 5454 (дальнейшая интерпретация)
- Leonovich, A. S., Kozlov, D. A., & Vlasov, A. A. (2021, Oct). Kinetic Alfvén waves near a dissipative layer. *J. Geophys. Res. (Space Physics)*, 126 (10), e29580. doi: 10.1029/2021JA029580

Приложение 1. Разность фаз между компонентами электромагнитного поля

$$B_r \equiv B_1/\sqrt{g_1} = |B_r| \exp(i\Phi_r), \quad B_\phi \equiv B_2/\sqrt{g_2} = |B_\phi| \exp(i\Phi_\phi).$$

$$\frac{B_\phi}{B_r} = \left| \frac{B_\phi}{B_r} \right| e^{i \arg(B_\phi/B_r)} = \frac{|B_\phi|}{|B_r|} \left[\cos(\tilde{\Delta}\Phi) + i \sin(\tilde{\Delta}\Phi) \right]$$

$$\tilde{\Delta}\Phi \equiv \arg(B_\phi/B_r) = \Phi_\phi(x) - \Phi_r(x)$$

$$\tan \tilde{\Delta}\Phi = \frac{\operatorname{Im}(E_r/E_\phi)}{\operatorname{Re}(E_r/E_\phi)}, \quad \tan \tilde{\Delta}\Phi = \frac{\operatorname{Im}(B_\phi/B_r)}{\operatorname{Re}(B_\phi/B_r)}.$$