

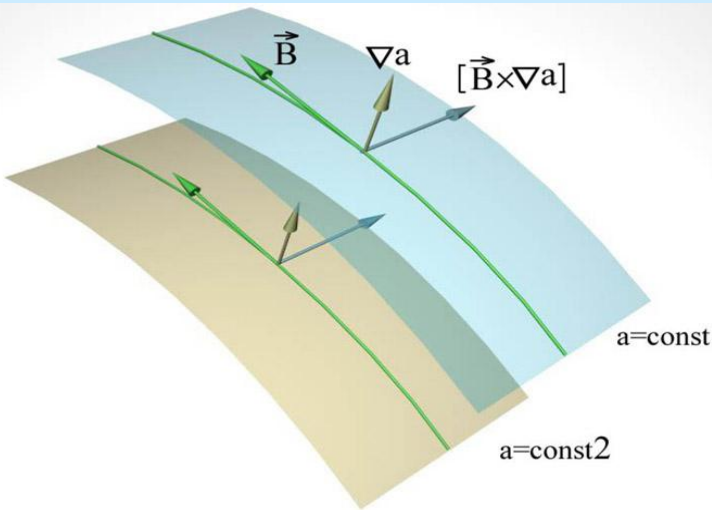


МГД-возмущения магнитосферной плазмы УНЧ-диапазона

Олег Черемных
Алексей Парновский

Институт космических исследований, Киев, Украина

Исходные уравнения



$$\mathbf{B} \cdot \nabla a = 0, \mathbf{j} \cdot \nabla a = 0, \text{div} \mathbf{B} = 0$$

$$p = \frac{1}{c} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] \Rightarrow [\nabla p \times \nabla a] = 0 \Rightarrow p = p(a)$$

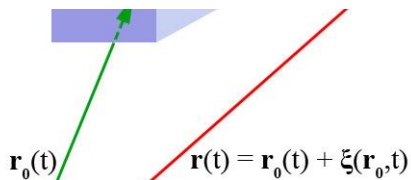
Малые возмущения:

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{\xi}}{\partial t^2} = -\nabla \delta p + \frac{1}{c} [\delta \mathbf{j} \times \mathbf{B}] + \frac{1}{c} [\mathbf{j} \times \delta \mathbf{B}],$$

$$\delta \rho = -\text{div}(\rho \boldsymbol{\xi}), \delta p = -\boldsymbol{\xi} \cdot \nabla p - \gamma p \text{div} \boldsymbol{\xi},$$

$$\delta \mathbf{B} = \text{rot}[\boldsymbol{\xi} \times \mathbf{B}], \delta \mathbf{j} = \frac{c}{4\pi} \text{rot} \delta \mathbf{B}, \text{div} \delta \mathbf{B} = 0$$

Cheng and Chance (1986)



$$\boldsymbol{\xi} = \xi \frac{\nabla a}{|\nabla a|^2} + \eta \frac{[\mathbf{B} \times \nabla a]}{|\mathbf{B}|^2} + \tau \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2}$$

Уравнения малых возмущений в дипольной геометрии

$$\rho \frac{\omega^2}{|\nabla\psi|^2} \xi + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla\psi|^2} \mathbf{B} \cdot \nabla \xi \right) + 2(\delta p_1 + p' \xi + \gamma p \operatorname{div} \xi) \frac{\boldsymbol{\chi} \cdot \nabla \psi}{|\nabla\psi|^2} = \frac{\nabla\psi \cdot \nabla \delta p_1}{|\nabla\psi|^2}$$

$$\rho \frac{\omega^2}{\alpha_s} \eta + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\alpha_s} \mathbf{B} \cdot \nabla \eta \right) = \frac{[\mathbf{B} \times \nabla\psi] \cdot \nabla \delta p_1}{|\mathbf{B}|^2},$$

$$\rho \omega^2 \tau + \gamma p \mathbf{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \xi = 0,$$

штрих означает производную по ψ

Уберем БМЗ, положив $\delta p_1 = 0$

$$\operatorname{div} \xi = \frac{1}{1 + \beta} \left\{ \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\tau}{|\mathbf{B}|^2} \right) - \frac{2\boldsymbol{\chi} \cdot \nabla \psi}{|\nabla\psi|^2} \xi \right\}, \quad \beta = \frac{\gamma p}{|\mathbf{B}|^2}$$

Уравнения малых возмущений в дипольной геометрии

Полученные точные уравнения

$$\rho \frac{\omega^2 \xi}{|\nabla \psi|^2} + \mathbb{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla \psi|^2} \mathbb{B} \cdot \nabla \xi \right) + 2 \frac{\mathbb{X} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \left[p' \xi + \frac{\gamma p}{1 + \beta} \left\{ \mathbb{B} \cdot \nabla \left(\frac{\tau}{|\mathbb{B}|^2} \right) - \frac{2 \mathbb{X} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \xi \right\} \right] = 0,$$

$$\rho \frac{\omega^2 \tau}{|\mathbb{B}|^2} + \beta \mathbb{B} \cdot \nabla \left[\frac{1}{1 + \beta} \left\{ \mathbb{B} \cdot \nabla \left(\frac{\tau}{|\mathbb{B}|^2} \right) - \frac{2 \mathbb{X} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \xi \right\} \right] = 0,$$

$$\rho \frac{\omega^2}{\alpha_s} \eta + \mathbb{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\alpha_s} \mathbb{B} \cdot \nabla \eta \right) = 0$$

полностью идентичны уравнениям, полученным в баллонном приближении

Собственные моды

$$\xi = 0 \quad \frac{[\mathbf{B} \times \nabla \Psi]}{|\mathbf{B}|^2} \cdot \nabla \eta = 0$$

$$\tau = 0$$

Cheng et al. (1993)

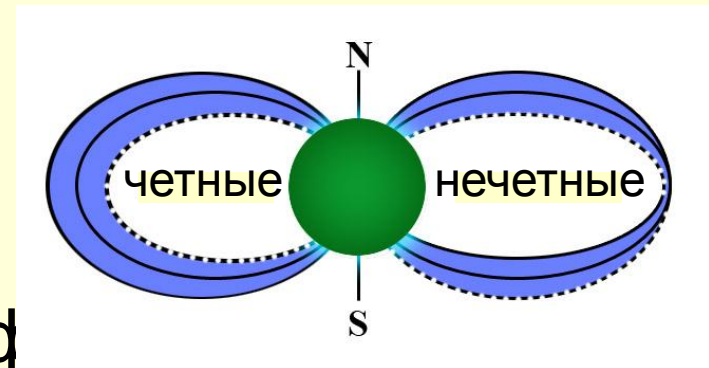
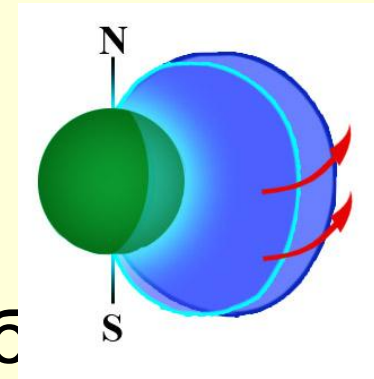
ТАМ – это обычные торсионные колебания магнитной поверхности альфвеновского типа

$$\eta = 0$$

$$\operatorname{div} \left(\xi \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^2} \right) + \frac{2}{1 + \beta} \frac{\chi \cdot \nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^2} \xi + \frac{\beta}{1 + \beta} \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\tau}{|\mathbf{B}|^2} \right) = 0$$

Черемных и др. (2001)

ПАМ – это компрессионные альфвеновские колебания с зацеплением – через радиальную кривизну



Гран. условия на ионосфере

Hameiri and Kivelson (1991)

Hameiri (1999)

Cheremnykh and Parnowski (2004)

- Малые параметры:

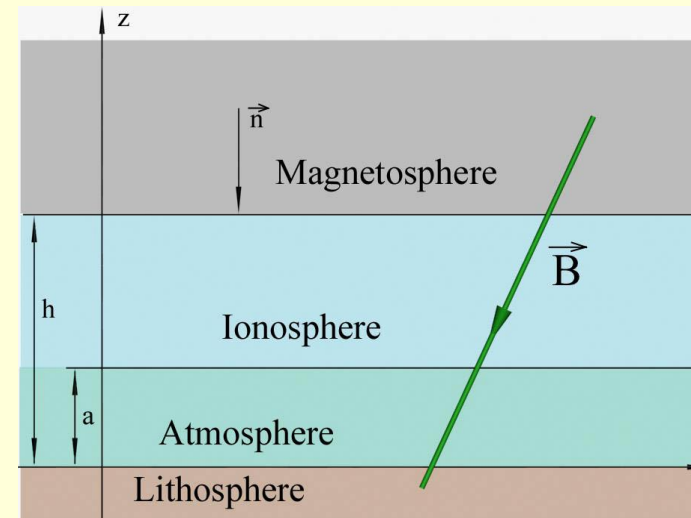
$$a/\lambda_{\parallel} \sim 10^{-1}, \sigma_{\perp}/\sigma_{\parallel} \sim 10^{-4}$$

- Замыкание магнитосферных токов в ионосфере:

$$\sum_M \cdot \vec{n} \Big|_b = \nabla_S \left(s \cdot s \right) \Big|_b$$

- Отсутствие возмущений в атмосфере:

$$\xi \cdot \vec{n} \Big|_b = 0$$



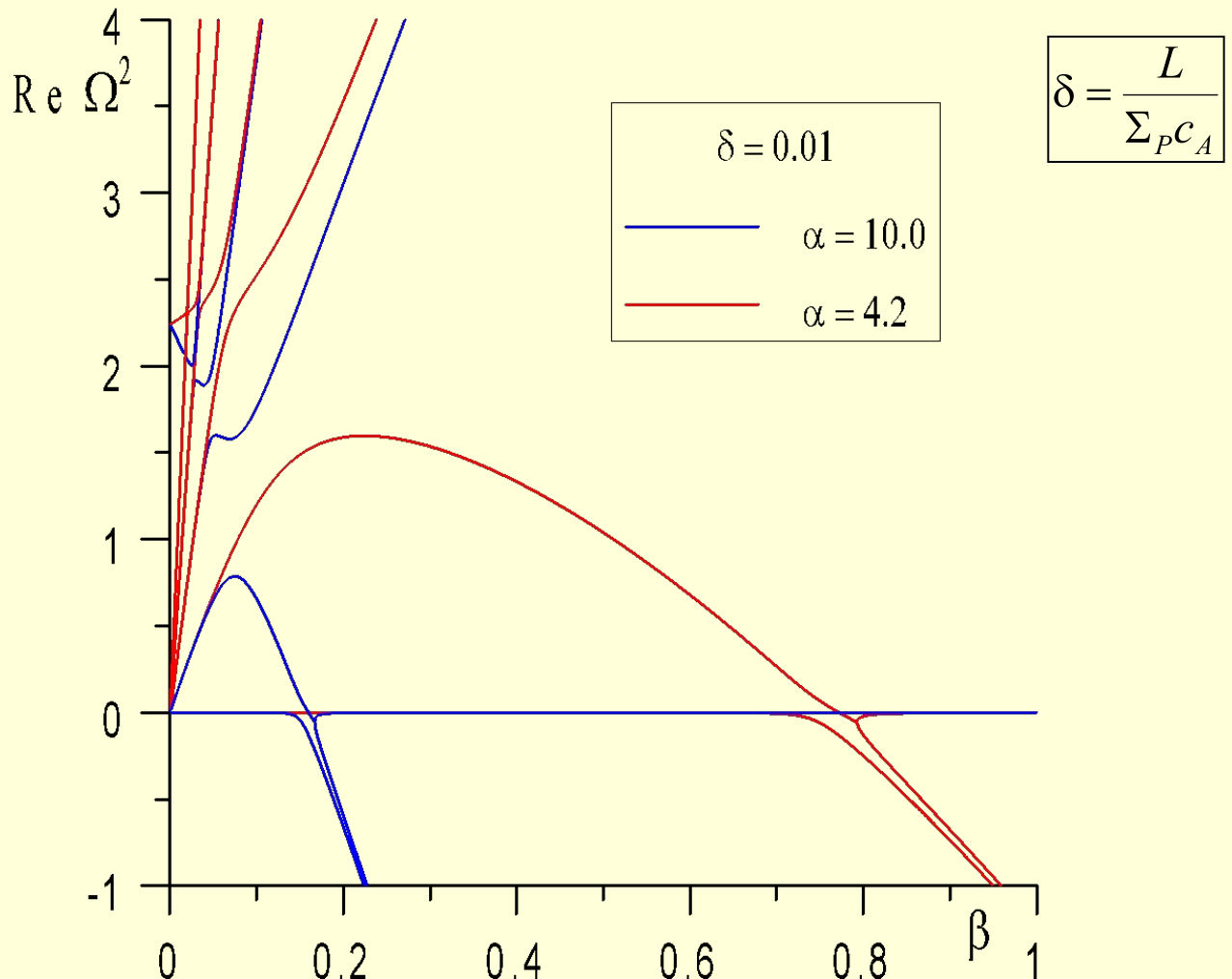
Индексы:

M – в магнитосфере

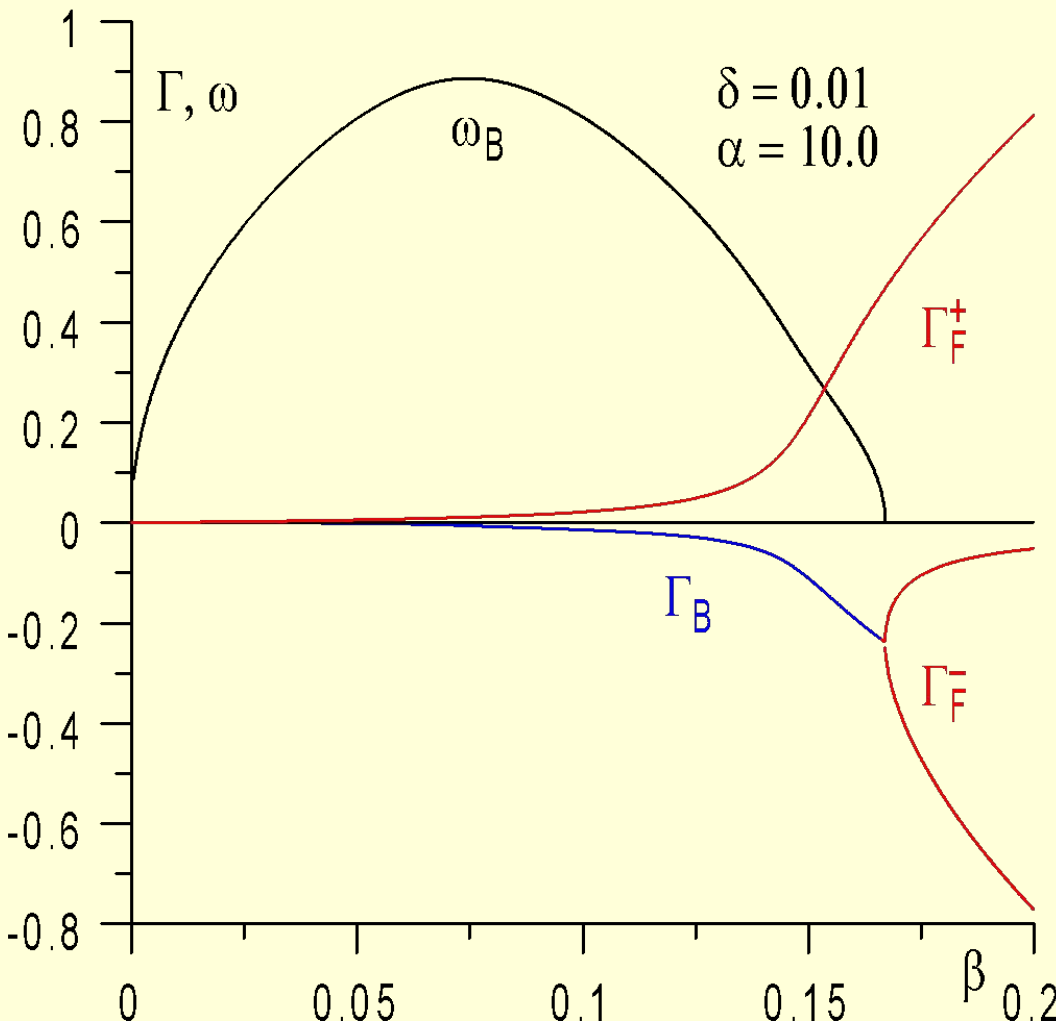
b – на границе

S – на поверхности

Спектр собственных мод



Желобковая неустойчивость (полдень)



Цвета:

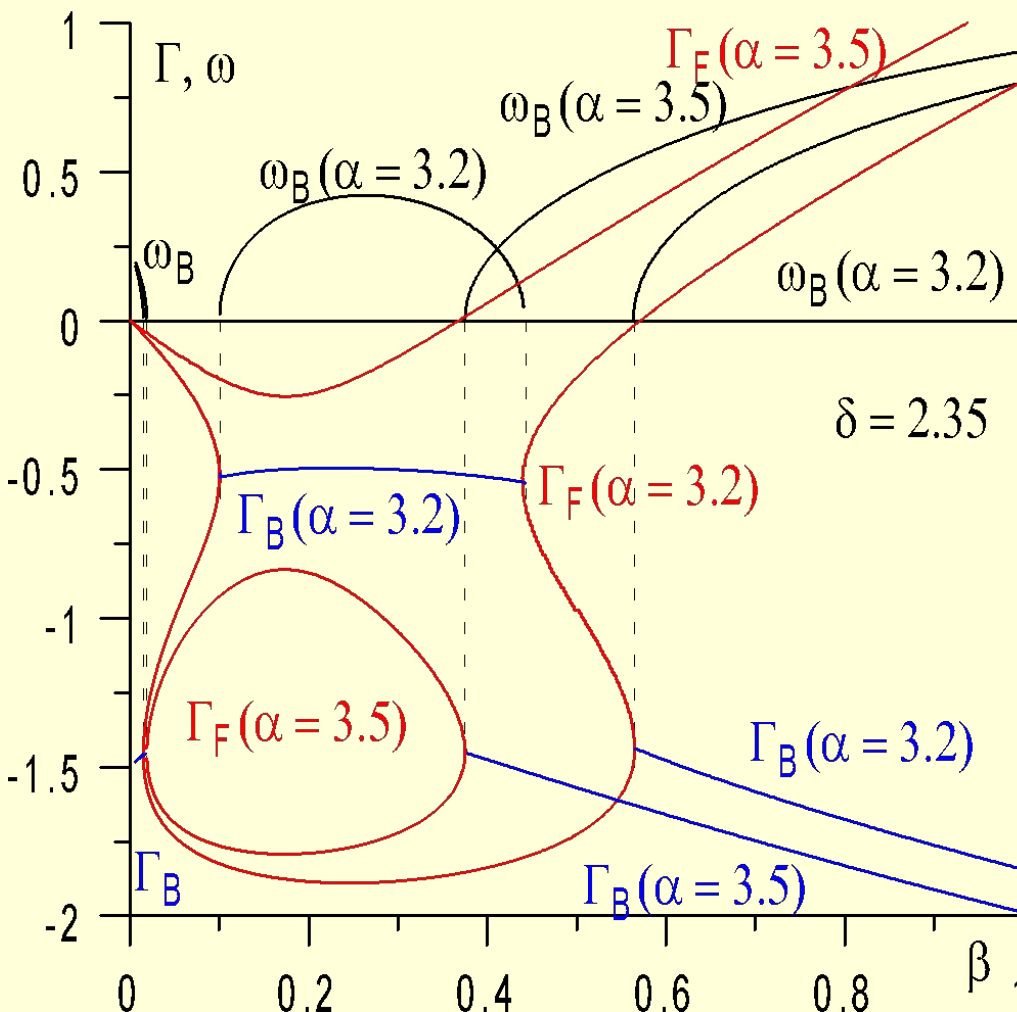
Черный = частота

Синий = инкремент
при $\omega \neq 0$

Красный = инкремент
при $\omega = 0$

Желобковая мода
всегда неустойчива,
но при $\beta < 0.14$ ей
можно пренебречь

Желобковая неустойчивость (утро/вечер)



Цвета:

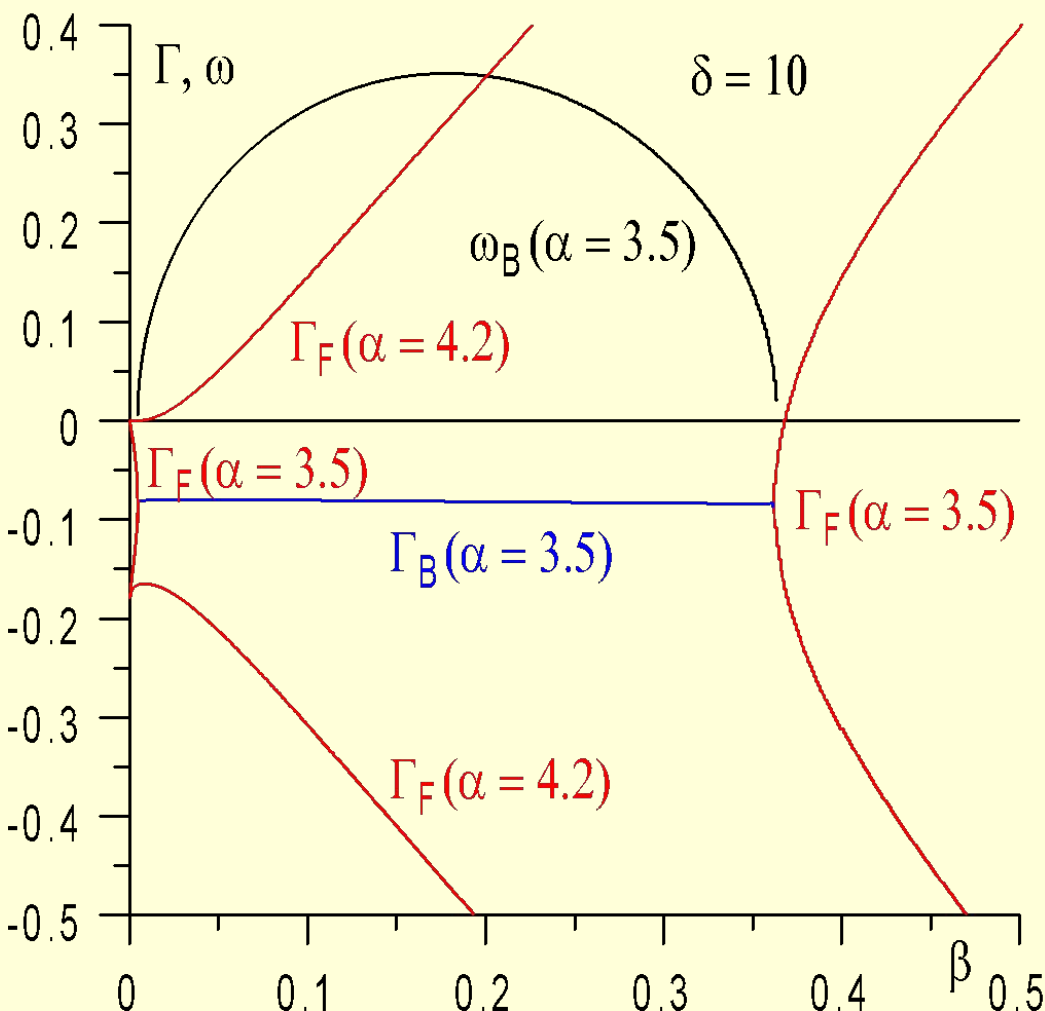
Черный = частота

Синий = инкремент
при $\omega \neq 0$

Красный = инкремент
при $\omega = 0$

Значение $\alpha \sim 3.3$
является критическим
и разделяет два
разных решения

Желобковая неустойчивость (полночь)



Цвета:

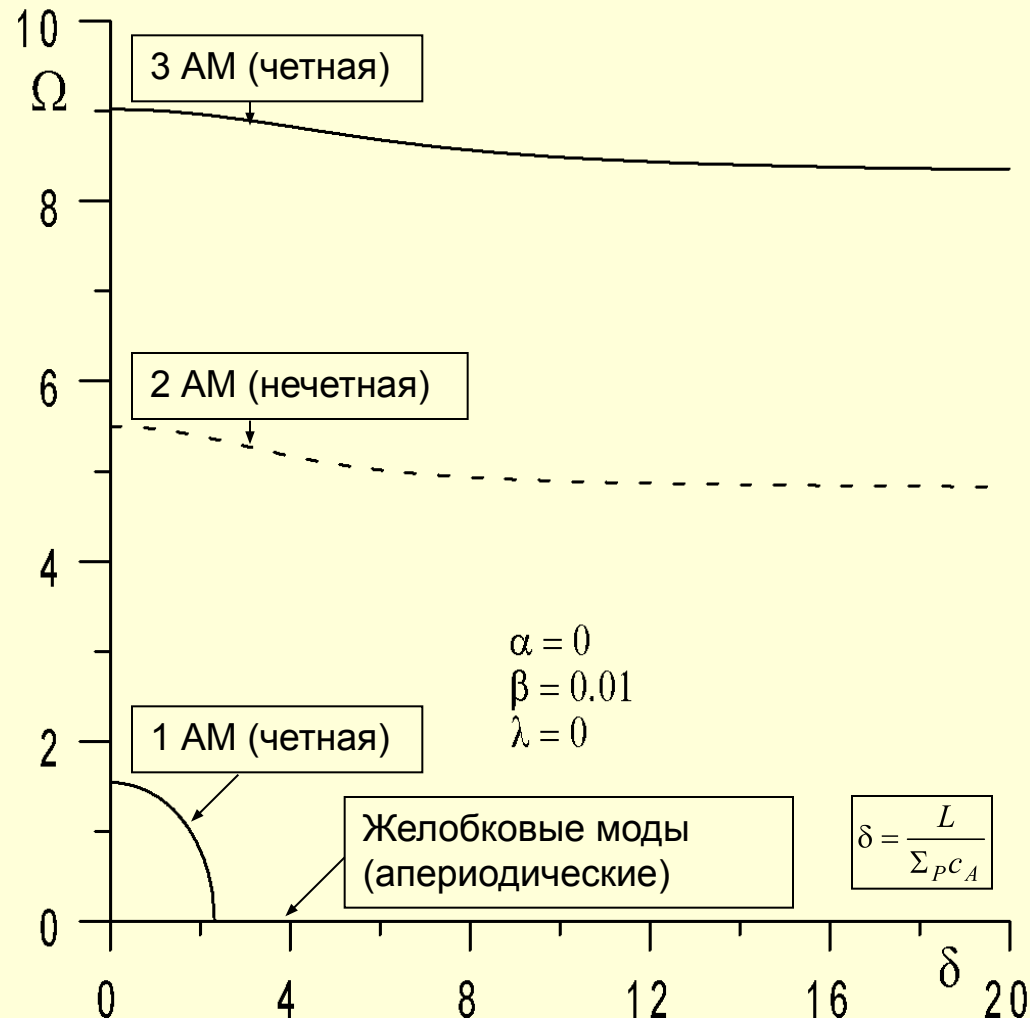
Черный = частота

Синий = инкремент
при $\omega \neq 0$

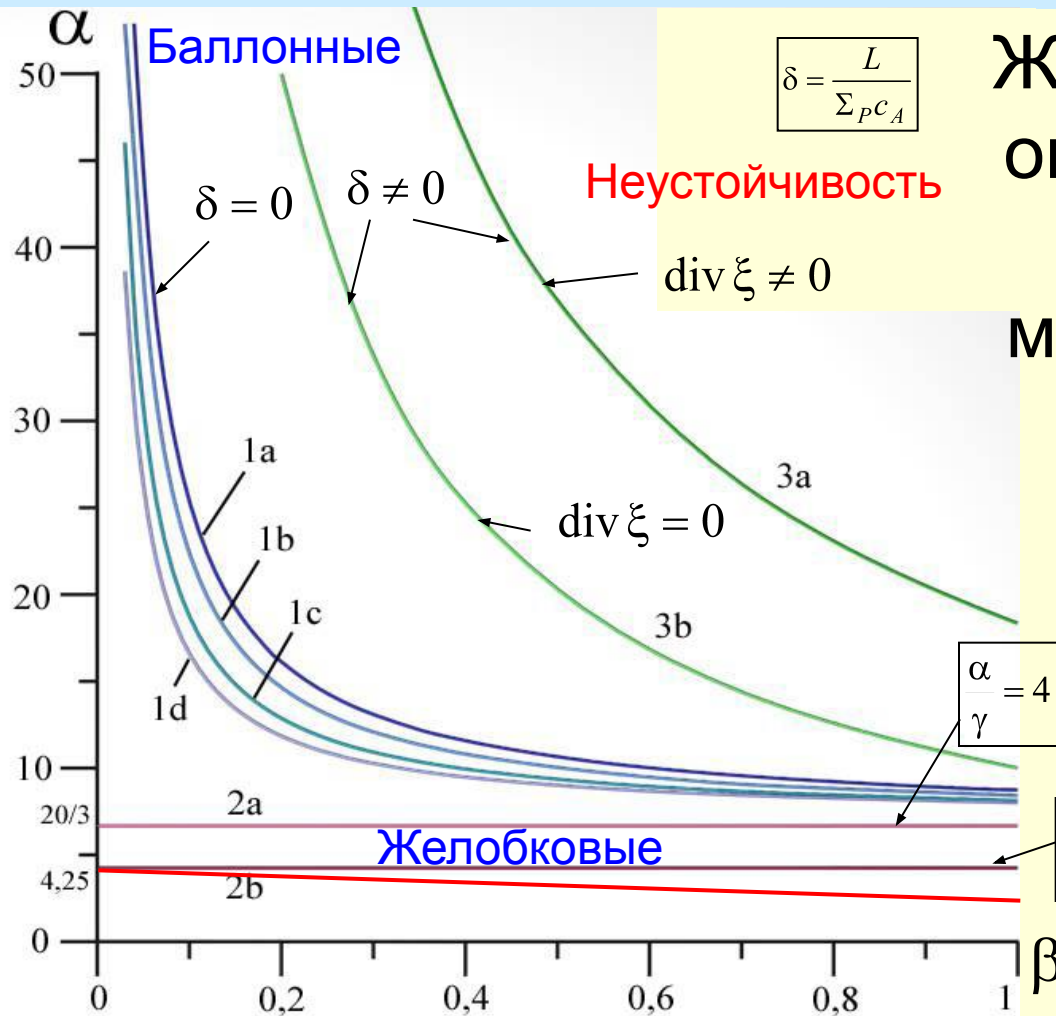
Красный = инкремент
при $\omega = 0$

При $\alpha > 4$ частота
всегда равна нулю

Желобковая неустойчивость



Границы устойчивости



Желобковые возмущения определяют общую МГД-устойчивость магнитосферной плазмы при любой конечной ионосферной проводимости

$$\xi \sim \text{const} + \frac{\Gamma}{\delta} f(x)$$

Желобковая неустойчивость

День (высокая проводимость): $\Gamma_D \sim \delta \sim \Sigma_P^{-1}$

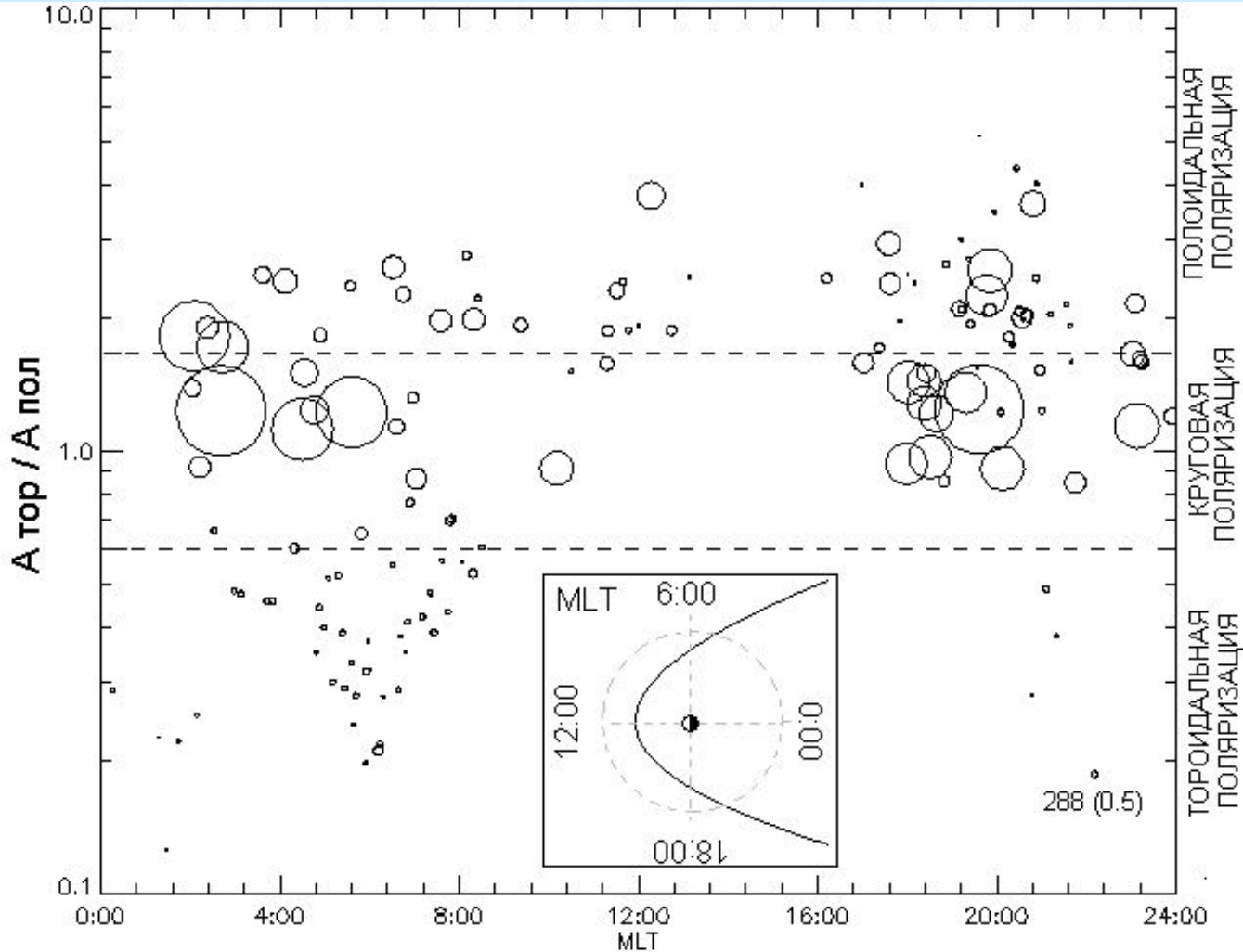
Ночь (низкая проводимость): $\Gamma_N \sim \delta^{-1} \sim \Sigma_P, \Gamma_D \sim \Gamma_N$

Слабая волновая активность

Утро/вечер (средняя проводимость): $|\Gamma| \gg |\Gamma_D|, |\Gamma_N|$

Сильная волновая активность

AMPTE/CSE



Выводы

- Спектральная мощность магнитосферных МГД-возмущений в УНЧ диапазоне сильно зависит от интегральной проводимости ионосферы, причем немонотонно с максимумами в утреннем и вечернем секторах, что согласуется с наблюдениями на КА.
- Наряду с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, представляется разумной гипотеза о генерации таких возмущений солнечным УФ терминатором в ионосфере.

Благодарности

Мы благодарим А.В. Агапитова и С.О. Черемных за весомый вклад в представленные результаты.

Мы благодарим А.С. Леоновича, В.А. Пилипенко и Д. Ю. Климушкина за ценные обсуждения.

Мы благодарим руководителей проектов INTERMAGNET, AMPTE/CSE, AMPTE/IRM за открытый бесплатный доступ к данным и высокие стандарты качества данных.

И, конечно, мы

Благодарим вас за внимание!