

Особенности возбуждения волн электростатического ионно- циклотронного типа в авроральной ионосфере

*Чернышов А.А.⁽¹⁾ Ильясов А.А.^(1,2) Могилевский М.М.⁽¹⁾
Головчанская И.В.⁽³⁾ Козелов Б.В.⁽³⁾*

(1) Институт космических исследований РАН

(2) Московский физико-технический институт (ГУ)

(3) Полярный геофизический институт КНЦ РАН

Широкополосная электростатическая турбулентность (шум)

Freja

FAST

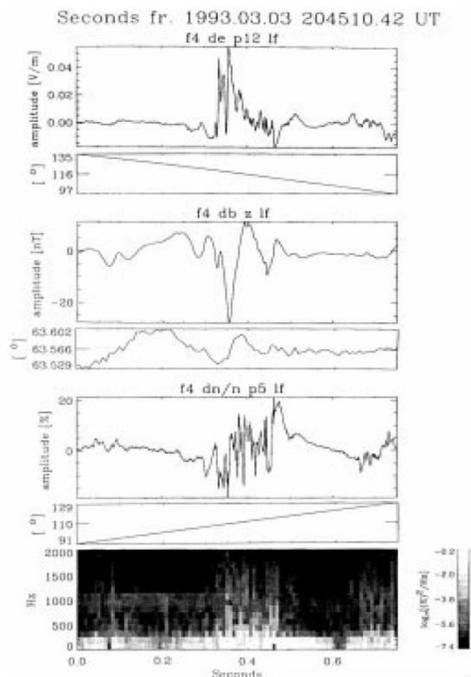
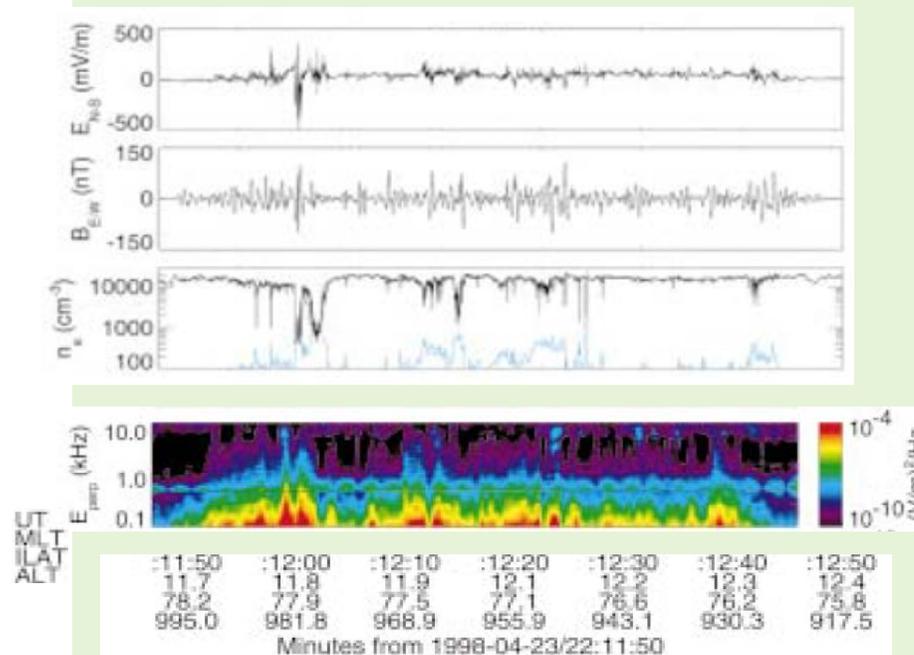


Figure 9. A clear example of a small scale Alfvénic structure filled with broadband electrostatic turbulence. (Wählund *et al.*, 1994a.)



Альфеновская турбулентность ($f \sim 0$)

Широкополосный электростатический шум ($f = 0.01-1$ kHz)

Наиболее подходящей для интерпретации широкополосной турбулентности (broadband ELF turbulence) является теория электростатических ионно-циклотронных волн, возбуждаемых локализованными электрическими полями, которые, как и продольные токи, присутствуют в авроральной ионосфере. *Возможность генерации неустойчивости неоднородным распределением плотности плазмы до сих пор не изучалась*

Цели работы

- Изучить влияние неоднородностей концентрации плазмы и электрического поля на возбуждение неустойчивостей в рамках теории, где предполагается, что возмущение вызывается неустойчивостью (inhomogeneous energy-density-driven instability (IEDDI)), к которой приводит неоднородное распределение плотности энергии, связанное со сдвигом скорости в плоскости, перпендикулярной магнитному полю.
- Провести сравнение механизмов возбуждения неустойчивостей при различных параметрах плазмы
- Изучить генерацию неустойчивостей в зависимости от вида профилей электрического поля и концентрации плазмы
- Показать, что указанные механизмы могут служить источниками широкополосного электростатического шума в авроральной области

IEDDI неустойчивость

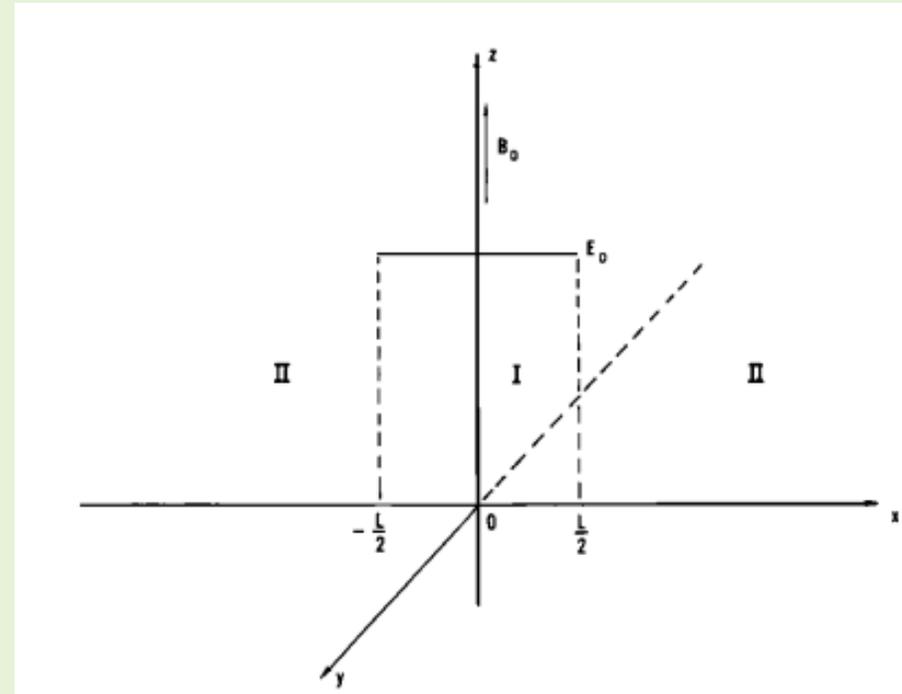
Основная идея возбуждения IEDD неустойчивости заключается в том, что при отсутствии электрического поля плотность энергии в волне

$$U \sim \omega \left[\sum_{n>0} \frac{\omega n^2 \Omega_i^2 \Gamma_n^2(b)}{(\omega^2 - n^2 \Omega_i^2)^2} \right] = \omega^2 \sigma(\omega) \quad \sigma(\omega) > 0$$

Если ввести однородное продольное электрическое поле вдоль оси x , то появится дрейф в направлении оси y .

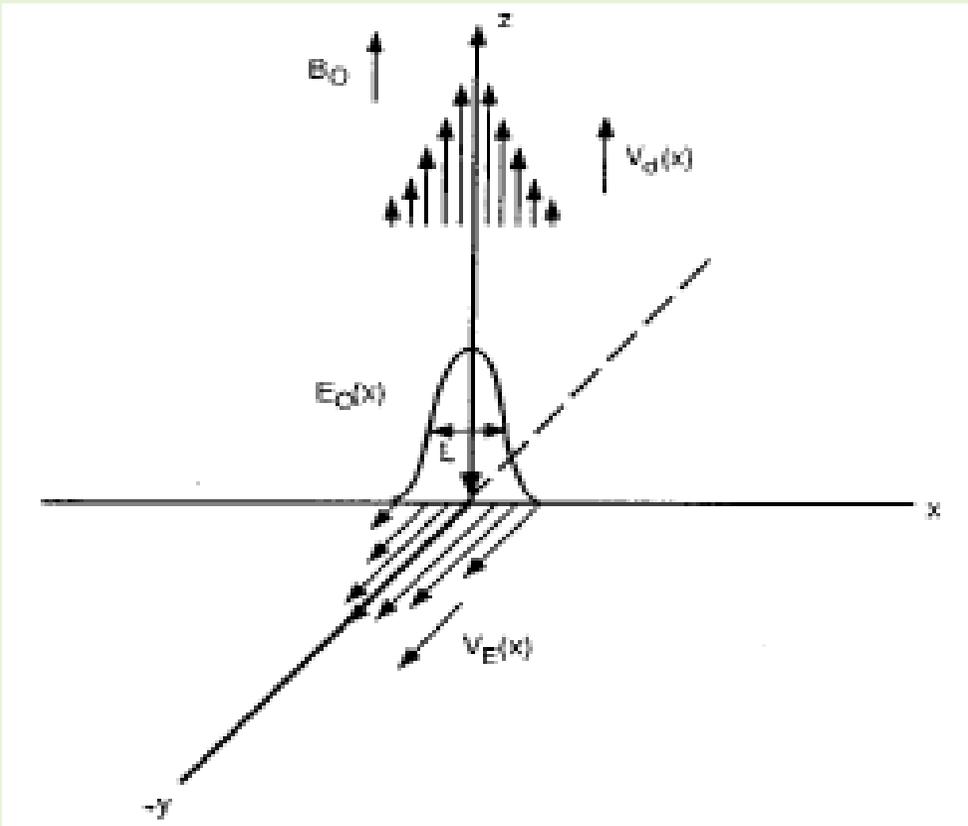
Вместо частоты в лабораторной системе отсчета будет частота в собственной системе отсчета $\omega_1 = \omega - k_y V_E$ в результате эффекта Доплера

$$U \sim \omega_1 \omega \sigma(\omega_1)$$



Плотность энергии волны в области I, отрицательна, а в области II - положительная. Возникает перекачка энергии и развивается неустойчивость.

Постановка задачи



Однородное магнитное поле B направлено вдоль оси z , перпендикулярно ему, вдоль оси x , направлено неоднородное электрическое поле E , создающий сдвиг $v_E = E \times B$ в направлении оси y .

Нелокальное дисперсионное уравнение для ЕС волн, основная неоднородность имеет место вдоль оси x , а вдоль y и z фон однороден. Проблема сводится к задаче на собственные значения для дифференциального уравнения 2-го порядка относительно электростатического потенциала. Возмущение электрического поля ищется в виде:

$$\varphi(x) = \psi(x) \exp\{-i(\omega t - k_y y - k_z z)\}$$

Основные уравнения

$$\frac{d^2\psi}{d\xi^2} + \kappa^2(\xi)\psi = 0 \quad \text{нелокальное дисперсионное уравнение}$$

$$\kappa^2(\xi) = -2 \frac{1 + \sum \Gamma(b) A_{ni}(\xi) + \tau(1 + A_{0e})}{\sum \Gamma'(b) A_{ni}(\xi)}$$

$$A_{n\alpha} = \frac{\omega_1 + \omega_{2\alpha} - \omega_\alpha^*}{k_z v_{t\alpha}} Z\left(\frac{\omega_1 - \omega_{2\alpha} - n\Omega_\alpha}{k_z v_{t\alpha}}\right)$$

$$\omega_1 = \omega - k_y V_E - k_z V_d \quad \omega_{2\alpha} = \frac{k_y V''_{E\rho_\alpha^2}}{2}$$

$$\omega_\alpha^* = k_y \Omega_\alpha \rho_\alpha \varepsilon_n \quad \varepsilon_n = (\rho_\alpha n_0(\xi)) / \left(\frac{dn_0(\xi)}{d\xi}\right)$$

$$\tau = \frac{T_i}{T_e} \quad b = \frac{(k_y \rho_i)^2}{2}$$

$$\Gamma_n(b) = \exp(-b) I_n \quad \Gamma'_n = \frac{d\Gamma_n}{db}$$

I_n - модифицированные функции Бесселя

Z - плазменная дисперсионная функция

Для Z использовались приближение для малого аргумента (электроны) и большого аргумента (ионы)

Численные методы

- Метод стрельбы
- Область решения разбивается на отрезки, на каждом из которых $\kappa^2(\xi)$ постоянна.
- Сшивка на границах.

Дифференциальное уравнение сводится к системе линейных уравнений

$$M \cdot h = 0$$

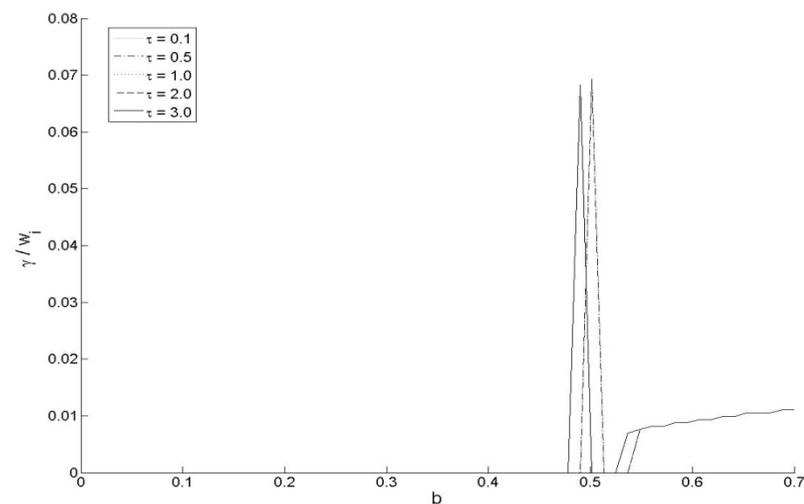
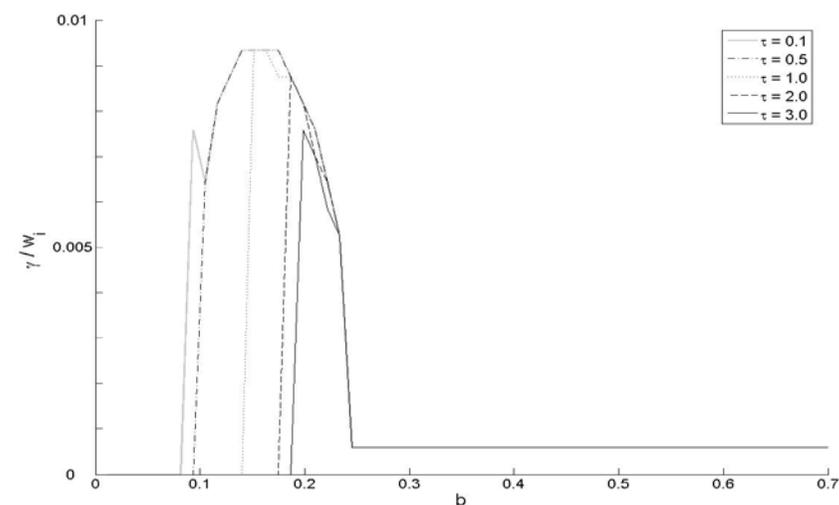
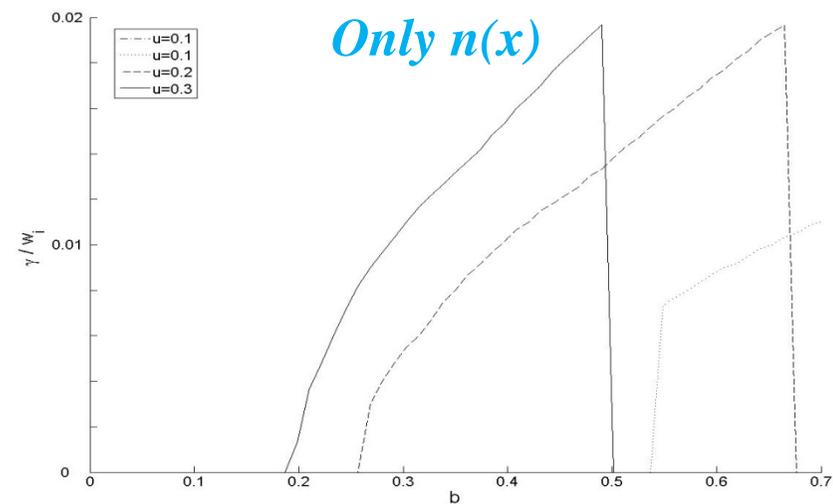
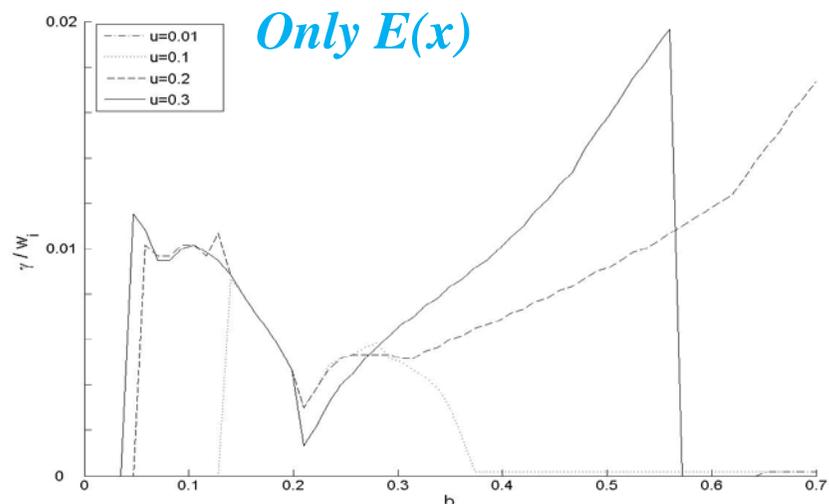
$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \kappa_1 & \kappa_2 & -\kappa_2 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e^{i\kappa_2\delta} & e^{-i\kappa_2\delta} & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \kappa_2 e^{i\kappa_2\delta} & -\kappa_2 e^{-i\kappa_2\delta} & \kappa_3 & -\kappa_3 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & e^{i\kappa_{N_L-1}\delta} & e^{-i\kappa_{N_L-1}\delta} & \dots & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \kappa_{N_L-1} e^{i\kappa_{N_L-1}\delta} & -\kappa_{N_L-1} e^{-i\kappa_{N_L-1}\delta} & \dots & -\kappa_{N_L} \end{pmatrix}$$

Нелокальное дисперсионное соотношение для модифицированных электростатических ионно-циклотронных мод:

$$\det M = 0$$

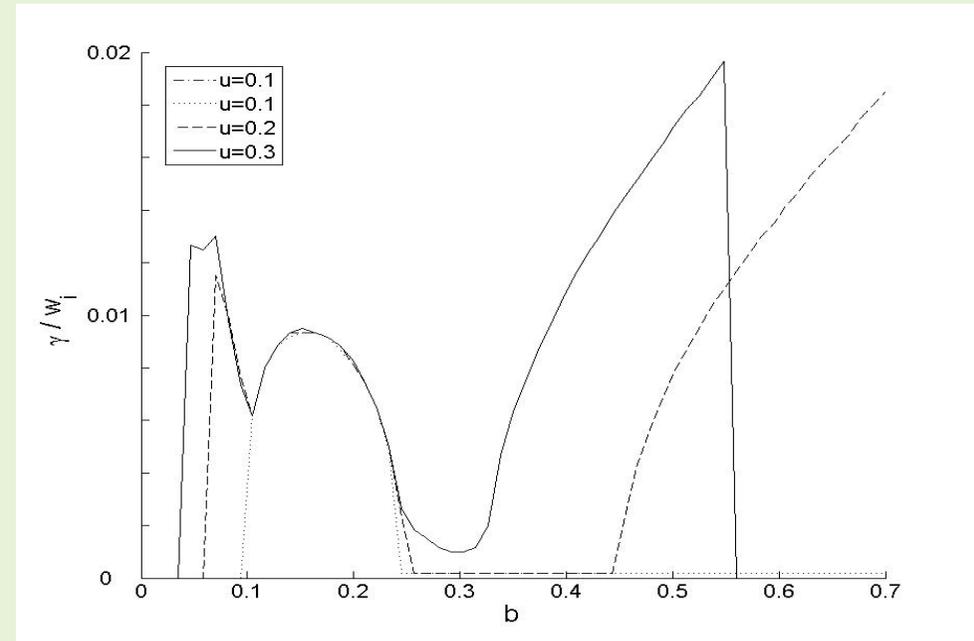
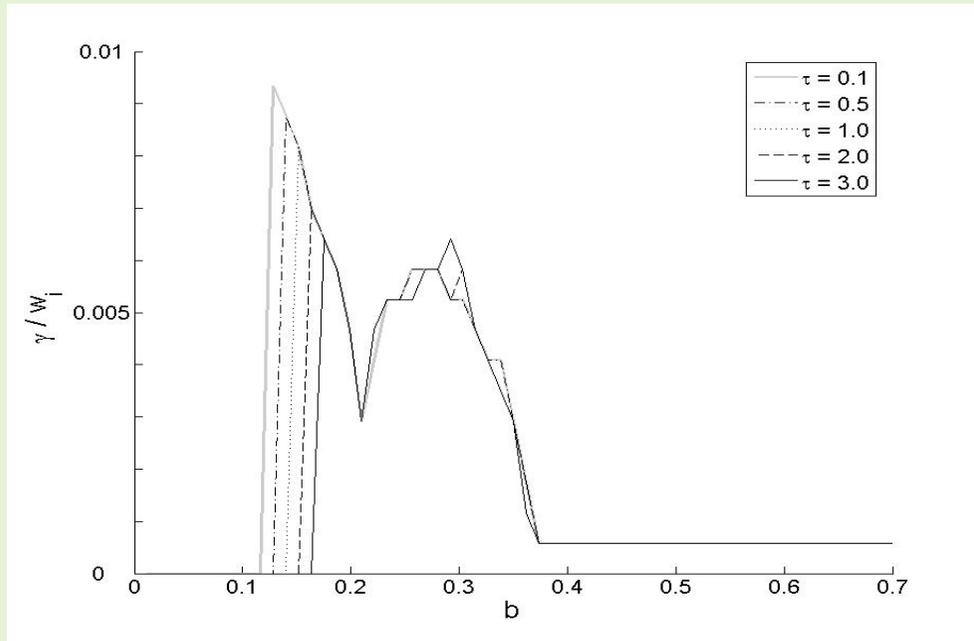
Результаты моделирования

Варьировали следующие параметры: $u=kz/ky$ and $\tau=Ti/Te$. Другие параметры плазмы: $\rho_i=10 m$, $V_d=0.1v_{te}$, $\omega_r=0.98\Omega_i$ ($E(x)$ и $n(x)$ по данным Freja)

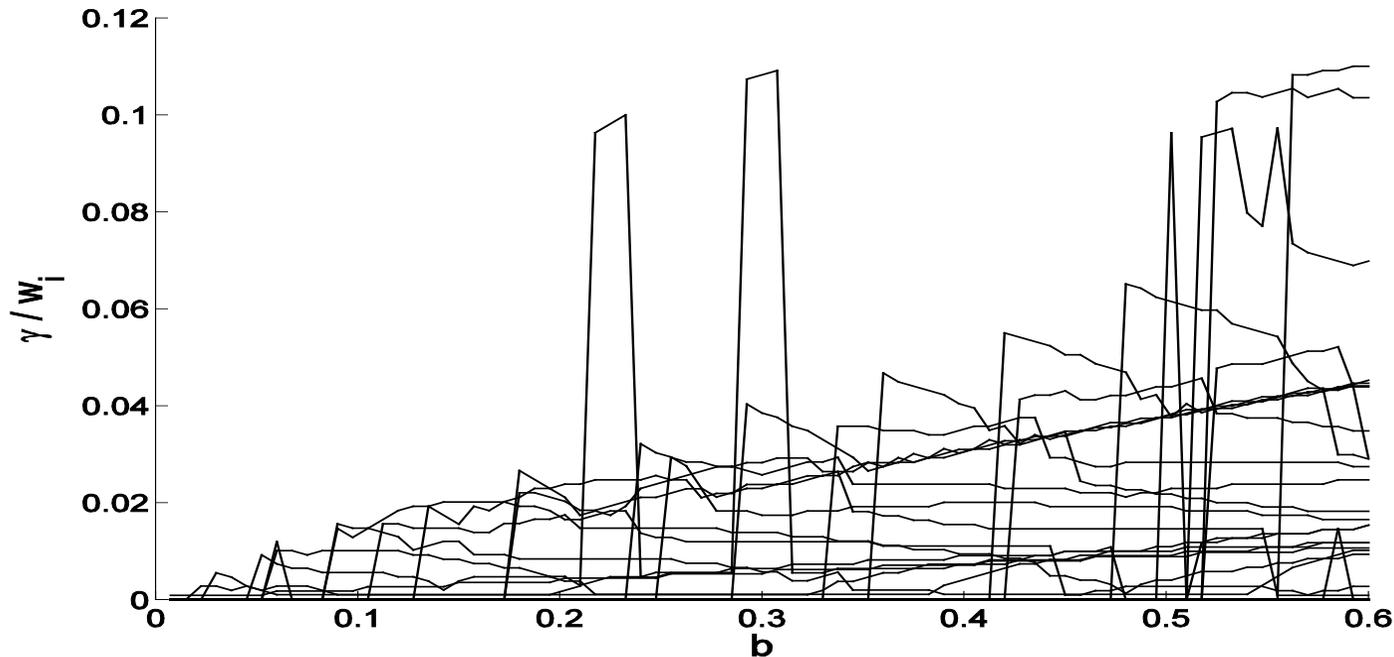


Результаты моделирования

С учетом неоднородностей электрического поля $E(x)$ и концентрации $n(x)$



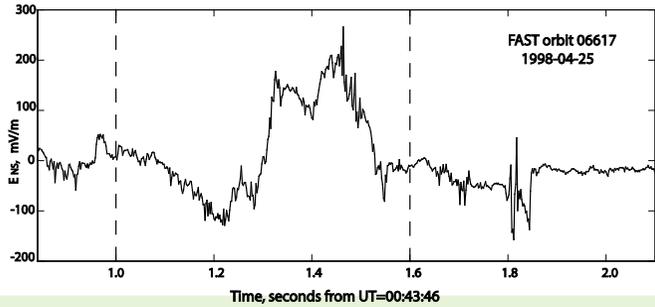
Наличие множества корней



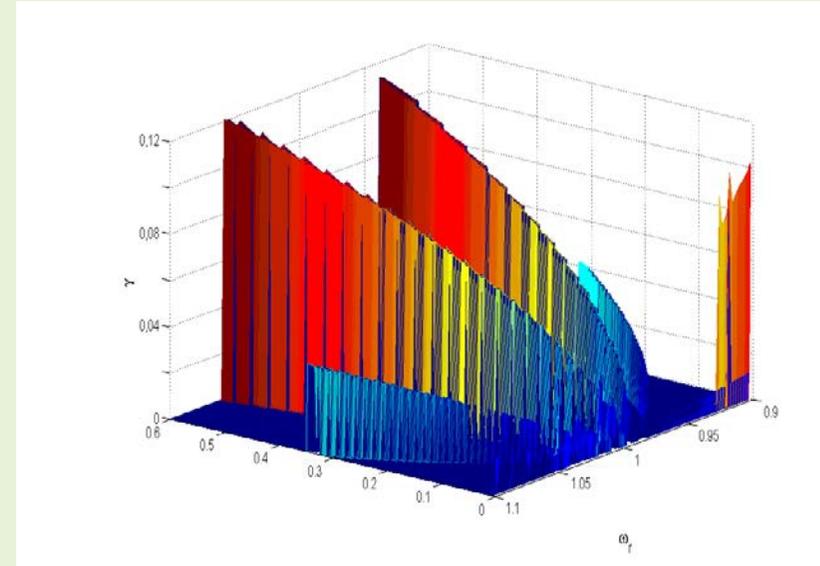
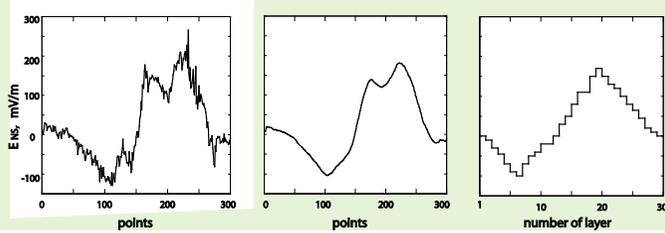
Неустойчивые решения для IEDD волн, полученных для 40 значений действительной частоты ω_r около ионной гирочастоты $\omega_r / \Omega_i = 0.8 - 1.2$
 $u = k_z / k_y = 0.1$, $\tau = T_i / T_e = 0.5$.

Существование множества корней

Результаты моделирования

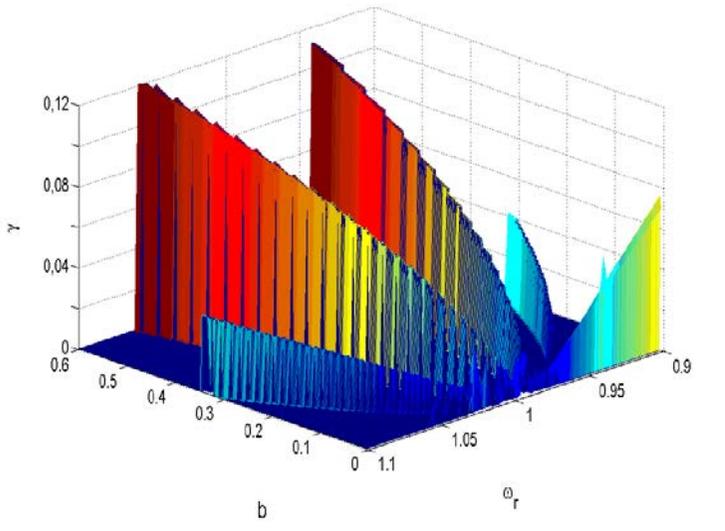


только $E(x)$



Модельный параболический профиль для $E(x)$

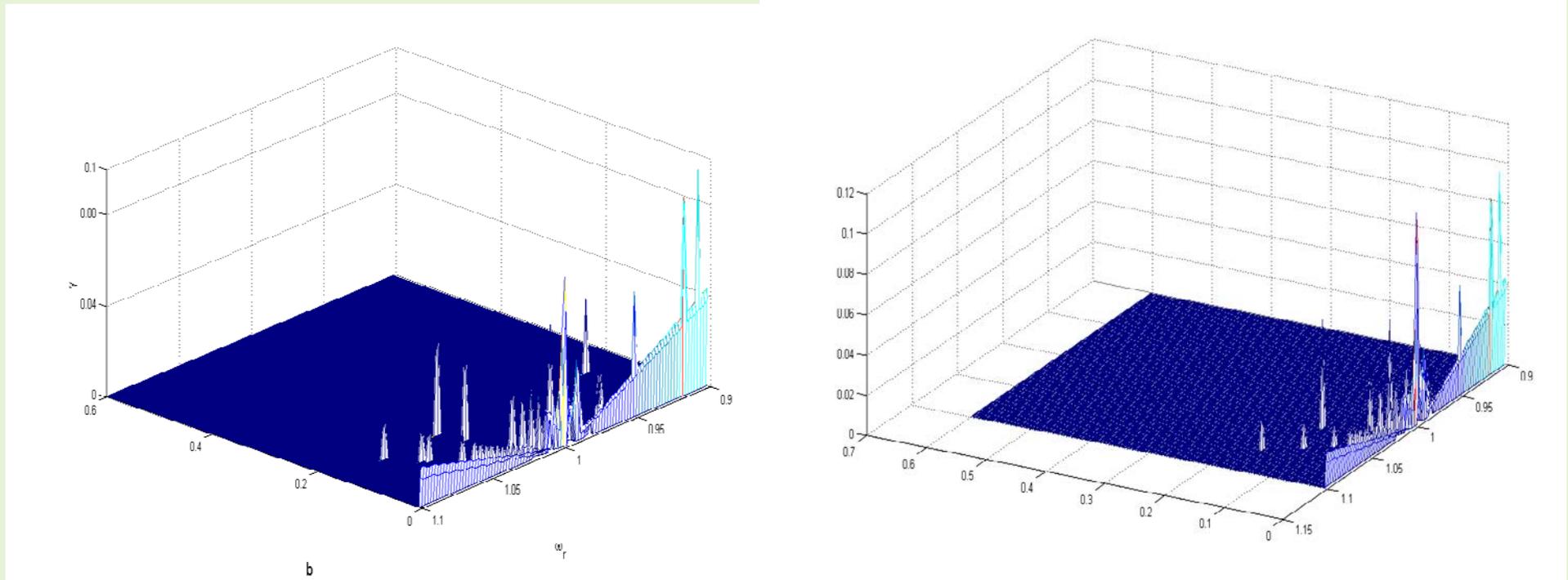
Параметры плазмы при моделировании: $\tau=0.5$, $u=0.1$, $\rho=20m$, $V_d = 0.9v_{te}$



По данным спутника FAST

Результаты моделирования

только $n(x)$

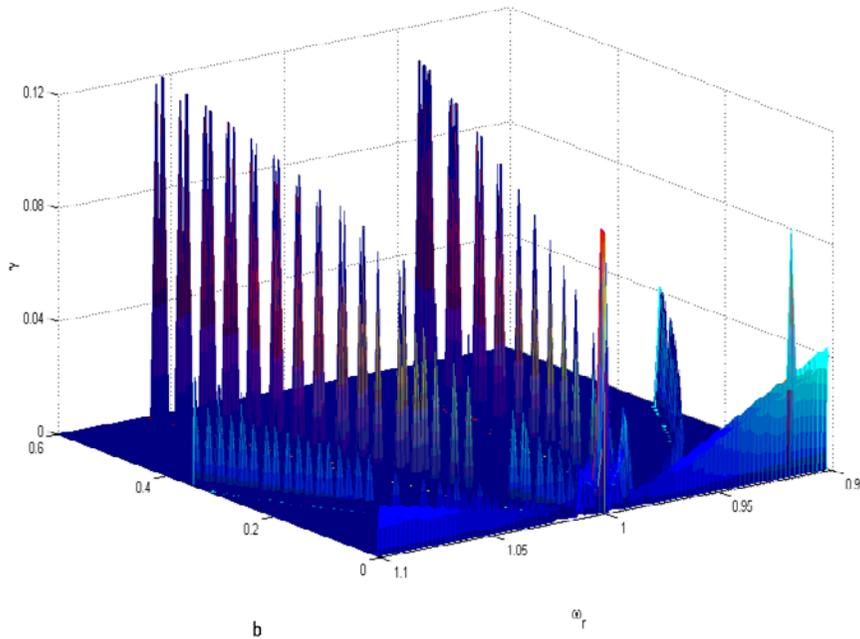


Модельный
параболический профиль

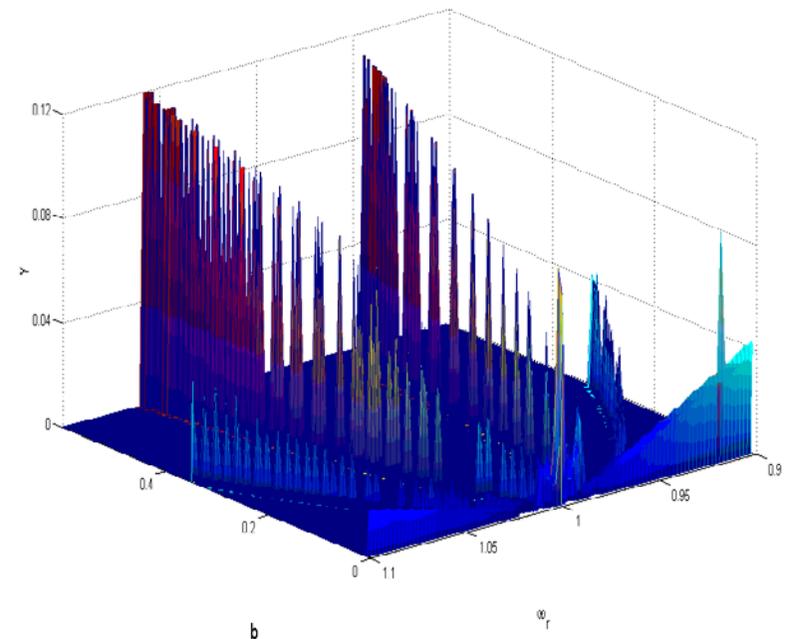
По данным FREJA

Параметры плазмы: $\tau=0.5$, $u=0.1$, $\rho=20m$, $V_d = 0.9v_{te}$

Результаты моделирования



Только электрическое поле



Добавлены неоднородности
концентрации

Параметры плазмы при моделировании: $\tau=0.5$, $u=0.1$, $\rho=20\text{м}$, $V_d = 0.9v_{te}$

Выводы

- Показано, что неоднородность концентрации плазмы способна возбуждать неустойчивости
- При учете неоднородностей плотности плазмы происходит уширение области неустойчивости
- Показано, что при увеличении τ (отношение температуры ионов к температуре электронов) область решения сужается.
- Область решения существует в диапазоне значений u (отношение продольной составляющей волнового вектора к поперечной), определяемым параметрами фоновой плазмы
- Неустойчивость слабо зависит от вида профилей электрического поля и концентрации плазмы
- Подтверждено, что рассмотренные механизмы генерации неустойчивостей могут служить источниками электростатического шума в авроральной области.

Спасибо за внимание!