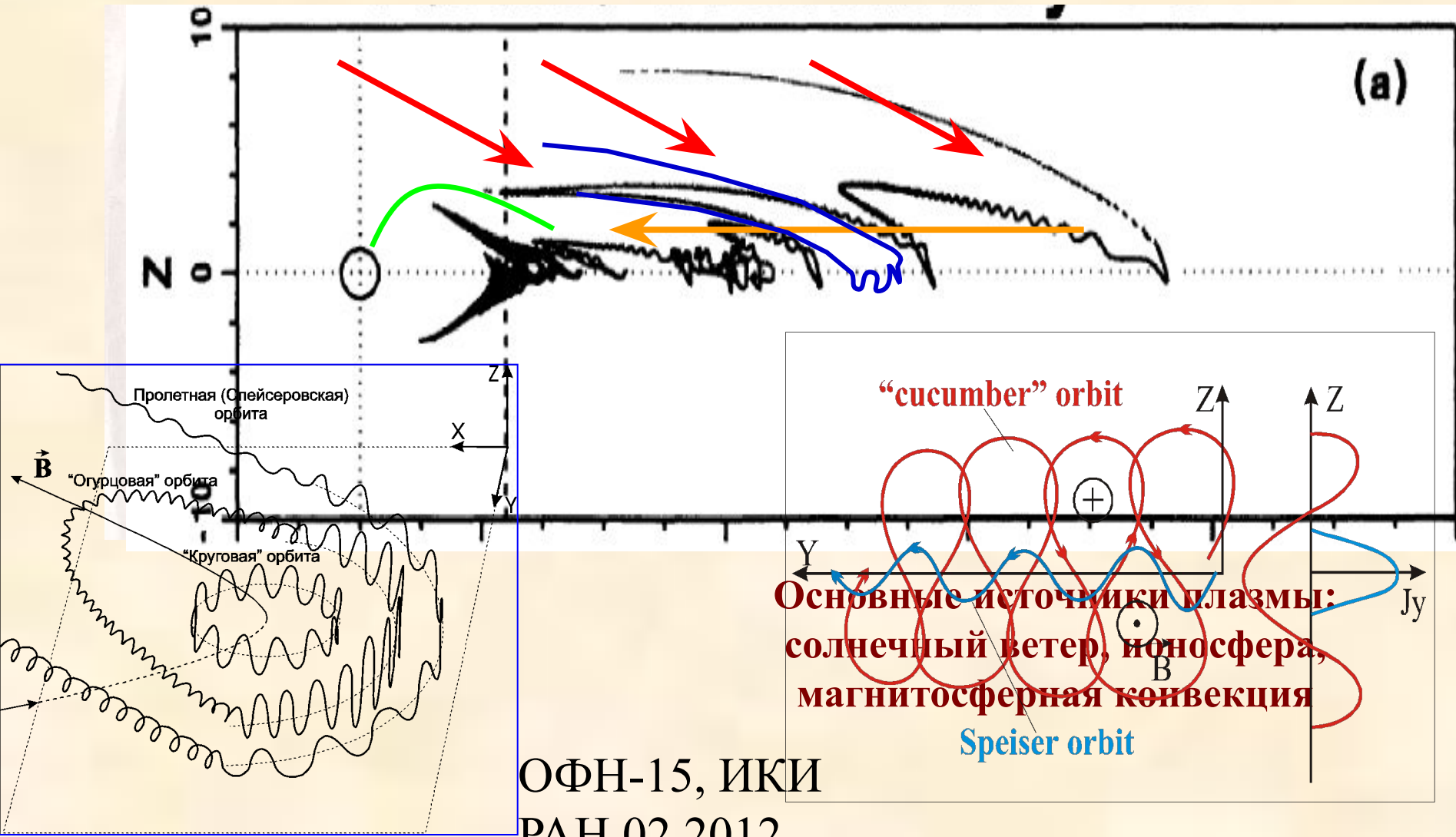


**Тонкие токовые слои в космической  
плазме: двумерная структура**

[Х.В. Малова, Л.М. Зеленый, В.Ю. Попов,  
А.В. Артемьев, А.А. Петрукович](#)

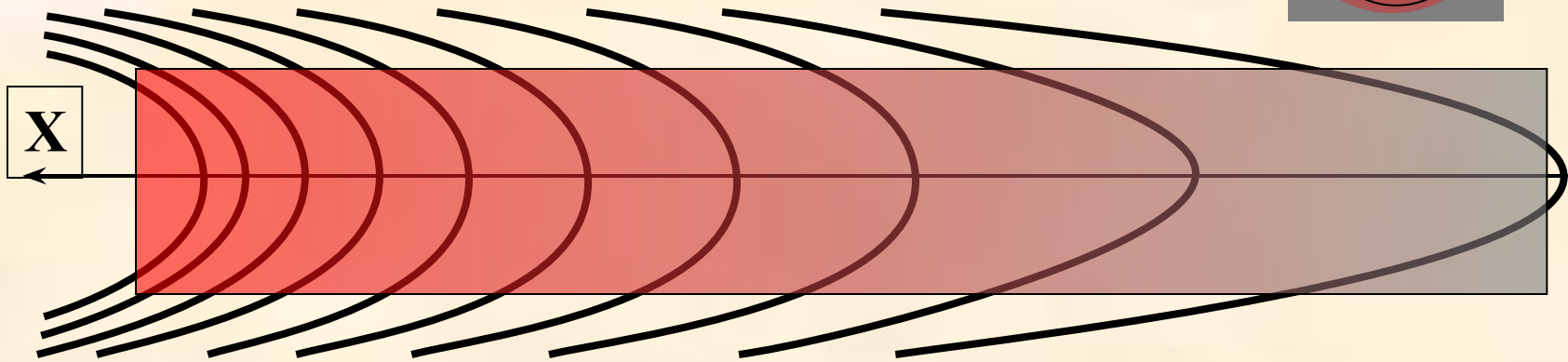
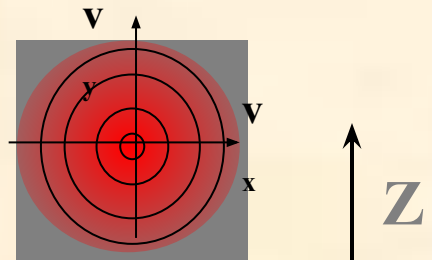
# Plasma populations in Earth's magnetotail



**Force balance:**

**Isotropic pressure models  
(Kan, 1973)**

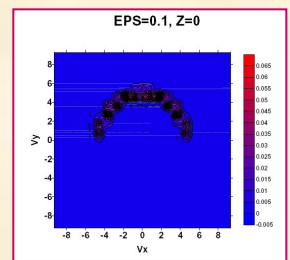
$$\frac{1}{c} [j_y \times B_n] = \nabla_x p$$



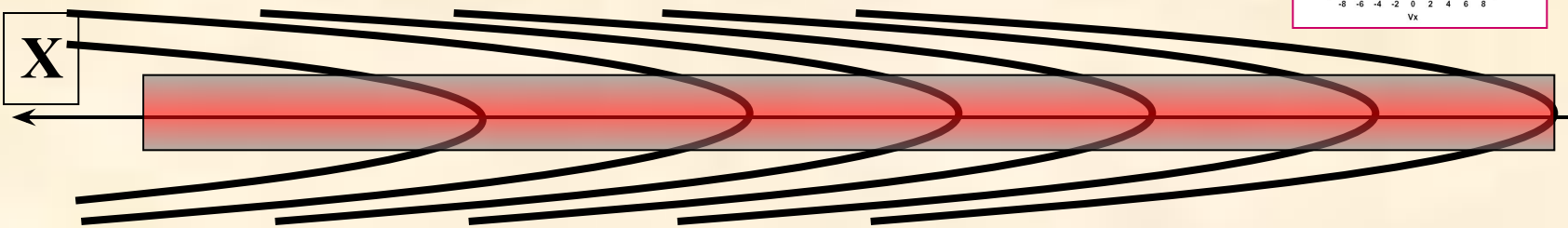
**Anisotropic pressure models**

**(Zelenyi et al., 2000)**

$$\frac{1}{c} [j_y \times B_n] = \frac{\rho v_{\perp}^2}{R_{curv}}$$



$$\kappa = \sqrt{\frac{R_{cmin}}{\rho_{max}}}$$



$$\frac{B_0^2}{8\pi} = n_0 (T_{e\perp} + T_{i\perp})$$

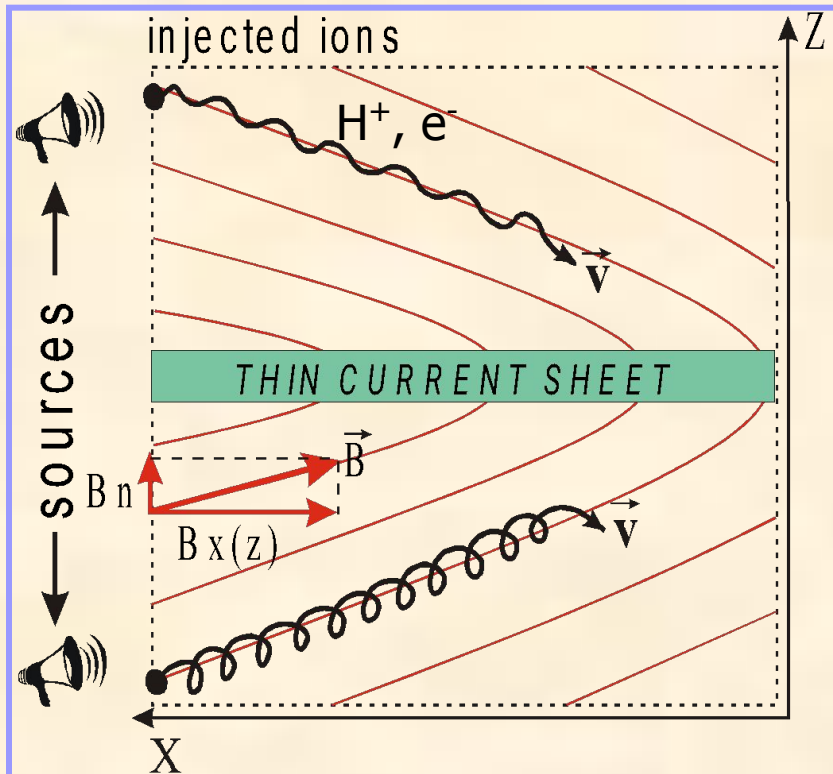
ОФН-15, ИКИ

РАН 02.2012

**Баланс поперек слоя как в модели Харриса**

# Самосогласованная модель 2-х мерного токового слоя

## Динамика ионов



$$W_0 \equiv \frac{mv_0^2}{2} = \frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2} + e\varphi$$

$$P_{y0} = mv_y + \frac{e}{c} A_y(x, z)$$

$$I_z \equiv \frac{1}{2\pi} \oint mv_z dz \approx const$$

$$I_x = \frac{m}{2\pi} \oint v_x dx$$

Энергия, обобщенный импульс и адиабатические интегралы движения сохраняются во время движения частиц

$$\frac{\omega_x}{\omega_z} \sim \frac{B_z}{B_0} \ll \kappa \ll 1$$

$$\Delta I_z \ll I_z$$

ОФН-15, ИКИ

РАН 02 2012

Neistadt, 1986; Timofeev, 1978  
Cary, Escande, Tennyson, 1986

# Функции распределения пролетных и захваченных частиц

## Пролетные ионы

## ЧАСТИЦ

$$f_{transient}(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{(v_{\parallel 0} - v_D)^2 + v_{\perp}^2}{v_T^2} \right\}$$

$$I_z = \frac{m}{2\pi} \oint v_z dz = \frac{2mc}{e} \mu \quad \text{где} \quad \mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B_0}$$

$$\frac{mv^2}{2} + e\varphi = \frac{mv_0^2}{2}$$

$$v_{\perp}^2 = \frac{\omega_0}{m} I_z$$

## Квазизахваченные и захваченные ионы

$$f_{trap}(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{v_D^2 + v_0^2}{v_T^2} \right\}$$

$$f(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{\left( \sqrt{v_0^2 - \frac{\omega_0}{m} I_z} - v_D \right)^2 + \frac{\omega_0}{m} I_z}{v_T^2} \right\};$$

$$I_x = \frac{m}{2\pi} \oint v_x dx \approx \frac{m(v_y^2 + v_x^2)}{\frac{B_z}{B_0} \omega_0}$$

$$v_0^2 = v_z^2 + v_z^2 + v_z^2 + \frac{2}{m} e\varphi(z)$$

$$f(\mathbf{v}) \sim \exp \left\{ -\frac{v_D^2 + v_0^2 + \frac{\omega_0}{m} I_x}{v_T^2} \right\}$$

## 2D модель ионного токового слоя

$$df/dt = 0$$

$$\vec{r}$$

$$B = \{B_x(x, z), 0, B_z(x, z)\}$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{4\pi}{c} \left\{ \int_{V^3} v_y f_{transient}(v_0, I_z) d^3 v \right. \\ \left. + \int_{V^3} v_y f_{trapped}(v_0, I_x) d^3 v + j_e(x, z) \right\}$$

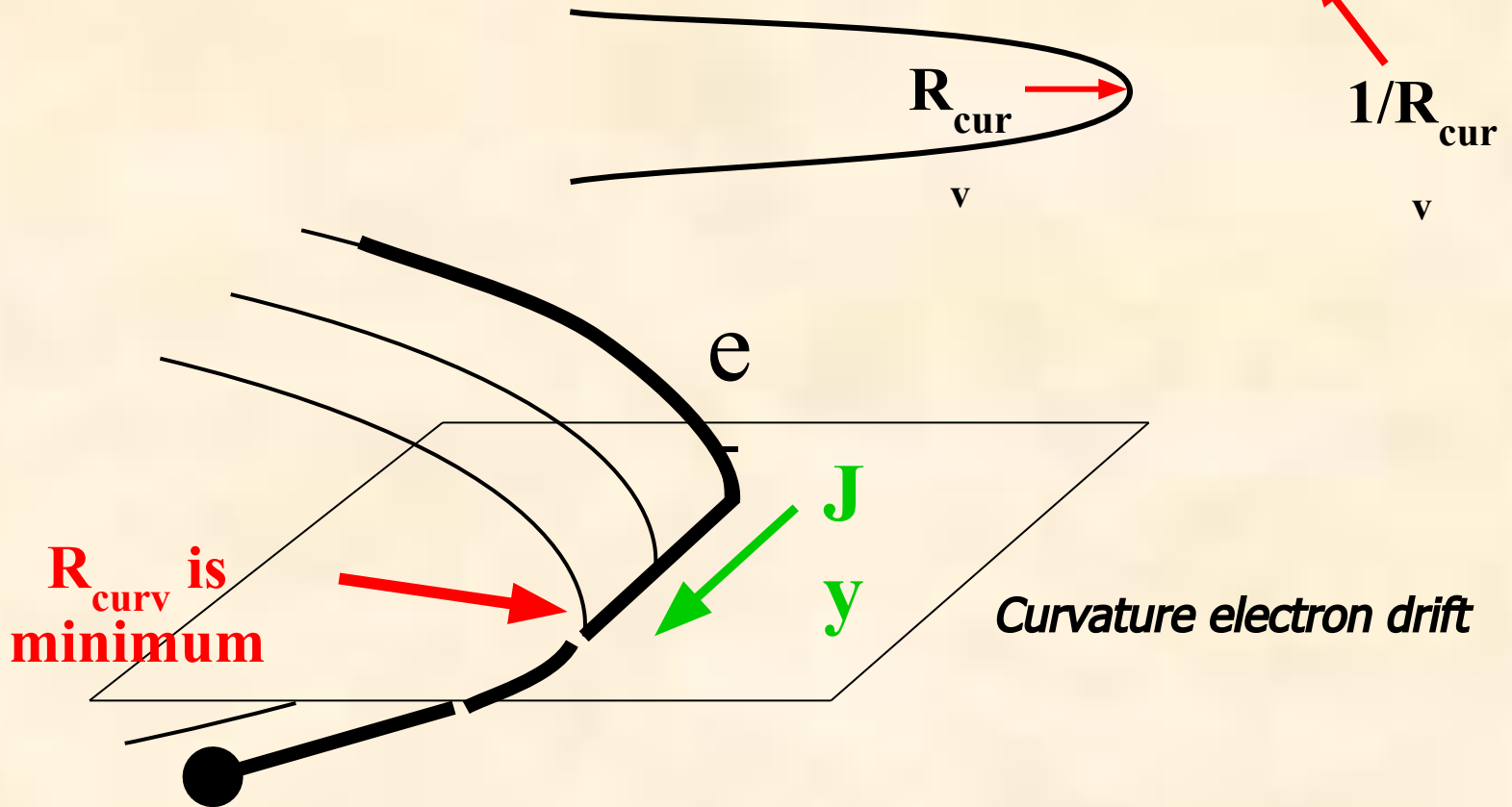
$$j_e = -en_e c \frac{[\vec{E}, \vec{B}]}{B^2} + \frac{c}{B^2} [\vec{B}, \nabla_{\perp} \tilde{p}_{\perp e}] + \frac{c}{B^4} (\tilde{p}_{\parallel e} - \tilde{p}_{\perp e}) \left[ \vec{B}, \left( \vec{B} \nabla \right) \vec{B} \right]$$

ОФН-15, ИКИ

РАН 02 2012

# Anisotropic electron pressure in TCS: calculation of electron currents

$$J_{e\perp} = -en_e c \frac{[\nabla E, \nabla B]}{B^2} + \frac{c}{B^2} [\nabla B, \nabla_{\perp} \tilde{p}_{\perp e}] + \frac{c}{B^4} (\tilde{p}_{\parallel e} - \tilde{p}_{\perp e}) \left[ \nabla B, \left( \nabla_{\perp} \nabla_{\perp} \right) \nabla B \right]$$



# Уравнения Грэда-Шафранова для двумерного ТС (ур-я для ионов)

$$-\frac{\partial B_z}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial z} = \frac{4\pi}{c} \left\{ \int_V v_y [j_x(W_0, I_x(x, z), I_z(x, z)) j_e^3] + j_e \right\}$$

$$A_y(B_0(z)) = \alpha_l(B), A_y(x, z) = \alpha_r(B(z)), B_y(x_0) = \frac{l_a}{B_0} \psi_0(B_x(x, z)), A_y(x, z) = \psi_1(x)$$

$$I_z = \frac{m}{2\pi} \int v_z dz$$

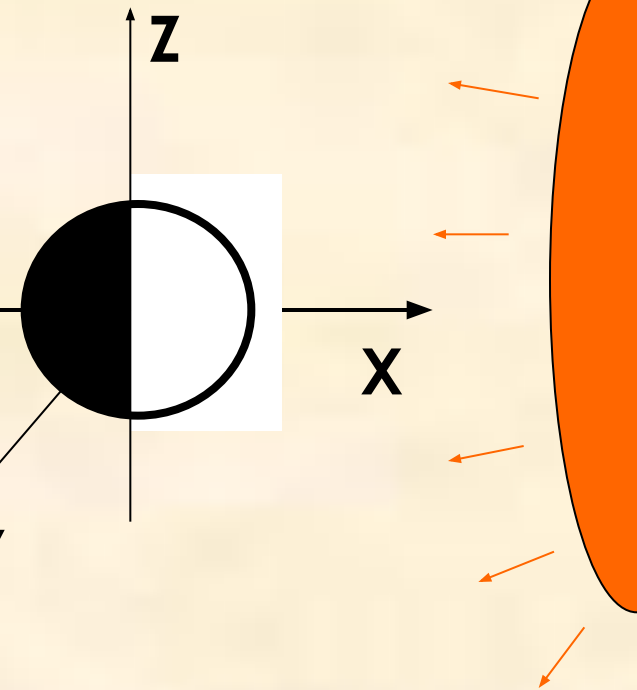
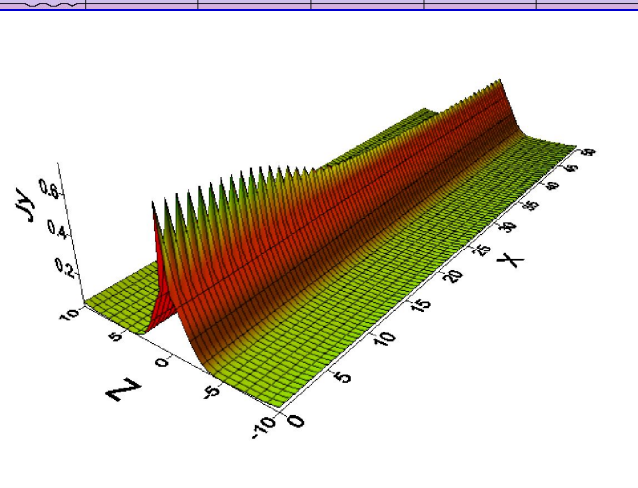
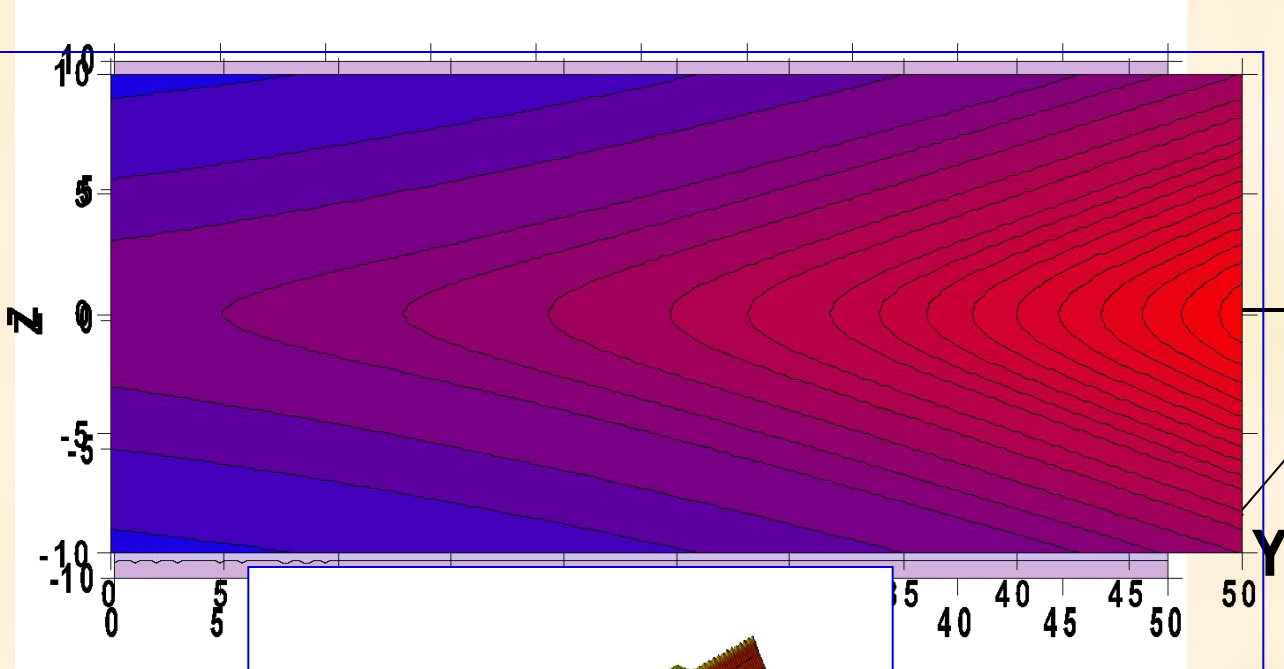
$$= \frac{m}{2\pi} \int \sqrt{v_0^2 - \left( v_x - \frac{e}{mc} B_y(z-z') \right)^2 - \left( m v_y + \frac{e}{mc} (A_y(x, z) - A_y(x', z')) \right)^2} + \frac{2e}{m} [\varphi(x, z) - \varphi(x', z')] dz'$$

$$A_y(x, z) - A_y(x', z') = \int_z^{z'} B_x(z'') dz'' + \int_{x'}^x B_z(x'') dx''$$

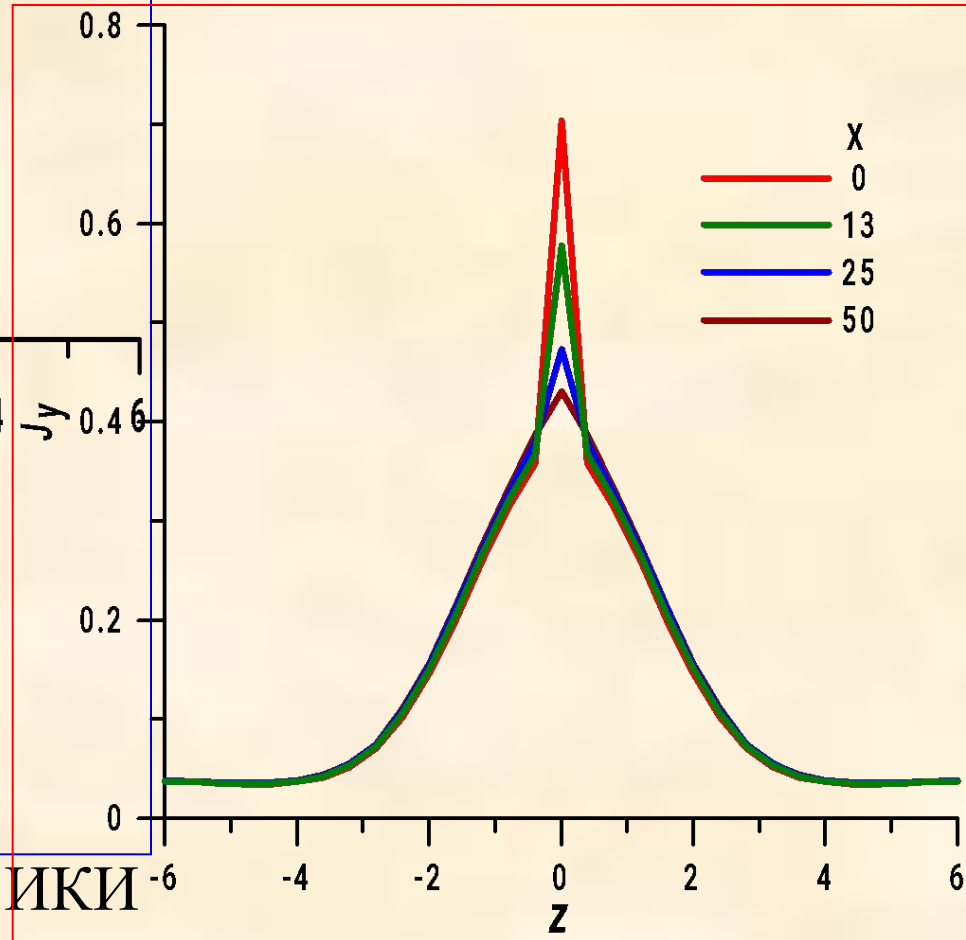
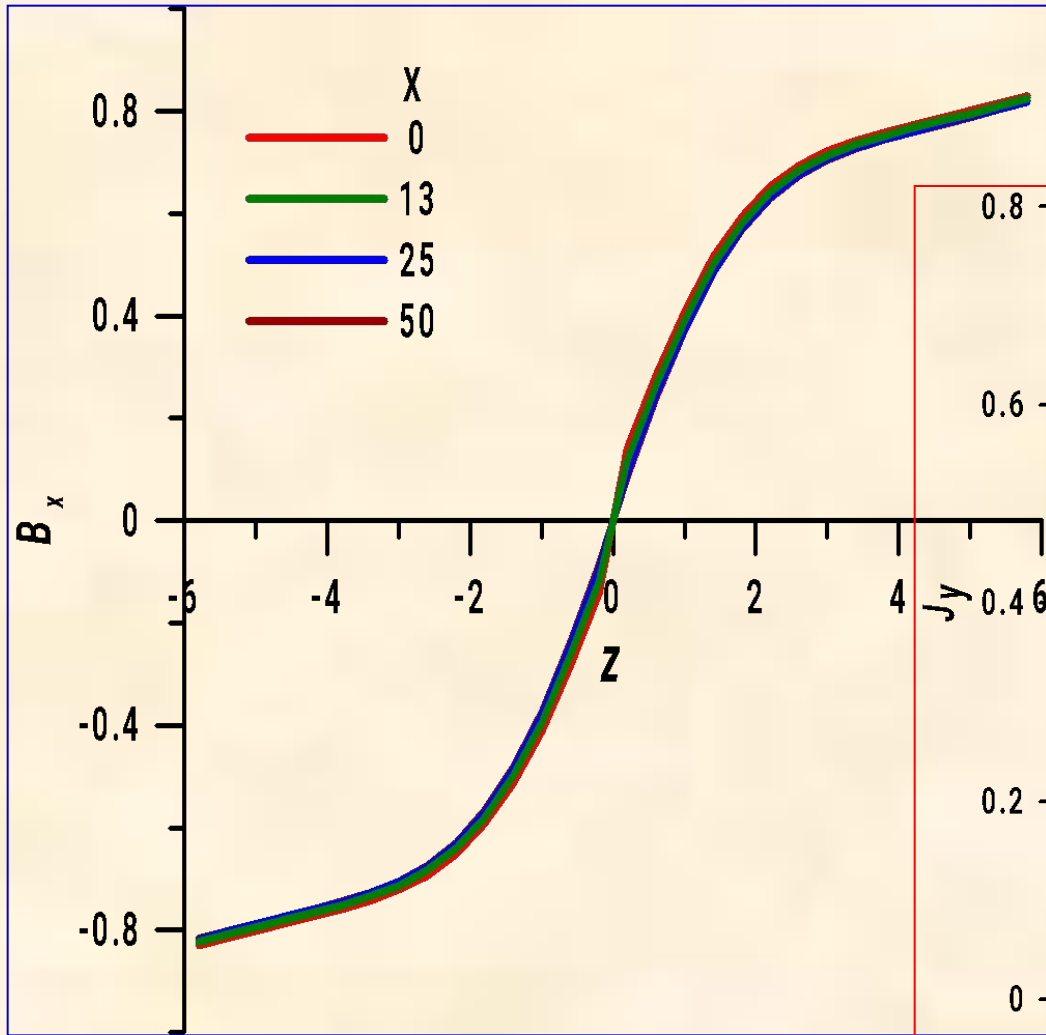
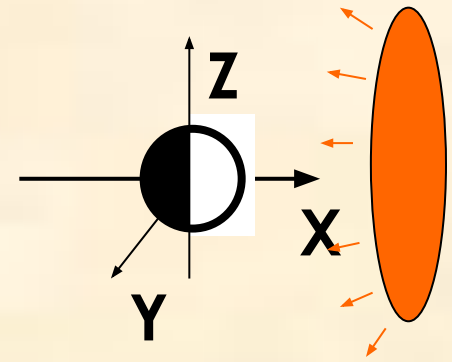
$$I_x = \frac{m}{2\pi} \int v_x dx = \frac{m}{2\pi} \int \sqrt{v_x^2 + v_y^2 - \left( v_y + \frac{e}{mc} (A_y(x, z) - A_y(x', z)) \right)^2} + \frac{2e}{m} [\varphi(x, z) - \varphi(x', z)] dx'$$



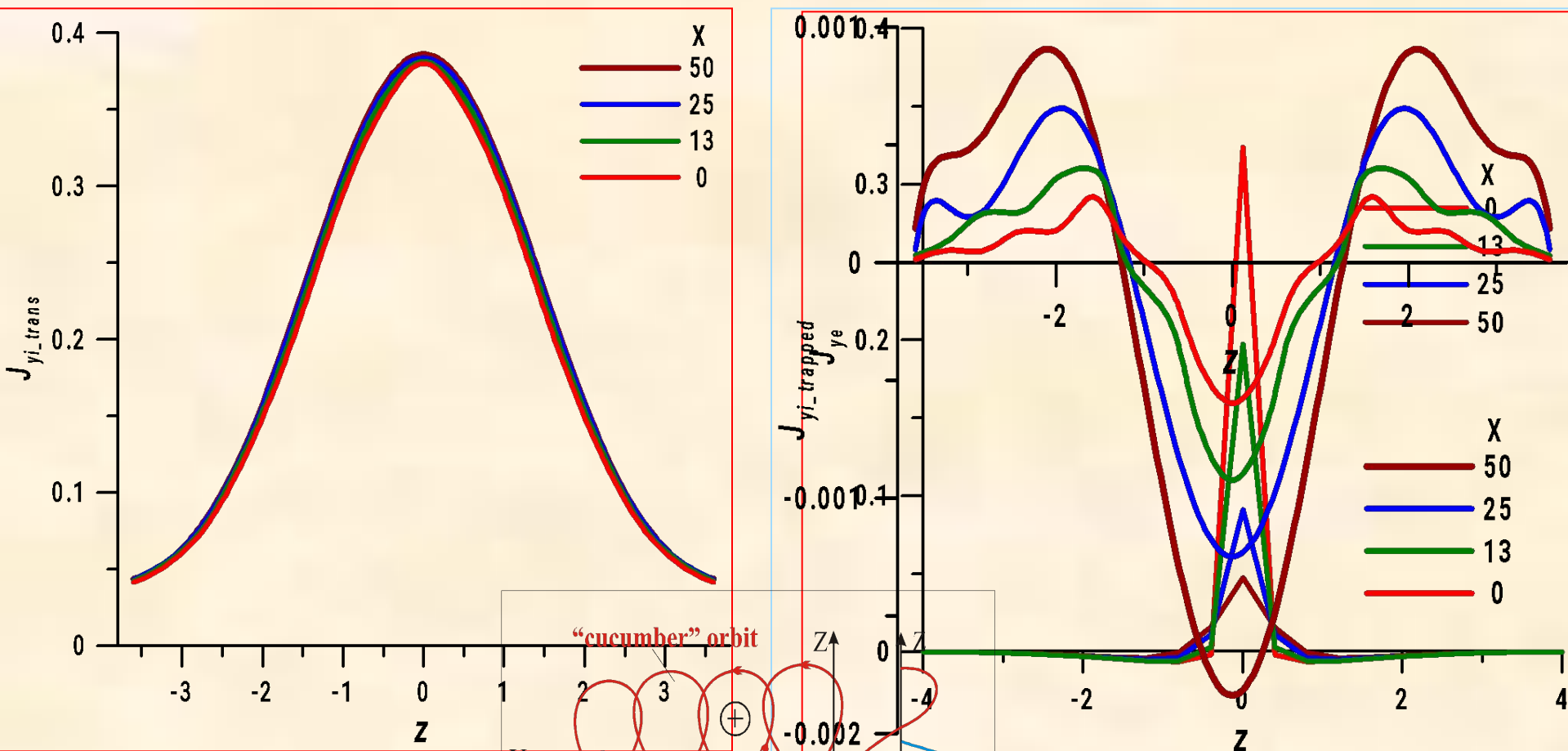
# Двухмерное распределение парциальных плотностей тока



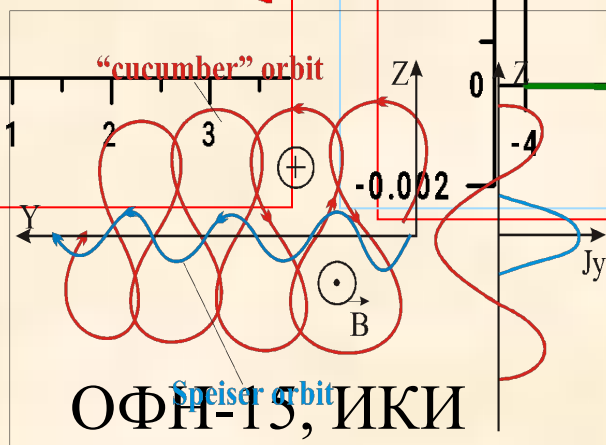
# Распределение плотности тока и плазмы в двухмерном ТС



# Распределение парциальных плотностей тока в системе



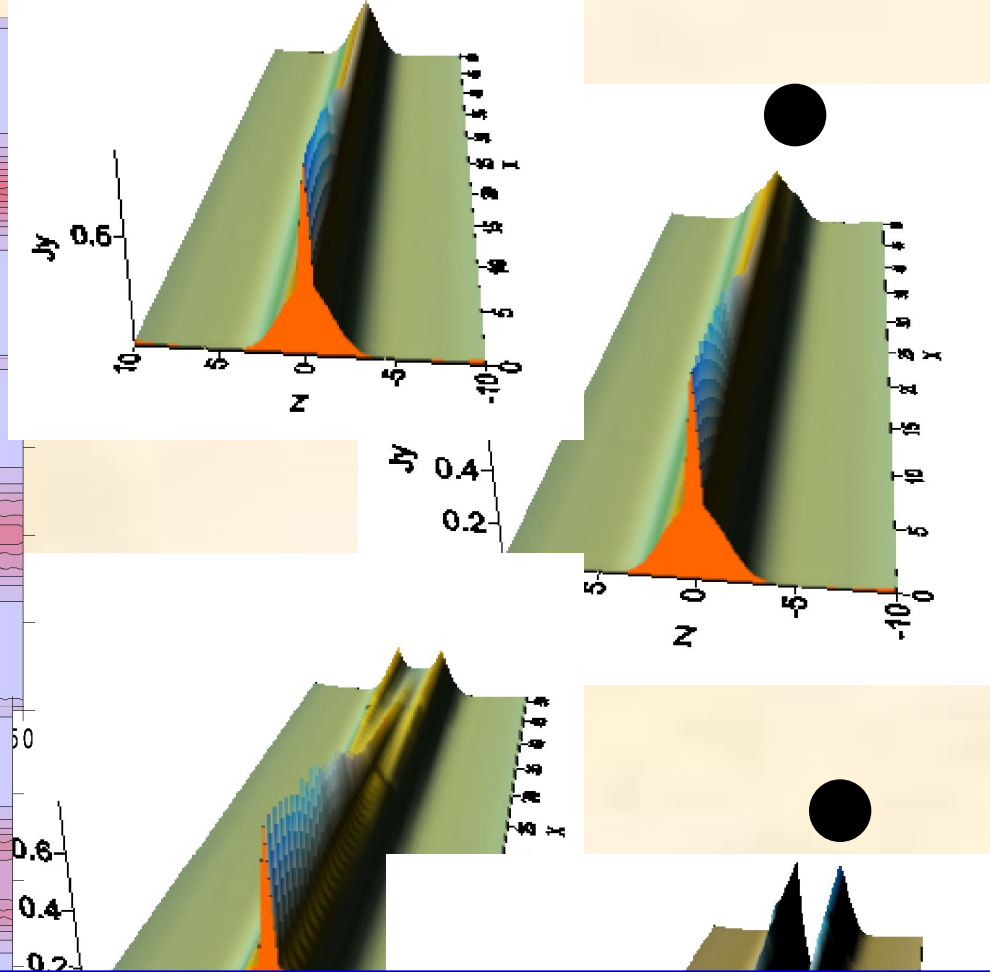
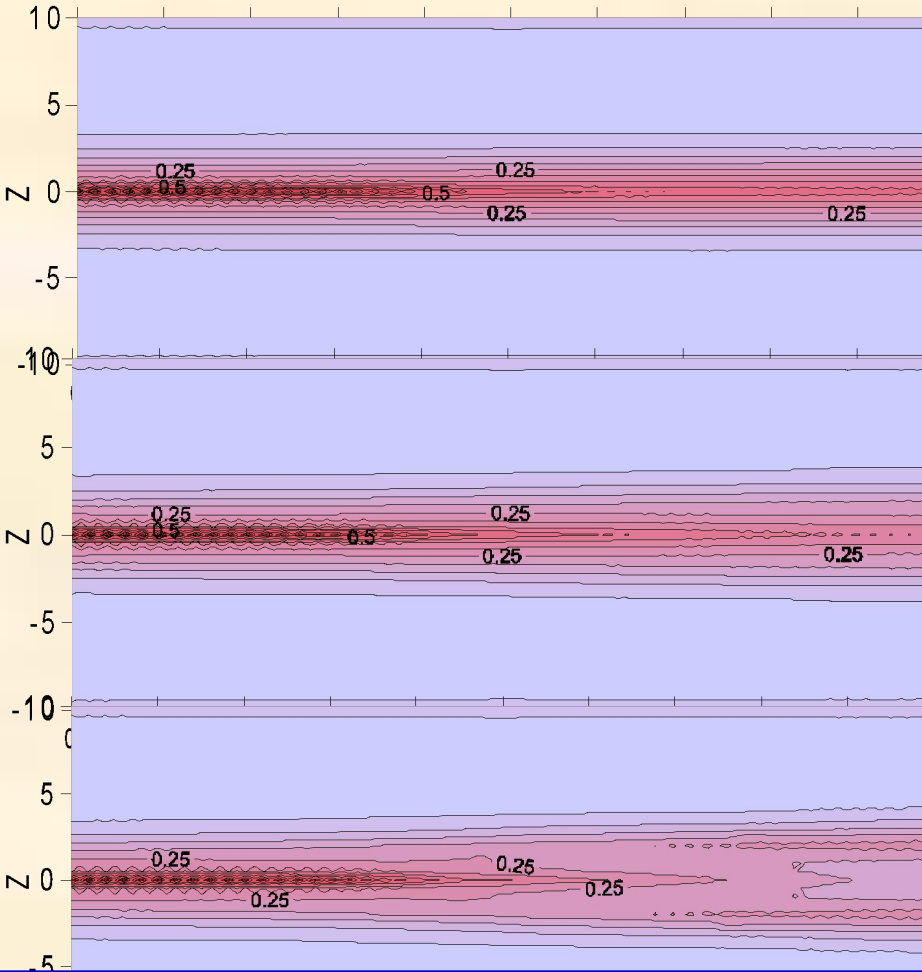
Пролетные ионы



Квазизахваченные ионы

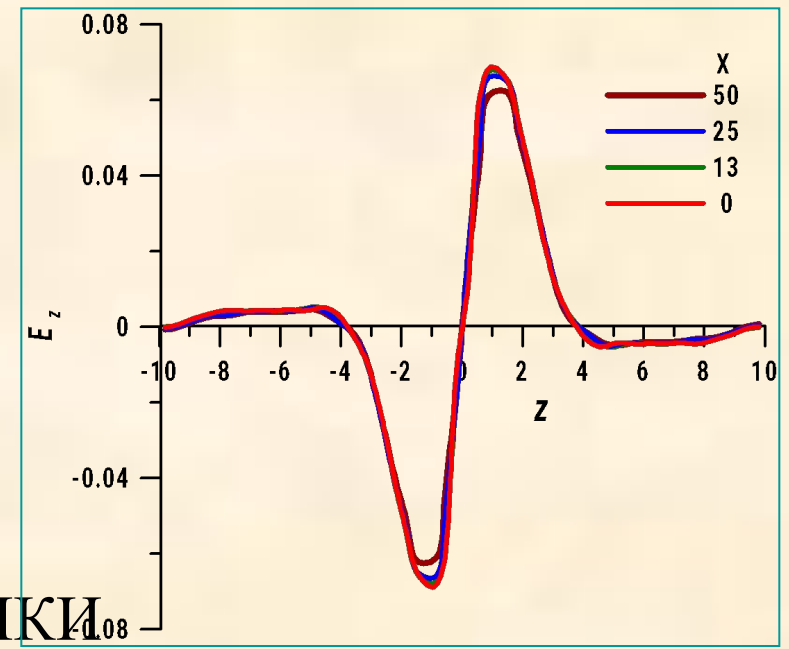
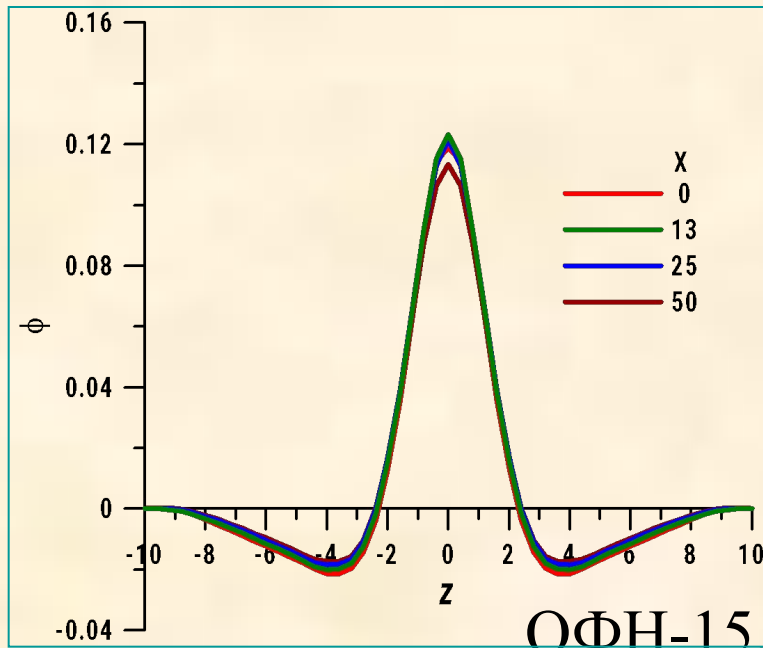
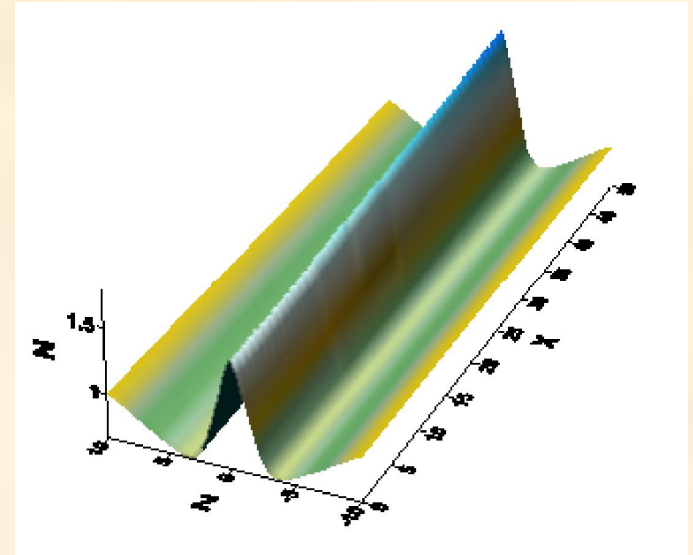
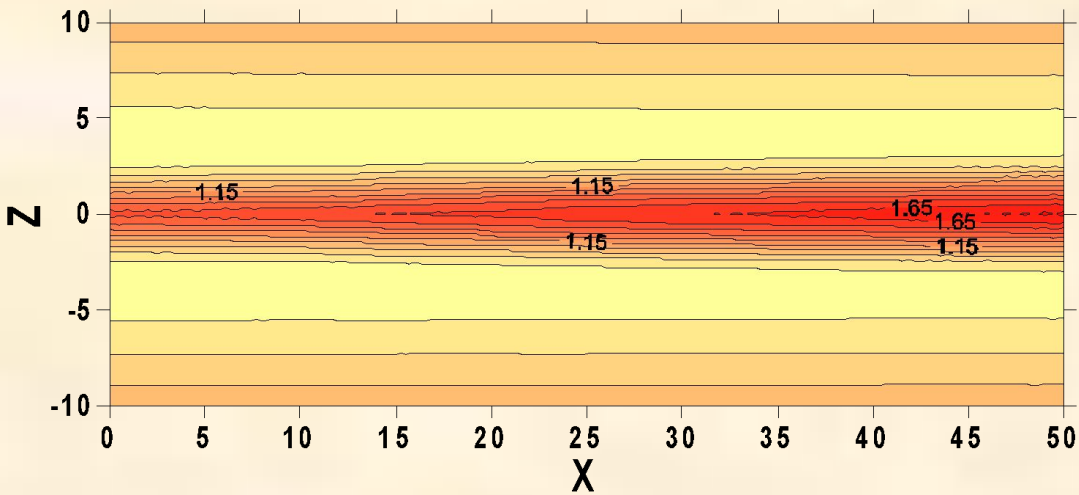
ОФН-15, ИКИ

РАН 02.2012



**Структура двухмерного токового слоя  
при разных плотностях  
захваченных и квазизахваченных частиц**

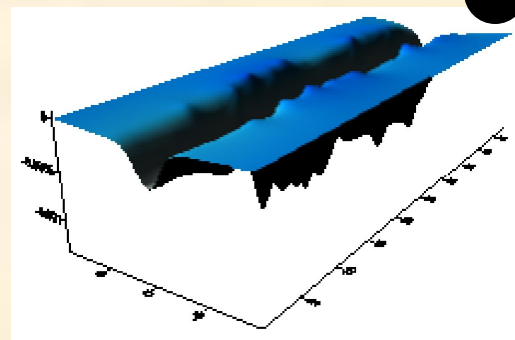
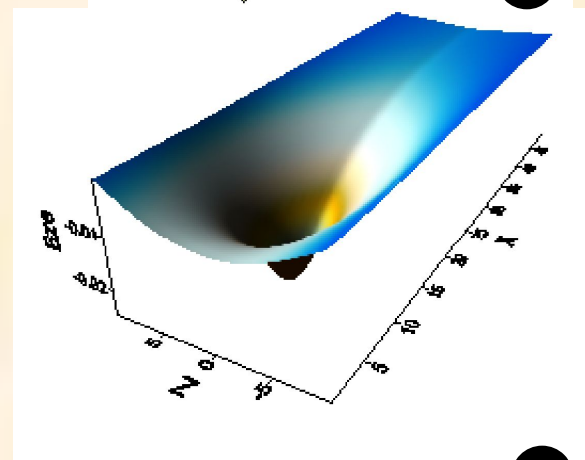
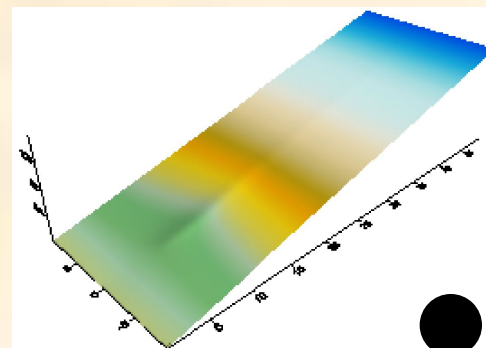
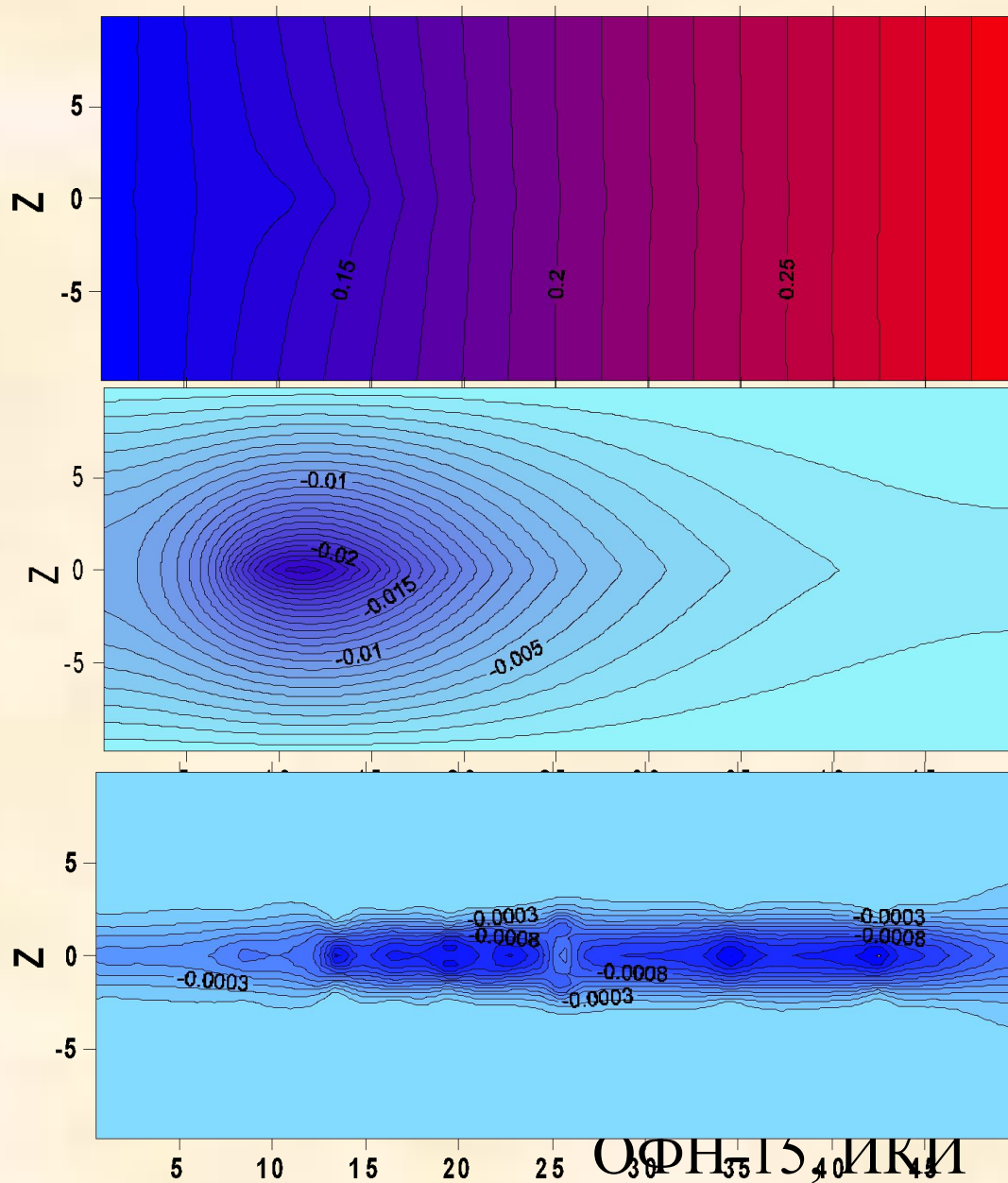
# Распределение $N(x,z)$ , $\phi(x,z)$ , $E_z(x,z)$



ОФН-15, ИКИ

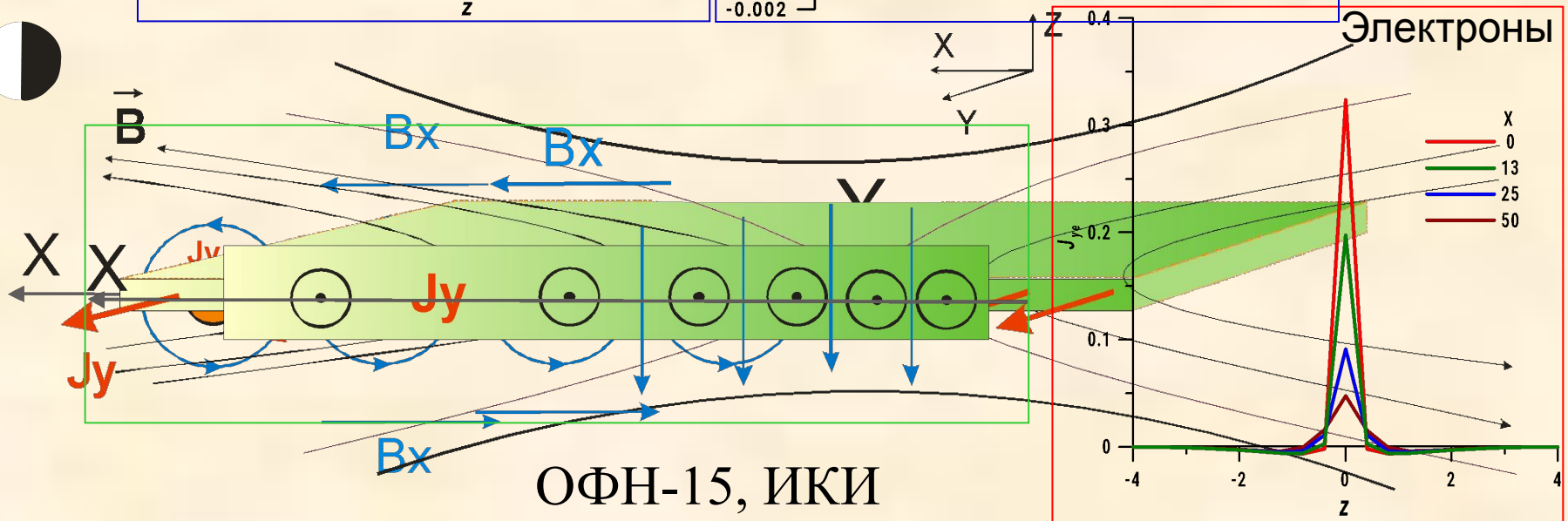
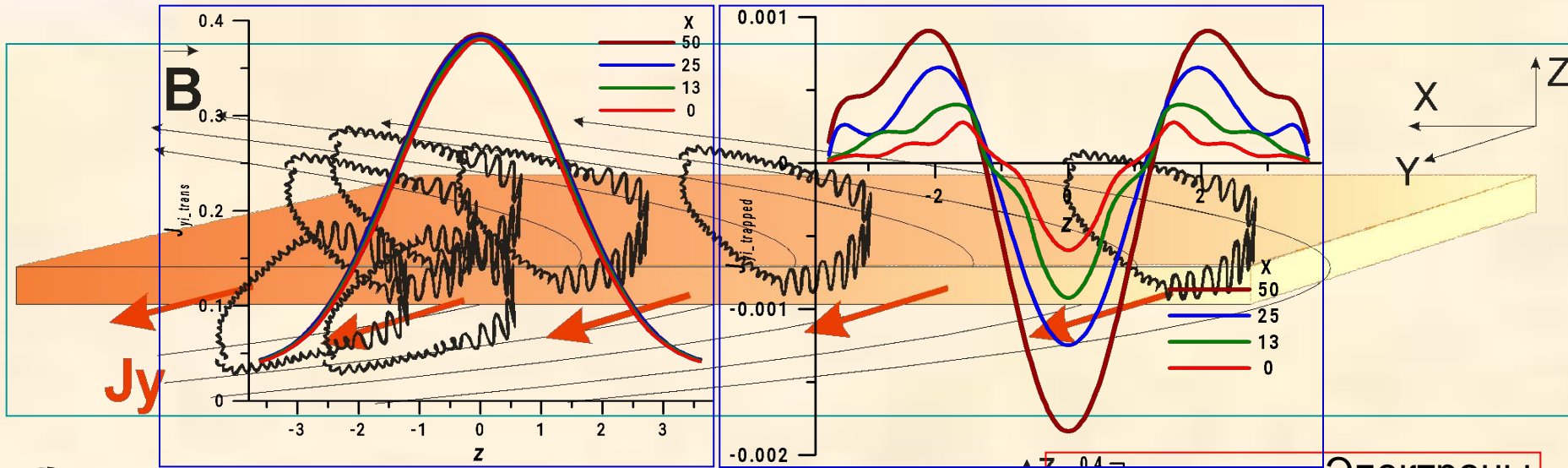
РАН 02.2012

# Распределение нормального поля $B_z$ в 2D ТС



# Вклад популяций частиц плазмы в распределение магнитного поля в ТС

Квазизахваченные ионы



ОФН-15, ИКИ  
РАН 02.2012

# Выводы

- ❑ Показано, что неоднородное распределение плотности тока в тонком токовом слое в продольном направлении обусловлено влиянием квазизахваченных ионов и электронов, в то время как основные носители тока – пролетные спейсеровские частицы.
- ❑ Плотность квазизахваченных частиц выше в области больших значений  $V_z$ , благодаря чему вблизи Земли может формироваться расщепленный ТС с 2 максимумами плотности тока.
- ❑ В области меньших  $V_z$  профиль  $J_y$  имеет колоколообразную форму и поддерживается, главным образом, токами пролетных ионов и электронов.
- ❑ Градиент электронных токов возрастает прочь от Земли, создавая самосогласованную отрицательную  $V_z$  компоненту, компенсирующую внешнее поле магнитного диполя.
- ❑ Возможно, электронные токи в ТТС облегчают формирование X-линии в хвосте м/сферы Земли.



A winter scene featuring several evergreen trees heavily laden with snow. Long, thin icicles hang from the branches and trunks of the trees. The ground is covered in a thick layer of snow. The overall atmosphere is cold and serene.

Спасибо за внимание!