

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ
СВЕРХМЕЛКОМАСШТАБНЫХ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ИОНОСФЕРНОЙ
ПЛАЗМЕ**

О.В. Мингалев, Г.И. Мингалева, В.С. Мингалев

**Полярный геофизический институт КолНЦ РАН,
г. Апатиты, Россия**

Неоднородности электронной концентрации, вытянутые вдоль силовых линий геомагнитного поля, часто наблюдаются в ионосферной и магнитосферной плазме. Их поперечные размеры могут находиться в диапазоне от нескольких дебаевских радиусов до нескольких десятков километров, а относительные отклонения электронной концентрации в них могут колебаться от долей до десятков процентов. Мелкомасштабные неоднородности могут наблюдаться в околоземной плазме как в естественных условиях, например, радиоаврора или мелкомасштабная турбулентность, так и при искусственных воздействиях на нее, в частности, во время экспериментов по нагреву ионосферы мощными короткими радиоволнами, испускаемыми наземными нагревными стендами.

Рассматриваемые в настоящей работе неоднородности считаются сильно вытянутыми вдоль магнитного поля, параметры плазмы внутри и вне их считаются слабо зависящими от продольной координаты. Поэтому исследуется зависимость плазменных параметров только от координат, перпендикулярных магнитному полю, т.е. задача считается пространственно 2-х мерной.

Целью настоящей работы является исследование динамики отдельных вытянутых вдоль магнитного поля сверхмелкомасштабных неоднородностей в плоскости, ортогональной магнитному полю.

Рассчитывается эволюция во времени первоначально созданной неоднородности, имеющей поперечные размеры порядка нескольких дебаевских радиусов, до ее полного расплывания и исчезновения.

Для исследования динамики отдельной сверхмелко-масштабной неоднородности используется недавно разработанная в ПГИ КолНЦ РАН численная модель, в которой предполагается, что плазма является разреженной смесью электронов и положительных ионов. Поскольку поперечные размеры исследуемых неоднородностей составляют несколько дебаевских радиусов и являются весьма малыми по сравнению с длинами свободного пробега электронов и ионов, то плазма считается бесстолкновительной. Кинетические процессы в ней описываются системой уравнений Власова-Пуассона, причем уравнения Власова описывают поведение функций распределения электронов и ионов, а уравнение Пуассона описывает самосогласованное электрическое поле в плазме. Внешнее магнитное поле считается постоянным и является задаваемым параметром модели.

Для решения применяемой в модели системы уравнений Власова-Пуассона используется метод крупных частиц. Областью моделирования является квадрат со стороной, равной 96 дебаевским радиусам, в центре которого и задается первоначальная неоднородность. Подробное описание используемой математической модели можно найти в работе:

Мингалев О. В., Мингалев И. В., Мингалев В. С.
Двумерное численное моделирование динамики
мелкомасштабных неоднородностей в околоземной
плазме. // Космические исследования. 2006. Т. 44. №5. С.
416-427.

Уравнения модели в $2D2V$ постановке ($a=i,e$): $\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{e}_3 = \text{Const}$

Функции распределения имеют вид

$$f_a(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \frac{1}{V_{Ta} \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left(-\frac{v_3^2}{2 \cdot V_{Ta}^2}\right) \cdot F_a(x_1, x_2, v_1, v_2);$$

Система Власова-Пуассона

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} + \left(\mathbf{v}, \frac{\partial f_a}{\partial \mathbf{x}}\right) + \frac{q_a}{m_a} \left(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0, \frac{\partial f_a}{\partial \mathbf{v}}\right) = 0$$

$$n_a(x_1, x_2, t) = \int f_a(x_1, x_2, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v} \quad \rho(x_1, x_2, t) = e(n_i - n_e)$$

$$\mathbf{E}(x_1, x_2, t) = -\nabla \varphi(x_1, x_2, t) \quad \Delta \varphi(x_1, x_2, t) = -\rho(x_1, x_2, t) \varepsilon_0$$

Область моделирования — квадрат с центром в начале координат и стороной $2L$:

$$\Pi = \{x_1, x_2\} \mid |x_k| < L$$

Используем периодические граничные условия

$$f_i(\mathbf{x}, \mathbf{v})|_{t=0} = f_{0i}(\mathbf{v})$$

Начальное состояние

$$f_e(\mathbf{x}, \mathbf{v})|_{t=0} = f_{0e}(\mathbf{v}) = \frac{1}{V_{Te} \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left(-\frac{v_3^2}{2 \cdot V_{Te}^2}\right) \cdot F_{0e}(x_1, x_2, v_1, v_2);$$

$$f_{0a}(\mathbf{v}) = n_0 \sqrt{2 \cdot \pi} \exp(-\mathbf{v}^2 / V_{Ta}^2);$$

Результаты расчетов, представляемые в настоящей работе, получены при значениях плазменных параметров, типичных для ночной ионосферы на высоте 300 км.

Средняя длина свободного пробега $l_{\text{free path}} \approx 50$ м;

Температура ионов $T_i \approx 930$ К, $V_{Ti} \approx 0.693$ км/с,

Температура электронов $T_e \approx 1212.9$ К, $V_{Te} \approx 135.584$ км/с;

Равновесная концентрация ионов и электронов $n_i^0 = n_e^0 = n_0 = 10^{11}$ м⁻³

Плазменная частота $\omega_{pe}^0 \approx 1.784 \cdot 10^7$ с⁻¹, $\theta_{pe}^0 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{pe}^0} \approx 3.522 \cdot 10^{-7}$ с

Дебаевское расстояние $\lambda_{De}^0 = \frac{V_{Te}}{\omega_{pe}^0} \approx 0.0076$ м = 7.6 мм

Магнитное поле $B_0 = 4.4 \cdot 10^{-5}$ Тл

Циклотронная частота и период электронов

$\omega_{ce} \approx 7.73877 \cdot 10^6$ с⁻¹, $\theta_{ce} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{ce}} \approx 8.1191 \cdot 10^{-7}$ с $\frac{\theta_{ce}}{\theta_{pe}^0} = \frac{\omega_{pe}^0}{\omega_{ce}} \approx 2.306$

Параметры дискретной модели: $L = 48 \cdot \lambda_{De}^0$,

шаг сетки $h = \frac{1}{8} \lambda_{De}^0 \approx 0.95 \text{ мм}$; сетка 768 768 шагов;

шаг по времени для электрического поля $\tau_f^0 = \theta_{pe}^0 / 100$;

Сеточная скорость $V_h = h / \tau_f^0$ примерно в 2 раза больше V_{Te} :

$$\frac{V_h}{V_{Te}} = \frac{h}{\tau_f^0 V_{Te}} = \frac{100}{16 \cdot \pi} \approx 1.99$$

Дискретное $2D2V$ распределение Максвелла создавалось в квадрате

со стороной $L_g = \frac{1}{2} \lambda_{De}^0$ при помощи $v_m = 2^{11}$ частиц и имело

16 уровней энергии. Число частиц в дебаевской ячейке для

модельной плазмы $n_D^{\text{mod}} = 4 \cdot v_m = 2^{13}$

Число частиц в дебаевской ячейке на измерение для модельной

плазмы $v_D^{\text{mod}} = \left(\frac{4}{3} n_D^{\text{mod}} \right)^{1/2} = 64 \cdot \sqrt{2} \approx 90.51 > v_D$

Период циклотронных колебаний электронов оказывается в 2.3 раза больше равновесного периода лэнгмюровских колебаний электронов.

При значениях параметров плазмы, типичных для ночной ионосферы на высоте 300 км, нами были проведены расчеты эволюции функций распределения заряженных частиц и электрического поля в плазме для двух принципиально различающихся ситуаций.

В первой ситуации концентрации электронов и ионов в начальный момент являлись пространственно однородными и совпадали во всех точках области моделирования, т.е. процесс стартовал от полностью электронейтрального состояния. Расчеты показали, что концентрации электронов и ионов стремятся сохранить пространственную однородность. Однако, вычисляемые в узлах сетки параметры обнаруживают нерегулярные флуктуации возле своих начальных значений. Наличие таких фоновых флуктуаций, называемых дискретным шумом, вызвано конечностью числа макрочастиц, используемых в модели, и является специфической чертой применяемого метода крупных частиц.

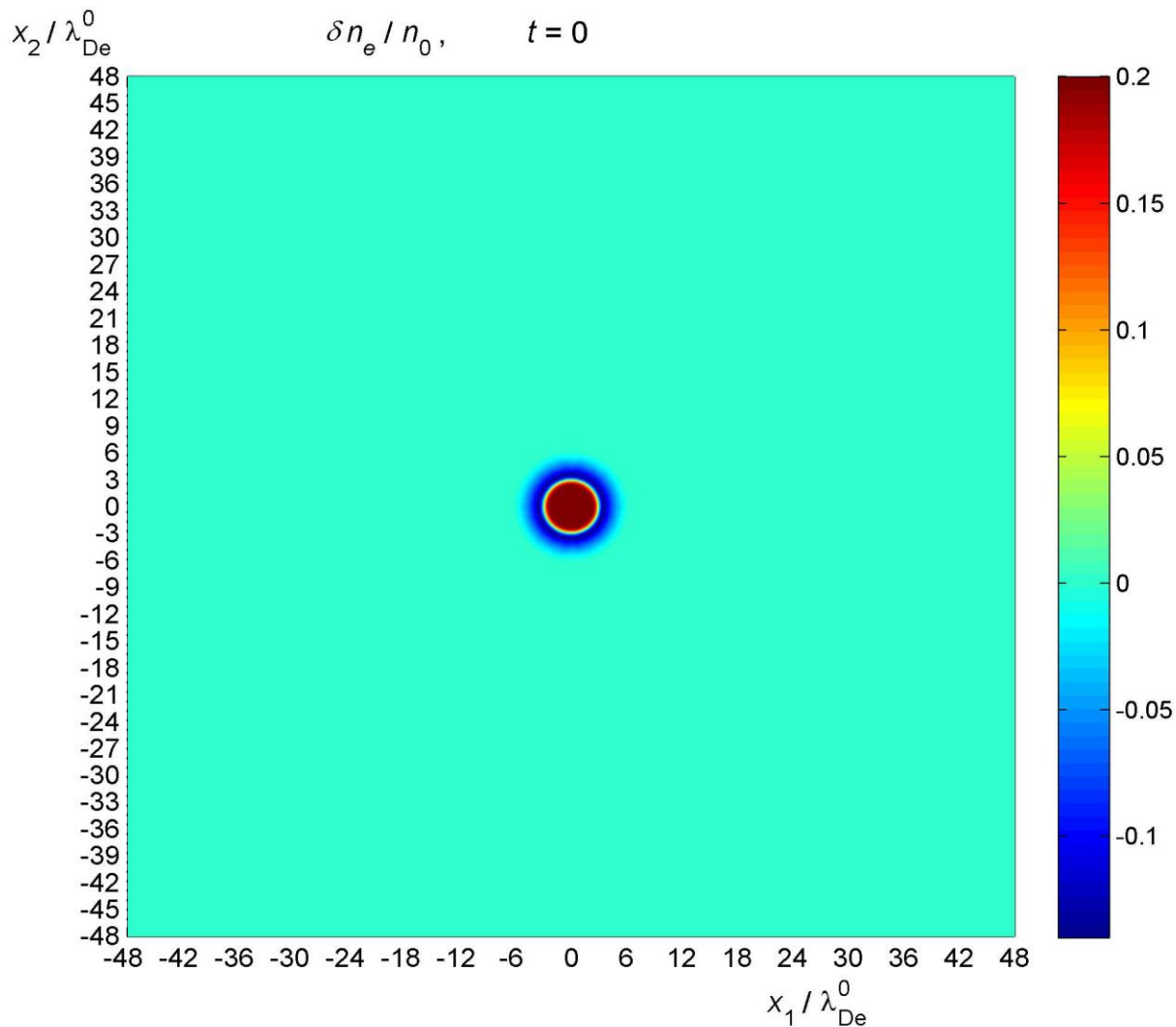
Выявленная в описываемых расчетах амплитуда флуктуаций определяет точность модели, с которой могут быть рассчитаны физические параметры в ходе численного моделирования.

Во второй ситуации в начальный момент концентрация ионов являлась пространственно однородной, а в пространственном распределении электронной концентрации создавалась первоначальная неоднородность, имеющая форму круга с центром в середине области моделирования и диаметром λ ; вне этого круга концентрации электронов и ионов являлись пространственно однородными и совпадали. Внутри первоначальной круглой неоднородности часть электронов из меньшего по размерам внутреннего круга с диаметром $\lambda/2$ перемещалась случайным образом в окружающее его кольцо, внешний и внутренний диаметры которого составляли, соответственно, λ и $\lambda/2$, причем концентрации электронов и ионов в кольце и во внутреннем круге были близки к постоянным.

Рассмотрим результаты расчетов для второй ситуации для варианта, в котором в начальный момент λ равно 12 дебаевским радиусам и среднее уменьшение электронной концентрации относительно первоначального фонового значения n_0 , т.е. величина

$$\frac{\delta n_e}{n_0} = \frac{n_0 - n_e}{n_0},$$

во внутреннем круге равна 0.2, или другими словами, когда относительное уменьшение электронной концентрации в центре неоднородности достигало 20%.



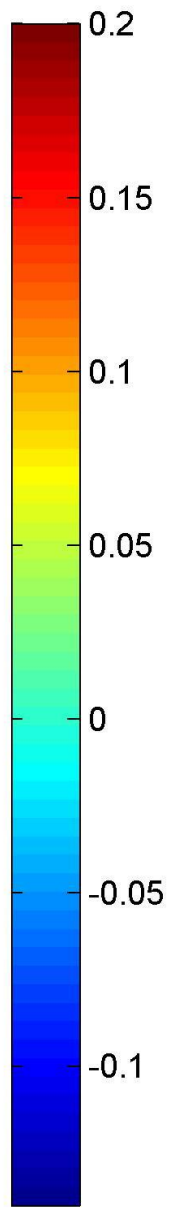
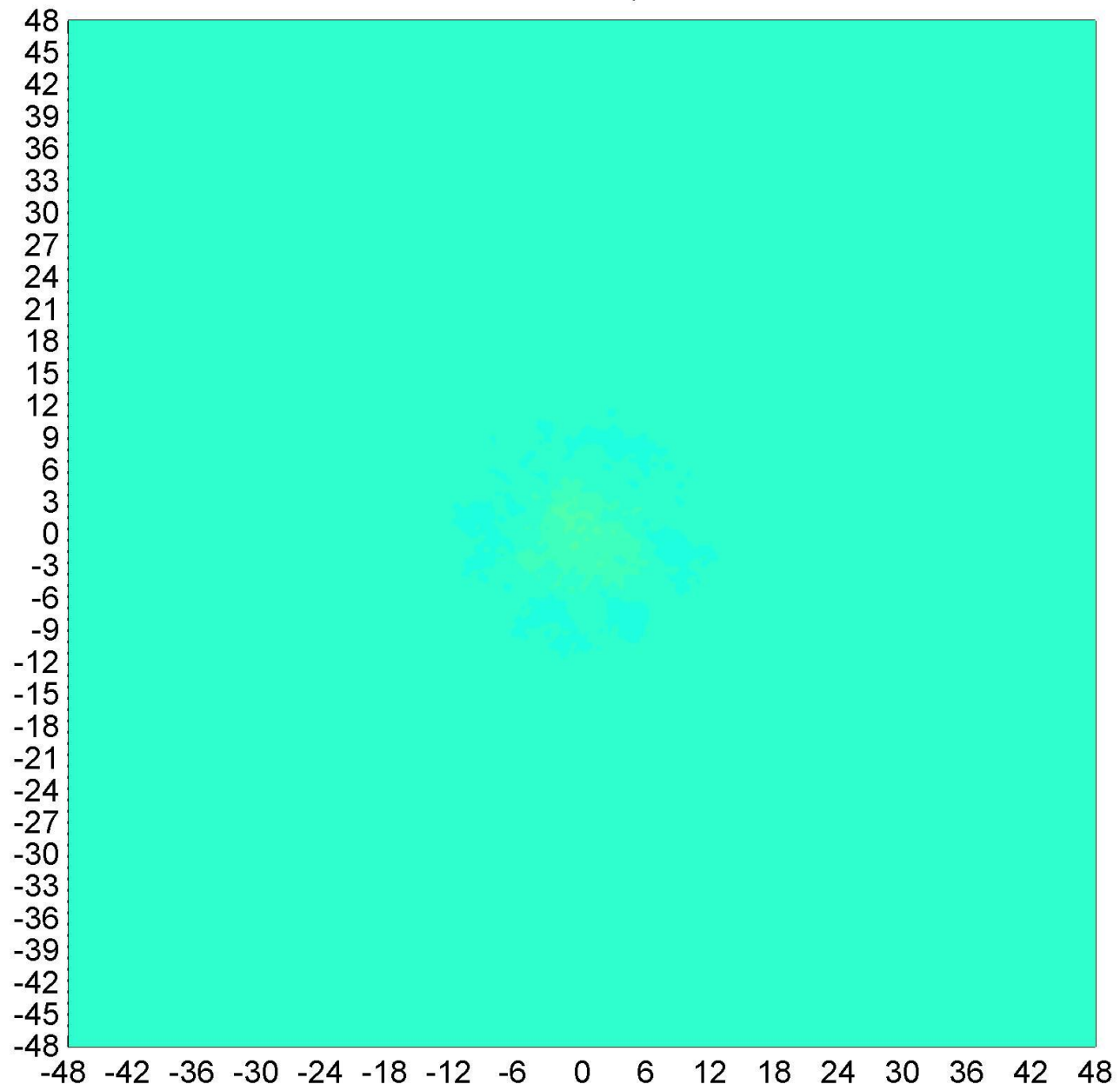
Относительные отклонения электронной концентрации от первоначального фонового значения в начальный момент. Цветовая гамма рисунка характеризует значения отклонений в соответствии со шкалой, приведенной справа. По горизонтальной и вертикальной осям, лежащим в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, отложено расстояние от центра области моделирования, выраженное в дебаевских радиусах.

Расчеты показали, что в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, первоначально созданная неоднородность то расплывалась в пространстве, исчезая полностью, то вновь воссоздавалась на короткое время так, что в поведении ее формы и значений физических параметров, характеризующих ее, обнаруживались периодические колебания. Амплитуда этих колебаний постепенно уменьшалась и выходила после примерно 15 колебаний (примерно 35 периодов лэнгмюровских колебаний электронов) на некоторый постоянный уровень, который сохранялся в дальнейшем, по крайней мере, в течение 24 периодов колебаний.

x_2 / λ_{De}^0

$\delta n_e / n_0,$

$t = 1 \theta_{pe}^0$

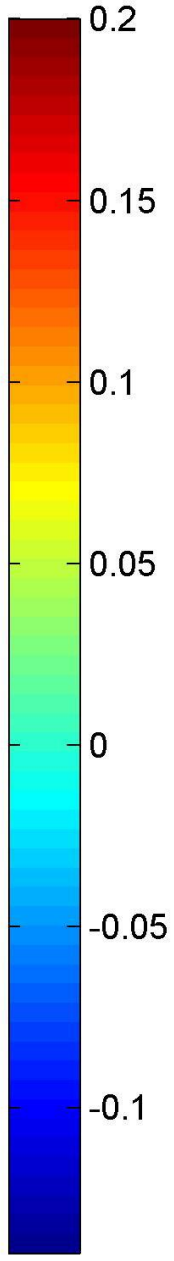
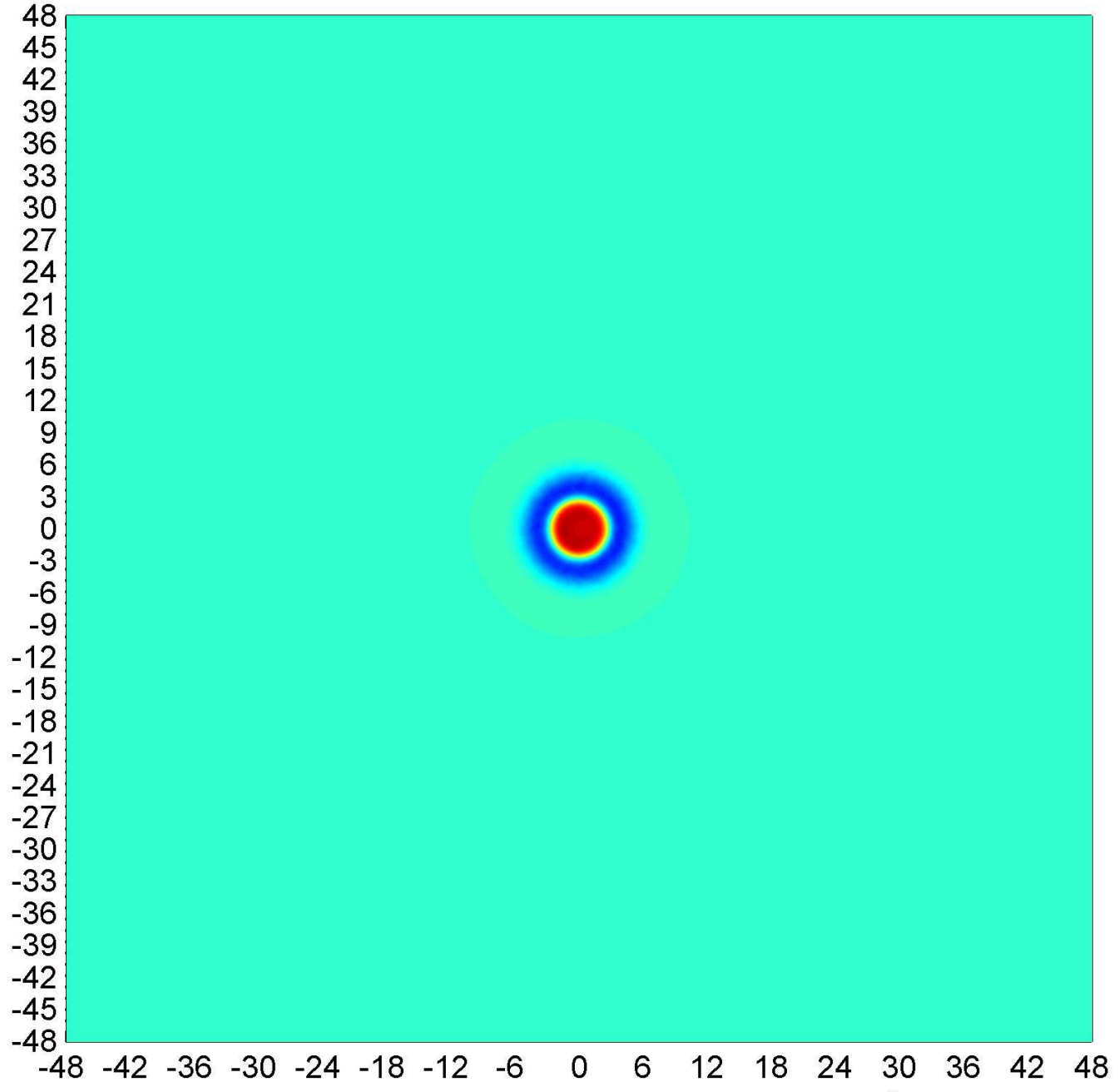


x_1 / λ_{De}^0

x_2 / λ_{De}

n_e / n_0

ω / ω_{pe}

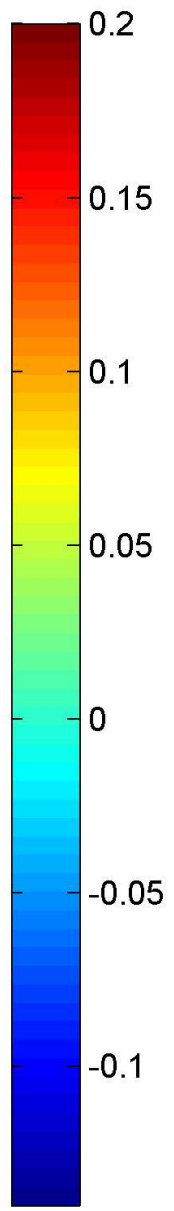
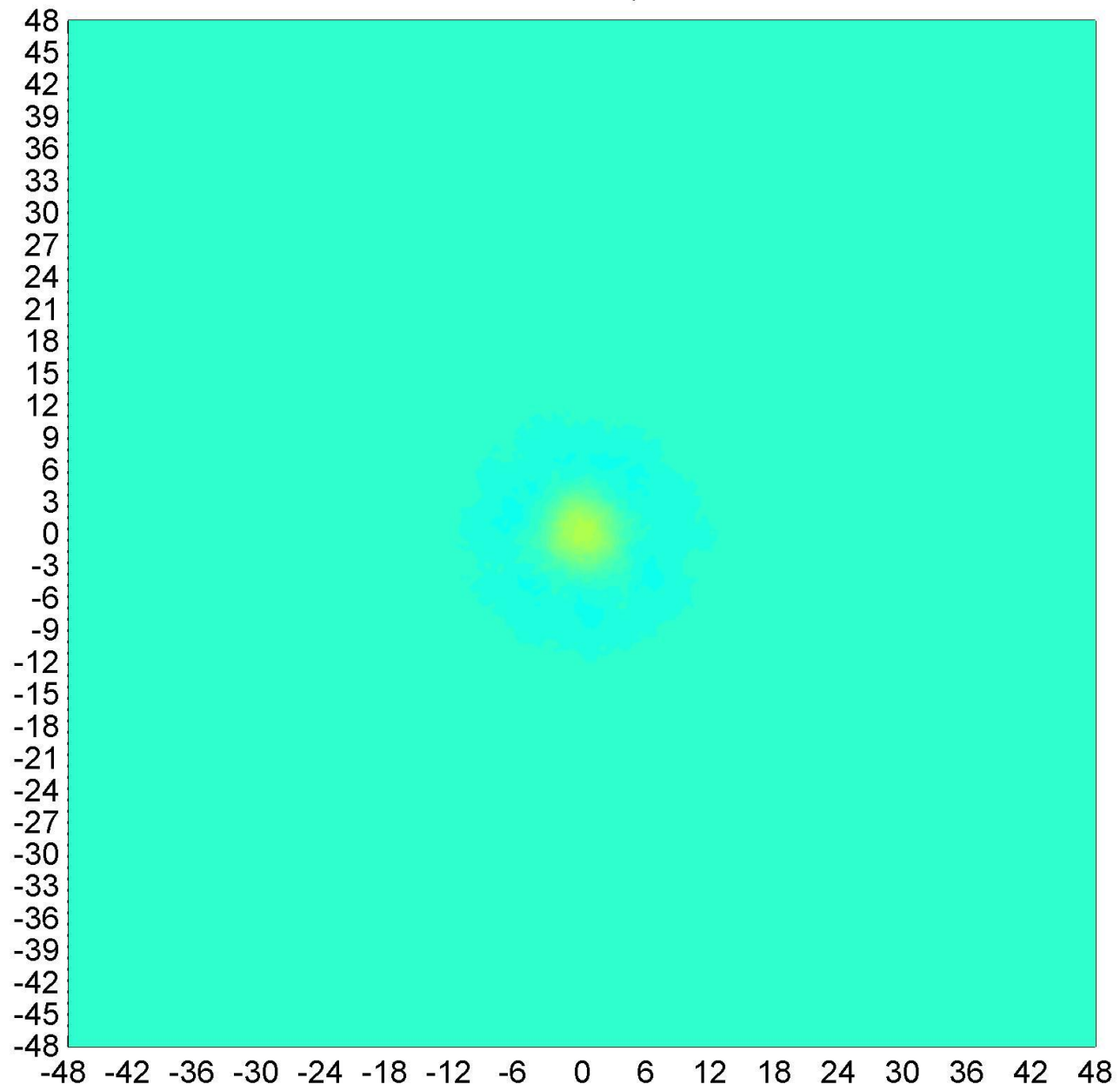


x_1 / λ_{De}^0

x_2 / λ_{De}^0

$\delta n_e / n_0,$

$t = 3 \theta_{pe}^0$

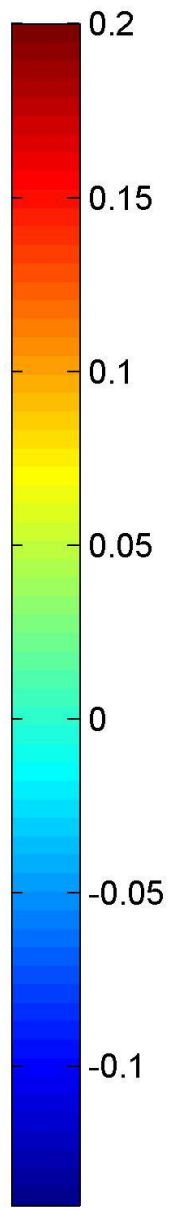
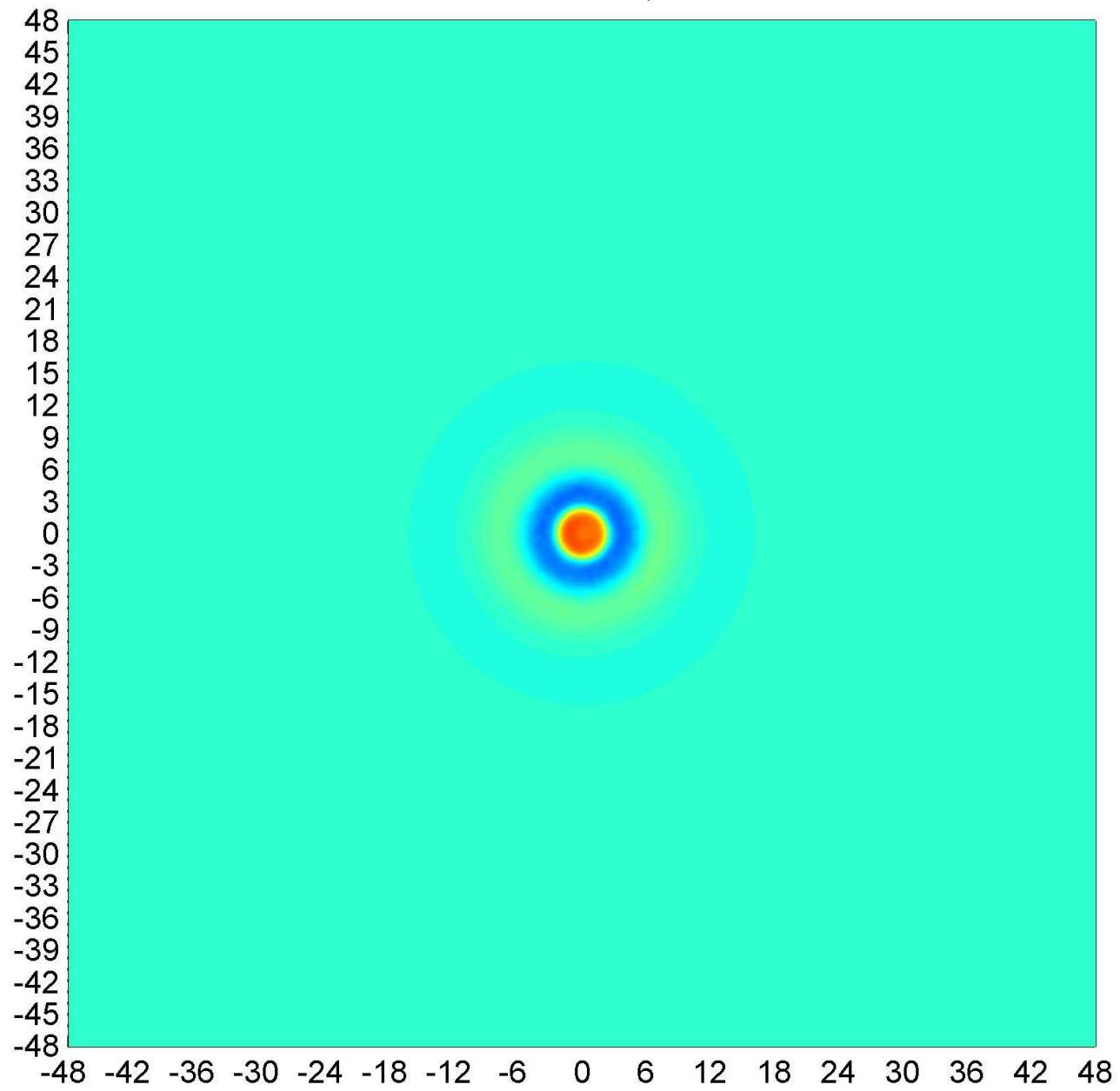


x_1 / λ_{De}^0

x_2 / λ_{De}^0

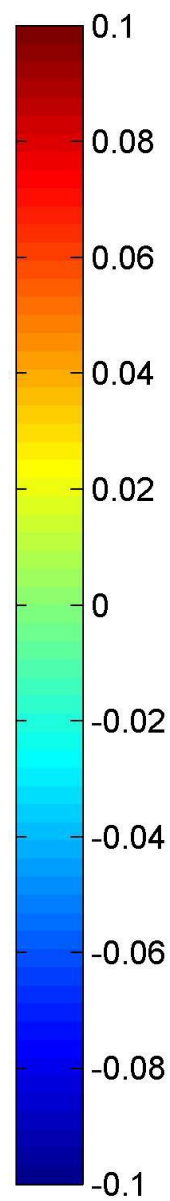
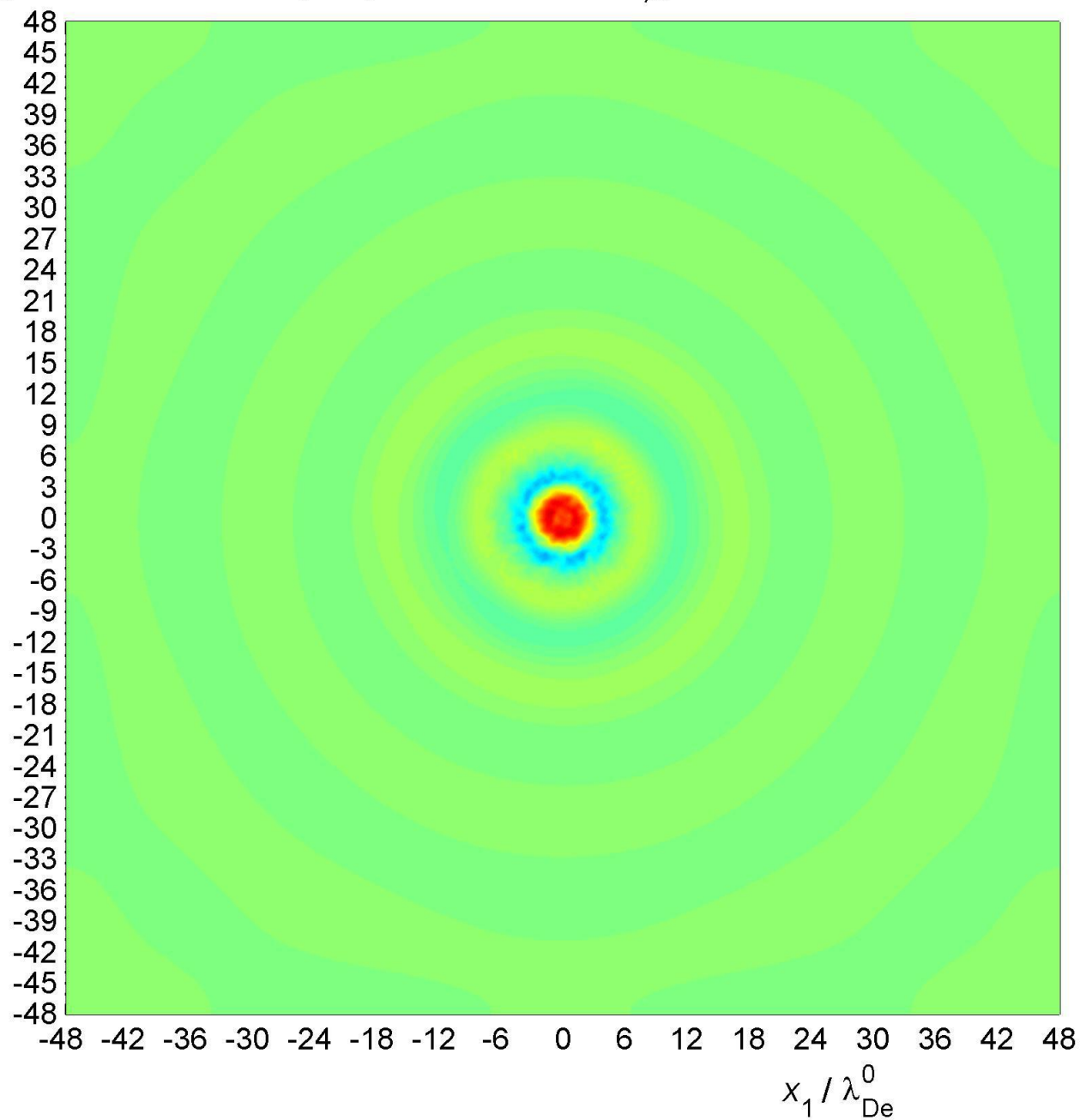
$\delta n_e / n_0,$

$t = 4.4 \theta_{pe}^0$

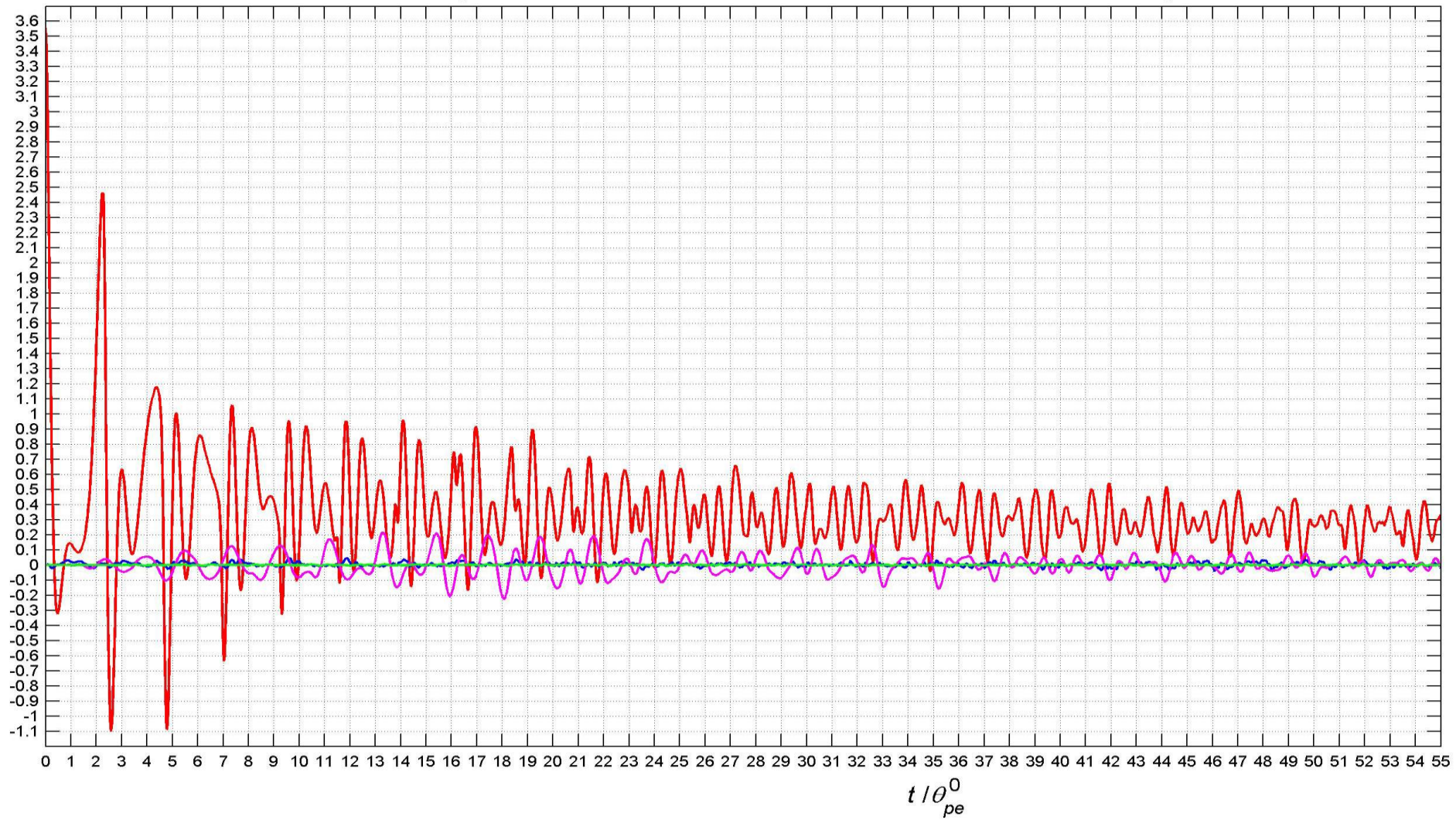


x_1 / λ_{De}^0

В ходе колебаний помимо первоначальной структуры в центре области моделирования начинали появляться дополнительные почти симметричные чередующиеся кольца с избытком заряда разного знака. Эти структуры отделялись от начальной неоднородности и со временем заполняли всю область моделирования. Центр неоднородности при этом оставался неподвижным.

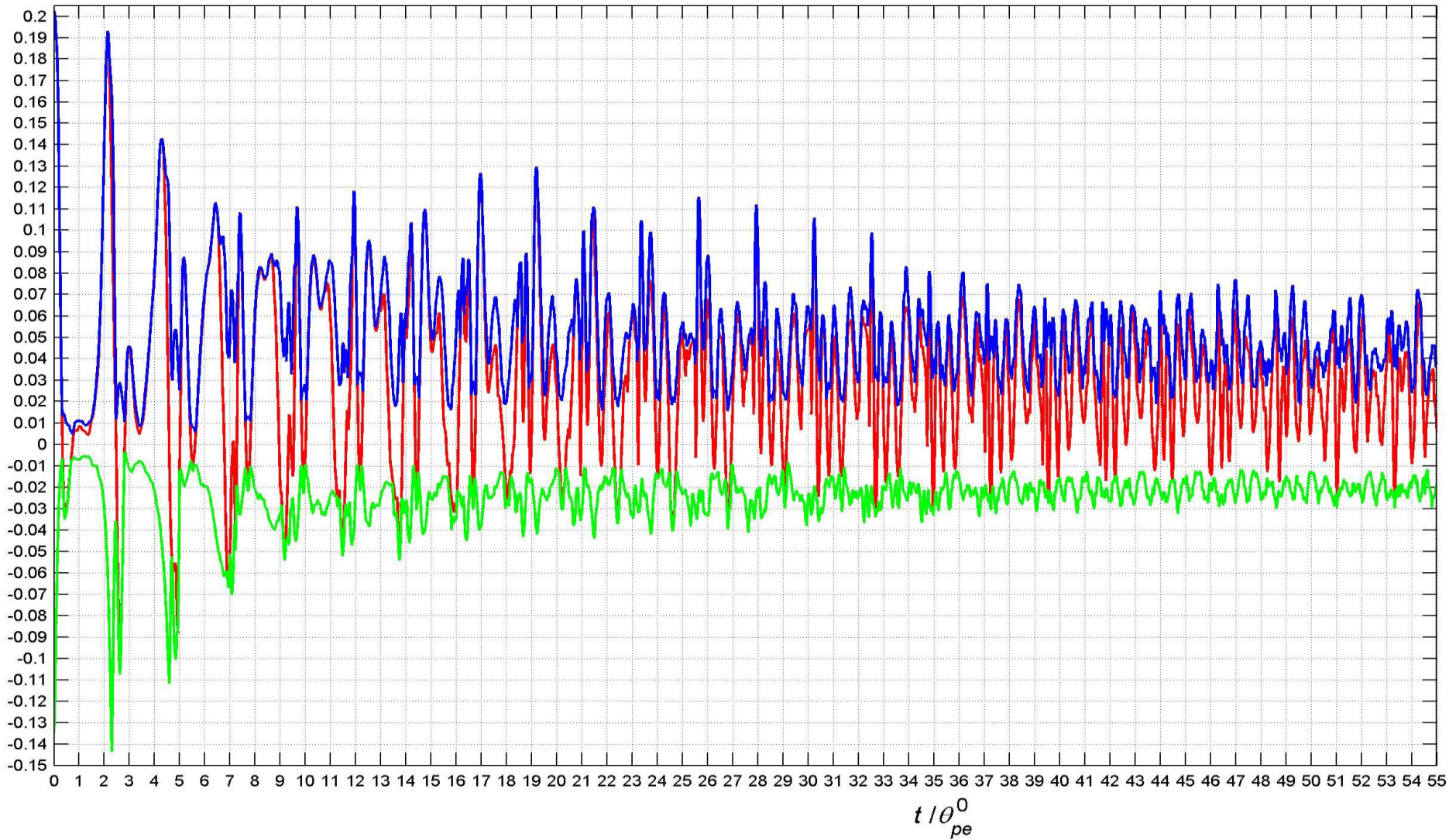
$x_2 / \lambda_{\text{De}}^0$ $\delta n_e / n_0,$ $t = 14.09 \theta_{pe}^0$ 

(В/м): $E_x(x=3\lambda_{De}^0, y=0, t)$ ---красн., $E_y(x=3\lambda_{De}^0, y=0, t)$ ---син., $E_x(x=16\lambda_{De}^0, y=0, t)$ ---фиол., $E_y(x=16\lambda_{De}^0, y=0, t)$ ---зел.



По горизонтальной оси отложено время, выраженное в равновесных периодах лэнгмюровских колебаний электронов .

$\max(\delta n(t) / n_0)$ --- синий, $\min(\delta n(t) / n_0)$ --- зеленый, $\delta n(\mathbf{0};t) / n_0$ --- красный



По горизонтальной оси отложено время, выраженное в равновесных периодах лэнгмюровских колебаний электронов .

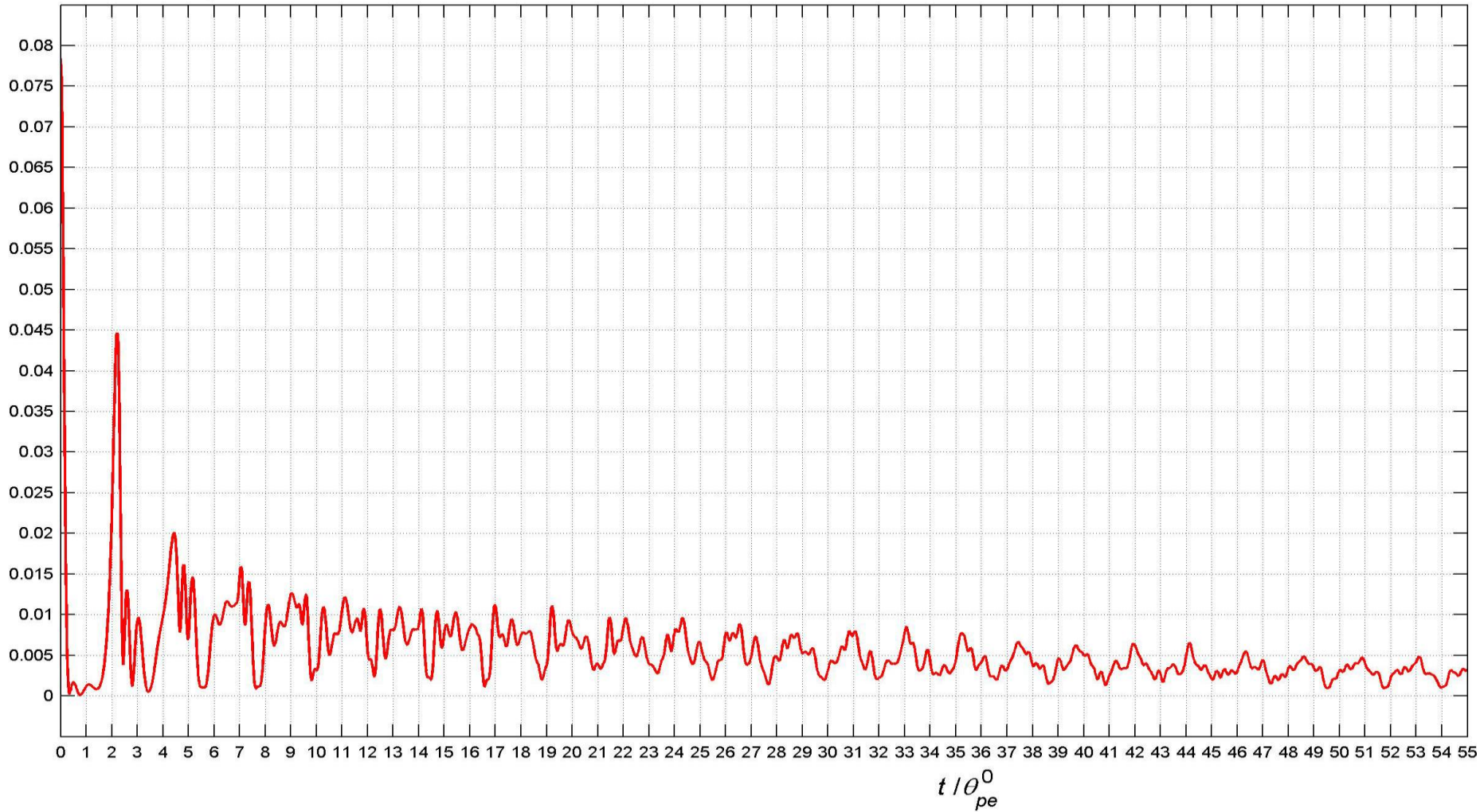
Одним из параметров, характеризующих заполняющую некоторый объем V плазму, является потенциальная энергия

$$W_{pot} = \frac{1}{2} \int_V \rho \cdot \varphi dv,$$

где ρ - плотность электрического заряда, φ - потенциал электрического поля. Численная аппроксимация этого интеграла, называемая сеточной потенциальной энергией системы, отнесенная к начальной кинетической энергии системы W_{kin}^0 , т.е. величина $W_{pot}(t) / W_{kin}^0$, как функция времени приведена на следующем рисунке.

$$W_{pot}(t) / W_{kin}^0$$

в случае изначально круглой неоднородности



По горизонтальной оси отложено время, выраженное в равновесных периодах лэнгмюровских колебаний электронов .

Видно, что эта величина так же, как и другие рассчитываемые в модели физические параметры, обнаруживает затухающие периодические колебания. Период наибольших по амплитуде колебаний оказался равным примерно $2.3 \cdot \mathcal{G}_{pe}^0$, т.е. совпал с периодом циклотронных колебаний электронов. Амплитуда этих колебаний от своего наибольшего значения, равного почти 0.08, за время порядка $35 \cdot \mathcal{G}_{pe}^0$ (15 колебаний неоднородности) уменьшилась примерно на порядок и вышла на почти постоянный уровень. За указанное выше время отслеживаемая неоднородность практически полностью потеряла свою начальную структуру, расплылась и исчезла, перейдя в еще более мелкомасштабный неоднородный хаотичный фон.

Выводы:

- первоначально созданная на уровне F2-слоя ионосферы неоднородность за время, меньшее времени свободного пробега электронов, расплывается и исчезает, причем совершает при этом периодические затухающие колебания с периодом, близким к периоду циклотронных колебаний электронов;*
- на начальном этапе эволюции неоднородности вокруг нее появляются дополнительные почти симметричные чередующиеся кольца с избытком заряда разного знака, которые со временем заполняют все большую часть пространства вокруг первоначальной неоднородности;*
- процесс эволюции неоднородности протекает в бесстолкновительном режиме в течение всего времени её жизни, которое составляет порядка 15 периодов колебаний и равно примерно 35 периодам лэнгмюровских колебаний электронов.*

Спасибо за внимание !