

## **НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА**

Волосевич А. В. (Учреждение образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова», кафедра общей физики)

Аннотация. На основе магнитогидродинамической (МГД) системы уравнений движения заряженных частиц в ионосферной плазме получено эволюционное уравнение для нелинейных стационарных структур, движущихся в направлении к ортогональному магнитному и электрическому полю, и найдено его автомодельное решение в виде бегущих волн. Методом компьютерного моделирования исследована параметрическая область пространства, в которой возможно формирование нелинейных столкновительных ударных волн. Также определены возможные значения скоростей движения, дрейфовых скоростей электронов и масштабы таких структур.

Возникновение мелкомасштабных неоднородности электронной плотности в E-слое авроральной ионосферы во времена магнитных возмущений является уникальным явлением, которое изучается теоретически и экспериментально на протяжении многих лет. С современной точки зрения предполагается, что причиной генерации этих неоднородностей является модифицированная двухпотоковая, или Фарлей-Бунемановская (ФБ), неустойчивость. В многочисленных работах предпринимались попытки согласовать выводы этой теории с экспериментальными данными.

ми, получаемыми с ракет и спутников. Однако выводы линейной теории противоречили радарным измерениям со спутников и ракет в многочисленных экспериментах [1–4].

Целью данной работы является исследование нелинейных процессов, приводящих к стабилизации ФБ неустойчивости и к формированию стационарных волновых структур. На простых моделях исследованы основные физические процессы, приводящие к их формированию.

В работе [5] было получено эволюционное уравнение для стационарной электростатической структуры ( $N$ -возмущение электронной плотности):

$$a_0 \partial_{zzz}^3 N + k_1 \partial_{zz}^2 N + k_2 (\partial_z N)^2 + k_3 \partial_z N_i + k_4 (\partial_z N) (\partial_{zz}^2 N) + k_5 (\partial_z N)^3 = 0 \quad (1)$$

Коэффициенты в уравнении (1) зависят от ионосферных параметров, от масштаба нелинейной волновой структуры  $L$  и скорости ее движения  $V$ .

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 + a_2 + (a_1 + a_2 + 1)N; & k_2 &= (1 + a_2 + a_1) + a_1 N; \\ k_3 &= a_3(1 - N) - \alpha_0; & k_4 &= a_0(5 + 8N); & k_5 &= 2a_0. \end{aligned} \quad (2)$$

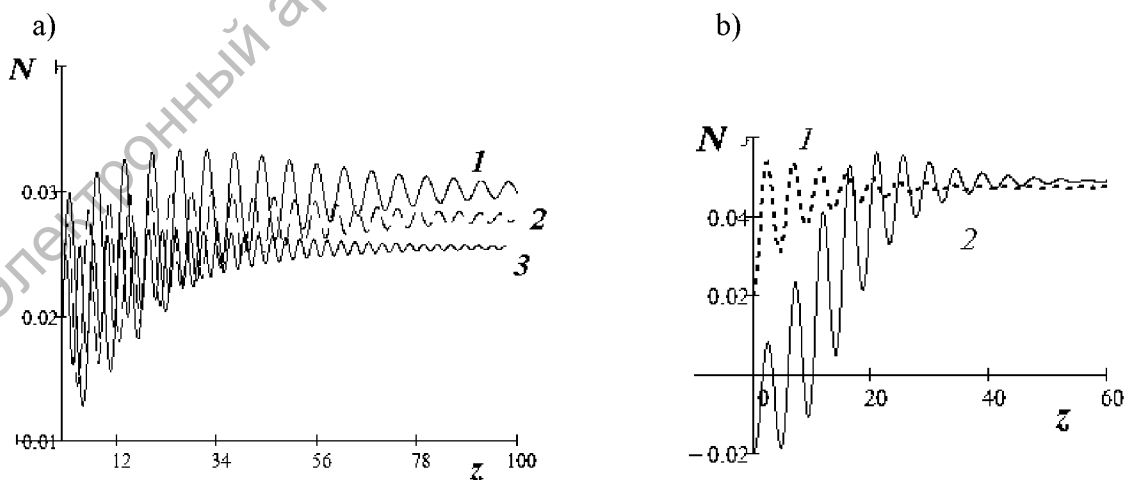
Здесь приняты обозначения для безразмерных ионосферных параметров:

$$\begin{aligned} a_0 &= \eta V / \tau L v_i; & a_1 &= 3V^2 / 2\tau v_{Ti}^2; & a_2 &= ((v_{Ti}^2 - V^2) / \tau v_{Ti}^2 - 1); & a_3 &= v_i V L / \tau v_{ii}^2 \\ \alpha_0 &= a_3(v_0 / V - 1) / R \end{aligned} \quad (3)$$

и введена безразмерная переменная  $z = s / L$ , где  $L$  – масштаб структуры.

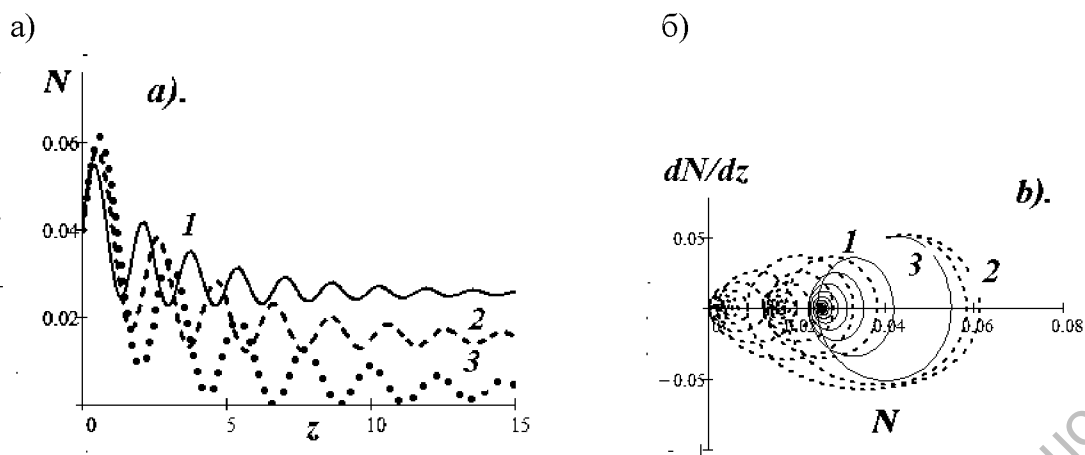
Эволюционное уравнение (1) исследовалось методом компьютерного моделирования. Для нелинейных стационарных электростатических структур сложная система дифференциальных уравнений в частных производных преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений для столкновительной ионосферной плазмы в обыкновенное дифференциальное уравнение третьего порядка (1), которое можно исследовать численными методами.

Исследовались зависимости параметров структур (формы, скорости их движения, масштабов, частот осцилляций) от физических параметров плазмы – дрейфовой скорости электронов, электронных и ионных столкновений, а также их гирочастот. В расчетах принимались физические параметры, соответствующие  $E$ -области авроральной ионосферы. Ниже на Рис. 1, 2 изображены некоторые результаты численного моделирования.



**Рис. 1.** Электростатические ударные волны при различных начальных данных  $N_0 < 0$

При значениях параметров:  $V = 363$  м/с,  $L = 0.2$ ,  $c_s = 353$  м/с – а) –  $N_0 > 0$ ; б) –  $N_0 < 0$ .



**Рис. 2.** Масштабы нелинейных структур при значениях параметров:  $R = 0.03$ ;  $V = 551$  m/s;  $c_s = 353$  m/s. а)  $L = 2.7$ ; 2.5; 2.3; б) Фазовые портреты процессов

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

а) исследование эволюционного уравнения (1) для ионосферной плазмы показало важность основных физических процессов – инерции, вязкости, диссипации и дисперсии на формирование стационарных волновых структур;

б) численным методом были определены: параметрические области ионосферных высот там, где возможно формирование стационарных структур, а также формы структур и скорости их движения;

в) показано, что стационарные диссипативные структуры образуются при конкуренции процессов диссипации, ионной вязкости дисперсии;

также показано, что скорость движения неоднородностей порядка скорости звука в плазме ( $V = v_0 / (1 + R) \approx c_s$ ), что соответствует результатам экспериментов по авроральному рассеянию радиоволн. Полученные результаты могут использоваться для интерпретации экспериментов.

### Литература

1. Lee, K. High-frequency Hall current instability / C. F. Lee K. Kennel, J. M. Kindel // Radio Science. – Vol. 1971. – Vol. 6, № 2. – P. 209–213.
2. Volosevich, A. V. Coherent nonlinear interaction of waves in collisional ionospheric plasma / A. V. Volosevich, C.-V. Meister // International Journal of Geomagnetism and Aeronom. – 2002. – Vol. 3, № 2. – P. 151–156.
3. Nielsen, E. VHF coherent radar signals from E-region of ionosphere and the relationship to electron drift velocity and ion acoustic velocity / E. Nielsen, C. F. del Pozo and P. J. S. Williams // J. Geophys. Res. – 2002. 107, A1, 10.1029/2001JA90111.
4. Волосевич, А. В. Обобщенная теория Фарлей-Бунемановской неустойчивости в столкновительной плазме / А. В. Волосевич, Ю. Ф. Зарницкий // Могилев: Веснік МДУ імя А. А. Куляшова. Сер. В. – 2013. – № 1. – С. 24–35.
5. Волосевич, А. В. Нелинейные электростатические структуры в столкновительной ионосферной плазме // Могилев: Веснік МДУ імя А. А. Куляшова. Сер. В. – 2016. – № 2. – С. 44–52.