



УДК 550.388.2

Н. М. Кащенко, С. А. Ишанов, С. В. Мациевский

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЕЙЛОРА В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ ИЗ СТОХАСТИЧЕСКИХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Рассмотрены процессы развития неустойчивости Рэля – Тейлора в экваториальной области ионосферы из случайно заданных малых возмущений нижней части F-слоя ионосферы.

Processes of development of instability of Rayleigh-Taylor in the equatorial region of the ionosphere from accidentally given small perturbations of lower part of F-layer of the ionosphere.

Ключевые слова: численная модель, неустойчивость Рэля-Тейлора, плазменные пузыри.

Key words: numeral model, the Rayleigh-Taylor instability, plasma bubbles.

Введение

Известно, что в ионосферной плазме на фоне регулярных распределений электронной концентрации имеются случайные возмущения с характерными масштабами от ~10 м до ~100 км. Особенности таких возмущений исследованы в ряде работ, например в [1; 2], на основе данных вертикального зондирования ионосферы при измерениях флуктуаций уровней радиоизлучения звезд, а также при использовании спутниковых измерений. В экваториальной ионосфере одной из причин появления среднemasштабных неоднородностей в вечернее время стало усиление малых неоднородностей механизмом неустойчивости Рэля – Тейлора, приводящее к появлению ионосферных пузырей [3].

1. Численная модель экваториального F-слоя ионосферы

В данной работе приведены результаты численных экспериментов по развитию плазменных пузырей из малых начальных возмущений со случайными параметрами. Для проведения численных экспериментов использована пятиионная модель экваториальной F-области ионосферы в двумерном диффузионном приближении, уравнения которой имеют вид [4]

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla_{\perp} (n_j \vec{V}_j) = Q_j - L_j, \quad (1)$$

$$\frac{3}{2} n_j k \left(\frac{\partial T_j}{\partial t} + (\vec{V}_j \nabla_{\perp}) T_j \right) + p_j \nabla_{\perp} \vec{V}_j + \nabla_{\perp} q_j = G_j - P_j, \quad (2)$$

$$\nabla_{\perp} (\hat{\sigma} \nabla_{\perp} U) = \nabla_{\perp} \vec{A}, \quad (3)$$



$$\vec{E}_\perp = -\nabla_\perp U, \quad (4)$$

$$\vec{E} + \vec{V}_j \times \vec{B} = 0, \quad (5)$$

где n_j , \vec{V}_j , Q_j , L_j , p_j , T_j , \vec{q}_j , G_j , P_j – соответственно концентрация, дрейфовая скорость, скорость образования и потеря, давление, температура, плотность теплового потока, скорость нагрева и скорость охлаждения заряженных частиц сорта j ; k – постоянная Больцмана; \vec{E} – напряженность электрического поля; $\hat{\sigma}$ – тензор проводимостей; \vec{A} – источники тока; U – потенциал электрического поля; \vec{B} – вектор индукции магнитного поля Земли. В модели использованы ионы O_2^+ , N_2^+ , NO^+ , O^+ , H^+ . Для вычисления внешних параметров, входящих в коэффициенты уравнений, использовалась глобальная термосферная модель MSIS [5–6].

14

Начальные значения при решении этих нестационарных уравнений задавались решением уравнений, полученным в результате численных расчетов на установление при заданном электрическом поле и при использовании глобальной модели термосферы MSIS для задания параметров нейтральной атмосферы.

Уравнения модели (1)–(5) решались в экваториальной плоскости конечно-разностными методами второго порядка точности на квазиравномерных регулярных сетках, шаги сеток в центральной части области были взяты равными 1 км. Для уравнений непрерывности ионов (1) и уравнений теплопроводности (2) использовались разностные схемы TVD типа [7]. При этом для функции $f(r)$, ограничивающей потоки [7], выбран следующий вид:

$$f(r) = \max\left(0, \frac{r\sqrt{2}}{\sqrt{1+r^2}}\right).$$

В соответствии с [7] такой ограничитель находится в области нелинейных монотонных схем с TVD свойством.

Уравнение потенциала электрического поля (3) имеет эллиптический тип с несамосопряженным оператором и переменными коэффициентами и решается на каждом временном шаге стандартным многосеточным методом. Для получения относительной погрешности порядка 10^{-12} при решении этим методом в среднем требовалось примерно 30 итераций.

Для улучшения качества совместного решения этих сильно связанных уравнений использовались итерации по нелинейности отдельно в каждом уравнении теплопроводности, по связям между уравнениями теплопроводности для разных сортов заряженных частиц и по связям между уравнениями непрерывности концентраций и уравнениями теплопроводности.

2. Результаты численных экспериментов

В работе [8] было проведено исследование конкуренции небольшого количества среднесапштабных неоднородностей на основе двумерной модели. Было показано, что при достаточно малых расстояниях экваториальные ионосферные пузыри взаимодействуют между собой,



что приводит к изменению параметров развития и даже подавлению некоторой части пузырей. Более того, начальные малые неоднородности концентрации плазмы могут иметь различные причины возникновения и различные параметры.

Для моделирования этой ситуации в данной работе рассмотрены процессы развития системы ионосферных пузырей в условиях, когда в некоторый начальный момент времени на фоновую концентрацию нижней части F-области экваториальной ионосферы наложено поле случайных малых возмущений. Пусть y – горизонтальная, а z – вертикальная координата области интегрирования. Тогда начальные малые возмущения будем задавать по формуле

$$n_j(y, z) = n_{j0}(y, z) \left(1 - f_1(y) \exp \left(- \left(\frac{z - f_2(y)}{f_3(y)} \right)^2 \right) \right),$$

где $n_{j0}(y, z)$ – невозмущенные ионные концентрации; $f_1(y)$, $f_2(y)$, $f_3(y)$ – функции, описывающие структуру возмущения. Значения этих функций задавались псевдослучайными с помощью встроенного в язык программирования C++, на котором реализована модель генератора псевдослучайных чисел, использующего как известно линейный конгруэнтный метод. Кроме этого в отдельных сравнительных расчетах был использован метод Фибоначчи с запаздываниями. Плотности вероятности для f_2 и f_3 показаны на рисунке 1, а значения f_1 распределены равномерно на отрезке $[0; 0,2]$.

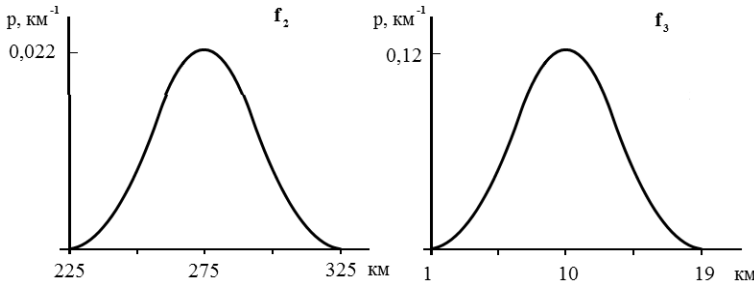


Рис. 1. Плотности вероятностей для значений функций f_2 (слева) и f_3 (справа)

Численные эксперименты проводились для условий, соответствующих равноденствию, уровню солнечной активности $F_{10.7} = 150$ и уровню геомагнитной активности $k_p = 3$, при этом начало процесса соответствовало 18.30 местного времени. Была проведена серия численных экспериментов с разными последовательностями псевдослучайных чисел и на конечноразностных сетках с различными пространственными шагами.

На рисунке 2 показано распределение электронной концентрации для одного из численных экспериментов в моменты времени 2200 с, 2600 с, 3000 с, 3400 с, 3800 с и 4000 с, считая от начала процесса. На этом

рисунке по горизонтали отложена долгота относительно центра области, а по вертикали отложена высота. Для лучшего отображения картинки вытянуты по горизонтали.

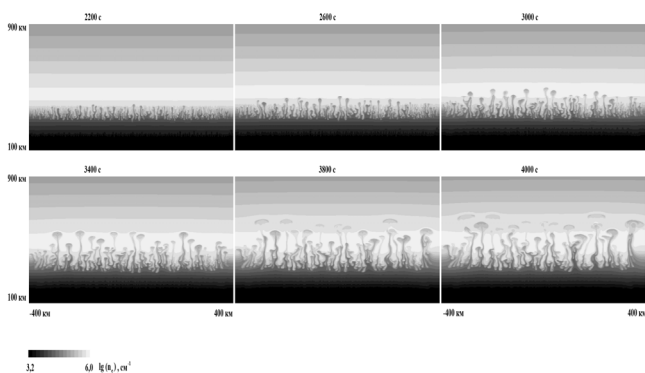


Рис. 2. Распределение десятичного логарифма электронной концентрации в различные моменты времени от начала процесса

Анализ результатов проведенных экспериментов показывает, что в описанных условиях процесс развития идет по следующему сценарию. На начальной, линейной, стадии процесса, которая в условиях экспериментов имеет длительность 1400 с, в области интегрирования (протяженностью по долготе 800 км) формируется примерно 80 зон пониженной концентрации. На следующей нелинейной стадии развития неустойчивости Рэля — Тейлора из этих зон формируется примерно 40 пузырей. Наконец на последней стадии эксперимента, соответствующей выходу наиболее развитых пузырей во внешнюю ионосферу, остается около 20 конкурирующих между собой развитых пузырей.

Таким образом, на первой стадии плотность неоднородностей составляет примерно одна неоднородность на 10 км, на второй стадии плотность пузырей составляет примерно один пузырь на 20 км, и наконец на последней стадии плотность развитых пузырей составляет примерно один пузырь на 40 км. Расчеты, проведенные с другими псевдослучайными последовательностями и с другими разрешениями разностных сеток, дают для указанных гелио-геофизических условий примерно такие же плотности ионосферных пузырей.

Кроме этих количественных особенностей процесса следует выделить следующие качественные особенности:

- сильная долготная асимметрия пузырей, существенно бóльшая, чем при развитии одиночных пузырей;
- возникновение изолированных пузырей существенно раньше, чем при развитии одиночных пузырей, что приводит в дальнейшем к быстрому развитию отдельных менее развитых пузырей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту 14-01-00020.



Список литературы

1. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М., 1984.
2. Гершман Б. Н., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д., Чернобровкина Н. А. Явления F-рассеяния в ионосфере. М., 1984.
3. Ossakow S.L., Zalesak S.T., McDonald B.E., Chaturvedi P.K. Nonlinear equatorial spread-F: Dependence of altitude of the F-peak and bottomside background electron density gradient scale length // J. Geophys. Res. 1979. Vol. A84, № 1. P. 17–39.
4. Кащенко Н. М., Мациевский С. В. Неустойчивость экваториального F-слоя ионосферы в условиях переменного электрического поля // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2014. Вып. 10. С. 30–35.
5. Hedin A. E., Salah J. E., Evans J. V. et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS 1. N2 density and temperature // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 82, № A1. P. 2139–2147.
6. Hedin A. E., Reber C. A., Newton G. P. et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS 2. Composition // *ibid.*
7. Сафронов А. В. Оценка точности и сравнительный анализ разностных схем сквозного счета повышенного порядка // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11. С. 137–143.
8. Кащенко Н. М., Мациевский С. В., Никитин М. А. Динамика системы множественных рэлей-тейлоровских ионосферных пузырей // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. № 2. С. 281–286.

Об авторах

Николай Михайлович Кащенко – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: kaschtschenko@mail.ru

Сергей Александрович Ишанов – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

Сергей Валентинович Мациевский – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: matsievsky@newmail.ru

About the authors

Dr Nikolay Kashchenko – ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: kaschtschenko@mail.ru

Prof. Sergey Ishanov – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

Dr Sergey Matsievsky – ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: matsievsky@newmail.ru