



УДК 550.388.2

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

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НАЧАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ПРОЦЕССЫ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЕЙЛОРА В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ F-СЛОЕ ИОНОСФЕРЫ

16

Приведены результаты численного моделирования неустойчивости Релея – Тэйлора для разных геометрических характеристик начальных неоднородностей для вечерних экваториальных условий на основе электродинамически согласованной математической модели экваториального F-слоя ионосферы. Показано, что увеличение только вертикальных размеров начальной неоднородности существенно ускоряет развитие рэлей-тейлоровского пузыря, тогда как увеличение только горизонтальных размеров начальной неоднородности несущественно замедляет это развитие.

Results of numerical simulation of the Rayleigh – Taylor instability for different geometrical characteristics of the initial irregularities for evening equatorial conditions based on electrodynamicly coherent mathematical model of the equatorial ionosphere F-layer are given. It is shown that increase only in the vertical extent of initial irregularity significantly accelerates development a rayleigh-Taylor bubble whereas increase only in lateral dimensions of initial irregularity insignificantly slows down this development.

Введение

Целью работы является дальнейшее исследование процессов развития экваториальной неустойчивости Релея – Тэйлора из начальных неоднородностей с разными геометрическими характеристиками.

Ранее в работах авторов эта тема исследования неоднократно поднималась. Уже при расчетах на небольшой математической двумерной экспресс-модели экваториальной неустойчивости Релея – Тэйлора [1] был сделан вывод о том, что структура рэлей-тейлоровских пузырей зависит от начальных условий.

Интересные результаты были получены при трехмерном моделировании экваториальной неустойчивости Релея – Тэйлора [2], а именно:

1) независимость характерного времени развития неустойчивости Релея – Тэйлора от большого (более 1000 км) продольного (вдоль геомагнитных линий) размера начальной неоднородности;

2) линейная связь между логарифмами малого (менее 1000 км) продольного размера начальной неоднородности и времени развития неустойчивости Релея – Тэйлора.

Теоретически вопрос о возможном влиянии на динамику рэлей-тейлоровских пузырей конечной вытянутости их вдоль силовых линий геомагнитного поля был затронут в работе [3].



1. Возникновение неустойчивости Рэлея – Тейлора

Как известно, условия для развития неустойчивости Рэлея – Тейлора в ионосфере Земли возникают в вечернее время при наличии направленного вверх вертикального дрейфа разреженной ионосферной плазмы и могут быть описаны линейным инкрементом нарастания, имеющим вид [4]

$$\gamma = \left(\frac{g}{v_{in}} + \frac{E_{0y}}{B} \right) \frac{\partial \ln N_e}{\partial z} - \nu_R,$$

где ν_R – частота рекомбинации ионов. Наличие положительных значений параметра γ приводит на линейной стадии к экспоненциальному росту обеднения с характерным временем γ^{-1} . При этом условия развития неустойчивости Рэлея – Тейлора существенно улучшаются во время геомагнитных бурь.

2. Уравнения модели

В соответствии с [5] в математической модели развития неустойчивости Рэлея – Тейлора использовано квазигидродинамическое приближение, содержащее уравнения непрерывности ионов, уравнения движения ионов и электронов в диффузионном приближении

$$\frac{d\vec{V}_j}{dt} = 0,$$

уравнения теплопроводности ионов и электронов, уравнения непрерывности электрического тока и три уравнения потенциальности электрического поля [10]:

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

$$-\frac{\nabla p_j}{n_j m_j} + \frac{e}{m_j} (\vec{E} + \vec{V}_j \times \vec{B}) - \nu_{jn} (\vec{V}_j - \vec{V}_n) - \sum_{l \neq j} \nu_{jl} (\vec{V}_j - \vec{V}_l) + \vec{g} = 0, \quad (2)$$

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

$$\nabla \times \vec{E} = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \vec{j} \equiv \nabla \sum e_j n_j \vec{V}_j = 0, \quad (5)$$

где n_j , \vec{V}_j , Q_j , L_j , m_j , e_j , p_j , ν_{jn} , ν_{jl} , T_j , q_j , G_j , P_j – соответственно концентрация, дрейфовая скорость, скорости образования и потерь, масса, заряд, давление, частоты соударений с нейтралами, частоты столкновений



между заряженными частицами, температура, плотность теплового потока, скорость нагрева и скорость охлаждения частиц сорта j ; k — постоянная Больцмана; \vec{j} — плотность тока; \vec{E} — напряженность электрического поля.

Следствие замагниченности ионосферной плазмы F-области процессы переноса вдоль магнитного поля Земли будут определяться столкновениями, а поперек поля — дрейфовым движением.

Из-за сильной анизотропии, обусловленной магнитным полем Земли, процессы диффузии и теплопроводности в области F и во внешней ионосфере происходят в основном вдоль силовых линий геомагнитного поля [6], а благодаря условию электростатики (5) электрическое поле потенциально:

$$\vec{E} = -\nabla\Phi,$$

где Φ — потенциал электрического поля.

Плазма вдоль геомагнитного поля на высотах экваториальной области F является высокопроводящей средой, поэтому будем считать, что силовые линии геомагнитного поля эквипотенциальны, а магнитное поле постоянно по времени и дипольное [7]. Поэтому размерность уравнения для потенциала может быть понижена до двух интегрированием его вдоль силовых линий:

$$\nabla_{\perp}(\hat{\sigma}\nabla_{\perp}\Phi) = \nabla_{\perp}\vec{A},$$

где $\hat{\sigma}$ — тензор интегральных проводимостей. Для вычисления параметров нейтральных частиц использовалась глобальная термосферная модель MSIS [8–9].

Уравнения вышеприведенной модели решались численно конечноразностными методами на квазиравномерных сетках, сгущающихся к центру области решения. Начальные значения задавались путем решения низкоширотной модели ионосферы до получения периодического решения.

В работе исследования проводятся в предположении достаточно развитых неоднородностей, что позволяет уравнения модели считать двумерными и записывать их в экваториальной плоскости [10]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla_{\perp}(n_i\vec{V}_i) = Q_i - L_i,$$

$$\frac{3}{2}n_i k \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + (\vec{V}_i \nabla_{\perp}) T_i \right) + p_i \nabla_{\perp} \vec{V}_i + \nabla_{\perp} q_i = G_i - P_i,$$

$$\nabla_{\perp}(\hat{\sigma}\nabla_{\perp}U) = \nabla_{\perp}\vec{A}.$$

Здесь ∇_{\perp} — поперечная магнитному полю Земли часть оператора ∇ , остальные обозначения те же, что и для системы дифференциальных уравнений (1–5).



3. Результаты численного моделирования

Численное моделирование проводилось в области, ограниченной снизу высотой 90 км, а сверху – 1700 км. По горизонтали протяженность области интегрирования составляет 400 км. Сетка выбрана так, что в центральной области шаги равны 2 км.

Условия расчетов соответствовали среднему уровню солнечной активности с $F_{10.7} = 150$ и уровню геомагнитной активности $k_p = 3$.

Для потенциала граничные условия заданы через фоновое электрическое поле.

Для концентраций и температур на нижней границе заданы соответственно условия химического равновесия и равенства нейтральной температуре, вверху и на боковых границах задано условие равенства нулю потоков.

Восточная компонента фонового электрического поля задавалась модельно, положительным значением (в представленных расчетах 1 мВ/м).

Начальное возмущение задавалось модельно в виде эллипса с пониженной концентрацией, в центре эллипса в 3 раза.

На рисунке 1 приведены зависимости времени развития пузыря (a) и вертикальной скорости в центре развитого пузыря (b) от горизонтального размера начальной неоднородности. При этом вертикальный размер начальной неоднородности равен 10 км. Время развития пузыря определялось достижением его центром высоты 500 км.

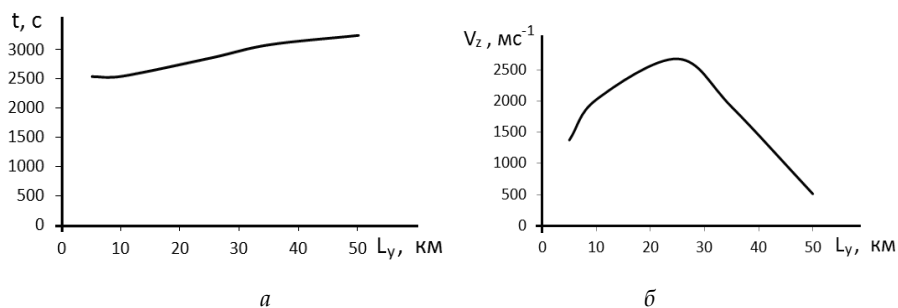


Рис. 1. Зависимости времени развития пузыря (a) и вертикальной скорости в центре развитого пузыря (b) от горизонтального размера начальной неоднородности (L_y)

Результаты, представленные на рисунке 1, показывают, что:

1) время развития рэлей-тейлоровского пузыря незначительно и монотонно увеличивается;

2) скорость плазмы в центре развитого пузыря при увеличении горизонтального размера начальной неоднородности вначале быстро растет, достигая максимума при горизонтальном размере 25 км, а затем быстро падает.

На рисунке 2 приведены зависимости времени развития пузыря (a) и вертикальной скорости в центре развитого пузыря (b) от вертикального размера начальной неоднородности. При этом горизонтальный размер равен 10 км. Время развития пузыря определялось достижением его центром высоты 500 км.

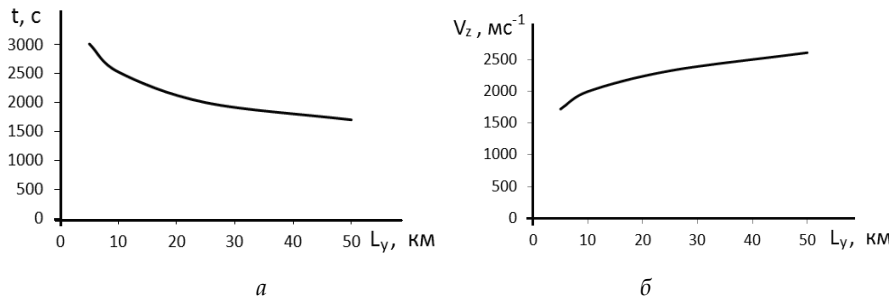


Рис. 2. Зависимости времени развития пузыря (а) и вертикальной скорости в центре развитого пузыря (б) от вертикального размера начальной неоднородности (L_z)

Результаты, представленные на рисунке 2, показывают, что в этом случае:

- 1) время развития достаточно сильно зависит от вертикального размера начальной неоднородности, монотонно убывая;
- 2) вертикальная скорость в центре развитого пузыря при увеличении вертикального размера начальной неоднородности достаточно быстро и монотонно возрастает.

Заключение

Относительно зависимости времени развития пузыря от размеров начальной неоднородности можно сделать следующие выводы:

- 1) вертикальный размер начальной неоднородности влияет на время развития пузыря гораздо сильнее, чем горизонтальный;
- 2) направления влияния размеров противоположны: увеличение горизонтального размера слабо увеличивает время развития пузыря, а увеличение вертикального размера — сильно уменьшает.

Другими словами, увеличение только вертикальных размеров начальной неоднородности существенно ускоряет развитие рэлей-тейлоровского пузыря, тогда как увеличение только горизонтальных размеров начальной неоднородности несущественно замедляет это развитие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту 17-01-00265.

Список литературы

1. Мацневский С. В., Никитин М. А., Пец А. В. О нелинейной стадии развития неустойчивости Рэля — Тейлора в экваториальной F-области // Геомагнетизм и аэронавигация. 1987. Т. 27, № 6. С. 921 — 924.
2. Каценко Н. М., Мацневский С. В., Никитин М. А. Исследования нелинейной стадии развития неустойчивости Рэля — Тейлора в экваториальной F-области с учетом продольной диффузии и педерсеновской проводимости E-области // Там же. 1989. Т. 29, № 4. С. 577 — 582.
3. Каценко Н. М., Мацневский С. В., Никитин М. А. Динамика системы множественных рэлей-тейлоровских ионосферных пузырей // Там же. 1990. Т. 30, № 2. С. 281 — 286.



4. 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.
5. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М., 1974.
6. Рыбин В. В., Поляков В. М. Об амбиполярности движений ионосферной плазмы // Ионосферные исследования. 1983. № 33. С. 5–44.
7. Фаткуллин М. Н., Ситнов Ю. С. Диполярная система координат и ее некоторые особенности // Геомагнетизм и аэронавигация. 1972. Т. 12, № 2. С. 333–335.
8. 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, N. A1. P. 2139–2147.
9. 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. P. 2148–2156.
10. Кащенко Н. М., Мациевский С. В. Математическое моделирование неустойчивостей экваториального F-слоя ионосферы // Вестник Калининградского государственного университета. 2003. Вып. 3. С. 59–68.

Об авторах

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

E-mail: kaschtschenko@mail.ru

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

E-mail: matsievsky@newmail.ru

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

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

About the authors

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

E-mail: kaschtschenko@mail.ru

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

E-mail: matsievsky@newmail.ru

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

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

УДК 532.5

А. Я. Шпилевой, В. Н. Худенко, Н. В. Персичкина

ДИНАМИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОСОБЫХ ТОЧЕК АНАЛИТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ В ГИДРОДИНАМИКЕ

Построены динамические визуализации математических моделей потенциальных установившихся течений идеальной несжимаемой жидкости с использованием особых точек аналитических функций.