

УДК 519.6

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

МОДЕЛЬ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НИЗКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Описаны постановка задач моделирования экстремальных процессов в низкоширотной ионосфере Земли и методы реализации уравнений этой модели на основе электродинамически согласованной математической модели экваториального F-слоя ионосферы.

This article formulates the problem of simulating extreme processes in the Earth's low-latitude ionosphere and describes the model equation implementation methods based on an electrodynamicly coherent mathematical model of the equatorial F-layer of the ionosphere.

Ключевые слова: ионосфера, термосфера, F-слой, неустойчивость Рэля — Тейлора, электрическое поле, математическая модель, численное моделирование.

Key words: ionosphere, thermosphere, F-layer, Rayleigh-Taylor instability, electric field, mathematical model, numerical simulation.

Введение

Цель работы — исследование сильно нестационарных процессов в низкоширотной F-области ионосферы Земли. Такого типа явления возникают в условиях геомагнитных бурь, в результате влияния которых происходит достаточно быстрая перестройка параметров термосферы, ионосферы и электрических полей, начинающаяся в полярных областях и распространяющаяся в средние и низкие широты посредством ряда механизмов. В частности, на примере геомагнитной бури 17–19 апреля 2002 г., влияние которой на термосферные параметры исследовано в работе [1], показало, что усиление геомагнитной активности приводит к изменениям в составе термосферы, ее ветровом и температурном режиме, наблюдается усиление меридиональной составляющей термосферного ветра, направленной в область более низких температур, в экспериментальных данных появляются флуктуации, когда скорость ветра меняет не только модуль, но и направление. При этом амплитуда ветра может достигать значения 300 м/с. На рисунке 1 отражены некоторые результаты [1], где проведено сравнение вариаций параметров термосферы в указанный период по трем стандартным эмпирическим моделям и экспериментальным данным.

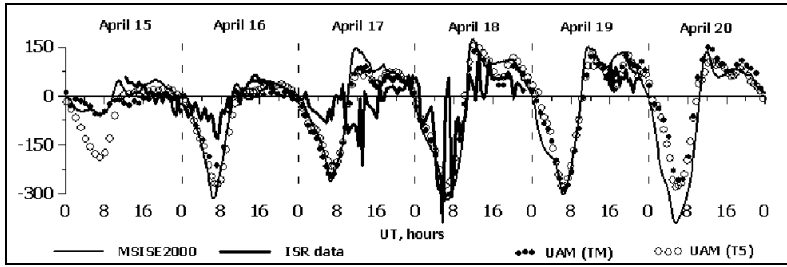


Рис. 1. Вариации по времени на высоте 350 км над станцией Миллстоун Хилл скорости (положительной к северу) меридионального термосферного ветра [1]

88

В экваториальной F-области ионосферы Земли создаются предпосылки для возникновения неустойчивостей, в частности неустойчивости Рэля — Тейлора. Как известно, условия для развития этой неустойчивости могут быть описаны линейным инкрементом нарастания, имеющим вид [2]:

$$\gamma = \left(\frac{g}{v_{in}} + V_E \right) \frac{\partial \ln N_e}{\partial z} - v_R, \quad (1)$$

где v_{in} — частота столкновений ионов с нейтральными частицами; v_R — частота рекомбинации; V_E — скорость вертикального дрейфа; N_e — электронная концентрация.

Наличие положительных значений γ приводит на линейной стадии к экспоненциальному росту обеднения с характерным временем γ^{-1} . При этом условия развития неустойчивости Рэля — Тейлора улучшаются во время геомагнитных бурь и реализуются в вечернее время, поскольку при этом вертикальный дрейф направлен вверх, а градиенты электронной концентрации достаточно большие.

Уравнения модели

В соответствии с [3; 4] в математической модели процессов использовано квазигидродинамическое приближение, содержащее уравнения непрерывности ионов, уравнения движения ионов и электронов в диффузионном приближении, уравнения теплопроводности ионов и электронов, уравнения непрерывности электрического тока и уравнения потенциальности электрического поля [5]:

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla(n_j \vec{V}_j) = Q_j - L_j; \quad (2)$$

$$0 = -\frac{\nabla p_j}{n_j m_j} + \frac{e}{m_j} (\vec{E} + \vec{V}_j \times \vec{B}) - v_{jn} (\vec{V}_j - \vec{V}_n) - \sum_{l \neq j} v_{jl} (\vec{V}_j - \vec{V}_l) + \vec{g}; \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} n_j k \left(\frac{\partial T_j}{\partial t} + (\vec{V}_j \nabla) T_j \right) + p_j \nabla \vec{V}_j + \nabla q_j = G_j - P_j; \quad (4)$$



$$\nabla \times \vec{E} = 0; \tag{5}$$

$$\nabla \vec{j} \equiv \nabla \sum e_j n_j \vec{V}_j = 0, \tag{6}$$

где n_j , \vec{V}_j , Q_j , L_j , m_j , e_j , p_j , v_{jn} , v_{jl} , T_j , q_j , G_j , P_j , k , \vec{j} , \vec{E} — соответственно концентрация, дрейфовая скорость, скорости образования и потерь, масса, заряд, давление, частоты соударений с нейтралами и между заряженными частицами, температура, плотность теплового потока, скорость нагрева и скорость охлаждения частиц сорта j , постоянная Больцмана, плотность тока, напряженность электрического поля.

Вследствие замагниченности ионосферной плазмы F-слоя процессы переноса вдоль магнитного поля будут определяться столкновениями, а поперек — дрейфовым движением; процессы диффузии и теплопроводности в области F и во внешней ионосфере происходят в основном вдоль силовых линий геомагнитного поля, а электрическое поле потенциально (что следует из (5)):

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

где Φ — потенциал электрического поля.

Магнитное поле Земли будем считать постоянным по времени и дипольным [6]. Для вычисления параметров нейтральных частиц использована глобальная эмпирическая термосферная модель MSIS [7].

При моделировании крупномасштабных процессов силовые линии геомагнитного поля можно считать эквипотенциальными, что позволяет понизить размерность трехмерного уравнения для потенциала, проинтегрировав его вдоль силовых линий:

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

где $\hat{\Sigma}$ — тензор интегральных проводимостей.

Уравнения вышеприведенной модели решаются численно в дипольной системе координат (α, β, λ) конечно-разностными методами на квазиравномерных сетках, сгущающихся к центру области решения. Начальные значения задаются путем решения уравнений модели до получения периодического по времени решения. Алгоритм решения использует расщепление по геометрическим и физическим параметрам; в частности, шаги расщепления такие: продольные процессы — диффузия и теплоперенос, поперечный перенос, химические реакции. Для поперечного переноса использована схема с ограничителями типа TVD, имеющая второй порядок точности на гладких решениях. Для решения эллиптических уравнений потенциала использовался геометрический многосеточный метод.

Для исследования среднemasштабных сильно нестационарных процессов ограничим область решения уравнений модели снизу высотой 90 км, сверху 3000 км. По горизонтали протяженность области интегрирования при исследовании процессов развития неустойчивости составляет 200—400 км, при получении начальных условий используется вся экваториальная зона. Характерные масштабы процессов, связанных с развитием неустойчивости Рэлея — Тейлора, составляют 1—50 км по пространству и 10—1000 с по времени. В силу сказанного минималь-

ное число узлов по долготе ≈ 200 , по высоте ≈ 500 , вдоль силовых линий магнитного поля ≈ 500 и по времени $1000-3000$ шагов. При такой степени детализации решение в однопоточном режиме требует несколько десятков часов процессорного времени, что неприемлемо. Поэтому используется высокопроизводительная реализация на языке C++.

Результаты моделирования

Численное моделирование проводилось в области, ограниченной снизу высотой 90 км и сверху 1700 км, по долготе протяженность области интегрирования 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 — условие равенства нулю потоков. Восточная компонента фонового электрического поля задавалась модельно положительным значением (в представленных расчетах $0,7$ мВ/м).

Были проведены численные эксперименты по влиянию меридиональной компоненты нейтрального ветра. Поскольку даже в равноденствие, как указано в [1], меридиональная составляющая нейтрального ветра на высотах F-области может содержать как дивергентную, так и сквозную составляющие достаточно больших амплитуд, будем использовать модельное представление меридиональной составляющей в виде выражения:

$$V_{n\theta} = (V_0 + V_1 \cos(3\theta))f(z),$$

где V_0 и V_1 — амплитуды сквозной и дивергентной компонент; $f(z)$ — функция, описывающая зависимость скорости от высоты.

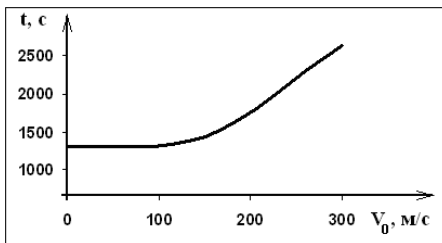


Рис. 2. Зависимость времени выхода (t) переднего фронта на высоту максимума F-слоя от сквозной составляющей скорости меридионального ветра (V_0)

Сери́я расчетов проведена для различных значений параметров модельного ветра V_0 и V_1 в условиях послезаходного периода. Начальная неоднородность задана модельно вытянутой вдоль силовых линий магнитного поля с поперечными размерами 10 км. Результаты вычислений показали, что неустойчивость Релея — Тэйлора развивается по классическому сценарию с выходом пузыря обеднения во внешнюю ионосферу для сквозной составляющей V_0 из диапазона $0-300$ м/с. При этом время выхода переднего фронта на высоту максимума F-слоя увеличивается с ростом скорости, что показано на рисунке 2.



При увеличении скорости сквозной составляющей меридионального ветра V_0 выше 300 м/с кроме увеличения времени развития происходит существенное изменение формы пузыря. На рисунке 3 приведено распределение электронной концентрации N_e в плоскости силовых линий магнитного поля Земли в области, ограниченной силовой линией с параметром Мак-Илвейна, равным 1,27. Распределение приведено для моментов достижения передним фронтом пузыря максимума F-слоя для значений $V_0 = 0$ слева и $V_0 = 300$ м/с справа. Цифрами на рисунке указаны значения десятичного логарифма концентрации (см^{-3}).

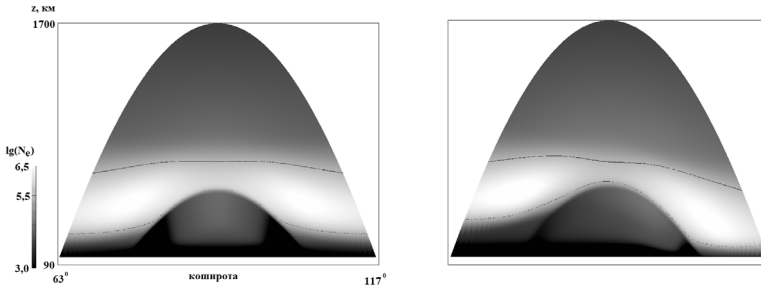


Рис. 3. Распределение N_e в плоскости силовых линий магнитного поля Земли в момент достижения передним фронтом максимума F-слоя для $V_0 = 0$ (слева) и $V_0 = 300$ м/с (справа)

На рисунке 4 приведена зависимость времени выхода (t) переднего фронта пузыря на высоту максимума F-слоя от величины дивергентной составляющей меридионального ветра (V_1). Расчеты показывают, что сходящийся ветер приводит к ускорению, а расходящийся — к замедлению процесса выхода пузыря в максимум F-слоя ионосферы. При этом сценарий развития процесса оказывается классическим.

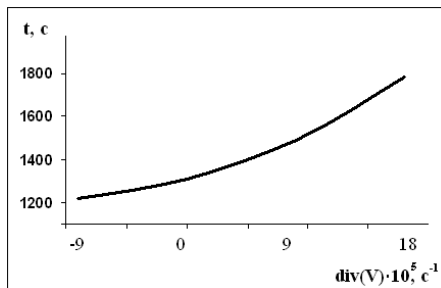


Рис. 4. Зависимость времени выхода (t) переднего фронта на высоту максимума F-слоя от дивергенции скорости меридионального ветра

Заключение

Таким образом, меридиональный ветер заметно влияет на процессы развития ионосферных пузырей как в количественном, так и в качественном аспектах. Численные эксперименты показали, что эти выводы остаются справедливыми и при других значениях солнечной и геомагнитной активности при развитии одиночных пузырей в экваториальной F-области.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 14-01-00020.



Список литературы

1. Доронина Е.Н., Намгаладзе А.А., Гончаренко Л.П. Вариации термосферных параметров над станциями некогерентного рассеяния во время геомагнитных бурь 17–19 апреля 2002 года // Вестник МГТУ. 2005. Т. 8, № 1. С. 132–143.
2. 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.
3. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М., 1974.
4. Грэд Г. О кинетической теории разреженных газов // Механика. 1952. Вып. 4. С. 71–79; Вып. 5. С. 61–96.
5. 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.
6. Рыбин В.В., Поляков В.М. Об амбиполярности движений ионосферной плазмы // Ионосферные исследования. 1983. № 33. С. 5–44.
7. 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 // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 82, N. A1. P. 2148–2156.

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, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: kaschtschenko@mail.ru

Prof. Sergey Ishanov, Prof. I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

Dr Sergey Matsievsky, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: matsievsky@newmail.ru