



УДК 550.388.2

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

### 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО F-РАССЕЯНИЯ: СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ MIZ И SAMIZ

Группа ученых Балтийского федерального университета им. И. Канта в 1989 г. разработала трехмерный код MIZ для изучения экваториального F-рассеяния (ЭФР). Военно-морская исследовательская лаборатория (ВМИЛ, Вашингтон, округ Колумбия, США) в 2008 г. разработала аналогичный код SAMIZ. Произведено сравнение этих моделей. Найдены отличия в количестве ионов и учете скоростей электронов и инерционных членов.

102

Group of scientists of the Immanuel Kant Baltic Federal University (I. Kant BFU) in 1989 developed a three-dimensional code to study equatorial F-spread (EFS) studying. The Naval Research Laboratory (NRL, Washington, DC, USA) in 2008 developed a three-dimensional code to study equatorial spread F (ESF) also. Comparison of these models is made. Differences in number of ions and the accounting of electrons speeds and inertial terms are found.

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, экваториальное F-рассеяние.

**Key words:** three-dimensional simulation, equatorial spread F.

#### Введение

Экваториальное F-рассеяние (ЭФР) [1–3] — это послезаходное явление, когда экваториальная F-область ионосферы становится неустойчивой: крупномасштабные (10 км) «пузыри» электронной концентрации развиваются и поднимаются на верхние высоты (временами более 1000 км). Для понимания сложной и динамической эволюции ЭФР требуется численное моделирование.

В 1989–1991 гг. группа ученых Балтийского федерального университета им. И. Канта (БФУ им. И. Канта) (М. А. Никитин, Н. М. Кащенко, С. В. Мацневский) провела ряд численных экспериментов на созданной ими трехмерной модели ЭФР, назовем ее MIZ (от слов «модель ионосферы»), описав свои результаты в работах [4–7].

Военно-морская исследовательская лаборатория (ВМИЛ, Вашингтон, округ Колумбия, США) в 2008–2009 гг. тоже разработала трехмерный код SAMIZ (от английских слов another of the ionosphere, буква S почему-то не расшифровывается) для изучения ЭФР (J. D. Huba, G. Joyce, J. Krall) [8–10].

Данная работа посвящена сравнению математических 3D-моделей указанных двух групп [11; 12]. Рассмотрены основные уравнения, на которых затем строятся разностные схемы и производятся вычисления на расчетной сетке.

#### Уравнения непрерывности

Обе модели включают уравнения непрерывности концентрации ионов:



$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla(n_i \mathbf{V}_i) = Q_i - L_i n_i,$$

где  $n_i$ ,  $\mathbf{V}_i$ ,  $Q_i$ ,  $L_i$  — соответственно концентрация, вектор дрейфовой скорости, скорость образования и коэффициент линейной рекомбинации ионов сорта  $i$ ,  $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  — количество сортов ионов;  $t$  — время.

Понятно, что чем больше задействовано сортов ионов, тем более вычислительные мощности требуются для расчетов.

Вычисления на русской модели MIZ проводились на средней по мощности для тех времен ЭВМ ЕС-1045, поэтому были задействованы не более двух ионов:  $O^+$  и  $NO^+$ . При выходе на современные суперкомпьютеры не составит труда увеличить количество моделируемых ионов.

Для реализации модели SAMIZ применялся суперкомпьютер, что позволило использовать семь ионов:  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$ ,  $N_2^+$ ,  $NO^+$  и  $O_2^+$ .

103

### Уравнения движения ионов и электронов

Обе модели включают уравнения движения ионов:

$$\frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial t} + \mathbf{V}_i \nabla \mathbf{V}_i = -\frac{1}{m_i n_i} \nabla p_i + \frac{e}{m_i} \mathbf{E} + \frac{e}{m_i} \mathbf{V}_i \times \mathbf{B} + \mathbf{g} - \nu_{in} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_n) - \sum_{j, j \neq i} \nu_{ij} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j),$$

где  $m_i$ ,  $p_i$  — соответственно масса и давление ионов сорта  $i$ ;  $e$  — заряд электрона;  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{g}$  — векторы соответственно напряженности электрического поля, индукции магнитного поля и ускорения свободного падения;  $\nu_{in}$ ,  $\nu_{ij}$  — частоты соударений ионов соответственно с нейтралами и другими ионами.

В модели MIZ используются, кроме уравнений движения ионов, еще и уравнения движения электронов. Правда, с целью сокращения объема вычислений эти уравнения упрощены за счет диффузионного приближения  $\frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial t} + \mathbf{V}_i \nabla \mathbf{V}_i = 0$ , верного и для скоростей электронов.

Но этот недостаток может быть легко исправлен, что и было сделано в соответствующих двумерных моделях. Чтобы иметь возможность корректно учесть при численном решении инерционные члены уравнений движения, аппроксимируем их конечными разностями

$$\frac{\partial \mathbf{V}_i}{\partial t} + \mathbf{V}_i \nabla \mathbf{V}_i \cong \frac{(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}'_i)}{\Delta t} + \mathbf{V}_i \nabla \mathbf{V}'_i,$$

где  $\Delta t$  — шаг по времени при численном решении;  $\mathbf{V}'_i$  — известное значение скорости на нижнем временном слое.

В модели SAMIZ уравнения движения для электронов не учитываются.

### Уравнения теплопроводности ионов и электронов

Обе модели включают уравнения теплопроводности ионов и электронов

$$\frac{dT_i}{dt} + \mathbf{V}_i \nabla T_i + \frac{2}{3} T_i \nabla \mathbf{V}_i - \frac{2}{3} \frac{1}{n_i} \nabla \kappa_i \nabla T_i = Q_{im} + Q_{in},$$



где  $T_l$ ,  $\kappa_l$ ,  $Q_{lm}$ ,  $Q_{ln}$  — соответственно температура и коэффициенты теплопроводности, столкновительного нагрева/охлаждения с частицами сорта  $m$  и нагрева за счет трения о нейтральные частицы частиц сорта  $l$ ,  $l = 1, \dots, M+1$ ,  $M$  — количество сортов ионов. Эти уравнения включают и уравнение для электронов.

На модели МІЗ были задействованы три таких уравнения: для двух ионов  $O^+$  и  $NO^+$  и электронов.

Для модели SAMІЗ использовались четыре частицы: три иона  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  и электрон. Температура молекулярных ионов  $N_2^+$ ,  $NO^+$  и  $O_2^+$  приравнивается к температуре иона  $O^+$ . О вычислении температуры иона  $N^+$  сведения отсутствуют.

104

### Уравнение потенциальности электрического поля

В дополнение к плазменным уравнениям необходимо решить уравнение электростатического потенциала с целью вычисления электрического поля, перемещающего плазму перпендикулярно геомагнитному полю. Уравнение потенциальности электрического поля определяется уравнением сохранения вектора электрического тока ( $\nabla \mathbf{j} = 0$ ) в дипольных координатах  $(\alpha, \varphi, \beta)$ , где  $\varphi$  — долгота,  $\beta$  — аналог кошироты.

В модели МІЗ это двумерное уравнение имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \Sigma_{p\alpha} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \Sigma_{p\varphi} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Sigma_h}{\partial \alpha} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} - \frac{\partial \Sigma_h}{\partial \varphi} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} = A.$$

В модели SAMІЗ имеем такое представление:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \Sigma_{p\alpha} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \Sigma_{p\varphi} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} = \frac{\partial F_h}{\partial \varphi}.$$

Коэффициенты этих уравнений определяются холловскими ( $h$ ) и педерсеновскими ( $p$ ) компонентами и здесь не описываются. Описание дипольной системы координат также не будем приводить.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам № 11-01-00098а и № 11-01-00558а.*

### Список литературы

1. Haerendel G. Theory of equatorial spread F. Preprint. Max-Planck Inst. für Extraterr. Phys. Munich, Germany. 1974.
2. Ossakow S. L. Spread F theories: a review // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1981. Vol. 43. P. 437.
3. Hysell D. L. An overview and synthesis of plasma irregularities in equatorial spread F. // Ibid. 2000. Vol. 62. P. 1037.
4. Кащенко Н. М., Мацевский 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 // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29. С. 577–582.



5. Ерохин Н. С., Кащенко Н. М., Мациевский С. В. и др. Тепловой режим внутри ионосферных пузырей // Космические исследования. 1990. Т. 28, вып. 1. С. 85–93.
6. Кащенко Н. М., Кшевецкий С. П., Мациевский С. В. и др. Резонансная генерация ионосферных пузырей внутренними гравитационными волнами // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30. С. 446–451.
7. Гайдуков В. Ю., Кащенко Н. М., Мациевский С. В. и др. Запуск экваториальных пузырей путем модификации E-слоя // Там же. 1991. Т. 31. С. 1042–1048.
8. Huba J. D., Joyce G., Krall J. Three-dimensional equatorial spread F modeling // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. P. L10102.
9. Huba J. D., Krall J., Joyce G. Atomic and molecular ion dynamics during equatorial spread F. // Ibid. 2009. Vol. 36. P. L10106.
10. Huba J. D., Krall J., Joyce G. Ion and electron temperature evolution during equatorial spread F. // Ibid. P. L15102.
11. Кащенко Н. М., Мациевский С. В. Математическое моделирование неустойчивостей экваториального F-слоя ионосферы // Вестник Калининградского государственного университета. 2003. Вып. 3. С. 59–68.
12. Huba J. D., Joyce G., Krall J. Three-dimensional modeling of equatorial spread F // Aeronomy of the Earth's atmosphere and ionosphere. IAGA Special Sopron Book Series. 2011. Vol. 2. P. 211–218.

#### Об авторах

Сергей Валентинович Мациевский — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: matsievsky@newmail.ru

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

Леонид Викторович Зинин — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: leonid.zinin@gmail.com

#### About authors

Dr Sergey Matsievsky — ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: matsievsky@newmail.ru

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 Leonid Zinin — ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: leonid.zinin@gmail.com