

Математическое моделирование динамики плазменных компонент среднеширотной ионосферы

Соловьева Юлия Анатольевна – студент аспирантуры Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Зубков Евгений Вячеславович – студент аспирантуры Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Дедков Юрий Викторович – студент аспирантуры Балтийского федерального университета им. И. Канта.

Аннотация: В статье представлена квазигидродинамическая модель частично ионизированной плазмы. Рассмотрены результаты вычислительных экспериментов в различных гелиогеофизических условиях. Показаны основные закономерности в динамике переноса и фотохимических процессах плазменных компонент.

Ключевые слова: Вычислительный эксперимент, математическое моделирование, численное моделирование, ионосфера, магнитосфера, плазма.

Введение

Математическое моделирование геофизических процессов, протекающих в ионосфере и магнитосфере Земли, является одним из основных методов в исследовании околоземного космического пространства.

Математическая постановка задачи моделирования нестационарных процессов в геомагнитных силовых трубках основана на уравнениях квазигидродинамики для слабоионизированной плазмы [1-3].

Ионосферная плазма на средних широтах считается низкотемпературной с максвелловским распределением электронов и ионов со средней энергией kT_e менее 1 эВ и концентрацией 10^2 - 10^6 см⁻³.

Концентрации плазменных компонент ионосферы, ионов и электронов, зависят от спектра и интенсивности волнового излучения, энергии корпускулярных потоков солнечного ветра, процессов переноса частиц, состава атмосферы, химической кинетики.

В среднеширотной ионосфере роль электрических полей незначительна, практически отсутствуют высыпания энергичных частиц, а распределения плазмы в *F*-области контролируется плазмосферой, заполненной тепловой плазмой с легкой ионной компонентой.

Диагностика состояния ионосферной плазмы не только дает важную информацию об условиях распространения радиоволн в околоземном пространстве, но и позволяет следить за состоянием и процессами перестройки внешних областей атмосферы по динамике системы вертикальных токов.

Особый интерес представляют исследования околоземной среды в условиях искусственного воздействия на нее. В качестве таких воздействий рассматриваются выбросы химически активных веществ, нагрев плазмы высокочастотным электромагнитным полем [3-4].

Интегрирование одномерных уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для ионов и электронов вдоль замкнутых силовых линий позволяет исследовать многие механизмы, влияющие на формирование среднеширотной области, в частности, роль горизонтальных компонент нейтрального ветра в образовании и поведении пика электронной концентрации в *F2*-слое, взаимодействие ионосферы и плазмосферы посредством обмена потоками заряженных частиц, энергетический режим заряженных и нейтральных компонент ионосферной плазмы [1-5].

Описание модели физико-математической модели.

Математическая модель основана на квазигидродинамическом описании плазмы. Она позволяет вычислять концентрации, температуры и потоковые скорости ее основных заряженных составляющих. Физико-математическая модель описывает частично ионизированную плазму, состоящую из нейтральных частиц, ионов H^+, O^+, NO^+, O_2^+, N и электронов.

Высотно-временное распределение

$$h = 100$$

сорта заряженных компонентов вдоль силовой линии описывается уравнением

$$\frac{\partial n_x}{\partial t} + \frac{\partial(n_x u_x)}{\partial h} = W_x - \gamma_x n_x, \quad (1)$$

где

$$n_x$$

— концентрация ионов;

$$u_x$$

— скорость ионов вдоль силовой линии, длина которой изменяется в пределах

$$h_0$$

<

$$h_0$$

<

$$h_0$$

, где

$$h_0$$

— нижняя граница силовой линии на высоте 125 км;

$$W_x$$

$$\gamma_x$$

— члены образования и потерь ионов в фотохимических реакциях.

Для скорости ионов записывается следующее выражение:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{\epsilon_0} \left[m_i g - Q_{ij} n_j - \epsilon_0 \frac{d(n_i v_i)}{dt} \right] \quad (2)$$

- Здесь ϵ_0 — коэффициент силы трения ион-нейтрал;
 Q_{ij} — коэффициент силы трения ион-ион;
 m_i — масса ионов;
 g — ускорение свободного падения;
 θ — магнитное наклонение;
 v_{n0} — меридиональная составляющая скорости нейтрального ветра;
 k — постоянная Больцмана;
 n_{e0} — концентрация электронов;
 n_j — концентрация ионов;
 T_{e0} — температура электронов;

— температура ионов.

Высотно-временное распределение для электронных и ионных температур (1) и (2) температур вдоль силовой линии описывается как

$$\frac{\partial}{\partial t} (k N_{e0} \frac{\partial T_{e0}}{\partial z}) + B \frac{\partial}{\partial t} \left(\lambda_{e0} \frac{\partial T_{e0}}{\partial t} \right) = \sum_j \frac{3 m_e N_{e0}}{m_j} \beta_{ej} k (T_j - T_{e0}) + B_{e0} \cdot C_{e0m}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (k m_j \frac{\partial T_j}{\partial z}) + B \frac{\partial}{\partial t} \left(\lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial t} \right) = 3 m_j \beta_{jm} k (T_{e0} - T_j) + \sum_m \frac{3 m_j m_j}{m_j + m_m} \beta_{jm} k (T_m - T_j) + C_j, \quad (4)$$

- где
- N_{e0} — концентрация электронов;
 - B — магнитная индукция;
 - λ_{e0} — коэффициент теплопроводности для электронов;
 - λ_j — коэффициент теплопроводности для ионов;
 - m_j — масса ионов;

- масса электронов;
- частота электронно-ионных столкновений;
- частота столкновений ионов с нейтральными частицами;
- температура нейтральных частиц;

$$\begin{aligned} & \mu_{\text{ex}} \\ & \mu_{\text{ex}} \\ & \mu_{\text{ex}} \\ & \mu_{\text{ex}} \end{aligned}$$

Математическое моделирование динамики плазменных компонент среднеширотной ионосферы за счет

используя уравнение (2), находится из решения системы

$$\frac{\partial u_{\text{nex}}}{\partial t} = \frac{\mu_{\text{ex}}}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 u_{\text{nex}}}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho_{\text{ex}}} \sum_{\alpha=1}^{L_0} m_{\alpha} \bar{v}_{\alpha} (u_{\text{nex}} - u_{\alpha} \cos \varphi) + \lambda_{\text{ex}} \sin \varphi u_{\text{ney}} - \frac{1}{\rho_{\text{ex}}} \frac{\partial K_{\text{ex}}}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_{\text{ney}}}{\partial t} = \frac{\mu_{\text{ex}}}{\sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 u_{\text{ney}}}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho_{\text{ex}}} \sum_{\alpha=1}^{L_0} m_{\alpha} \bar{v}_{\alpha} u_{\text{ney}} - \lambda_{\text{ex}} \sin \varphi u_{\text{nex}} - \frac{1}{\rho_{\text{ex}}} \frac{\partial K_{\text{ex}}}{\partial y}$$

Здесь

- зональная составляющая скорости нейтрального ветра;
- кинематическая вязкость нейтрального газа;
- плотность нейтрального газа;
- скорость вращения Земли;

$$u_{\text{ex}} = 3.34 \cdot 10^8$$

$$\rho_{\text{ex}}$$

$$\omega$$

$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{v}n_e) + S - R$

$\frac{\partial P_{n_0}}{\partial x} = -\mathbf{v} \cdot \nabla P_{n_0}$

$\frac{\partial P_{n_0}}{\partial y} = -\mathbf{v} \cdot \nabla P_{n_0}$

$\frac{\partial n_0}{\partial t} = W_{n_0} - \gamma_{n_0} n_0$ (1.1)

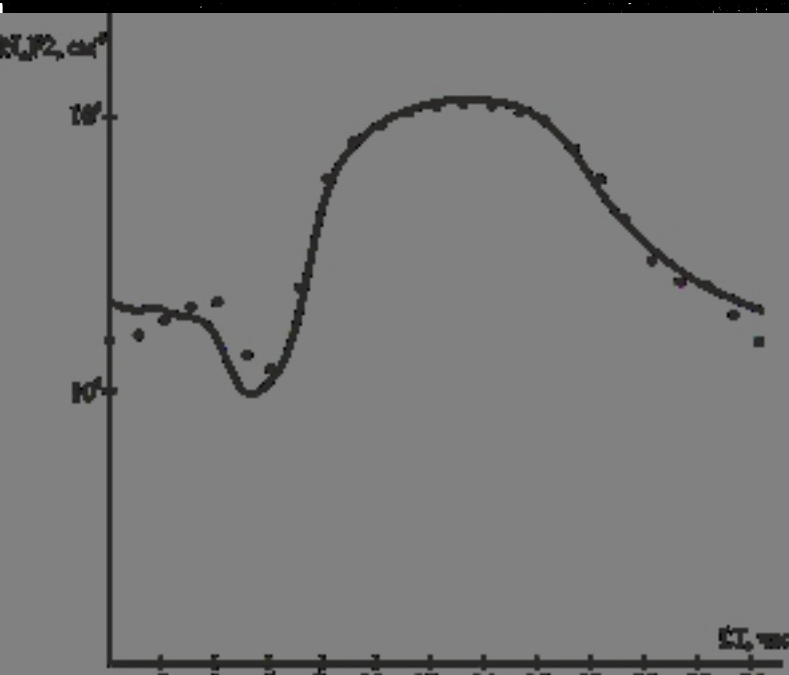


Рис. 1.2. Зависимость электронной концентрации от времени. Крестиком и кружками обозначены измерения.

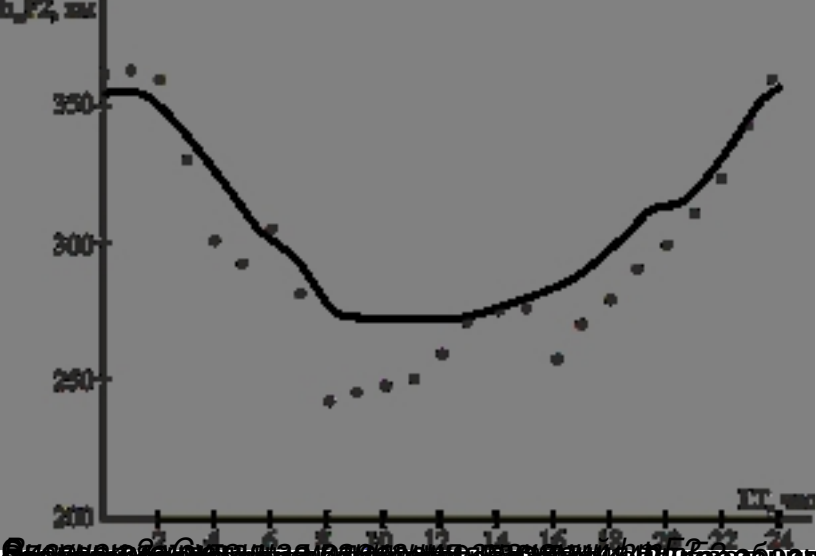


Рис. 1.3. Зависимость виртуальной высоты от времени. Крестиком и кружками обозначены измерения, квадратами — расчеты.

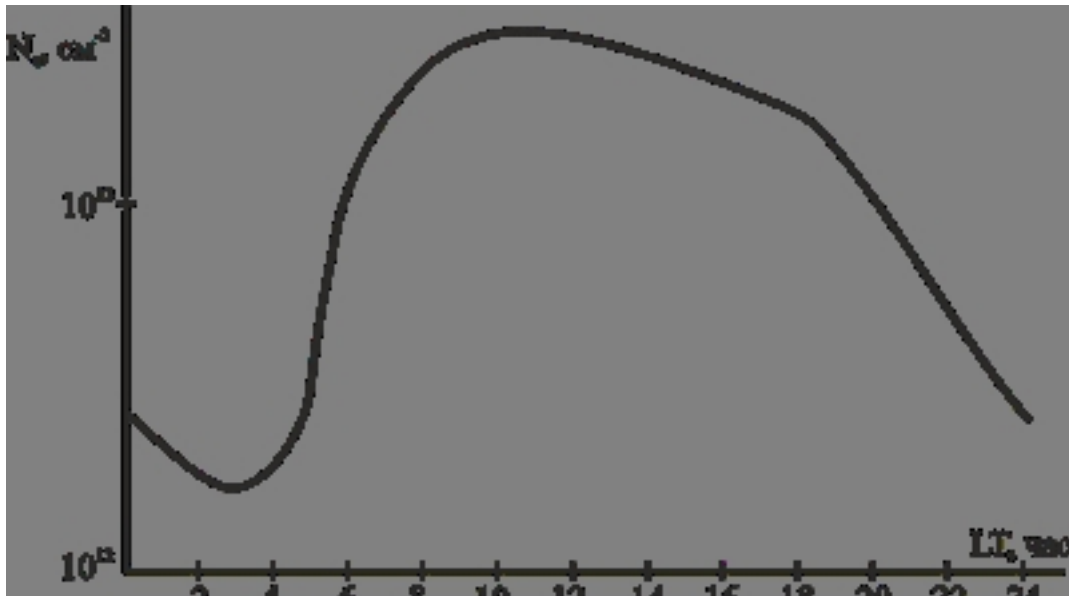


Рис. 53. Сравнение экспериментальных данных с моделью

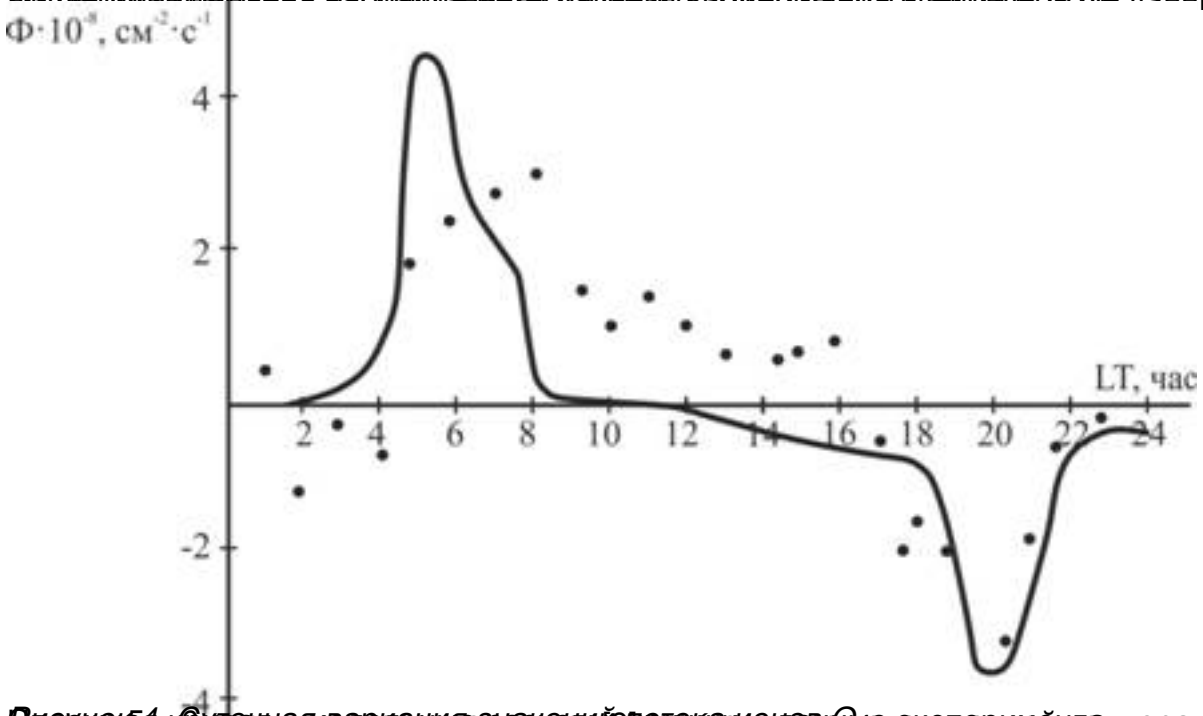


Рис. 54. Сравнение экспериментальных данных с моделью

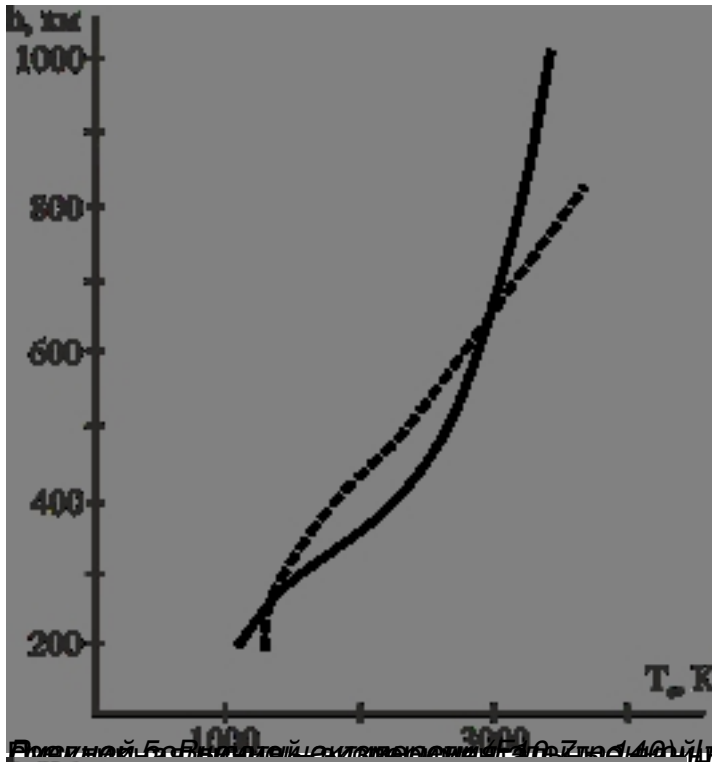


Рис. 10. Значения N_e и температуры T_e для зимних условий при $f_oF_2 = 3.0$ MHz и $f_{min}F_2 = 1.4$ MHz.

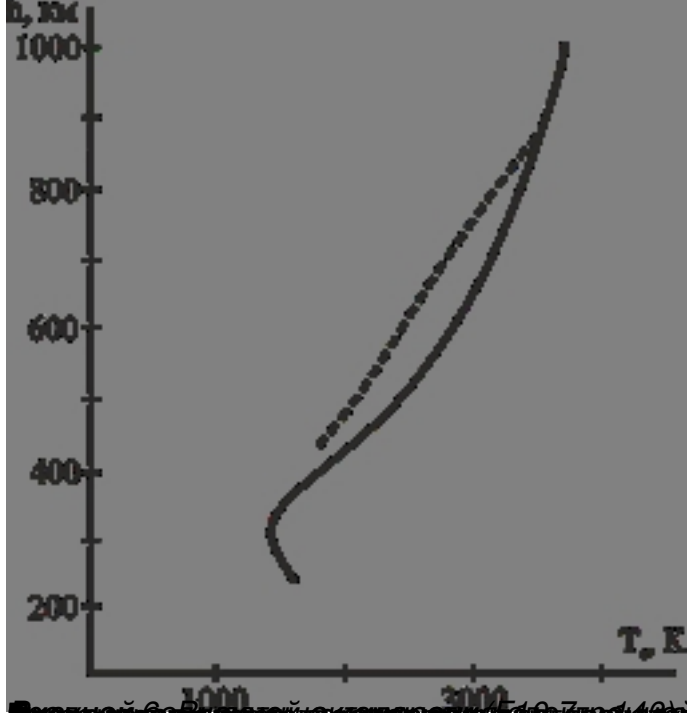


Рис. 11. Значения N_e и температуры T_e для летних условий при $f_oF_2 = 3.0$ MHz и $f_{min}F_2 = 1.4$ MHz.