

DOI 10.37882/2223–2966.2021.04.20

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ¹

HYDRODYNAMIC APPROACH TO MODELING NON-STATIONARY PROCESSES IN IONOSPHERIC PLASMA

**E. Zubkov
Yu. Dedkov
P. Karataeva
V. Khudenko**

Summary. Based on an improved mathematical model of low-energy near-Earth space plasma, non-stationary problems of evolution of the ionosphere-plasmasphere system under various heliogeophysical conditions are considered. The model allows solving the complete system of hydrodynamic equations for nine kinds of ions and electrons, taking into account their heat balance, as well as the diffusion equations for metastable and small components.

Based on the results of numerical modeling, the space-time distributions of the key macroscopic parameters of the ionospheric-magnetospheric plasma are obtained and analyzed.

Keywords: mathematical model, ionosphere, plasmasphere, magnetosphere, numerical methods, hydrodynamic description, concentration, velocity, temperature.

Зубков Евгений Вячеславович
Аспирант, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта
evgenyzubkov@mail.ru

Дедков Юрий Викторович
Аспирант, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта
yuri.dedkov@gmail.com

Каратаева Полина Михайловна
Аспирант, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта
karataeva.polina@list.ru

Худенко Владимир Николаевич
К.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта
VKHudenko@kantiana.ru

Аннотация. На основе усовершенствованной математической модели низкоэнергичной околоземной космической плазмы рассмотрены нестационарные задачи эволюции системы ионосфера-плазмосфера в различных гелиогеофизических условиях. Модель позволяет решать полную систему гидродинамических уравнений для 9 сортов ионов и электронов с учетом их теплового баланса, а также уравнения диффузии для метастабильных и малых компонент.

По результатам численного моделирования получены и проанализированы пространственно-временные распределения ключевых макрофизических параметров ионосферно-магнитосферной плазмы.

Ключевые слова: математическая модель, ионосфера, плазмосфера, магнитосфера, численные методы, гидродинамическое описание, концентрация, скорость, температура.

Введение

Непрерывное возрастание техногенного (химического, электромагнитного) воздействия на ионосферу Земли требует глубокого понимания физико-химических процессов в околоземной плазме, умения прогнозировать возможное поведение этой многокомпонентной среды в различных геофизических условиях. [1–2]

В данном классе задач численное моделирование необходимо проводить для сильно неоднородной разреженной среды (с перепадом плотности более чем

в 15 порядков) — от нейтральной атмосферы до полностью ионизованной плазмы в верхней части ионосферы и плазмосферы. В этой плазменной среде одновременно присутствуют разномасштабные процессы: возникновения и эволюции сильных разрывов (ударных и магнитозвуковых волн), сильно различающиеся доли внутренней и кинетической энергии плазмы в возмущенной области, большая неоднородность параметров на рассматриваемых масштабах ионосферы Земли, длительные времена подлежащих исследованиям процессов, образующихся и эволюционирующих под совместным действием силы тяжести, геомагнитного поля и техногенных возмущений [3].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20–01–00361).

Теоретической базой исследования процессов, контролирующих образование и распределение тепловой плазмы в системе ионосфера-плазмосфера, является метод математического моделирования, реализующий в различных приближениях решения уравнений гидродинамики и физической кинетики, описывающих поведение плазменных компонент ОКП.

В статье представлены полученные для средних широт результаты вычислительных экспериментов в различных гелиогеофизических условиях.

1. Описание физико-математической модели

Используемая в данной работе физико-математическая модель системы ионосфера-плазмосфера, основанная на системе уравнений магнитной гидродинамики, позволяет рассчитывать концентрации, температуры и скорости ионов $H^+, He^+, O^+, N^+, N_2^+, O_2^+, NO^+, H_2O^+, OH^+$ и электронов вдоль геомагнитной силовой трубки от высоты 125 км до нескольких радиусов Земли.

В модели также решаются уравнения диффузии для малых нейтральных и возбужденных компонент, в том числе и таких как $O(^1D), N(^2D), O_2(A^1\Delta g), H_2O, N_2^{(v)}$.

Магнитогидродинамическое описание ионосферной плазмы наиболее естественным образом осуществляется в системе координат, связанной с геомагнитным полем. Выбором дипольной системы координат сведем физическую задачу трехмерного движения плазмы к двумерной математической задаче в переменных s (координата вдоль силовой линии) и t (время).

Математическая модель основана на численном решении системы уравнений гидродинамики частично ионизированной плазмы для ионов и электронов. Система уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для заряженных компонент может быть записана [3–4] в следующем виде:

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial A n_\alpha u_\alpha}{\partial s} + L_\alpha n_\alpha = Q_\alpha \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial u_\alpha}{\partial s} + \frac{1}{m_\alpha n_\alpha} \frac{\partial P_\alpha}{\partial s} = F_\alpha \tag{2}$$

$$\frac{3}{2} k n_\alpha \left(\frac{\partial T_\alpha}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial T_\alpha}{\partial s} \right) + \frac{P_\alpha}{A} \frac{\partial A u_\alpha}{\partial s} - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s} \left(A \lambda_\alpha \frac{\partial T_\alpha}{\partial s} \right) = \Theta_\alpha \tag{3}$$

Здесь $n_\alpha, u_\alpha, T_\alpha, m_\alpha, P_\alpha$ — соответственно концентрация, продольная скорость, температура, масса, давление частиц сорта α , A — расходимость силовых линий магнитного поля, L_α — коэффициент рекомбинации, Q_α — функция ионизации, F_α — проекция внешних сил (гравитация, силы трения, электрические силы)

на силовую линию магнитного поля, λ_α — коэффициент теплопроводности, Θ_α — разность скоростей нагрева и охлаждения, k — постоянная Больцмана.

Положим справедливым условие квазинейтральности плазмы

$$u_e = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^9 n_i u_i.$$

Химические реакции, определяющие кинетику ионов, а также образующихся в результате их взаимодействия с нейтральными компонентами молекулярных ионов, представлены в [5–8].

Учет взаимодействия плазмы с горизонтальным термосферным ветром на ионосферных высотах проводится так же, как в [5]. Члены Θ_α , входящие в уравнение теплового баланса (3), которые учитывают упругие и неупругие процессы обмена энергией между заряженными частицами и нейтральными составляющими, взяты из [8]. Для расчета нагрева тепловой плазмы сверхтепловыми электронами решалось кинетическое уравнение для сверхтепловых электронов [3]. Нестационарные уравнения фотохимического равновесия для молекулярных ионов O_2^+, NO^+, N_2^+ записываются в виде

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = Q_i - \alpha_i n_i, \quad i = 3, 4, 5. \tag{5}$$

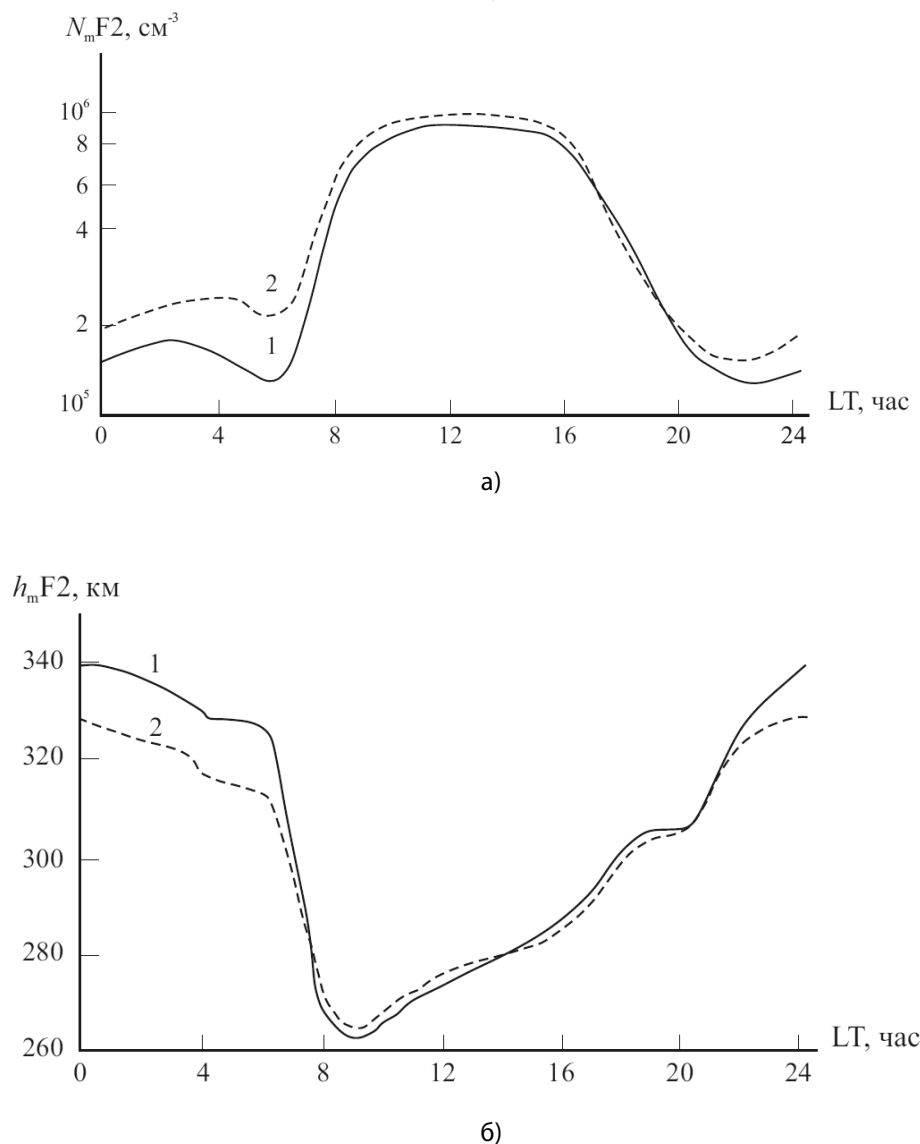
Высотное-временное распределение метастабильных и малых нейтральных компонент описывается дифференциальным уравнением в частных производных параболического типа

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left(D_k \frac{\partial N_k}{\partial s} + \beta_k N_k \right) - \alpha_k N_k + Q_k,$$

где N_k — концентрация k -й нейтральной составляющей, Q_k и α_k — члены, учитывающие образование и потери частиц в фотохимических реакциях, D_k — коэффициент молекулярной диффузии.

Численное решение системы уравнений модели осуществлялось вдоль геомагнитной силовой линии с применением метода конечных разностей. Линеаризация разностных уравнений проводилась с использованием значений неизвестных функций, взятых с предыдущего временного слоя, с последующими итерациями по нелинейности и связанности уравнений.

Усовершенствованы численные методы решения уравнений для многокомпонентной ионосферно-магнитосферной плазмы [9–11]. Основное внимание уделено методам решения системы уравнений непрерывности


 Рис. 1. Суточные вариации $N_m F2$ (а), $h_m F2$ (б).

1 — диффузионное приближение, 2 — гидродинамическое приближение.

и движения ионов. Разработаны вычислительные алгоритмы, решающие уравнения переноса в гидродинамическом приближении. Вычислительные эксперименты показали успешность применения этих алгоритмов при моделировании стационарных и периодических процессов в системе ионосфера-плазмосфера.

Разработан вычислительный алгоритм расчета скорости нагрева тепловой плазмы фотоэлектронами в плазмосфере и ионосфере Земли. С использованием кинетического уравнения вычислялись энергетические спектры сверхтепловых электронов в магнитосжатых областях с учетом эффектов захвата и потерь энергии при их прохождении через плазмосферу. Для решения уравнений переноса сверхтепловых электро-

нов разработаны абсолютно устойчивые разностные схемы и алгоритмы их решения.

Результаты численного моделирования

Для решения нестационарных задач эволюции системы ионосфера-плазмосфера в спокойных и возмущенных условиях были проведены усовершенствования численных методов и алгоритмов.

Для расчета пространственно-временных вариаций температуры и концентраций нейтральных компонентов O, H, He, N, O_2, N_2 используется модель термосферы MSIS [12].

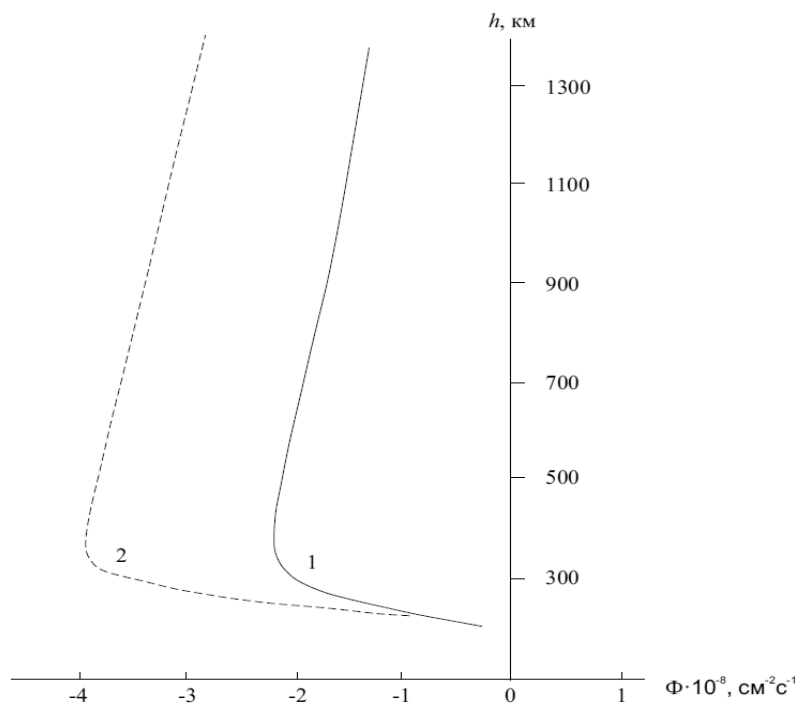


Рис. 2. Высотные профили ионных потоков для 00.00 LT: 1 — диффузионное приближение, 2 — гидродинамическое приближение.

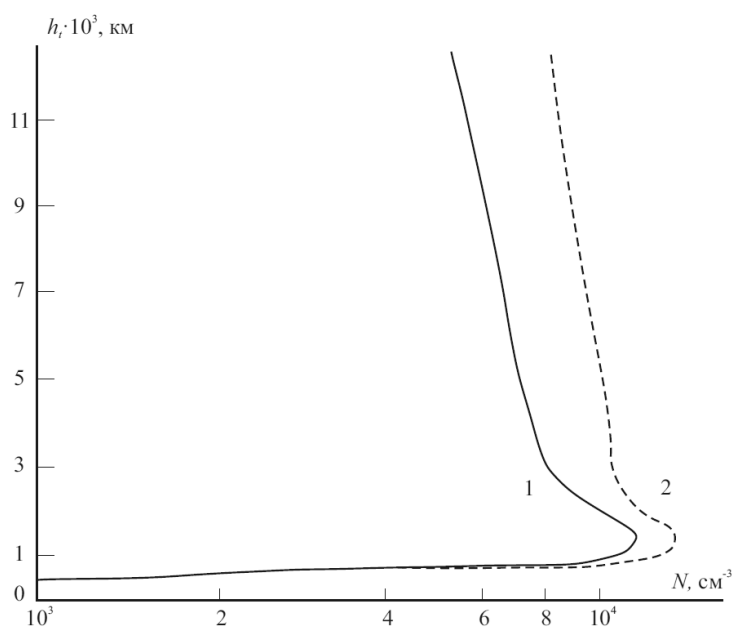


Рис. 3. Высотные профили концентрации ионов H+, 12.00 LT: 1 — диффузионное приближение, 2 — гидродинамическое приближение.

В качестве первой модельной задачи был выбран расчет ионосферно-плазмосферных параметров в геомагнитной трубке с параметром Мак-Илвайна $L = 3$ для средней геомагнитной активности (индекс $K_p = 3$), низкой солнечной активности (индекс $F_{10.7} = 80$) и на-

чала года (зима в северном полушарии, лето — в южном).

Подобная задача рассматривалась в работе [3], но в данной постановке используется другая модель

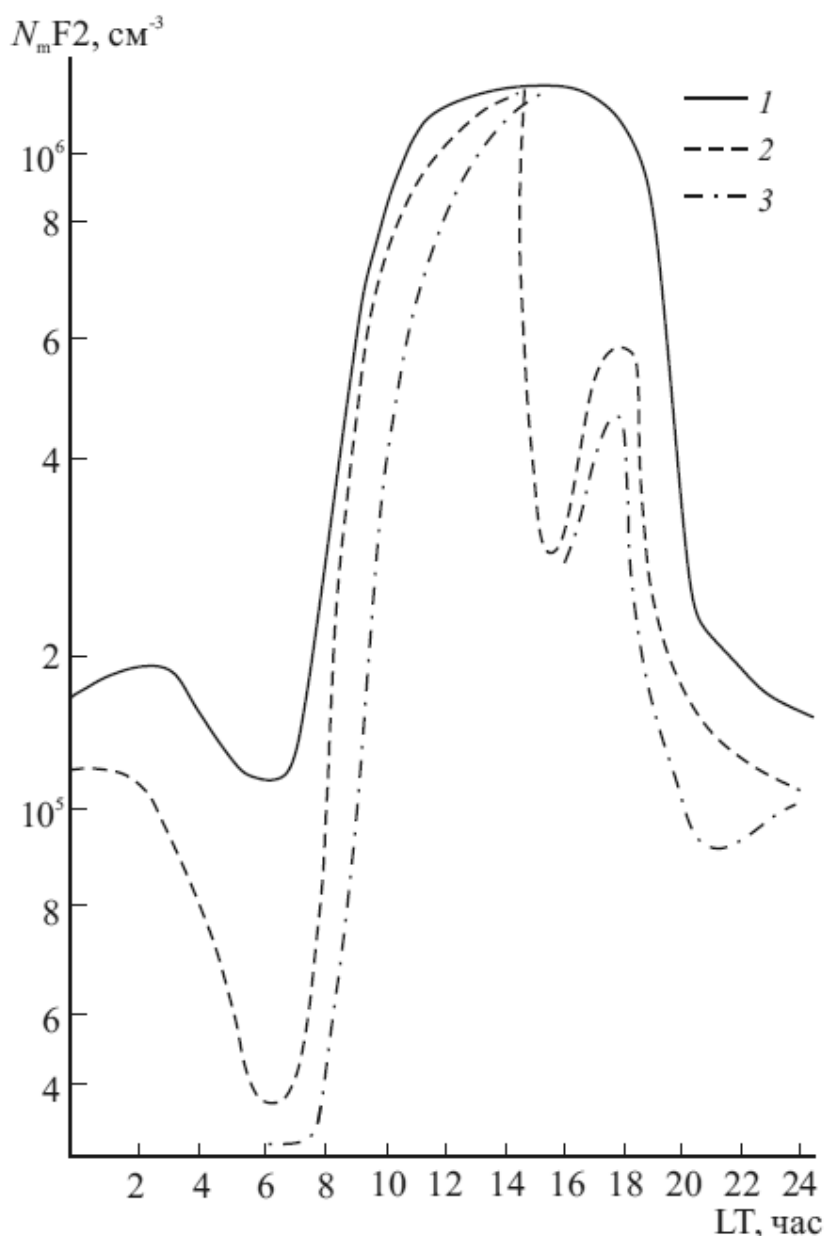


Рис. 4. Суточные вариации максимума F2-слоя.
 1 — фоновые значения $N_m F2$, 2 — значения $N_m F2$ при $[H_2O] = 10^7 \text{ см}^{-3}$,
 3 — значения $N_m F2$ при $[H_2O] = 10^8 \text{ см}^{-3}$.

нейтральной атмосферы [12], учтены новые физико-химические процессы, применен новый вычислительный алгоритм.

На рисунке 1 показан суточный ход концентрации максимума F2 слоя $N_m F2$, а также высоты максимума F2 области $h_m F2$ для среднеширотной ионосферы.

В светлое время суток результаты, полученные в диффузионном и гидродинамическом приближениях, хорошо согласуются.

Однако, как видно из сравнения приведенных профилей, в послезаходный период и в течение всей ночи концентрация электронов различаются значительно (максимум в 1,8 раза).

Это можно объяснить тем, что поддерживающие ночную ионосферу потоки Φ заряженных частиц из плазмосферы, рассчитанные в гидродинамическом приближении, существенно превосходят, как видно из рисунка 2, соответствующие потоки, полученные в диффузионном приближении.

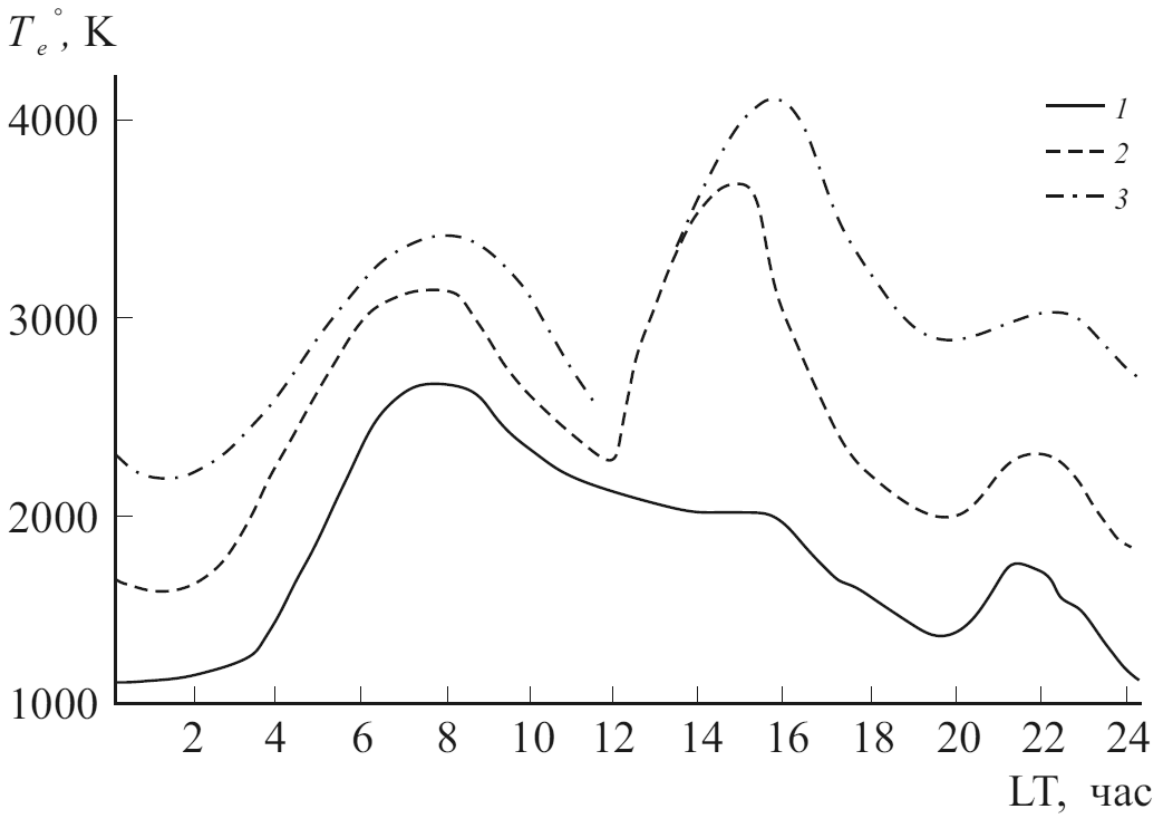


Рис. 5. Суточные вариации электронной температуры T_e на высоте $[N_m F2]$; (обозначения кривых соответствуют рис. 4)

Различия между гидродинамическим и диффузионным приближением наблюдается и в распределение ионов H^+ вдоль геомагнитной трубки (рис. 3)

При этом расхождение высотных профилей ионов H^+ в плазмосфере почти одинаково в течении суток.

Таким образом, в целом гидродинамическое описание дает более высокое содержание заряженных частиц в плазмосфере и ионосфере.

Следовательно, в спокойных геофизических условиях потоки, которыми обмениваются ионосфера и плазмосфера, являются гидродинамическими.

Вторая модельная задача решалась для силовой трубки ($L = 2$) для высокой солнечной активности (индекс $F_{10.7} = 200$) в зимних условиях.

На рис. 4 представлены суточные вариации $N_m F2$ при выбросах H_2O для зимних условий в полдень.

В первом эксперименте выброс воды составил на высоте $h_m F2$ $[H_2O] = 10^7 \text{ см}^{-3}$, во втором эксперименте $[H_2O] = 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Начальный профиль $[H_2O]$ задавался согласно работе [5]. Затем концентрация H_2O рассчитывалась численно по диффузионному уравнению.

Из рис. 4 видно, что $[N_m F2]$ в первом случае восстанавливается в течение 2 часов. Во втором эксперименте восстановление $[N_m F2]$ наблюдается через сутки.

Восстановление ионосферной «дыры» происходит как за счет ионизации, так и за счет потоков плазмы из плазмосферы в ионосферу.

На рис. 5 представлена суточная вариация электронной температуры T_e на высоте $h_m F2$ при выбросах H_2O .

При выбросах $[H_2O] = 10^8 \text{ см}^{-3}$ наблюдается существенное изменение в высотно-временном поведении электронной температуры.

Заключение

В работе на основе МГД уравнений рассмотрены нестационарные задачи динамики ионосферно-плазмферного взаимодействия.

В рамках усовершенствований модели проведен ряд вычислительных экспериментов в различных гелиогеофизических условиях и показаны основные закономерности в динамике переноса и химической кинетике компонент ионосферной плазмы.

Более корректная постановка задачи моделирования процессов в ионосферно-плазмосферной плазме формулируется для полной системы уравнений непрерывности и движения гиперболического типа.

Показано, что динамика ионосферно-плазмосферного взаимодействия может быть описана в полной постановке.

Результаты второй модельной задачи подтверждают тесную взаимосвязь между концентрацией и температурой электронов, а также важнейшую роль плазмосферы в формировании структуры F2-области и внешней ионосферы. Показано, что уменьшение концентрации электронов и увеличение температуры существенно зависит от количества активного реагента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ступицкий Е.Л., Холодов А.С. Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов: Монография // Издательский Дом Интеллект. 2018.
2. Плазменная гелиогеофизика. Т. 2 // Под редакцией Л.М. Зеленого, И.О. Веселовского. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. — 560 с. — ISBN 978-5-9221-1041-9.
3. Латышев К.С., Зинин Л.В., Ишанов С.А. Математическое моделирование околоземной космической плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы, 2008, т. 7–1, ч. 3, с. 337–349.
4. Ишанов С.А., Мацула П.В. Вычислительный эксперимент при моделировании динамики антропогенных возмущений ионосферно-магнитосферной плазмы // Математическое моделирование. 2012. Т. 24, № 6. С. 128–136.
5. Ишанов С.А., Леванов Е.И., Медведев В.В. Магнитосферно-ионосферные изменения, вызванные полетами космических аппаратов // Инженерно-физический журнал. Национальная академия наук Беларуси. — 2006. Т. 79, № 6, с. 11–15.
6. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988, 528 с.
7. Richards P.G. Reexamination of ionospheric photochemistry. J. Geophys. Res. 2011, vol. 116, iss A8, A08307.
8. Кринберг Н.А., Тацилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984, 189 с.
9. Елизарова Т.Г., Четверушкин Б.Н. Об одном вычислительном алгоритме для расчета газодинамических течений // ДАН СССР, 1984, т. 279, № 1, с. 80–83.
10. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983.
11. Chetverushkin B., D'Ascenzo N., Ishanov S., Saveliev V. Hyperbolic type explicit kinetic scheme of magneto gas dynamics for high performance computing systems // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling. 2015. 30(1). P. 27–36.
12. Hedin A.E. Thermospheric model // J. Geophys. Res., 1987, v. 92, № A5, p. 4649–4662.

© Зубков Евгений Вячеславович (evgenyzubkov@mail.ru), Дедков Юрий Викторович (yuri.dedkov@gmail.com),
 Каратаева Полина Михайловна (karataeva.polina@list.ru), Худенко Владимир Николаевич (VKHudenko@kantiana.ru).
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»