

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СПОКОЙНЫХ И ВОЗМУЩЕННЫХ УСЛОВИЯХ<sup>1</sup>

## NUMERICAL STUDY OF THE DYNAMICS OF IONOSPHERIC PLASMA IN QUIET AND DISTURBED CONDITIONS

**S. Ishanov**  
**N. Kashchenko**  
**E. Zubkov**  
**D. Savkin**  
**V. Khudenko**

*Summary.* A method for numerical simulation of non-stationary equations of the dynamics of the ionosphere-plasmasphere system in geomagnetic plasma tubes of arbitrary size is presented.

The mathematical model is based on the quasi-hydrodynamic description of plasma and considers the dynamics of the ionospheric-plasmospheric exchange, the processes of chemical kinetics, considering impact ionization by energetic magnetospheric ions, heat transfer in the ionospheric plasma, the diffusion of electron-ionic gas, considering the neutral wind, the transfer and thermalization of superthermal electrons.

Based on the results of numerical modeling of processes in the near-Earth space plasma under various heliogeophysical conditions, the spatiotemporal distributions of the key macroscopic parameters (density, velocities, and temperatures) of the ionospheric-magnetospheric plasma have been obtained and analyzed.

*Keywords:* hydrodynamics, numerical simulation, computational experiment, ionosphere, plasmasphere, numerical methods, evolution of disturbances.

**Ишанов Сергей Александрович**

*Д.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта»  
(Калининград)*

*sishanov@kantiana.ru*

**Кащенко Николай Михайлович**

*Д.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта»  
(Калининград)*

*nkashchenko@kantiana.ru*

**Зубков Евгений Вячеславович**

*Старший преподаватель, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта» (Калининград)*

*evgenyuzubkov@mail.ru*

**Савкин Дмитрий Александрович**

*Доцент, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта» (Калининград)*

*DSavkin@kantiana.ru*

**Худенко Владимир Николаевич**

*К.ф.-м.н., профессор, ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта»  
(Калининград)*

*VKHudenko@kantiana.ru*

*Аннотация.* Представлен метод численного моделирования нестационарных уравнений динамики системы ионосфера-плазмосфера в геомагнитных плазменных трубках произвольного размера.

Математическая модель основана на квазигидродинамическом описании плазмы и учитывает динамику ионосферно-плазмосферного обмена, процессы химической кинетики с учетом ударной ионизации энергичными магнитосферными ионами, теплоперенос в ионосферной плазме, диффузию электронно-ионного газа с учетом нейтрального ветра, перенос и термализацию сверхтепловых электронов.

По результатам численного моделирования процессов в околоземной космической плазме в различных гелиогеофизических условиях получены и проанализированы пространственно-временные распределения ключевых макроскопических параметров (концентрации, скоростей и температур) ионосферно-магнитосферной плазмы.

*Ключевые слова:* гидродинамика, численное моделирование, вычислительный эксперимент, ионосфера, плазмосфера, численные методы, эволюция возмущений.

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

Введение

**М**атематическое моделирование ионосферно-плазмозферных взаимодействий важно как для изучения структуры ионосферы и физики протекающих в ней процессов, интерпретации и анализа наблюдаемых особенностей среды, так и для прогноза возможного поведения околоземной космической плазмы.

Основные подходы к теоретическим исследованиям динамики ионосферно-плазмозферного переноса околоземной плазмы в принципиально неоднородной (экспоненциальной по плотности и давлению) среде связываются с применением методов математического моделирования, реализующих в различных приближениях решения уравнений гидродинамики и физической кинетики.

Целью работы является исследование динамики плазмы среднеширотной ионосферы и плазмозферы в возмущенных и спокойных условиях с учетом широкого спектра геофизических факторов, ответственных за образование этих структур: сложного состава ионосферной плазмы, диффузии электронно-ионного газа, фотохимии, дипольной геометрии геомагнитного поля, электрического дрейфа, ионосферно-плазмозферного обмена, кинетики сверхтепловых электронов [1–4].

Используемая в данной работе численная модель системы ионосфера-плазмозфера, основанная на системе уравнений магнитной гидродинамики, позволяет рассчитывать концентрации, температуры и скорости ионов  $H^+, He^+, O^+, N^+, N_2^+, O_2^+, NO^+$  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  $O(^1D), N(^2D), O_2(A^1\Delta g), H_2O, N_2^{(v)}$ .

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

1. Математическая модель и вычислительные методы

Специфику рассматриваемого класса задач определяет возможность одновременного присутствия разномасштабных процессов: возникновения и эволюции сильных разрывов, различающихся долей внутренней и кинетической энергии плазмы в возмущенной области, большой неоднородности невозмущенных параметров на рассматриваемых масштабах ионосферы и плазмоз-

феры, длительных времен подлежащих моделированию процессов, образующихся и эволюционирующих под совместным действием магнитного поля Земли и силы тяжести.

В используемой численной модели ионосфера и плазмозфера рассматриваются как единая система, состоящая из множества заполненных тепловой плазмой геомагнитных силовых трубок [3, 4].

Полагаем, что макроскопическое движение плазмы происходит вдоль геомагнитного поля. 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 [2–4] в следующем виде:

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

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

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

Здесь  $n_\alpha, u_\alpha, T_\alpha, m_\alpha, P_\alpha$  — соответственно концентрация, продольная скорость, температура, масса, давление частиц сорта  $\alpha$ ,  $A$  — расходимость силовых линий магнитного поля,  $L_\alpha$  — коэффициент рекомбинации,  $Q_\alpha$  — функция ионизации,  $F_\alpha$  — проекция внешних сил (гравитация, силы трения, электрические силы) на силовую линию магнитного поля,  $\lambda_\alpha$  — коэффициент теплопроводности,  $\Theta_\alpha$  — 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 [5–9].

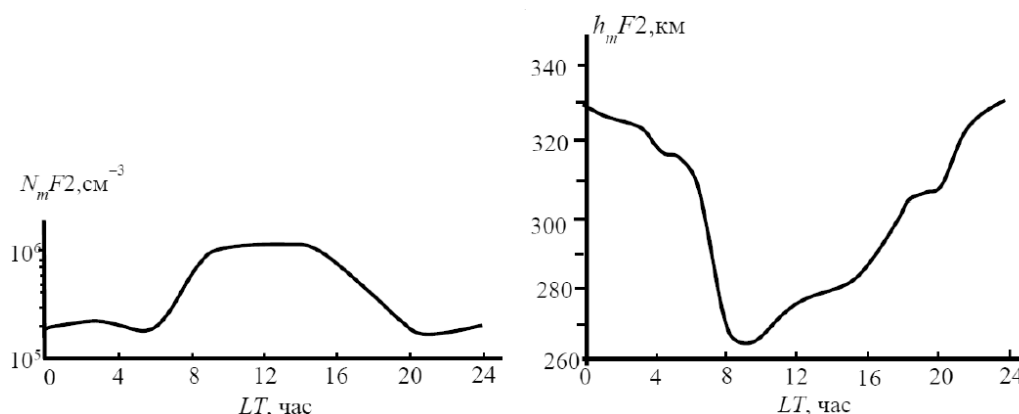


Рис. 1. Суточный ход изменения концентрации электронов в максимуме и высоты максимума

Учет взаимодействия плазмы с горизонтальным термосферным ветром на ионосферных высотах проводится так же, как в [2]. Члены  $\Theta_{\alpha}$ , входящие в уравнения теплового баланса (3), которые учитывают упругие и неупругие процессы обмена энергией между заряженными частицами и нейтральными составляющими, взяты из [9]. Для расчета нагрева тепловой плазмы сверхтепловыми электронами решалось кинетическое уравнение для сверхтепловых электронов [2]. Нестационарные уравнения фотохимического равновесия для молекулярных ионов  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $N_2^+$  записываются в виде

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

Высотно-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  $\alpha_k$  — 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 [10–12]. Основное внимание уделено методам решения системы уравнений непрерывности

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 электронов разработаны абсолютно устойчивые разностные схемы и алгоритмы их решения.

## 2. Результаты численного моделирования

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

Для расчета пространственно-временных вариаций концентраций и температуры нейтральных компонентов  $He$ ,  $O$ ,  $H$ ,  $N$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  используется модель термосферы MSIS [13].

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

В качестве первой модельной задачи был выбран расчет макроскопических параметров для среднеши-

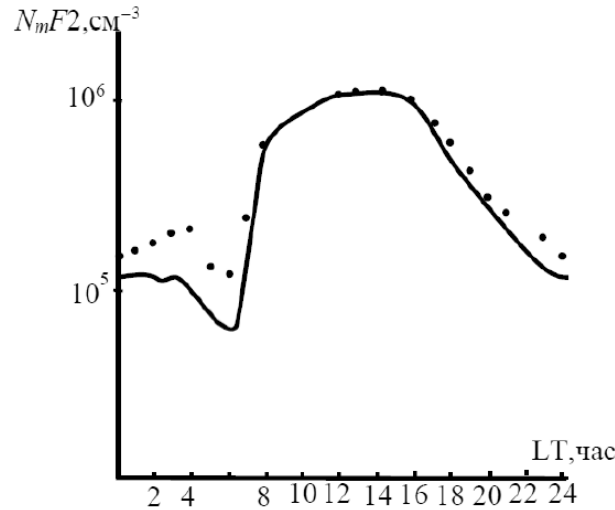


Рис. 2. Суточная вариация значений  $N_m F2$ , вычисленная с помощью ионосферно-плазмосферной модели (сплошная кривая), экспериментальные измерения значений  $N_m F2$  обозначены кружками

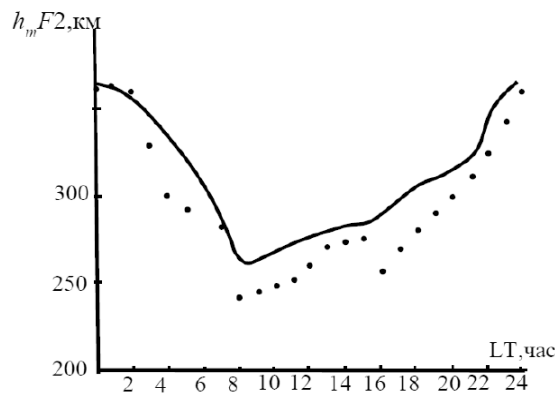


Рис. 3. Суточная вариация значений  $h_m F2$  — модельные расчеты (сплошная кривая) и полученная на основе измерений (обозначена кружками)

ротной силовой трубки геомагнитного поля (параметр Мак-Илвайна  $L = 3$ ) и низкой солнечной активности (индекс  $F_{10.7} = 70$ ) и начало года (зима в северном полушарии, лето — в южном).

На рис. 1 представлен суточный ход изменения концентрации электронов в главном ионосферном максимуме и высоты максимума. Расчеты выполнены для среднеширотной силовой трубки геомагнитного поля ( $L = 3$ ) и низкой солнечной активности  $F_{10.7} = 70$ .

На рис. 2 и 3 приведены суточные вариации параметров  $N_m F2$  и  $h_m F2$  — важных для целей прогнозирования [14]. Проведенное сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными в случае высокой солнечной активности (зима) и  $L = 3,2$  показывает удовлетворительное согласие между ними.

В следующей модельной задаче, на основе численного исследования распределения плазмы вдоль силовой трубки геомагнитного поля рассмотрим динамику области пониженной электронной концентрации, образуемой при химическом техногенном возмущении [5, 15].

Рассмотрим результаты антропогенного поступления воды в области дневного максимума F2 в полдень.

На рис. 3 показан суточный ход  $N_m F2$  и  $h_m F2$ , рассчитанный для этого техногенного воздействия.

Резкое уменьшение электронной концентрации в начальный период практически совпадает с данными работ, ограничивавшихся рассмотрением только области F2.

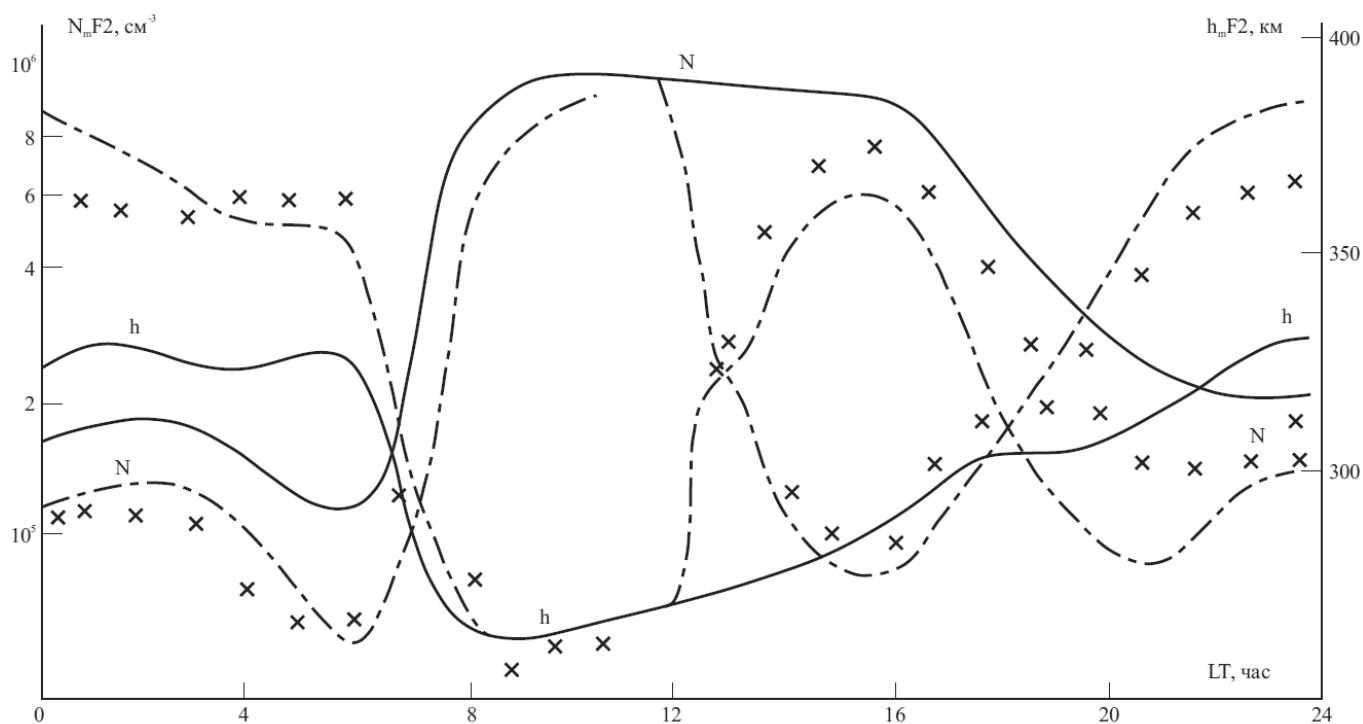


Рис. 4. Временные вариации максимума концентрации и высоты F слоя. Сплошные линии — профили, соответствующие невозмущенным условиям; штрихпунктирные — антропогенному возмущению в 12.00 LT с учетом образующегося атомарного водорода; крестики — такому же возмущению без водорода

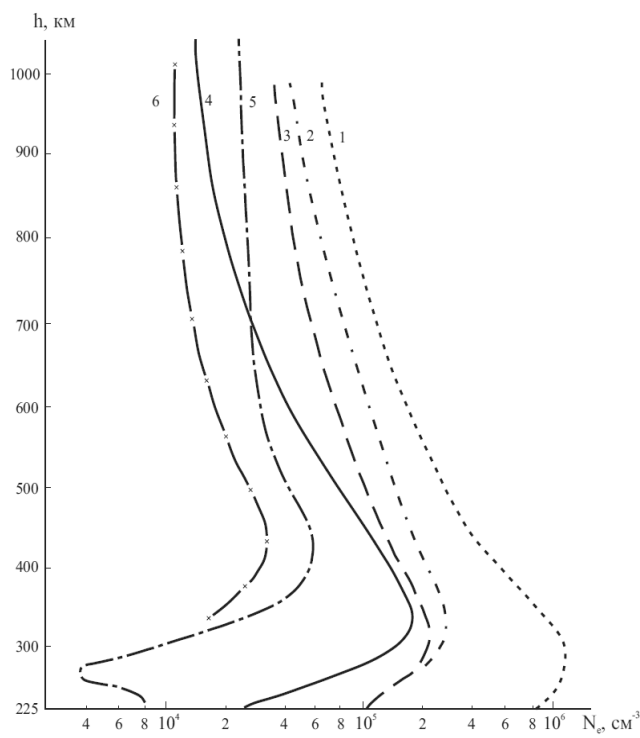


Рис. 5. Высотные профили электронной концентрации.

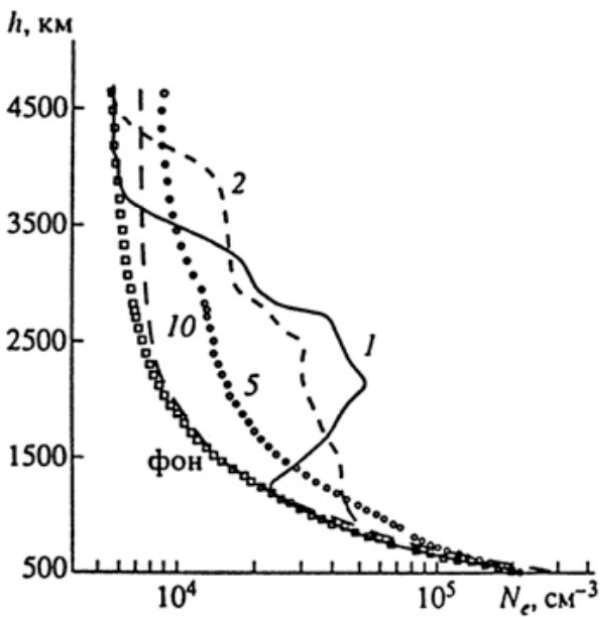


Рис. 6. Высотные профили электронной концентрации для различных моментов времени в Северном полушарии. Цифры у кривых соответствуют времени (в мин), прошедшему после возмущения плазмосферы

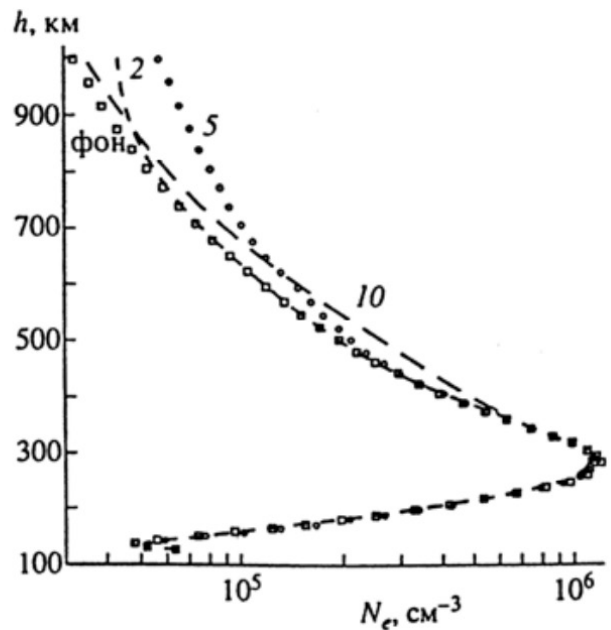


Рис. 7. Высотные профили электронной концентрации в области ионосферы для различных моментов времени в Северном полушарии. Обозначения как на рис. 6

Учет физико-химических процессов вдоль всей силовой трубки позволяет установить существование области пониженной электронной концентрации на больших интервалах времени. На рис. 4 видно, что вплоть до начала восхода в следующие сутки в области максимума F2 наблюдается понижение электронной концентрации приблизительно в 2 раза по сравнению со спокойными условиями, соответствующими суточному ходу  $N_mF2$  при отсутствии химического возмущения.

Высота максимума при этом сдвигается вверх и это отличие  $h_mF2$  от фона также сохраняется вплоть до восхода.

Изменениям  $N_mF2$  и  $h_mF2$  соответствует изменение всего высотного профиля электронной концентрации  $N_e$ , как это видно из рис. 4, на котором приведено изменение высотного распределения  $N_e$  через 1 час после техногенного воздействия.

Профили 1–3 (антропогенное воздействие в 12.00 LT) соответствуют 13.00 LT, кривые 4–6 (антропогенное возмущение в 00.00 LT) — 03.00 LT. Профили 1, 4 соответствуют невозмущенным условиям. Кривые 3, 5 соответствуют антропогенным воздействиям с учетом атомарного водорода, а профили 2 и 6 — таким же воздействиям без учета водорода

Особо следует отметить необходимость учета влияния атомарного водорода, который образуется из молекул воды в результате перезарядки с ионами  $O^+$  и последующей рекомбинации ионов  $H_2O^+$ . Увеличение содержания водорода прежде всего приводит к дополнительному уменьшению  $N_mF2$  (см. рис. 4), т.е. к увеличению области с дефицитом электронной концентрации, как это видно из сравнения соответствующих кривых на рис. 5.

В качестве следующей модельной задачи был выбран расчет ионосферно-плазмосферных параметров в условиях возмущения плотности и температуры плазмы в силовой трубке с параметром  $L = 3$  для средней геомагнитной и солнечной активности (индексы  $K_p = 3$ ,  $F_{10.7} = 150$ ) и начала года (зима в Северном полушарии, лето в Южном).

В геомагнитной силовой трубке с установившимся режимом техногенное воздействие задавалось в полдень в Северном полушарии гауссоподобным распределением концентрации и температуры электронов с максимальным значением на высоте 2350 км ( $N_e[2350] = 1,6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e[2350] = 1 \text{ эВ}$ ). Размер области возмущения на высоте — 900 км.

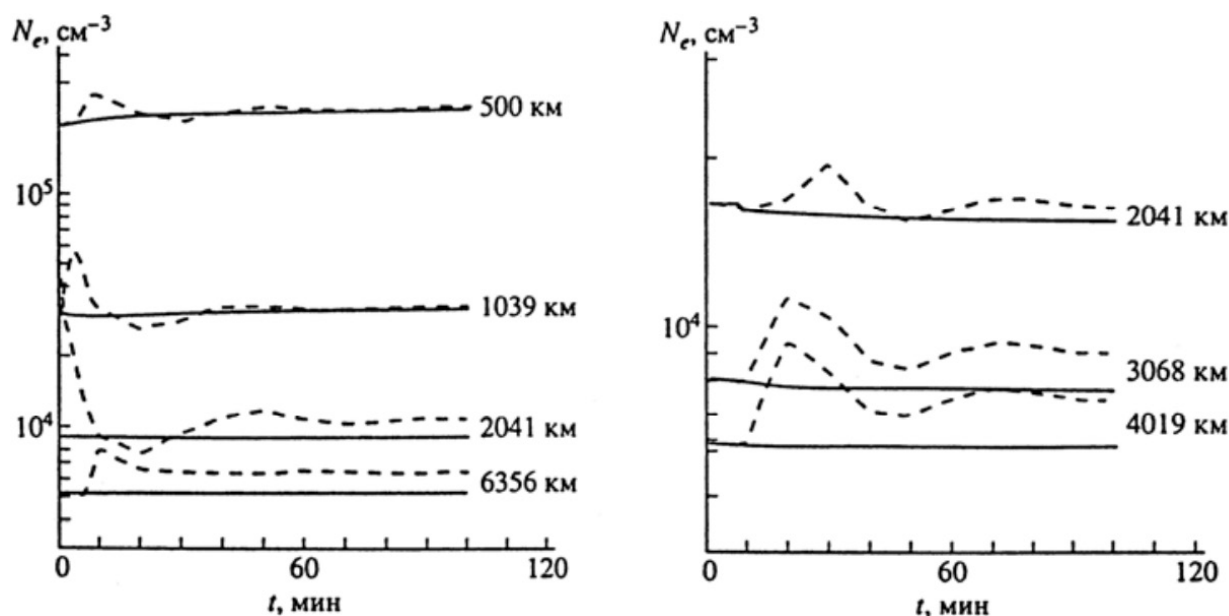


Рис. 8. Временные вариации электронной концентрации на фиксированных высотах в Северном полушарии. Сплошные кривые соответствуют невозмущенным условиям

На рис. 6, 7 представлены высотно-временные распределения электронной концентрации до и после динамического воздействия. Результаты, показанные на рис. 6, позволяют проследить распространение возмущения вверх и вниз по геомагнитной трубке. Время релаксации электронной концентрации к фоновым значениям составляет примерно 10 мин в интервале высот 300–2500 км. Динамическое воздействие не вызвало заметного отклика на высотах F-области (рис. 7), однако через 5 мин после начала возмущения на высоте 900 км концентрация электронов возросла в 1.7 раза, а на высоте 500 км спустя 10 мин — в 1.3 раза.

На рис. 8 представлены временные изменения концентрации электронов на избранных высотах. Очевидно, по мере удаления от места локализации динамического воздействия амплитуда возмущения уменьшается, причем наблюдается фазовый сдвиг максимального значения концентрации, изменяющийся с высотой. Для Северного полушария (рис. 8) заметно некоторое понижение электронной концентрации через 20–30 мин после возмущения на высотах 500–2100 км, обусловленное, по-видимому, динамическими факторами. Возмущение плазмосферы в Северном полушарии вызывает перенос тепловой плазмы через экватор в Южное полушарие. Характерные времена прохождения возмущения в Южное полушарие составляют 20–40 мин.

Таким образом, техногенное возмущение температуры и плотности плазмы на высотах плазмосферы пере-

носится вдоль геомагнитного поля от места локализации в ионосферу и магнитосопреженную область.

### Заключение

Представлен метод численного исследования динамики околоземной космической плазмы в дипольном магнитном поле на высотах более 125 км.

Предложенный подход реализован в виде физико-математической модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия, позволяющей воспроизводить пространственно-временное распределение параметров тепловой плазмы и сверхтепловых электронов в спокойных и возмущенных условиях.

В результате вычислительных экспериментов показаны основные закономерности в динамике переноса и химической кинетике заряженных частиц в различных гелиогеофизических условиях, включая техногенные воздействия.

Вычислительные эксперименты показали, что корректная постановка задачи численного моделирования процессов в системе ионосфера-плазмосфера формулируется для полной системы уравнений движения и непрерывности гиперболического типа.

Работоспособность и численная устойчивость построенной модели по входным данным подтверждены результатами решений нестационарных задач динамики и энергетики околоземной космической плазмы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Современные достижения в плазменной гелиогеофизике // Под редакцией Зеленого Л.М., Петруковича А.А., Веселовского И.С. М.: Физматлит, 2019. — 688 с.
2. 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.
3. Тащилин А.В., Романова Е.Б. Численное моделирование диффузии ионосферной плазмы в дипольном геомагнитном поле при наличии поперечного дрейфа // Математическое моделирование. 2013. Т. 25, № 1. С. 3–17.
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., Залеская В.А. 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. Barakat A.R., Schunk R.W., Moore T.E., Waite J.H. Ion escape fluxes from the terrestrial highlatitude ionosphere // J. Geophys. Res., 1987, v. 92, № 11, p. 12255–12266.
8. Richards P.G. Reexamination of ionospheric photochemistry. J. Geophys. Res. 2011, vol. 116, iss A8, A08307.
9. Кринберг Н.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984, 189 с.
10. Елизарова Т.Г., Четверушкин Б.Н. Об одном вычислительном алгоритме для расчета газодинамических течений // ДАН СССР, 1984, т. 279, № 1, с. 80–83.
11. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983.
12. 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.
13. Hedin A.E. Thermospheric model // J. Geophys. Res., 1987, v. 92, № A5, p. 4649–4662.
14. Evans J.V. A study of F2-region daytime vertical ionization fluxes at Millstone Hill during 1969 // Planet. and Space Sci. — 1975. — Vol. 23, № 11. — P. 1461–1482.
15. Ступицкий Е.Л., Холодов А.С. Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов: Монография // Издательский Дом Интеллект. 2018.

---

© Ишанов Сергей Александрович ( sishanov@kantiana.ru ), Кашченко Николай Михайлович ( nkashchenko@kantiana.ru ),  
Зубков Евгений Вячеславович ( evgenyzubkov@mail.ru ), Савкин Дмитрий Александрович ( DSavkin@kantiana.ru ),  
Худенко Владимир Николаевич ( VKHudenko@kantiana.ru ).  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»