

УДК 551.511.61, 551.511.32

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В МОДЕЛИ КОНВЕКЦИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА ОБЛАСТИ F ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2023 г. И. В. Романов^{1,*}, Д. В. Григорьев¹, А. Т. Платонова¹¹Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова, Москва, Россия

*E-mail: romanov@ipg.geospace.ru

Исследуются режимы в модифицированной динамической системе Лоренца, описывающие распределение скорости движения и температуры конвективных валов с теплофизическими параметрами нейтрального газа в атмосфере, соответствующей высоте F области ионосферы, при внешнем гармоническом воздействии на температуру нейтрального газа. Модель нейтрального газа построена в приближении сосредоточенных параметров. Воздействие на динамическую систему осуществляется с помощью изменения параметров горизонтального и вертикального распределения температуры конвективных валов.

Ключевые слова: ионосфера, турбулентность, нейтральный газ, карты динамических режимов.

Для цитирования: Романов И.В., Григорьев Д.В., Платонова А.Т. Динамические режимы в модели конвекции нейтрального газа области F ионосферы при вынужденном гармоническом воздействии // Динамические процессы в геосферах, 2023, т. 15, № 1. С. 45–53. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_45

Введение

Анализ литературных источников [Намгаладзе и др., 1996; Клименко и др., 2006; Ridley et al., 2006; Jin et al., 2012; Тащилин, 2013; Uvarov, 2015] показывает, что для корректного описания процессов, происходящих в термосфере, необходимо учитывать взаимовлияние верхней атмосферы и ионосферы друг на друга. Возможное возникновение турбулентных потоков нейтрального газа в верхней атмосфере будет влиять на перераспределение температуры и плотности ионосферной плазмы и наоборот.

Образование регулярных и турбулентных потоков нейтрального газа можно рассматривать как их устойчивое и неустойчивое конвективное движение при наличии «ветра» и разности температур с формированием конвективного вала. Формирование разности температур, необходимой для возникновения конвективных потоков, возможно за счет передачи энергии атомам и молекулам нейтрального газа в столкновительных процессах с электронами ионосферной плазмы. Такого результата можно добиться при воздействии на ионосферу мощным коротковолновым излучением [Гуревич, 2007; Cohen et al., 2010].

Особенно эффективно этот процесс будет происходить в максимуме ионосферы (F область) при распространении мощной электромагнитной волны в направлении магнитного зенита [Kosch et al., 2000; Pedersen et al., 2003]. Согласно результатам работ [Mishin et al., 2012] разность температур может достигать 30° K, а относительная разность температур может достигать $\Delta T/T \approx 3\%$. При этом рассчитанная скорость нагрева нейтрального газа может составлять $\Delta T/\Delta t \sim 100$ K/мин [Millward et al., 1993].

В данной работе рассматривается математическая модель движения конвективного вала нейтрального газа на высотах, соответствующих F области ионосферы. Цель работы – выявление закономерностей режимов движения конвективных валов при внешнем воздействии температуры.

Математическая модель

Рассматривается подогреваемый слой газа высотой h , находящийся в поле сил тяжести. На верхней границе поддерживается постоянная температура T_0 , на нижней границе – $T_0 + \Delta T$ (рис. 1). В газе с определенным коэффициентом теплового расширения разность температур ΔT порождает разность плотностей. Холодный, более плотный газ, который расположен в верхней части слоя (с температурой T_0), стремится опуститься в нижнюю, более теплую (с температурой $T_0 + \Delta T$) и менее плотную часть слоя. В то же время нижняя часть слоя стремится подняться вверх. Возникает движение газа, которое называют тепловой конвекцией. При малых значениях ΔT конвективное движение не возникает из-за эффектов трения. При достижении определённой ΔT_c разности температур $\Delta T \geq \Delta T_c$ формируется структура валов (конвективные валы с параллельными горизонтальными осями). Эти валы образованы чередующимися восходящими и нисходящими потоками. При этом движение газа однородно вдоль оси Oy . Потоки расположены эквидистантно с пространственным периодом l . Два соседних вала вращаются в противоположных направлениях. При больших значениях $\Delta T \geq \Delta T_c$ структура движения валов полностью разрушается: движение становится хаотическим (турбулентным).

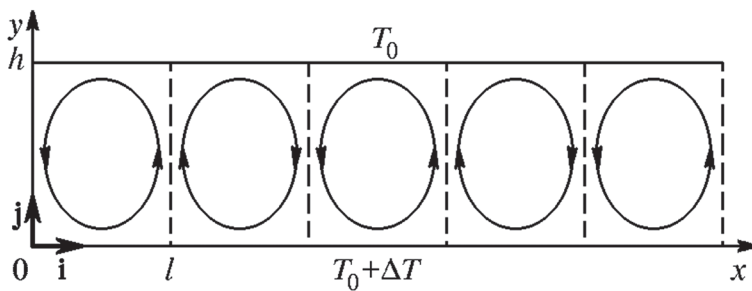


Рис. 1. Конфигурация течения, возникающая при конвекции подогреваемого снизу слоя газа [Кузнецов, 2006]

Динамику конвективных валов (рис. 1) описывает гидродинамическая модель Лоренца [Кузнецов, 2006; Шустер, 1988]

$$\dot{x} = \sigma(y - x), \quad \dot{y} = rx - y - xz, \quad \dot{z} = -bz + xy. \quad (1)$$

Безразмерные параметры представлены в виде [Шустер, 1988]:

$$\sigma = \frac{\nu}{\kappa}, \quad b = \frac{4}{1 + \alpha^2}, \quad r = \frac{g\gamma h^3 \alpha^2 \Delta T}{\pi^4 (1 + \alpha^2)^3 \kappa \nu}. \quad (2)$$

Переменная x характеризует скорость вращения конвективных валов, величины y и z отвечают за распределение температуры по горизонтали и по вертикали соответственно, σ – число Прандтля, параметр b определяется геометрией конвективной ячейки; r – нормированное число Релея, g – член, который обусловлен присутствием силы тяжести, $p(x, y, z, t)$ – поле давлений, ν – коэффициент кинематической вязкости, κ – коэффициент температуропроводности, γ – коэффициент теплового расширения, α – отношение высоты и ширины вала.

Внешнее воздействие на систему (3) представлено через добавление в правые части ко второму и третьему уравнениям членов, характеризующих внешнее изменение вертикального и горизонтального распределения температуры по закону:

$$\Delta Y = \omega_1 A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad \Delta Z = \omega_2 A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2). \quad (3)$$

Тогда система уравнений (1) принимает вид:

$$\dot{x} = \sigma(y - x), \quad \dot{y} = rx - y - xz + \Delta Y, \quad \dot{z} = -bz + xy + \Delta Z. \quad (4)$$

Параметры A_1 , A_2 , ω_1 , ω_2 , φ_1 , φ_2 в (3) задают вид горизонтального и вертикального нормированного мгновенного распределения разности температур внешнего воздействия, параметр r задает значение разности температур ΔT согласно (2). На рис. 2 представлены примеры такого распределения при различных параметрах.

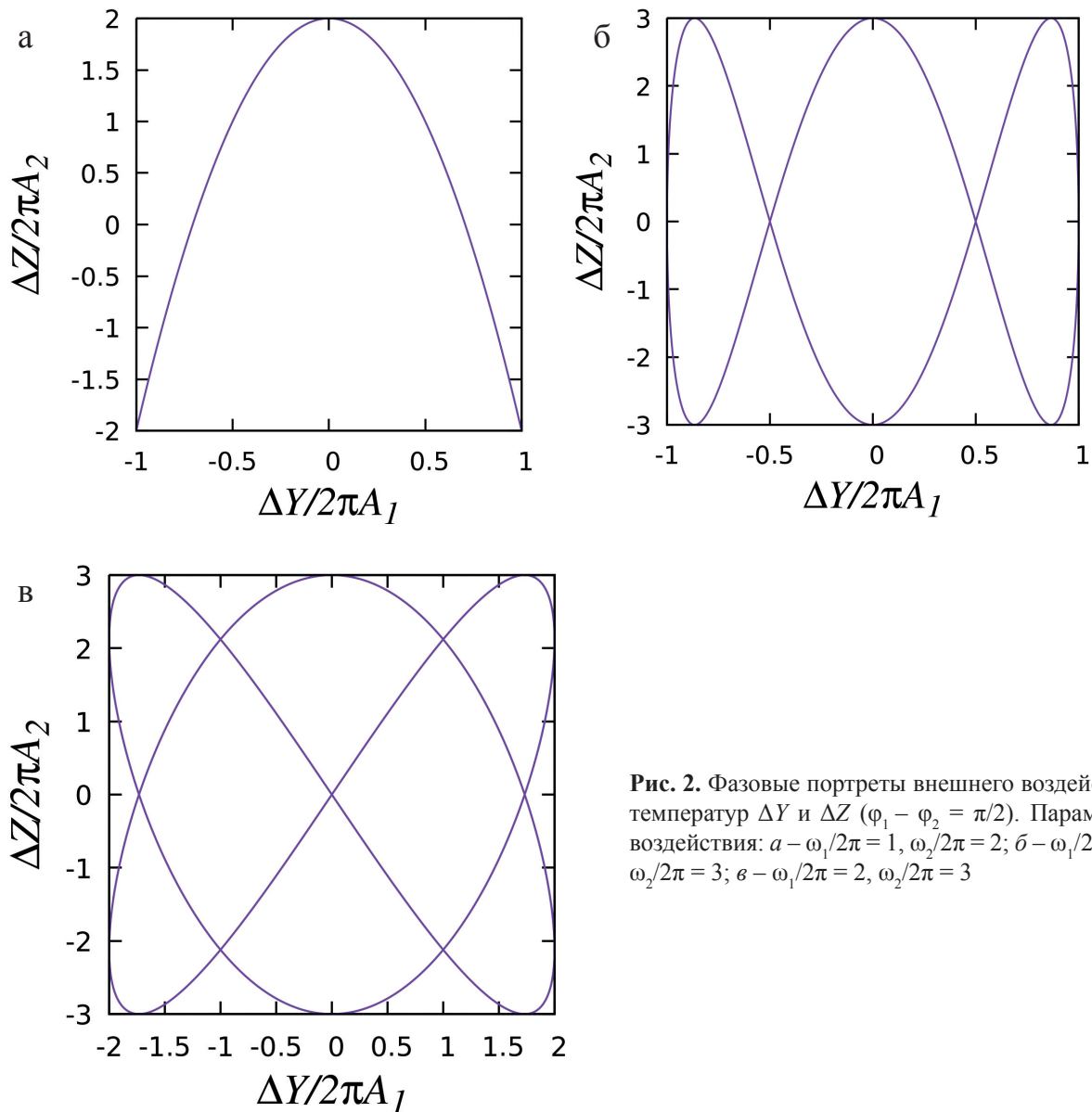


Рис. 2. Фазовые портреты внешнего воздействия температур ΔY и ΔZ ($\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$). Параметры воздействия: *а* – $\omega_1/2\pi = 1$, $\omega_2/2\pi = 2$; *б* – $\omega_1/2\pi = 1$, $\omega_2/2\pi = 3$; *в* – $\omega_1/2\pi = 2$, $\omega_2/2\pi = 3$

Расчет динамики конвективных валов нейтрального газа проводился в приближении соответствия теплофизическим параметрам (рис. 3) на высотах области F ионосферы на основе профилей компонент нейтрального газа [РД 52.26.817.2015., 2015].

Расчёт теплофизических параметров атмосферы проводился согласно результатам работ [Гинзбург, 1970; Исаченко, 1981; Сахин, 2013]. Температурные зависимости теплопроводности и динамическая вязкость компонентов нейтрального газа использовались из работ [Варгафтик, 1972; Сычев, 1978].

Устойчивость динамических режимов исследовалась методом оценки значений показателей Ляпунова [Ляпунов, 1950] системы уравнений (4) при теплофизических параметрах атмосферы, соответствующей высотам F области ионосферы при положительной разности температур ΔT ($r > 0$) Нахождение показателей Ляпунова проводилось по методу Бенетти [Benettin et al., 1980; Купцов, 2010; Brown, 1991].

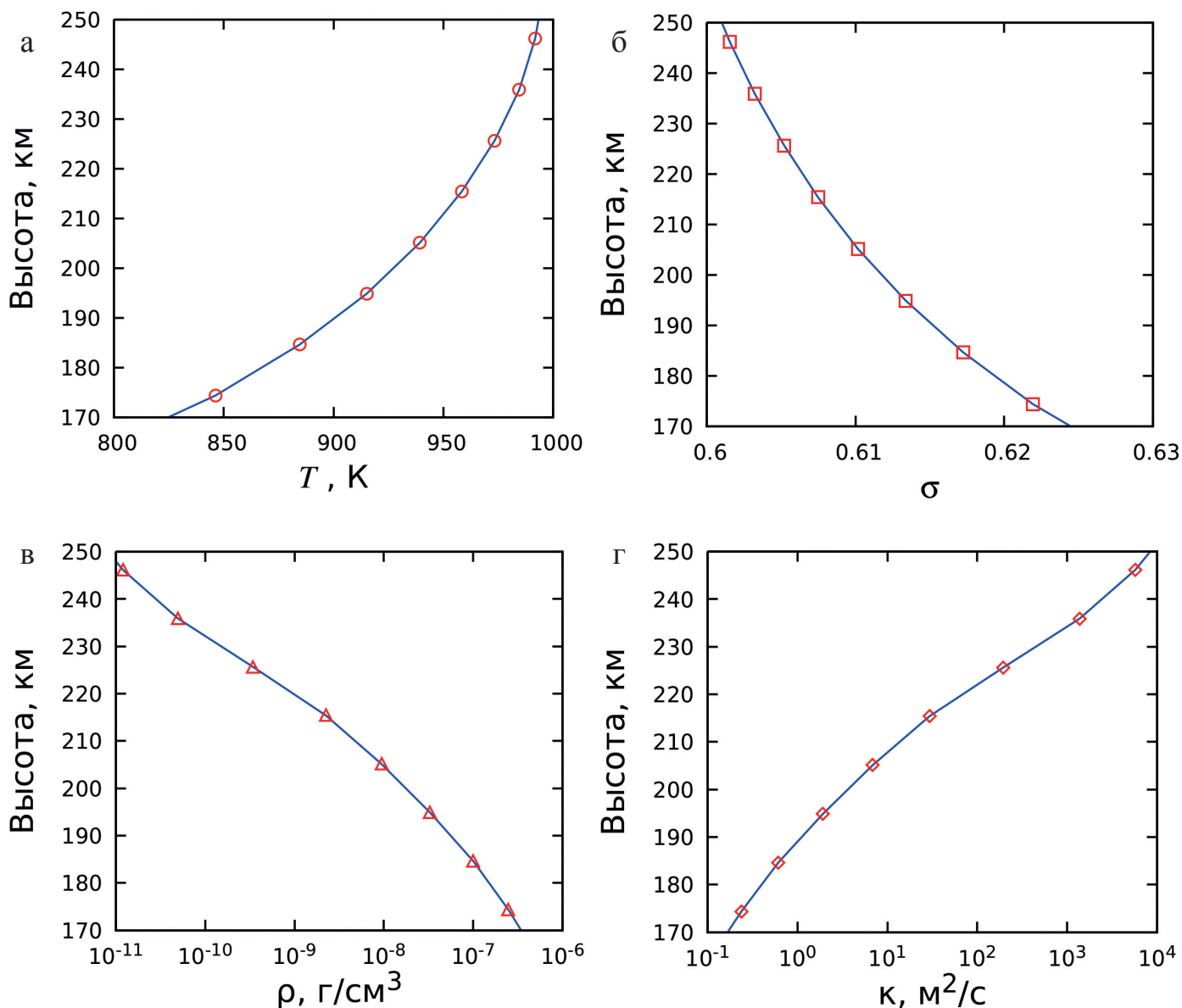


Рис. 3. Профили нейтрального газа в модели ионосферы: а – температуры; б – числа Прандтля; в – плотности нейтрального газа; г – температуропроводности

Результаты численного эксперимента

Система (1) при $r \leq 0$ и отсутствии внешнего воздействия является устойчивой [Кузнецов, 2006], то есть возникшие конвективные движения с течением времени затухают. Однако в случае $r > 0$ и наличии внешнего воздействия в системе (4) могут возникать вынужденные незатухающие движения с образованием конвективных валов. Вычисление старшего показателя Ляпунова (Lp_1) при различных значениях параметров системы позволяет представить на карте сложную зависимость динамических режимов.

В системе (4) возникают следующие режимы:

- состояние равновесия (конвективных валов нет, передача тепла происходит за счет теплопроводности нейтрального газа), значение всегда $Lp_1 < 0$;
- предельный цикл (формируется конвективный вал, характеризующийся постоянным периодом и амплитудой, передача тепла происходит, в том числе, за счет переноса массы нейтрального газа), значение $Lp_1 \leq 0$;

– турбулентная фаза (формируется конвективный вал, характеризующийся непериодическим движением и непостоянной амплитудой, передача тепла происходит, в том числе, за счет переноса массы нейтрального газа), значение $Lp_1 > 0$;

На рис. 4 представлены фазовые портреты (ФП) динамики в модели (4) на плоскости Oxy . На рисунках 4,а и 4,б изображены ФП периодического движения конвективных валов, соответствующие предельному циклу.

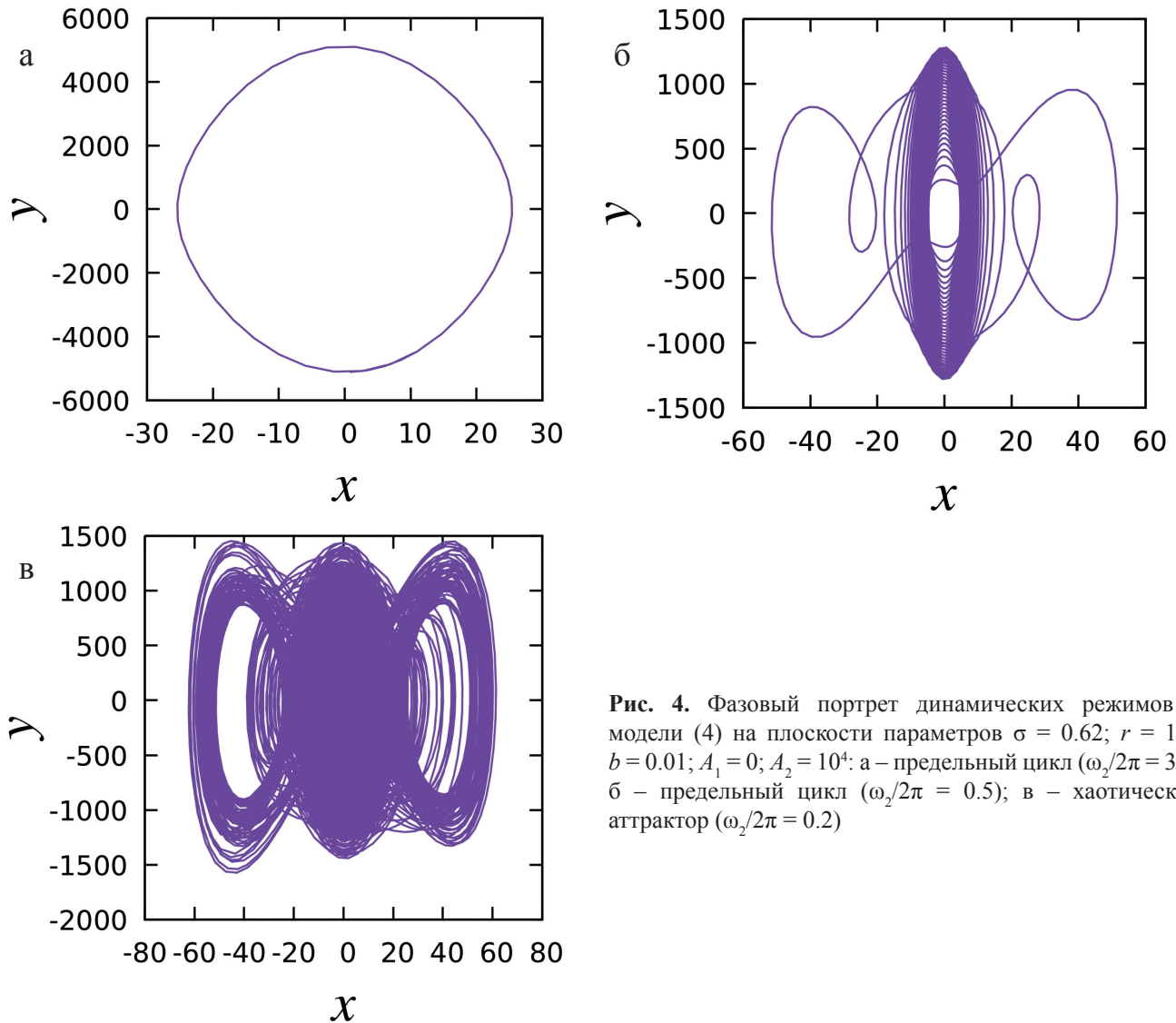


Рис. 4. Фазовый портрет динамических режимов в модели (4) на плоскости параметров $\sigma = 0.62$; $r = 10^4$; $b = 0.01$; $A_1 = 0$; $A_2 = 10^4$: а – предельный цикл ($\omega_2/2\pi = 35$), б – предельный цикл ($\omega_2/2\pi = 0.5$); в – хаотический аттрактор ($\omega_2/2\pi = 0.2$)

Траектория на фазовой плоскости на рис. 4,а имеет самую простую форму – окружности. В этом случае реализуется равномерное вращение конвективных валов. Траектория на рис. 4,б имеет более сложную структуру, а также заполняет большую часть фазового пространства, чем на рис. 4,а. Эта траектория также характеризуется наличием предельного цикла. При этом движение конвективных валов имеет более сложную зависимость от времени. На рис. 4,в представлен фазовый портрет хаотического аттрактора, характеризующего турбулентный режим движения конвективных валов. При таком движении период предельного цикла равен бесконечности, то есть вышедшая из заданной точки на фазовой траектории система уже не вернется к начальным условиям.

На рисунках 5–8 представлены результаты расчета карт значений старшего показателя Ляпунова Lp_1 (динамических режимов) в системе уравнений (4). Оттенками синего цвета показаны отрицательные значения Lp_1 (состояния динамического равновесия). Желтым цветом представлены устойчивые

динамические режимы типа «предельный цикл». Красным – показан неустойчивый динамический режим – турбулентная фаза. Каждая точка на карте динамических режимов соответствует конкретной конфигурации конвективного вала с соответствующими параметрами.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что при увеличении значения параметра r область реализации динамических режимов сужается (рис. 5) и асимптотически стремится к $b \approx 0.01$. Картина на рис. 6 свидетельствует о возможности реализации динамических режимов в области частот ω_2 незначительной амплитуды ($A_2/r \ll 1$) относительно параметра r . Соотношение значений начальных фаз внешнего воздействия ϕ_1 и ϕ_2 имеет значительное влияние на картину режимов конвективных валов.

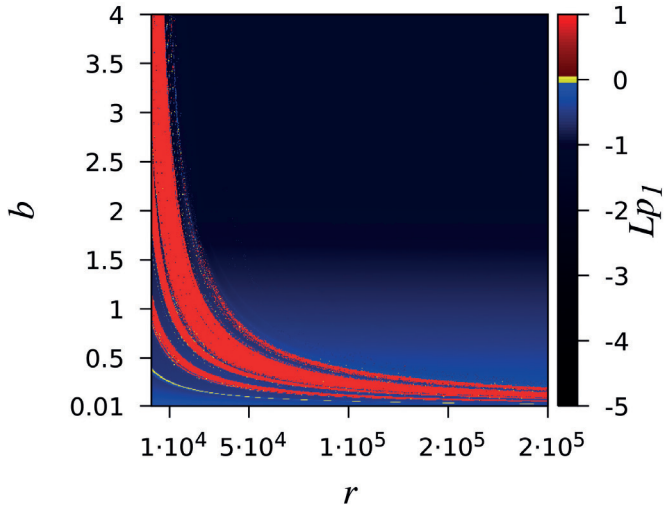


Рис. 5. Карта Lp_1 на плоскости $r \times b$ при $\sigma = 0.62$, $A_1 = 10^5$, $\omega_2/2\pi = 1$, $\phi_2 = \pi/2$, $A_2 = 0$

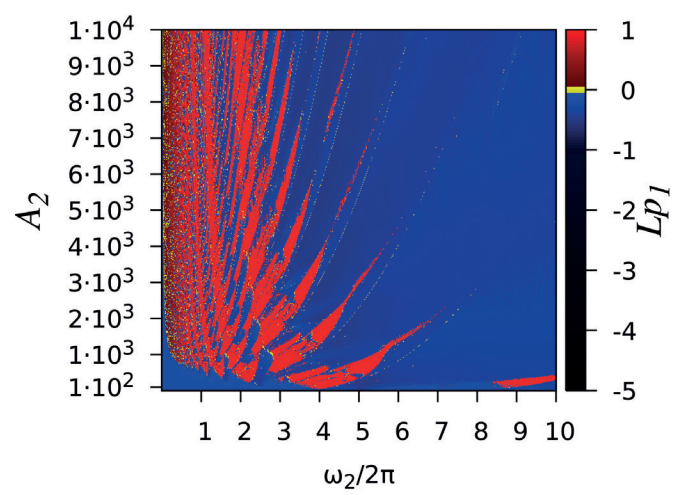


Рис. 6. Карта Lp_1 на плоскости $\omega_2/2\pi \times A_2$ при $\sigma = 0.62$, $b = 0.01$, $r = 10^5$, $\phi_2 = \pi/2$

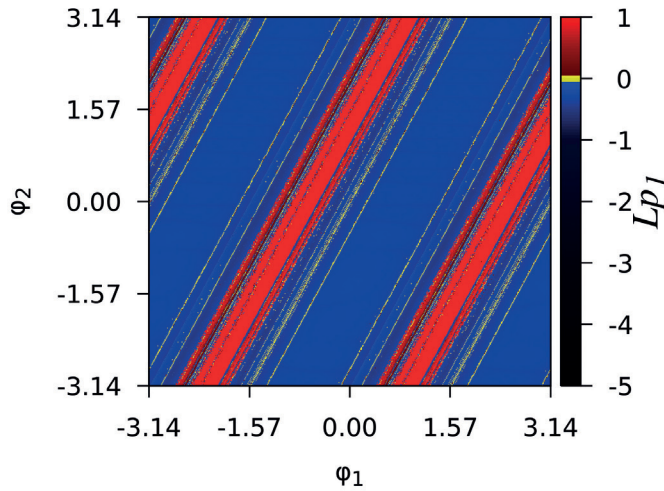


Рис. 7. Карта Lp_1 на плоскости $\phi_1 \times \phi_2$ при $\sigma = 0.62$, $b = 0.01$, $r = 10^5$, $A_1 = A_2 = 25 \cdot 10^3$, $\omega_1/2\pi = 1$, $\omega_2/2\pi = 2$

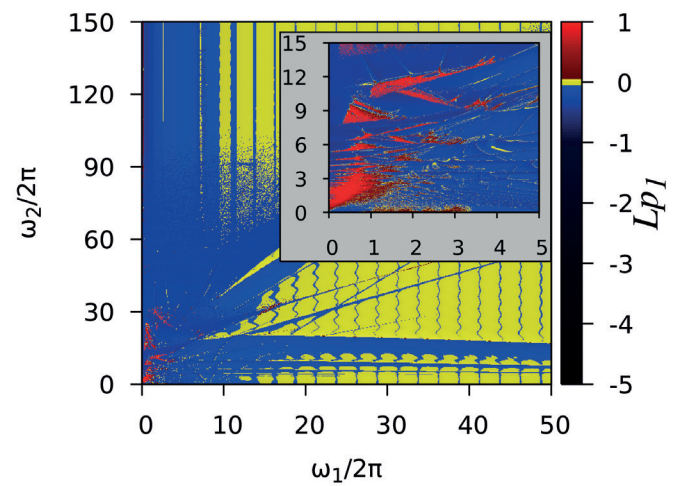


Рис. 8. Карта Lp_1 на плоскости $\omega_1/2\pi \times \omega_2/2\pi$ при $\sigma = 0.62$, $b = 0.01$, $r = 10^5$, $A_1 = A_2 = 25 \cdot 10^3$; $\phi_1 = 0$; $\phi_2 = \pi/2$. На вставке – увеличенный фрагмент области с неустойчивой динамикой

На рис. 7 хорошо различимы зоны потери устойчивости при изменении начальных фаз в условиях постоянных значений амплитуды воздействия A_1 и A_2 . Закономерности воздействия на конвективные валы нейтрального газа с помощью изменения частоты горизонтальной $\omega_1/2\pi$ и вертикальной $\omega_2/2\pi$ разности температур представлены на рис. 8. Значение старшего показателя Ляпунова Lp_1 на карте имеет неоднородную структуру. Области равномерного движения конвективных валов (предельный

цикл) перемежаются с областями турбулентного движения. Отметим, что возникновение неустойчивого турбулентного состояния конвективных валов, главным образом, наблюдается при внешнем воздействии на частотах $\omega_1/2\pi$ и $\omega_2/2\pi$ от долей единицы до десятка. На вставке (рис. 8) в области частот $\omega_1/2\pi < 4$ и $\omega_2/2\pi < 15$ реализуется турбулентный режим (красный цвет). На частотах $\omega_1/2\pi > 10$ и $\omega_2/2\pi > 0$ возникают периодические движения при идентичных параметрах (σ, b, r) модели (4).

Ненормированная частота f с учетом параметров среды (κ) и конфигурации конвективного вала (высота h и ширина h/α) определяется выражением [Шустер, 1988]:

$$f_i = \frac{(2\pi)^2 \kappa}{h^2 \cdot b} \cdot \frac{\omega_i}{2\pi}, \quad (5)$$

где $i \in 1, 2$ (f_1, f_2 – частота воздействия на горизонтальную и вертикальную разность температур); α находится с учетом b по (2). Так для нормированной частоты $\omega_1/2\pi = 1$ при $\kappa = 0.4 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$; $h = 1 \text{ км}$, $b = 0.01$ частота внешнего воздействия f_1 равна $1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}$, при воздействии на частоте $\omega_1/2\pi = 30$ пересчет ненормированной частоты внешнего воздействия f_1 дает значение $4.7 \cdot 10^{-2} \text{ Гц}$.

По результатам моделирования динамических режимов на карте параметров $r \times b$ (рис. 5) отмечается потеря устойчивости динамического равновесия при значении параметра r в широких пределах – от 10^2 до 10^5 . Условие возникновения конвективных валов нейтрального газа определяется выражением:

$$r_{\max} \geq r = \frac{g\gamma h^3 \alpha^2 \Delta T}{\pi^4 (1 + \alpha^2)^3 \kappa \nu} \geq r_{\min}. \quad (6)$$

Устанавливая величины теплофизических и геометрических параметров области формирования конвективного вала, например, вертикальное положение, геометрические размеры нагретой области атмосферы и значение вертикальной разности температур, можно управлять формированием конвективных валов и их размерами.

Заключение

Таким образом, проведенный расчет карт динамических режимов нейтрального газа атмосферы на высотах области F ионосферы при моделировании вынужденной динамики конвективных валов на основе системы Лоренца при внешнем гармоническом воздействии на вертикальное и горизонтальное распределение температуры свидетельствует о реализации следующих режимов движения нейтрального газа: состояния равновесия, периодического режима (предельный цикл), турбулентного режима.

В состоянии равновесия энергия от источника тепла передается с помощью механизма теплопроводности, в динамических режимах (ламинарная и турбулентная фаза) передача энергии реализуется, в том числе, и конвенционным механизмом передачи энергии. В рассматриваемой системе возможно реализовать управление переключением режимов движений конвективных валов с помощью внешнего гармонического воздействия на нейтральный газ путем изменения амплитуды, частоты и разности фаз источника теплоты.

Численное моделирование показало, что при изменении параметров воздействия наблюдается переключение режимов движения конвективных валов скачком, то есть присутствует триггерное переключение режимов из состояния равновесия в динамический режим и обратно.

Список литературы

- Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. : НАУКА. 1972. –720 с.
Гинзбург И.П. Теория сопротивления и теплопередачи. Л. : Изд-во ЛГУ, 1970. –376 с.
Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.

Исаченко В.П. Теплопередача: учебн. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. 4-е изд. М. : Энергоиздат, 1981. –416 с.

Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – динамо поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 485–494.

Кузнецов С.П. Динамический хаос. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2006. –356 с.

Купцов П.В. Вычисление показателей Ляпунова для распределённых систем: преимущества и недостатки различных численных методов // Изв. вузов «ПНД», т. 18, № 5. 2010. С. 93–112.

Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М. Л. : ГИТТЛ. 1950.

Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В., Намгаладзе А.Н. Глобальная модель верхней атмосферы с переменным шагом интегрирования по широте // Геомагнетизм и аэронавигация. 1996. Т. 36, № 2. С. 89–95.

РД 52.26.817.2015. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть 1. Ионосферные наблюдения. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2015.

Сахин В.В. Конвективный теплообмен в однородной среде (теплоотдача): учебное пособие / В.В. Сахин; Балт. гос. техн. ун-т. СПб. 2013. –224 с.

Сычев В.В., Вассерман А.А., Козлов А.Д., Спиридонов Г.А., Цымарный В.А. Термодинамические свойства воздуха – ГСССД. Серия: монографии. М. : Издательство стандартов. 1978. –276 с.

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.

Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение: Пер. с англ. М. : Мир. 1988. –240 с.

Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for hamiltonian systems: A method for computing all of them. Part I: Theory. Part II: Numerical application // Meccanica. 1980. Vol. 15. P. 9.

Brown R., Bryant P. and Abarbanel H.D.I. Computing the Lyapunov Spectrum of a Dynamical System from Observed Time Series // Phys. Rev A. 1991. V. 43, №. 6. P. 2787–2806.

Cohen M.B., Inan U.S., Golkowski M., McCarrick M.J. ELF/VLF wave generation via ionospheric HF heating: Experimental comparison of amplitude modulation, beam painting, and geometric modulation // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A02302. DOI:10.1029/2009JA014410.

Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D. et al. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A10323. DOI: 10.1029/2012JA017650.

Kosch M.J., Rietveld M.T., Hagfors T., Leyser T.B. High-latitude HF-induced airglow displaced equator wards of the pump beam // Geophys. Res. Lett. 2000. Vol. 27, №. 17. P. 2817–2820;

Millward G., Quegan S., Moffett R., Fuller-Rowell T. and Rees D. A modelling study of the coupled ionospheric-thermospheric response to an enhanced high-latitude electric field event // Planet. Space Sci. 1993, 41, 45.

Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C., Forster M. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams // Geophys. Res. Lett. 2012, vol. 39. L11101. DOI: 10.1029/2012GL052004.

Pedersen T.R., McCarrick M., Selcher C. et al. Magnetic zenith enhancement of HF radio-induced airglow production at HAARP // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30, № 4. P. 1169.

Ridley A.J., Deng Y., Tóth G. The global ionosphere-thermosphere model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68, № 8. P. 839–864. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.01.008.

Uvarov V.M., Lukianova R.Yu. Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions // Adv. Space Res. 2015. V. 56, № 11. P. 2563–2574. DOI: 10.1016/j.asr.2015.10.004.

DYNAMIC MODES IN THE MODEL OF NEUTRAL GAS CONVECTION IN THE IONOSPHERIC F REGION UNDER FORCED HARMONIC INFLUENCE

© 2023 I. V. Romanov^{1, *}, D. V. Grigoryev¹, A. T. Platonova¹

¹Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

**E-mail: romanov@ipg.geospace.ru*

The modes in the modified Lorentz dynamic system, which describe the distribution of the speed and temperature of convective rolls with thermophysical parameters of the neutral gas of the ionosphere F region under an external harmonic effect on the neutral gas temperature are investigated. The neutral gas model is built in the approximation the thermophysical parameters constant in a convective cell. The external influence on the dynamic system is carried out by changing the parameters of the horizontal and vertical temperature distribution of the convective rolls.

Keywords: ionosphere, turbulence, neutral gas, dynamic modes maps.