

вертикальная конвергенция воздушных потоков в струях северного ветра и дивергенция в струях южного. Вследствие этих процессов происходит формирование областей тепла и холода на высотах мезосферы.

Приведём количественные оценки возможного изменения температуры атмосферы вследствие формирования зон конвергенции и дивергенции вертикальных потоков. Оценки можно сделать на основании уравнения притока тепла. При реализации адиабатического процесса для единицы объёма сухого воздуха справедливо выражение:

$$\rho C_v \frac{dT}{dt} = \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (1)$$

где C_v – теплоёмкость сухого воздуха при постоянном объёме, T – температура, P – давление, ρ – плотность, t – время.

Левая часть уравнения (1) представляет изменение внутренней энергии единичного объёма газа атмосферы вследствие работы внешних сил давления, правая часть – обусловленных глобальной системой меридиональной циркуляции. Воспользовавшись уравнением непрерывности, перепишем уравнение (1) в виде:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{\rho^2 C_v} \left(\frac{d\rho}{dz} w - \rho \frac{dw}{dz} \right), \quad (2)$$

где z – высота над уровнем моря, w – вертикальная скорость.

Предположим, например, что конвергенция происходит на уровне 90 км. Для него можно принять $P = 0,16$ н/м², $\rho = 3,17 \cdot 10^{-6}$ кг/м³ [8]. Принимая $C_v = 727$ Дж/кг·К и допуская, что на границе слоёв вертикальная скорость составляет 10 см/с и уменьшается к середине слоя на протяжении 10 км до нуля, получаем, что второй член в уравнении (2) даёт значение $dT/dt = 6,3 \cdot 10^{-4}$ К/с. При устойчивости таких систем циркуляции за часы и сутки механизм может приводить к наблюдаемым изменениям температуры. В частности, он может быть эффективным для сезонных изменений температуры мезопаузы, если предположить, что зимой на этих высотах имеет место вертикальная сходимостъ воздушных потоков.

Литература

1. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
2. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 398 с.
3. Уэбб В. Структура стратосферы и мезосферы. – М.: Мир, 1969. – 258 с.
4. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 394 с.
5. Groves G.V. Atmospheric structure and its variations in the region from 25 to 120 km //COSPAR International reference atmosphere 1972 (CIRA-72). – Berlin. Akademic – Verlag. 1972. P. 33 – 224.
6. Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G., et all. Revised global model of thermosphere wind using Satellite and ground – based observations//J. Geophys. Res. 1991. V.96. N. A5. P. 7657 – 7688.
7. Бутко А.С., Голубев Е.Н., Иванова И.Н. и др. Особенности суточных и полусуточных колебаний температуры и ветра над пунктом Волгоград. В сб.: Суточные и широтные вариации параметров атмосферы и корпускулярные излучения. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 86 – 104.
8. Хвостиков И.А. Высокие слои атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 605 с.

ОБ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКОЙ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ABOUT FEATURE OF RESEARCHES OF THIN MULTIFRACTAL STRUCTURE OF IONOSPHERIC TURBULENCE

Ф. И. Выборнов, В. А. Алимов, А. В. Рахлин

Федеральное государственное научное учреждение "Научно-исследовательский радиофизический институт"

We discuss the particular research thin multifractal structure of developed ionospheric turbulence by methods of multidimensional structure functions and modulus maxima of wavelet transform with the help of remote sensing of ionospheric plasma by orbiting satellites signals. It is shown that diffraction effects during the propagation of radio waves in the ionosphere lead to "blur" quasi-singular structure of ionospheric turbulence and to the inability to diagnose it by these methods during ground receiving satellite signals. It is proposed to study the fractal structure of the ionospheric turbulence apply direct probe measurements of electron density fluctuations with high frequency samples along the trajectory of the spacecraft directly into the ionosphere.

В последнее время был выполнен ряд работ по изучению мультифрактальной структуры развитой ионосферной турбулентности (ИТ) (см. [1] и цитируемую там литературу). При этом соответствующие исследования проводились с помощью дистанционного зондирования ионосферной плазмы сигналами орбитальных ИСЗ с последующей обработкой принимаемых сигналов методом многомерных структурных функций (МСФ). Но метод МСФ – интегральный метод исследований случайных процессов. Носителем фрактальной меры в нем является структурная функция 2-го порядка исследуемого процесса на локальном (квазистационарном) интервале наблюдений [2]. Поэтому с помощью этого метода невозможно изучить тонкую (облачную) мультифрактальную структуру ионосферной турбулентности. В то же время предложенный и реализованный на практике метод максимумов модулей вейвлет-преобразования (ММВП) при исследовании мультифрактальной структуры атмосферной турбулентности [3], в принципе, может быть использован и для изучения тонкой структуры ионосферной турбулентности. В отличие от метода МСФ, в методе ММВП носителем фрактальной структуры является сама сингулярная функция $f(t)$, описывающая этот случайный процесс в отдельных случайным образом выбранных ”особых” точках t_l исследуемого процесса.

При этом в основе метода ММВП лежит определение частичной суммы $z(q, \tau)$:

$$z(q, \tau) = \sum_{l=1}^N |W(\tau, t_l)|_{\max}^q, \quad (1)$$

где l – линия максимумов для скелетона вейвлет-преобразования (ВП) (см. [3,4]); N – число таких экстремальных линий на интервале наблюдений за сигналом; q – параметр порядка в частичной сумме. Максимум модуля вейвлет-преобразования на l -ой линии (вблизи ”особой” точки t_l) имеет вид [3,4]:

$$W(\tau, t_l)|_{\max} = \frac{1}{\tau} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t - t_l / \tau) \cdot f(t) dt \right|_{\max}. \quad (2)$$

Здесь функция $\psi(t - t_l / \tau)$ – стандартная вейвлет-функция с временным разрешением τ [3,4].

Исследуемую случайную функцию $f(t)$ вблизи особых ”точек” t_l , для которых отклик модуля ВП (2) является максимальным, целесообразно записать в следующем виде (ср. [3,4]):

$$f(t) = f(t_l) + c(t_l) \cdot |t - t_l|^{\alpha(t_l)}, \quad (3)$$

где $c(t_l) = \text{const}(t_l)$, а параметр

$$\alpha(t - t_l) = \begin{cases} 0 < \alpha < 1 \\ \alpha > 1 \end{cases} \text{ при } \begin{cases} |t - t_l| > \tau_0 \\ |t - t_l| \leq \tau_0 \end{cases}, \quad (4)$$

τ_0 – характерный внутренний масштаб турбулентности изучаемого случайного процесса $f(t)$.

Здесь предполагается, что мы имеем дело со случаем развитой турбулентности [3], когда второе слагаемое в формуле (3) описывает квазисингулярную тонкую структуру исследуемого турбулентного процесса. При этом, в отличие от упрощенного математического подхода, исследованного в работах [3,4] для описания поведения функции $f(t)$ вблизи ”особой” точки t_l , применяется более сложная и более реалистичная физическая конструкция измеряемого сигнала с переменной функцией (см. (4)). В целом функция $f(t)$ – регулярная функция, но вблизи некоторых выделенных точек t_l в области значений $|t - t_l| \geq \tau_0$ она может вести себя как сингулярная функция вида $f(t) = f(t_l) + c(t_l) \cdot |t - t_l|^\alpha$ с параметром $0 < \alpha < 1$ (ср. [3,4]). Однако, строго говоря, внутри интервала $\Delta t \leq \tau_0$ она полностью регулярна, подобно тому, как структурная функция 2-го порядка $D_f(\tau)$ полностью регулярна внутри такого же малого интервала наблюдений за нижним пределом инерционного интервала турбулентности [5]. Но вклад этой малой области внутреннего интервала турбулентности в отклик ВП незначителен (см. (2) с учетом соотношений (3), (4) при $\tau \gg \tau_0$) и поэтому приближенно можно считать, что на исследуемых локальных масштабах регистрации сигнала вблизи экстремальных точек t_l функция $f(t)$ сингулярная. Действительно, математически функцию $f(t)$, точнее ее аппроксимацию при $\Delta t \geq \tau_0$, можно считать сингулярной функцией. Но реально на всем интервале наблюдений

функция $f(t)$ – гладкая дифференцируемая функция с квазисингулярным поведением вблизи ”особых” точек t_i для скелетона ВП. При этом на любой экстремальной l -ой линии для максимумов модулей откликов ВП имеет место скейлинговое соотношение (см. (2) – (4)):

$$W(\tau, t_i)_{\max} \propto \tau^2. \quad (5)$$

Далее, с учетом соотношений (1) и (5), для исследуемой случайной функции может быть применена стандартная процедура фрактального формализма с последующим определением мультифрактального спектра исследуемого турбулентного процесса [3,4].

Но при дистанционном зондировании ИТ сигналами ИСЗ и обработке их методом ММВП возникают непреодолимые сложности. Дело в том, что даже модель фазового экрана (модель ”тонкого” неоднородного слоя толщины L с отсутствием дифракционных эффектов при распространении радиоволн в этом слое) работает лишь, когда выполняется неравенство $\lambda L \ll l^2$ (где λ - длина волны излучаемого сигнала; l - характерный размер неоднородностей) [5]. Для диагностики ”чистых” фазовых флуктуаций сигнала на выходе такого слоя при исследовании неоднородной турбулентной структуры с характерными размерами в несколько единиц – десятков метров (масштаб $l \geq l_0$, где $l_0 \approx 1$ м – внутренний масштаб плазменной турбулентности верхней ионосферы [6]), на частоте зондирования 1 ГГц толщина слоя L должна не превышать нескольких десятков метров. Такая ситуация является практически нереальной для ионосферных условий, когда характерный размер толщины слоя ионосферной плазмы с мелкомасштабными неоднородностями составляет несколько единиц – десятков километров [6]. А в таком ”толстом” слое будут существенны дифракционные эффекты при распространении радиоволн. Что, в конечном счете, приведет к ”замыванию” тонкой квазисингулярной структуры неоднородной ИТ и к невозможности диагностики ее методом ММВП при наземном приеме сигналов ИСЗ (см. [7]).

Поэтому для исследования тонкой структуры ИТ следует применять прямые зондовые измерения флуктуаций электронной концентрации $\Delta N(x)$ с высокой частотой отсчетов $\nu_{\text{отсч}} \geq 10$ кГц вдоль траектории космического аппарата в ионосфере. Мультифрактальная обработка таких прямых зондовых записей сигнала $\Delta N(x)$ с помощью метода ММВП, в принципе, позволит выявлять тонкую фрактальную структуру ионосферной турбулентности.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №09-02-97026-р_поволжье_a.

Литература

1. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. // Изв. ВУЗов-Радиофизика. 2009. т. 52, №1. С. 14.
2. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. // Изв. ВУЗов-Радиофизика. 2008. т. 51, № 4. С. 287.
3. Arheodo A. et al. // Physica A. 1998, 254. P. 24-45.
4. Павлов А.И., Анищенко В.С. // УФН. 2007. т. 177, № 8. С. 859.
5. Рытов С. М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Т. II. М.: Наука, 1978.
6. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984.
7. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. Некоторые особенности перспективных исследований мультифрактальной структуры мелкомасштабной ионосферной турбулентности с использованием вейвлет-преобразования. Препринт №528. Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ, 2009.

О ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ABOUT SPATIALLY NON-UNIFORM STRUCTURE OF SMALL-SCALE MID-LATITUDE IONOSPHERE TURBULENCE

Ф. И. Выборнов, В. А. Алимов, А. В. Рахлин

Федеральное государственное научное учреждение ”Научно-исследовательский радиофизический институт”

We present the results of the researches of inhomogeneous small-scale ionosphere turbulence structure using the method of multidimensional structure functions of the amplitude fluctuations of artificial satellites signals. Found significant differences in the behavior of multi-indices of power spectra of the irregularities and the generalized multiracial spectrum of mid-latitude ionosphere turbulence for different clouds of electron density of ionosphere plasma with dimensions of 200 ÷ 250 km, and within the clouds for local non-uniform structures with dimensions of 12 ÷ 15 km.