

УДК 520.1

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

П.Г. Ковадло, А.Ю. Шиховцев, О.С. Кочеткова

THE INVESTIGATION OF LARGE-SCALE AND STRUCTURE CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE

P.G. Kovadlo, A.J. Shikhovtsev, O.S. Kochetkova

Спектр атмосферной турбулентности изучен в широком диапазоне волновых чисел. Основываясь на данных о характеристиках колебаний в произвольном диапазоне и известной форме спектра, можно составить схему пересчета полученных характеристик в количественные характеристики произвольной полосы волновых чисел. При астроклиматических исследованиях косвенная оценка оптической нестабильности земной атмосферы является важной задачей. Схема предусматривает расчет по метеорологическим данным значений структурной характеристики показателя преломления воздуха. Результаты расчетов дали возможность выделить перспективные территории для проведения астроклиматических наблюдений.

The energy spectrum of atmospheric turbulence has been studied on a large range of wavenumbers. Using the fluctuation characteristics in some range and well-known shape of the energy spectrum, it is possible to make the calculating method of the numerical characteristics in some range of wavenumbers using calculated characteristics. The indirect estimation of optical instability of the earth's atmosphere is important problem of astroclimatic investigations. The method based on calculating the structure characteristic of air refraction index using meteorological data. The calculating results gave the possibility to choose perspective areas for astroclimatic observations.

Энергетический спектр атмосферных неоднородностей, найденный по многочисленным эмпирическим данным, известен в широком диапазоне волновых чисел. При статистическом усреднении поведение спектральных характеристик подчиняется определенным законам в различных диапазонах длин волн. Например, Настром и Гейдж при анализе температурных и ветровых измерений, полученных в результате более чем 6900 авиаполетов с 1975 по 1979 г. в диапазоне широт от 30° до 50° N в верхней тропосфере и нижней стратосфере в направлении восток–запад, получили спектр атмосферных неоднородностей, представленный на рис. 1 [Nastrom, Gage, 1985]

Для годовой продолжительности нами получен усредненный спектр флуктуаций полного вектора скорости ветра (рис. 2), вычисленный по данным ВММ (г. Обнинск) для высот 8, 121, 301 м, который по форме спектральной кривой близок к энергетическому спектру Настрома–Гейджа.

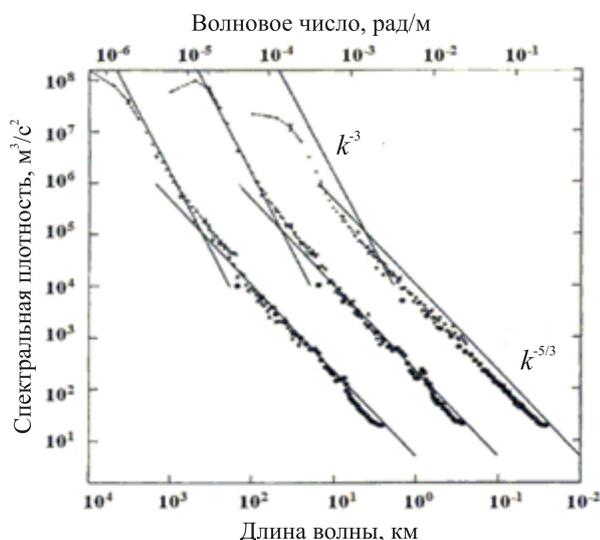


Рис. 1. Энергетический спектр Настрома–Гейджа [Nastrom, Gage, 1985].

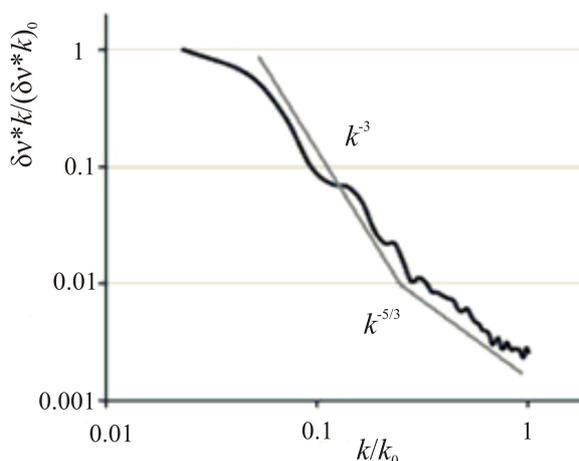


Рис. 2. Энергетический спектр флуктуации полного вектора скорости ветра (ВММ Обнинск).

В полосе малых волновых чисел спектральная кривая характеризуется наклоном -3 , для более высокочастотной части характерен наклон $-5/3$. Спектр энергии турбулентности больших (более нескольких сотен километров) и малых (менее нескольких сотен метров) горизонтальных масштабов объясняется в рамках модели геострофической турбулентности, в которой учитывается влияние вращения Земли [Charney, 1971], и модели трехмерной турбулентности [Колмогоров, 1941]. Согласно результатам численных исследований форма спектральной кривой в мезомасштабной части спектра объясняется в рамках модели квазидвумерной турбулентности [Gage, 1979; Lilly, 1983] или модели, основанной на форме спектров гравитационных волн [Dewan, 1979]. Эта проблема имеет прикладное значение в численных методах анализа и прогноза погоды. Согласно последним численным исследованиям [Tung, Orlando, 2003; Smith, 2004], в коротковолновой части спектра существует прямой каскад энергии, обусловленный преобладающим энергетическим потоком, который является следствием прямо-

го каскада энстрофии (рис. 3), что противоречит общепринятой квазигеострофической модели.

Таким образом, предполагая, что форма спектральной кривой мало меняется для средних условий и зная характеристики колебаний в произвольной полосе частот, можно рассчитывать спектральные характеристики в любой заданной полосе частот. Аппроксимировать форму спектральной кривой (не используя полиномиальные уравнения) предлагается билогарифмическим соотношением

$$A_l^2 = a \log_a A_L^2 + \int_{k_l}^{k_L} \frac{\partial \log_a A_L^2}{\partial \log_a k} d \log_a k$$

или

$$A_l^2 = a \log_a A_L^2 + \gamma_1 \int_{k_l}^{k_L} d \log_a k + \gamma_2 \int_{k_l}^{k_L} d \log_a k,$$

где a – безразмерная характеристика среднего уровня флуктуаций.

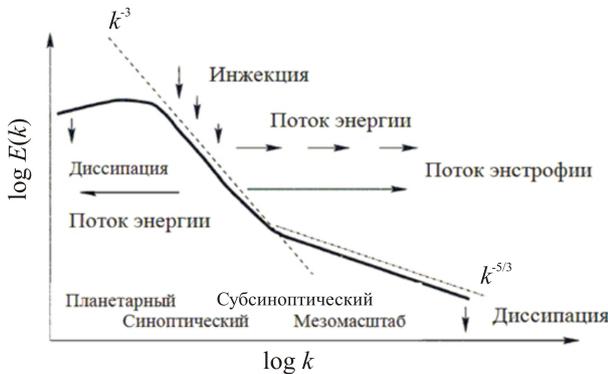


Рис. 3. Схема энергетического спектра турбулентности [Tung, Orlando, 2003].

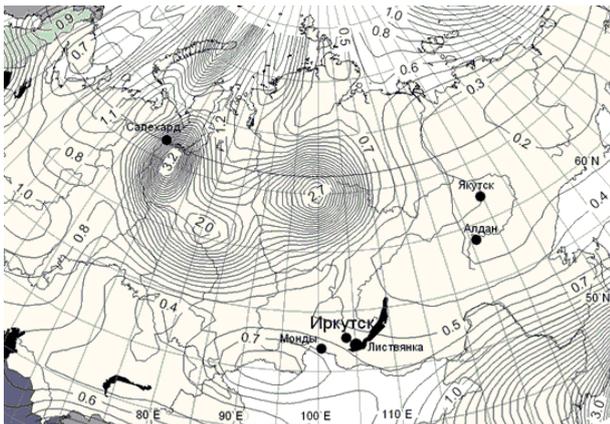


Рис. 4. Распределение мелкомасштабной компоненты турбулентности (NCEP/NCAR Reanalysis).

Представленные формулы позволили пересчитать имеющиеся в распоряжении ассимилированные радиозондовые четырехсрочные ряды данных по температуре и давлению (архив NCEP/NCAR Reanalysis) для каждого узла сетки размером $2.5 \times 2.5^\circ$ в слое атмосферы 1000–100 гПа за период 1991–2009 гг. (для диапазона неоднородностей порядка 30 см) на территории России (рис. 4).

Достоверность полученного распределения была проанализирована на основании сравнения с аналогичным распределением среднего квадратичного отклонения показателя преломления воздуха для этой же территории и в этом же слое атмосферы по справочным данным прямых радиозондовых измерений. Среднее максимальное отклонение для отделов узлов сетки не превысило 20 %.

Заключение

На основе разработанной методики можно с известной точностью рассчитывать пульсационные характеристики метеоэлементов по сетевым радиозондовым данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. 1941. Т. 30, № 4. С. 301–305.
- Charney J.G. Geostrophic turbulence // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. P. 1087–1095.
- Dewan E.M. Stratospheric wave spectra resembling turbulence // Science. 1979. V. 204. P. 832–835.
- Gage K.S. Evidence for a $k^{-5/3}$ law inertial range in mesoscale two-dimensional turbulence // J. Atmos. Sci. 1979. V. 36. P. 1950–1954.
- Lily D.K. Stratified turbulence and the mesoscale variability of the atmosphere // Ibid. 1983. V. 40. P. 749–761.
- Nastrom G.D., Gage K.S. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft // Ibid. 1985. V. 42. P. 950–960.
- Smith K.S. Comments on «The k^{-3} and $k^{-5/3}$ energy spectrum of atmospheric turbulence: Quasigeostrophic two-level model simulation» // Ibid. 2004. V. 61. P. 937–942.
- Tung K.K., Orlando W.W. The k^{-3} and $k^{-5/3}$ energy spectrum of atmospheric turbulence: Quasigeostrophic two-level model simulation // Ibid. 2003. V. 60. P. 824–835.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск