

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ МАСШТАБОВ

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

THE INVESTIGATION OF ATMOSPHERIC TURBULENCE STRUCTURE OVER AN EXTENDED RANGE OF SCALES

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

В работе представлены результаты исследования связей между полями мелкомасштабной атмосферной турбулентности и синоптических неоднородностей температуры, полями скорости ветра и показателя преломления. В результате анализа данных наблюдений, полученных с помощью высотной метеорологической мачты (ВММ) Обнинска в слое 2–301 м в течение 2008 г., и данных акустической метеостанции (Большой солнечной вакуумный телескоп) обнаружены статистические закономерности поведения пульсаций скорости ветра и показателя преломления. Показано, что в широком диапазоне частот турбулентная энергия пульсаций не является постоянной величиной, а зависит от размера неоднородностей и энергетического состояния синоптических образований.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, пульсации скорости ветра и температуры воздуха

The results of investigations of relations between small-scale atmospheric turbulence and synoptic inhomogeneities of temperature, wind speed and refraction index are shown. Statistical regularities of wind speed pulsations, temperature pulsations, refraction index pulsations are obtained by using data taken from high-altitude meteorological mast (Obninsk) at altitudes between 2 and 301 m during 2008 and data taken from acoustic weather-station (Large Solar Vacuum Telescope). It is shown that turbulent energy of pulsations over an extended range of frequencies is not constant but the energy depends on inhomogeneity scale and energy state of synoptic structures.

Key words: atmospheric turbulence, pulsations of wind speed and air temperature

Постановка задачи

Исследования атмосферных течений охватывают большое количество неоднородностей различных масштабов: от масштабов вязкой диссипации, где энергия турбулентности переходит в тепло, до крупномасштабных вихрей и общей циркуляции атмосферы. Целью настоящей работы является рассмотрение мелкомасштабных пульсаций характеристик атмосферной турбулентности с точки зрения их обусловленности крупномасштабной вихревой турбулентностью, рассматриваемой как в широком диапазоне энергетического спектра, так и в отдельных его интервалах. При этом проблема заключается в том, с какой долей вероятности структурированы турбулентные неоднородности всех пространственных диапазонов внешним влиянием и как далеко сказывается это влияние на разных участках спектра. Решение этой проблемы связано с поиском физических закономерностей взаимодействия турбулентных атмосферных неоднородностей в разных пространственных диапазонах, что важно как для общей теории турбулентности, так и для ее приложений в физике и оптике атмосферы.

При регистрации оптического излучения Солнца с помощью инструментов наземного базирования эффекты оптической неустойчивости (атмосферной турбулентности) понижают разрешение получаемых изображений. Оптическая неустойчивость земной атмосферы, или набор пульсаций показателя преломления воздуха по лучу зрения в оптическом диапазоне длин волн, определяется в основном пульсациями температуры. В работе [García-Lorenzo et al., 2013] показано, что средняя скорость турбулентности, определенная во всем активном слое атмосферы, может коррелировать (до 80 %) со средней скоростью ветра на разных высотных уровнях атмосферы. Высокий уровень корреляций объясняется тем, что величина кинетической энергии течения отражает величину общей механической энергии всего слоя, в

том числе и доступной потенциальной энергии, и определяет величины пульсаций скорости ветра.

Спектры атмосферной турбулентности

Рабочая гипотеза, на которую опирается настоящее исследование, состоит в том, что энергетические свойства мелкомасштабной атмосферной турбулентности определяются энергией более крупных турбулентных неоднородностей. Для сравнения энергий ветровых турбулентных мелкомасштабных и крупных неоднородностей были исследованы энергетические спектры пульсаций скорости ветра в широком диапазоне масштабов. На рис. 1 показаны спектры пульсаций полного вектора скорости воздушного потока для высот 8 м (черная кривая), 121 м (точечная кривая), 301 м (темно-серая кривая).

Спектры рассчитаны по данным наблюдений на высотной метеорологической мачте (ВММ) Обнинска [<http://typhoon-tower.obninsk.org>] за 2008 г. Черной линией с кружками изображен классический спектр

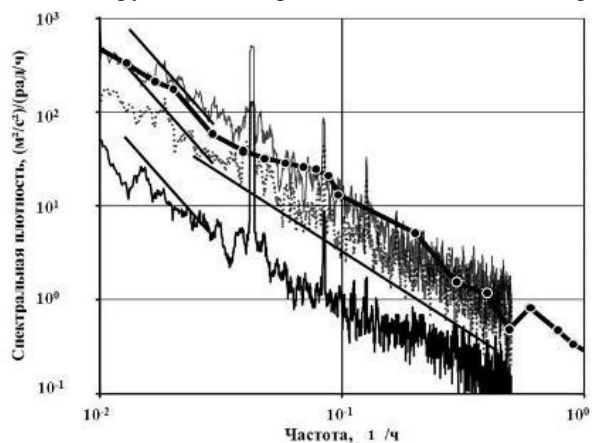


Рис. 1. Энергетические спектры пульсаций полного вектора скорости ветра для различных высот.

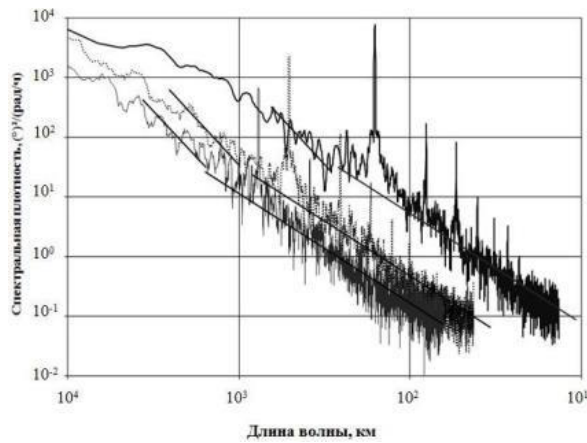


Рис. 2. Энергетические спектры пульсаций температуры для разных высот.

пульсаций горизонтальной компоненты скорости ветра Ван-дер-Ховена, полученный по данным 125-метровой метеорологической мачты в Брукхагене. Жирными прямыми линиями, отличающимися наклоном, обозначены степенные асимптоты «-3» и «-5/3» соответственно.

На рис. 2 показаны спектры пульсаций температуры, полученные за 2008 г. по данным ВММ для высот 2 м (черная кривая), 121 м (точечная кривая), 301 м (темно-серая кривая). Для того чтобы оценить пространственные масштабы явлений, мы приняли средние годовые значения скорости ветра 1.9, 5.9, 8.9 м/с для высот 8, 121, 301 м соответственно.

Зависимости величины спектральной плотности от частоты для представленных спектров аппроксимируются двумя участками: «-3» – в крупномасштабном диапазоне и «-5/3» – в мезомасштабном диапазоне. Ширина диапазона «-3» и степень деформаций неоднородностей в этом диапазоне зависят от высоты: с высотой этот диапазон расширяется и деформации уменьшаются. В приземном слое атмосферы для высоты 8 м за счет разрушения крупномасштабных неоднородностей диапазон «-3» сильно деформирован. В спектрах, характерных для высот 121 и 125 м, диапазон «-3» охватывает частоты от 0.03 до 0.02 ч⁻¹ (700–1000 км), выше приземного слоя для высоты 301 м низкочастотная граница участка «-3» сдвигается до 0.015 ч⁻¹ (2200 км). В свободной атмосфере, как показано, например, в [Nastrom, Gage, 1985], внешний масштаб этих неоднородностей соответствует 0.01 ч⁻¹ (3000÷4000 км), т. е. близок по продолжительности к естественному синоптическому периоду 5–7 сут, связанному с крупномасштабной перестройкой барического поля. На рис. 3 представлен спектр турбулентности, построенный по данным ультразвуковой метеостанции «Метео-2», осредненным за 5-минутный интервал, полученным на площадке Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) ИСЗФ СО РАН в марте 2010 г.

Представленный спектр пульсаций скорости ветра на высоте 5 м аппроксимируется двумя участками: «-5/3» в крупномасштабной и мелкомасштабной части спектра с резким переходом («-3») между ними (от 400 до 600 км). Максимальной энергией в представленном спектре обладают неоднородности размером порядка 1000 км (50–60 ч).

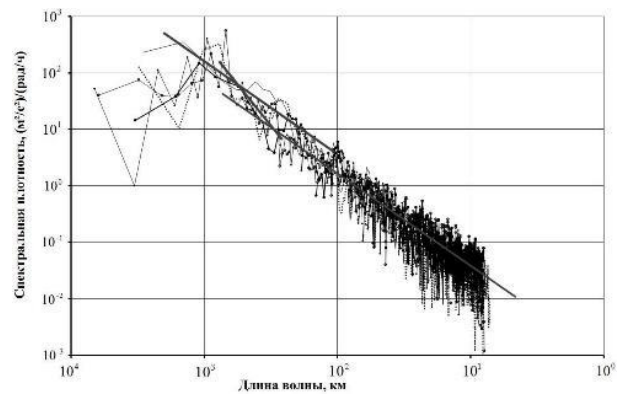


Рис. 3. Спектр атмосферной турбулентности, полученный на площадке БАО.

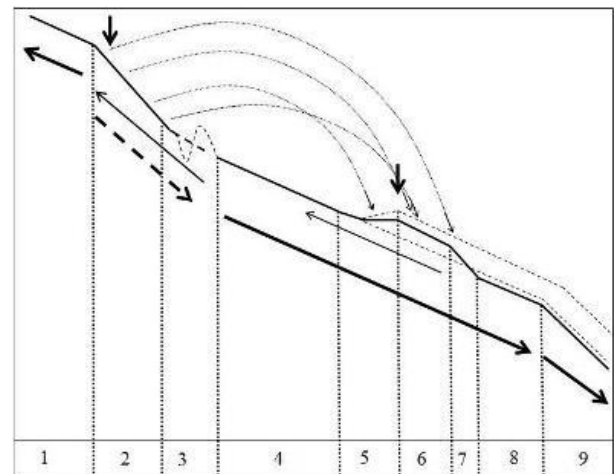


Рис. 4. Схематический композитный спектр атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов.

На рис. 4 схематически показан обобщенный композитный спектр атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов, построенный как по данным собственных измерений, так и по данным работ [Kovadlo et al., 2012; Ковadlo и др., 2012].

Диапазон 1 соответствует области наиболее крупномасштабной атмосферной турбулентности. Энергия неоднородностей этого диапазона поддерживается обратным каскадом энергии из диапазона 2. Турбулентные атмосферные неоднородности диапазона 2 являются основным источником энергии всего пространственного спектра атмосферной турбулентности. Энергия турбулентности в этом диапазоне генерируется за счет механизма бароклинной неустойчивости с образованием термобарических соленидов. Диапазон 3 является областью разрушения макротурбулентных вихрей, основная энергия которых запасена в форме энтропии. Диапазон 4 – область так называемой мезометеорологической ямы. Диапазон 5 соответствует области потери устойчивости основного воздушного потока. В диапазоне 6 форма спектра определяется квазиравновесием между поступлением энергии в спектр и потерей этой энергии на обратный каскад (например, на смешение турбулентности или на образование крупномасштабных градиентов). Диапазон 7 – область перехода турбулентности в потенциальную энергию за счет работы против сил плавучести. Диапазон 8 – инерционный интервал атмосферной

турбулентности. Диапазон 9 – диссипативный интервал.

Результаты

Диапазон синоптической турбулентности с показателем степени «-3» с высотой расширяется: на высоте 5÷8 м – от 0.03 до 0.025 ч⁻¹ (30÷40 ч), на высоте 121 м – от 0.03 до 0.02 ч⁻¹ (30÷50 ч), на высоте 301 м – от 0.03 до 0.015 ч⁻¹ (30÷70 ч), в свободной атмосфере – от 0.03 до 0.01 ч⁻¹ (30÷100 и более ч). Наши исследования показывают, что в атмосфере наиболее вероятный механизм обмена энергией между неоднородностями выглядит следующим образом. Мелкомасштабная турбулентность питается энергией, поступающей в результате каскадного дробления неоднородностей атмосферной турбулентности, и энергией, передающейся непосредственно от крупномасштабной турбулентности в микрометеорологический диапазон спектра, минуя промежуточные масштабы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю., Кочеткова О.С. Методика оценки оптической нестабильности земной атмосферы на основе численного анализа сетевых метеорологических данных // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2012. № 2. С. 139–149.

García-Lorenzo B., Eff-Darwich A., Fuensalida J.J., Castro-Almazan J.A. Estimation of adaptive optics parameters from wind speed: Results for the Teide Observatory // Proc. SPIE. 2013. V. 7476.

Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu., Kochetkova O.S. The investigation of spectrum shape of atmospheric inhomogeneities over an extended dynamic range // Proc. SPIE 8696. Eighteenth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2012.

Nastrom G.D., Gage K.S. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft // J. Atmos. Sci. 1985. V. 42. P. 950–960. <http://typhoon-tower.obninsk.org>.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия