



УДК 520.1

## Энергетическая структура оптической атмосферной турбулентности при различных параметрах воздушного потока

П. Г. Ковадло ([kovadlo2006@rambler.ru](mailto:kovadlo2006@rambler.ru))

А. Ю. Шиховцев ([artempochta2009@rambler.ru](mailto:artempochta2009@rambler.ru))

**Аннотация.** В работе показаны результаты исследований физико-статистических связей пульсаций метеорологических параметров в широком диапазоне масштабов. Анализ наблюдаемых данных температуры и скорости ветра в различных погодных условиях позволил получить частотные зависимости спектральной плотности энергии турбулентности и энергии турбулентности в условиях сильной и слабой турбулентности атмосферы. На основании полученных связей показано, что энергетические свойства характеристик мелкомасштабной (оптической) турбулентности определяются энергией набора всех крупномасштабных неоднородностей.

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

### Введение

Известно, что атмосферные течения – это суперпозиция течений различных пространственно-временных масштабов, которые имеют преимущественно турбулентный режим. Атмосферная турбулентность существенно ухудшает условия регистрации изображения и снижает разрешающую способность наземных астрономических телескопов. При этом качество астрономических наблюдений определяется оптической нестабильностью земной атмосферы, под которой понимается набор пульсаций показателя преломления воздуха по лучу зрения астрономического прибора. Искажения, вносимые турбулентной атмосферой в оптические изображения космических объектов, корректируются в реальном масштабе времени так называемыми адаптивными оптическими системами (АОС). Для оценки требуемых параметров АОС используют следующие характеристики оптической нестабильности земной атмосферы:

$$- \text{радиус когерентности атмосферы } r_0 = \left( 0,423k^2 \sec \alpha \int_0^H C_n^2(h) dh \right)^{-\frac{3}{5}},$$

где  $C_n^2$  – структурная характеристика пульсаций показателя преломления

воздуха,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число,  $\alpha$  – зенитный угол наблюдения,  $h$  – высота уровня,  $H$  – максимальная высота оптически активной атмосферы,  $\lambda$  – длина волны света [5]. Радиус когерентности соответствует виртуальному размеру неоднородности показателя преломления воздуха, которая оказывает влияние на параметры фронта световой волны и определяется интенсивностью атмосферной турбулентности по лучу зрения. Величина  $\int_0^H C_n^2(h)dh$  характеризует набор пульсаций показателя преломления воздуха  $n'(h)$  по лучу зрения;

$$- \text{ угол изопланатизма } \theta_0 = \left( 2,91k^2 \sec^3 \alpha \int_0^H C_n^2(h)h^5 dh \right)^{-\frac{3}{5}}, \text{ опреде-}$$

ляющий размер поля зрения, в котором может быть достигнуто дифракционное разрешение изображения [10], и

$$- \text{ время когерентности } \tau_0 = 0,057\lambda^{\frac{6}{5}} \left( \int_0^H C_n^2(h)V^{\frac{5}{3}}(h)dh \right)^{-\frac{3}{5}},$$

характеризующее временные вариации характеристик атмосферной турбулентности [10]. Анализ этих соотношений позволяет говорить о том, что величина оптической нестабильности воздуха определяется вертикальным распределением турбулентных неоднородностей показателя преломления и скорости ветра. Кроме того, представленные соотношения справедливы только в приближении модели трехмерной однородной и изотропной турбулентности, разработанной Колмогоровым. Стоит заметить, что для современных крупноапертурных телескопов такое приближение может быть не всегда оправдано. Так называемый внешний масштаб трехмерной однородной и изотропной турбулентности, который определяет наибольший размер неоднородности в потоке, может быть по величине сопоставим с диаметром телескопа. В связи с этим необходимо знать информацию о воздействии основного течения и крупных неоднородностей на формирование турбулентных пульсаций показателя преломления воздуха и скорости ветра в широком диапазоне масштабов. Например, в адаптивной оптике информация о трехмерном распределении мелкомасштабной турбулентности позволяет более эффективно корректировать изображения.

Проблема поиска физических закономерностей взаимодействия атмосферных неоднородностей в разных пространственных диапазонах важна как для общей теории турбулентности, так и для ее приложений в физике и оптике атмосферы. В частности, проблемы взаимодействия неоднородностей сводятся в том числе к вопросам выбора так называемых соотношений замыкания между статистическими моментами характеристик турбулентных течений. При этом важной стороной здесь является установление связи между характеристиками мелкомасштабной турбулентности и характери-

ками квазидвумерных образований, рассматриваемой как в широком диапазоне энергетического спектра, так и в отдельных его интервалах. Данные в различных архивах, составленные по сетевым наземным и радиозондовым наблюдениям, имеющие, как правило, дискретность 1–8 ч, дают возможность определять дисперсию турбулентных пульсаций или спектральные характеристики только за длительные промежутки времени. Такая информация не позволяет прямо оценивать характеристики мелкомасштабной турбулентности, поэтому требуется привлечь методы, основанные на определенных физических представлениях и количественных соотношениях.

Для определения характеристик мелкомасштабной атмосферной турбулентности по разработанной методике, представленной в работе [2], необходимо знать форму фонового спектра атмосферных неоднородностей в широком диапазоне масштабов. Под фоновым спектром атмосферных неоднородностей можно понимать характерную зависимость распределения энергии турбулентных неоднородностей по масштабам, справедливую для некоторых средних (климатических) условий. Зная характеристики колебаний крупномасштабных течений и форму зависимости энергии неоднородностей в широком диапазоне масштабов, можно оценить энергию мелкомасштабной турбулентности. При этом основным допущением в работе является то, что крупномасштабные неоднородности течения структурируют мелкомасштабную турбулентность определенным образом через величину потока энергии от самых крупных неоднородностей к мелкомасштабным турбулентным неоднородностям. Стоит заметить, что в отдельных диапазонах спектра при определенных внешних условиях передача энергии от мелкомасштабных турбулентных неоднородностей к крупным неоднородностям также возможна.

Спектр атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов деформируется в зависимости от свойств атмосферы и параметров крупномасштабных течений. При этом, например, структура течений в пограничном слое атмосферы отличается от структуры течений свободной атмосферы [8; 9]. К настоящему времени наиболее изучена трехмерная турбулентность в высокочастотной части, так называемой микрометеорологической области, менее исследованным является синоптический участок спектра. В промежуточном диапазоне – мезометеорологической области – физические основы и механизмы формирования формы спектра однозначно не определены.

Для сравнения энергии ветровых турбулентных пульсаций в мелкомасштабном пространственном диапазоне с энергией крупномасштабных неоднородностей были исследованы энергетические спектры пульсаций скорости ветра в широком диапазоне масштабов на разных высотах в пограничном слое атмосферы. На рисунке 1 показаны ненормированные спектры пульсаций полного вектора скорости воздушного потока на разных высотах, рассчитанные нами по данным высотной метеорологической мачты г. Обнинска (<http://typhoon-tower.obninsk.org>) за 2008 г. Пульсации полного вектора скорости ветра однозначно определяют кинетическую энергию атмосферной турбулентности, которая не зависит от выбора системы коорди-

нат. Средние годовые значения скорости ветра, используемые для оценки характерного пространственного масштаба неоднородностей, для высот 8, 121, 301 м соответственно равны: 1,9, 5,9, 8,9 м/с. При этом величина общей энергии неоднородностей для представленного спектра на высоте 8 м меньше энергии спектров, характерных для высот 121 и 301 м. Это должно быть учтено при построении спектральной картины трехмерных турбулентных течений. Для сравнения на рисунке изображен (жирной непрерывной линией с маркерами круглой формы) спектр пульсаций горизонтальной скорости ветра Ван дер Ховена, полученный по данным 125-метровой метеорологической мачты в Брукхавене [11]. Примечательно, что спектр Ван дер Ховена сопоставим по энергии и форме со спектром высотной метеорологической мачты на высоте 301 м. Это позволяет говорить о том, что форма спектра определяется средней кинетической энергией воздушного потока и в определенной степени квазиуниверсальна при данных условиях. Таким образом, форма фонового спектра турбулентности прямым образом не зависит от высоты, а зависит от величины средней скорости ветра. И на данном высотном уровне при определенной величине средней скорости ветра можно говорить, что форма фонового спектра будет аналогична форме спектра другого высотного уровня при тех же параметрах воздушного потока.

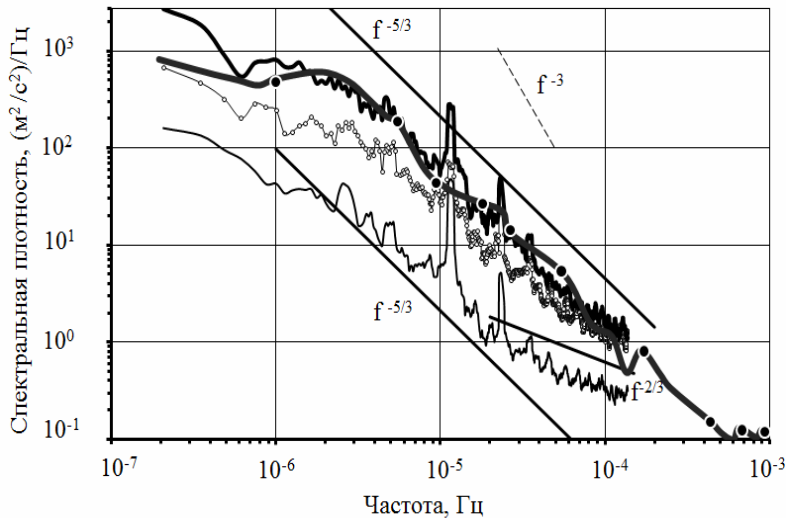


Рис. 1. Энергетические спектры пульсаций скорости ветра для различных высот, обозначенные: непрерывной кривой – на 8 м, тонкой кривой с круглыми маркерами – на 121 м, жирной непрерывной линией с маркерами круглой формы – на 125 м, непрерывной жирной кривой – на 301 м. Прямыми линиями обозначены степенные асимптоты  $f^{-\frac{5}{3}}$  и  $f^{-\frac{2}{3}}$ , пунктирной прямой –  $f^{-3}$

Рассмотрение пульсаций скорости ветра в части взаимной обусловленности неоднородностей, лежащих в одном пространственном диапазоне с неоднородностями большего и меньшего пространственного масштаба, позволяет выделить несколько основных интервалов. В приземном слое атмосферы на высоте 8 м за счет деформаций крупномасштабных неоднородностей частотная зависимость спектральной плотности энергии  $S(f) \sim f^{-3}$  не проявляется. Фактически форму этого спектра можно аппроксимировать зависимостью  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$  в широком диапазоне масштабов: от  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Гц (120 ч) до  $3,1 \cdot 10^{-5}$  Гц (9 ч). Используя гипотезу «замороженной» турбулентности, при средней скорости ветра  $\bar{V} = 1,9$  м/с, пространственные масштабы этого диапазона соответственно лежат в пределах от 830 до 60 км. В высокочастотной части спектральная плотность удельной энергии пульсаций скорости убывает пропорционально частоте в степени « $-2/3$ ». Увеличение удельной спектральной энергии в этом диапазоне связано с процессами дробления крупномасштабных неоднородностей и процессами конвекции.

На высотах 121, 125 м зависимость  $S(f) \sim f^{-3}$  начинает проявляться в интервале частот от  $5,5 \cdot 10^{-6}$  Гц (50 ч) до  $8,3 \cdot 10^{-6}$  Гц (33 ч), что соответствует пространственным масштабам при средней скорости ветра  $\bar{V} = 5,9$  м/с от 1050 до 700 км. В высокочастотном диапазоне форма спектра отклоняется от  $f^{-\frac{5}{3}}$  также в сторону увеличения энергии пульсаций. Это говорит о том, что конвективная составляющая слабее проявляется при этой скорости ветра ( $\bar{V} = 5,9$  м/с) по сравнению с уровнем 8 м, где  $\bar{V} = 1,9$  м/с.

На высоте 301 м зависимость  $S(f) \sim f^{-3}$  охватывает тот же частотный диапазон (до 1500 км при  $\bar{V} = 8,5$  м/с). В высокочастотной части спектр в широком диапазоне масштабов описывается зависимостью  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$ . Это говорит о том, что приток энергии за счет конвекции на этих масштабах по величине значительно меньше, чем на нижних уровнях.

Таким образом, на основании исследований формы спектра можно сделать следующие выводы. При средней скорости течения  $\bar{V} > 8$  м/с форма спектра в диапазоне от 2 ч до 7 суток остается неизменной и ее можно аппроксимировать степенной зависимостью, близкой к  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$ . При средней скорости ветра около 2 м/с на высотах выше 8 м в диапазоне от 9 ч до 7 суток форма спектра также может быть аппроксимирована степенной зависимостью  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$ .

Для объяснения деталей формы представленного фонового спектра и понимания физических механизмов взаимодействия неоднородностей разных масштабов в течении были рассмотрены структурные функции третьего порядка. Анализ структурных функций третьего порядка позволяет составить представления о действии источников и стоков турбулентной энергии в широком диапазоне масштабов неоднородностей. По знаку структурной функции третьего порядка  $D_{VVV}$  возможно определить преобладающее направление передачи энергии по спектру. Отрицательные величины  $D_{VVV}$  показывают, что преобладает передача энергии от крупных неоднородностей к неоднородностям меньших масштабов, положительные значения  $D_{VVV}$  показывают, что преобладает передача энергии от мелкомасштабных неоднородностей к крупным неоднородностям

На рисунке 2 показаны структурные функции третьего порядка пульсаций скорости ветра. Структурные функции третьего порядка пульсаций скорости ветра, полученные по осредненным данным за 24-часовой промежуток времени, показаны на рис. 3. При осреднении отфильтрованы те течения, временной масштаб которых оказался меньше интервала осреднения, равного 24 ч. Структурные функции рассчитаны по данным высотной метеорологической мачты г. Обнинска (<http://typhoon-tower.obninsk.org>) в диапазоне от 1 ч до 7 суток (естественный синоптический период) за полный 2008 г.

На рисунках 2 и 3 по оси абсцисс отложены значения временных интервалов, по оси ординат – значения структурных функций третьего порядка (для высот 121, 301 м – слева, для 8 м – справа). Анализируя рис. 2 и 3, можно видеть, что на высотах от 8 до 121 м  $D_{VVV}$  для временных интервалов более 100 ч преимущественно по величине меньше, чем  $D_{VVV}$  на 301 м, на порядок и более. Это связано с тем, что энергия крупномасштабных неоднородностей на высоте 301 м значительно выше энергии тех же неоднородностей на высотах 8 и 121 м. Представленная на рис. 3  $D_{VVV}$  для высоты 301 м имеет четыре основных участка: от 170 до 100 ч, где  $D_{VVV}$  по величине  $>0$ ; от 100 до 30 ч, где  $D_{VVV}$  по величине  $<0$ ; от 30 до 4 ч, где  $D_{VVV}$  по величине  $>0$ ; и высокочастотный мезометеорологический участок (от 4 ч и менее), где пульсации скорости малы по величине, а  $D_{VVV}$  отрицательна и мало изменяется.

В диапазоне от 170 до 100 ч энергия в спектр поступает и распределяется в основном по неоднородностям меньших масштабов. При этом вероятно, что положительные значения  $D_{VVV}$  обусловлены тем, что вихревые воздушные потоки преимущественно конвергируют. При этом энергия в том числе передается общему потоку (к крупномасштабным неоднородностям).

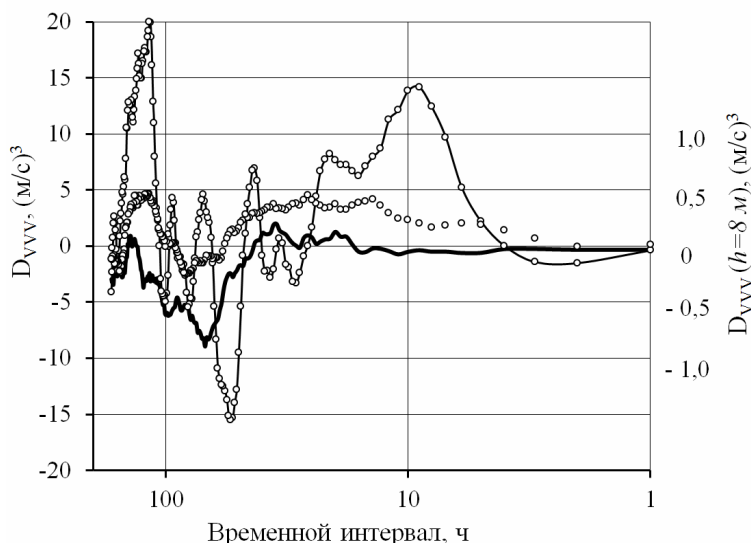


Рис. 2. Структурные функции третьего порядка пульсаций скорости ветра на разных высотах обозначены: жирной непрерывной линией – на 8 м, маркерами круглой формы – на 121 м, непрерывной линией с маркерами круглой формы – на 301 м

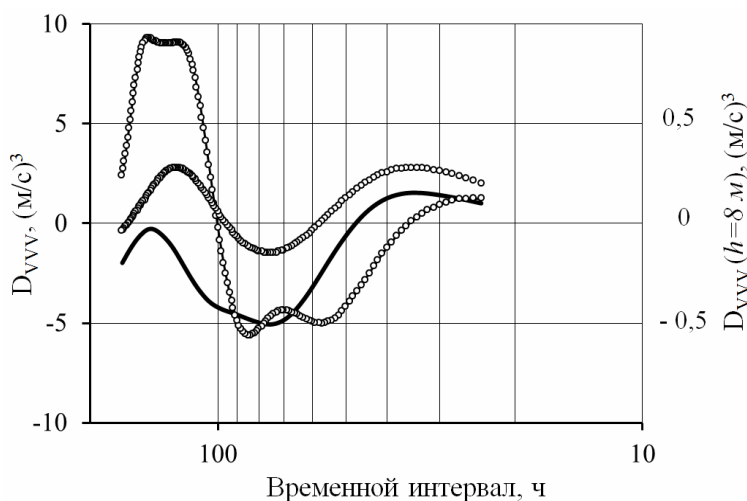


Рис. 3. Структурные функции третьего порядка, полученные по осредненным данным за 24-часовой промежуток времени, обозначены: жирной непрерывной линией – на 8 м, маркерами круглой формы – на 121 м, непрерывной линией с маркерами круглой формы – на 301 м

В диапазоне от 100 до 36 ч форма спектра определяется передачей энергии от крупных неоднородностей к мелким неоднородностям. В диапазоне от 36 до 4 ч кривая  $D_{VVV}$  определяется внутрисуточными и кратными суточным колебаниями значений скорости ветра. В высокочастотном мезо-

метеорологическом участке отрицательный знак  $D_{VV}$  показывает, что форма спектра турбулентности определяется передачей энергии к мелкомасштабным неоднородностям. На высотах 8 и 121 м процессы передачи энергии подобны процессам передачи энергии на высоте 301 м. Отрицательные значения  $D_{VV}$  на уровне 8 м в крупномасштабном диапазоне отражают то, что энергия крупномасштабных вихревых неоднородностей незначительна.

### Мелкомасштабная (оптическая) турбулентность в общем спектре атмосферных течений

Для методики оценки характеристик мелкомасштабной турбулентности (в том числе характеристик оптической неустойчивости), представленной в работе [2], целесообразно рассмотреть форму спектра атмосферных неоднородностей в широком диапазоне масштабов. Спектр целесообразно рассматривать от крупномасштабных квазидвумерных неоднородностей до масштабов оптической турбулентности. Одним из вопросов является зависимость энергии мелкомасштабной турбулентности от общего уровня энергии спектра и энергии крупномасштабных неоднородностей. При этом малоисследованным спектральным диапазоном атмосферных неоднородностей является переходная область от мезомасштабных неоднородностей к трехмерной турбулентности ( $10^{-3}$  Гц  $< f < 10^{-2}$  Гц). По результатам исследований [3; 4; 6; 7; 11; 12] были оцифрованы и построены спектры атмосферных неоднородностей в широком диапазоне масштабов (рис. 4). Спектры представлены в билогарифмических координатах: по оси абсцисс отложены частоты, по оси ординат – значения спектральной плотности пульсаций скорости ветра. Спектры получены для разных высот: спектр [12] – для свободной атмосферы, остальные спектры [3; 4; 6; 7; 11] – для приземного слоя.

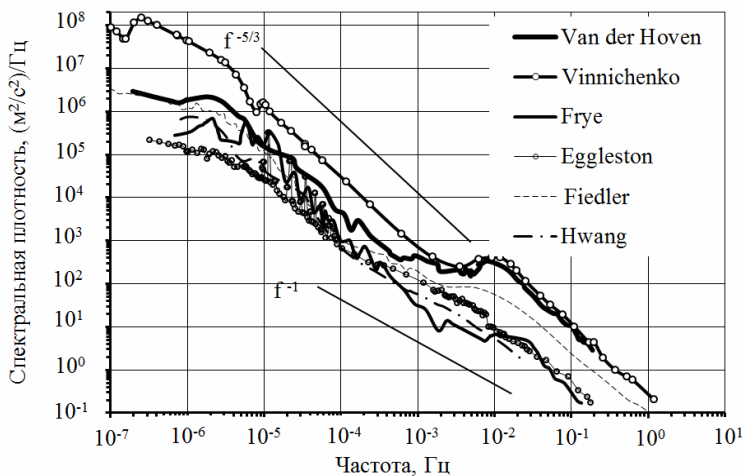


Рис. 4. Энергетические спектры атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов



Анализируя рис. 4, можно говорить о том, что форма энергетических спектров мало отличается в зависимости от условий общей турбулизации атмосферы. Однако при сильной турбулизации воздушных течений в мелкомасштабной области спектра наблюдается резкое увеличение энергии турбулентности (верхние кривые на рис. 4). Фактически подобная форма зависимости отмечается при значениях турбулентной энергии при  $f = 2,3 \cdot 10^{-6}$  Гц (5 дней) более  $2 \frac{M^2}{c^2}$ . При слабой турбулизации течений

спектр можно аппроксимировать зависимостью  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$  в широком диапазоне масштабов. Таким образом, наглядно можно видеть, что энергия крупномасштабных неоднородностей определяет энергию мелкомасштабной атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов. В свободной атмосфере наличие микрометеорологического максимума в спектре необходимо исследовать.

### **Спектр мелкомасштабной турбулентности в свободной атмосфере**

Структура течений в свободной атмосфере отличается от структуры течений в пограничном слое. Несмотря на то что течения свободной атмосферы обладают большей кинетической энергией, чем течения пограничного слоя, энергия мелкомасштабных турбулентных неоднородностей много меньше, чем в пограничном слое. В свободной атмосфере при ясном небе форма спектра в микрометеорологической области отличается от формы, описываемой зависимостью  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$ . На рисунке 5 представлены спектры неоднородностей скорости ветра, полученные по радиозондовым ветровым данным для различных сезонов для станции Братск за 2008 г. Полученный спектр для зимнего периода показан кривой с круглыми маркерами, непрерывной линией показан спектр для летнего периода. Слева по оси ординат отложены значения спектральной плотности энергии для зимнего периода, справа – для летнего периода.

Спектры атмосферной турбулентности как для летнего периода, так и для зимнего описываются аналогичным образом. В диапазоне от 120 до 330 с (600 – 1600 м) спектры имеют зависимость  $S(f) \sim f^{-3}$ . В этом случае мелкомасштабная турбулентность в свободной атмосфере подавлена. В диапазонах более 330 и менее 120 с спектры описываются зависимостью  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$ . Полученный результат важен для модельных расчетов параметров оптической нестабильности [2].

Зная форму фонового спектра, рассчитанную по архивным данным за год или большей продолжительности с 3-часовой дискретностью, принятой на сети станций, можно оценивать величины относительной дисперсии пульсаций за часовой интервал, например, в течение отдельного сезона или

среднюю за часовой интервал дисперсию за год и т. д. Поскольку спектр в мелкомасштабном диапазоне хорошо изучен, то аналогичным методом можно оценивать относительную дисперсию за более короткие промежутки времени, в том числе до секунд и менее. Если спектральная плотность энергии характеризует неоднородности конкретных масштабов, то дисперсия пульсаций является величиной интегральной, отражающей энергию заданного диапазона неоднородностей. В оптике атмосферы эта величина характеризует весь набор aberrаций оптических изображений.

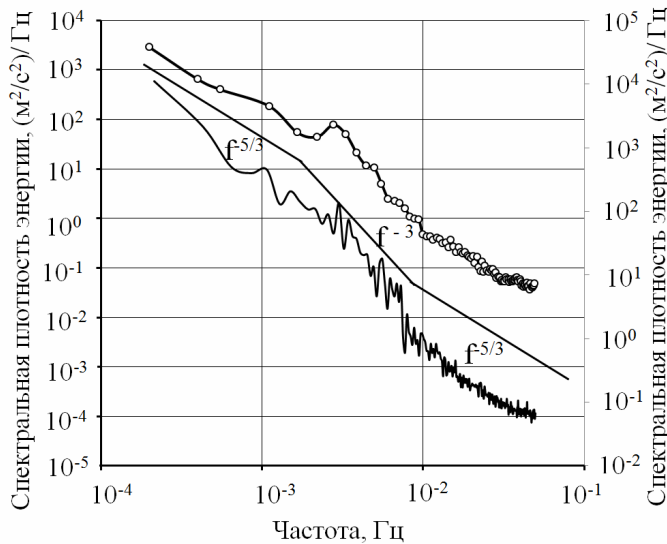


Рис. 5. Энергетические спектры пульсаций скорости ветра, полученные по радиозондовым ветровым данным для холодного и теплого сезонов для станции Братск за 2008 г.

Для сравнения характеристик атмосферных неоднородностей различных масштабов рассмотрим удельную энергию турбулентности (дисперсию). На рисунке 6, *a* показаны результаты оценки вариаций удельной турбулентной энергии в слое от 8 до 301 м, характеризуемой дисперсией пульсаций скорости ветра  $\sigma_v^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2$  различных временных интервалов, где  $v_i$  – «мгновенная» скорость ветра,  $\bar{v}$  – средняя скорость ветра за рассматриваемый период,  $n$  – количество отсчетов.

Для определения величины турбулентной энергии использованы те же данные, приведенные выше за полный 2008 г. (ВММ, Обнинск). Исследование динамики пульсаций полного вектора скорости ветра для различных временных масштабов атмосферных неоднородностей выполнялось для каждой выборки продолжительностью 100 ч в течение года. Для полноты описания структуры атмосферной турбулентности необходимо учитывать потенциальную энергию турбулентности, оцениваемую по неоднородностям

температуры воздуха. Например, неоднородности температуры всего слоя атмосферы до высоты 1500 км и по горизонтали вызывают так называемый термический ветер, за счет неоднородностей температуры по вертикальной координате на объемы воздуха воздействует сила Архимеда, которая либо подавляет, либо усиливает атмосферную турбулентность. Динамика пульсаций температуры представлена изменением дисперсии пульсаций температуры, характерных для различных временных масштабов неоднородностей за 100-часовые периоды. На рисунке 6, б показаны изменения удельной потенциальной энергии турбулентности  $\sigma_t^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2$  различных временных масштабов (от 1 до 100 ч с шагом 1 ч) за 100-часовые интервалы в слое от 2 до 301 м.

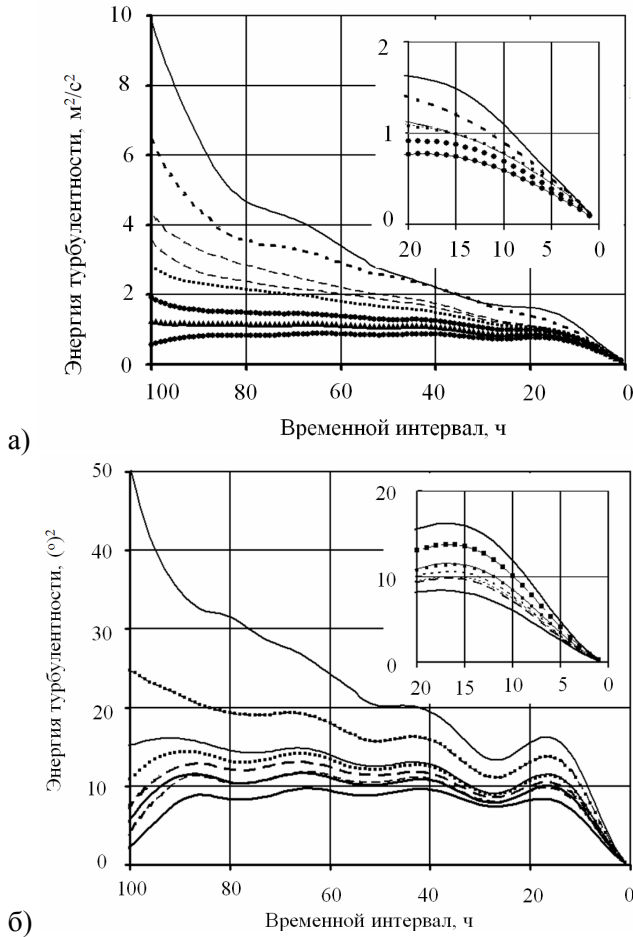


Рис. 6: а – удельная кинетическая энергия турбулентности различных временных масштабов за 100-часовые интервалы времени; б – удельная потенциальная энергия турбулентности различных временных масштабов за 100-часовые интервалы времени

Следует отметить, что как для пульсаций температуры, так и для пульсаций скорости ветра насыщение дисперсии происходит на одних и тех же интервалах времени, в конкретном случае в диапазоне от 15 до 20 ч. На рисунке 7, а, б интервалы насыщения дисперсии показаны на врезках. Кроме того, анализ показывает, что в условиях сильной и слабой атмосферной возмущенности атмосферные неоднородности структурированы по интенсивности.

## Результаты

Результаты можно сформулировать следующим образом. Анализ временной изменчивости энергетических свойств атмосферной турбулентности показывает, что для фоновых (климатических) условий существует определенная зависимость между характеристиками крупномасштабных неоднородностей и характеристиками мелкомасштабной турбулентности. Это указывает на то, что генерация неоднородностей мелких масштабов непосредственно зависит как от гидродинамических параметров более крупных неоднородностей, так и от интенсивности процессов их взаимодействия.

Показано, что спектр неоднородностей течений свободной атмосферы может значительно отличаться от спектра неоднородностей, полученного для пограничного слоя. Отличия прежде всего могут иметь место в уровне энергии мелкомасштабной турбулентности, который на несколько порядков ниже уровня энергии неоднородностей пограничного слоя. Энергия неоднородностей микрометеорологической области спектра зависит как от высоты над подстилающей поверхностью, так и от энергетических и структурных свойств основного потока. В низкочастотной области спектр может аппроксимироваться либо зависимостью  $S(f) \sim f^{-3}$  в развитых течениях, либо зависимостью  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$  для низкоэнергичных течений.

Процесс дробления неоднородностей, исследованный в широком диапазоне масштабов, указывает на несколько особых участков обмена энергией между неоднородностями разных масштабов. Наиболее исследован высокочастотный диапазон неоднородностей с периодами от долей секунды до десятков минут, называемый микрометеорологическим диапазоном, с максимумом энергии, приходящимся на 1–1,5 мин. Этот диапазон охватывает турбулентность, описываемую моделью Колмогорова, физический смысл которой состоит в каскадной передаче энергии от крупных неоднородностей к мелким без обмена с окружающей средой. При такой передаче энергии турбулентность в этом диапазоне должна удовлетворять условиям однородности и изотропности. Спектр трехмерной однородной и изотропной турбулентности удовлетворяет зависимости спектральной плотности энергии от частоты  $f^{-\frac{5}{3}}$ . Этот диапазон является наиболее изученным как в приземном слое атмосферы, так и в пограничном слое. В зависимости от условий устойчивости выявлены отклонения от этого закона. Особый интерес этот

диапазон представляет для атмосферной оптики. Существующая модель Колмогорова вносит существенный вклад в теорию переноса электромагнитного излучения в атмосфере.

Исследования неоднородностей показывают, что в более низкочастотной области, а именно в диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  Гц, процесс дробления неоднородностей описывается такой же асимптотикой, что и высокочастотный диапазон, хотя структура и геометрия неоднородностей существенно отличается и является квазидвумерной. Условия дробления неоднородностей существенно отличаются, поскольку они являются квазидвумерными.

Атмосфера в этом диапазоне представляет собой слоистую среду. Обмен между слоями осуществляется посредством сдвиговых явлений между слоями, вертикальный масштаб которых в десятки и сотни раз меньше горизонтальных размеров. Общей теории дробления неоднородностей и обмена энергией в настоящее время не создано. Это является следствием слабого понимания процессов, происходящих в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  Гц, и процессов формирования мезомасштабного диапазона. Результаты экспериментальных исследований в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  Гц не показывают устойчивой формы. Можно лишь отметить, что при низкой энергетике атмосферных процессов (при максимальной дисперсии крупномасштабных неоднородностей скорости ветра меньше  $2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ) переходная зона и высокочастотный диапазон энергетически слабо проявляют себя. Спектр при таких условиях асимптотически приближается к зависимости  $S(f) \sim f^{-\frac{5}{3}}$  во всем диапазоне.

Полученные статистические зависимости могут быть использованы для оценки мелкомасштабных характеристик турбулентности дифференцированно по степени возмущенности атмосферы. Это подтверждается высокими коэффициентами корреляции от 0,7–0,9 и выше [1], осредненных за длительный период результатов наблюдения качества телескопических изображений удаленных источников света и параметров атмосферы.

#### Список литературы

1. Ковадло П. Г. Исследование крупномасштабных астроклиматических характеристик / П. Г. Ковадло, О. С. Кочеткова, А. Ю. Шиховцев // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2010. – Т. 3, № 2 – С. 88–96.
2. Ковадло П. Г. Методика оценки оптической нестабильности земной атмосферы на основе численного анализа сетевых метеорологических данных / П. Г. Ковадло, А. Ю. Шиховцев, О. С. Кочеткова // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 139–149.
3. Eggleston E. D. Wind speed power spectrum analysis for Bushland, Texas, USA / E. D. Eggleston, R. N. Clark // Wind engineering. – 2000. – Vol. 24, N 1. – P. 49–52.
4. Fiedler F. The variance spectrum of the horizontal wind velocity at 50 m above the ground // Beiträge zur Physik der Atmosphäre. – 1971. – P. 187–200.
5. Fried D. L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion // J. of the optical society of America. – 1965. – Vol. 55, N 11. – P. 1427–1435.
6. Frye D. E. Note on the kinetic energy spectrum of coastal winds / D. E. Frye, S. Pond, W. P. Elliott // Monthly Weather Review. – 1972. – Vol. 100, N 9. – P. 671–673.

7. Hwang H. J. Power density spectrum of surface wind speed on Palmyra Island // Monthly Weather Review. – 1970. – Vol. 98, N 1. – P. 70–74.
8. Nastrom G. D. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft / G. D. Nastrom, K. S. Gage // J. Atmos. Sci. – 1985. – Vol. 42. – P. 950–960.
9. Petersen E. L. On the kinetic energy spectrum of atmospheric motions in the planetary boundary layer // RisØ Report. – 1975. – P. 1–103.
10. Roddier F. Atmospheric limitations to adaptive image compensation // ASP Conference series. – 2002. – Vol. 266. – P. 546–561.
11. Van der Hoven I. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour // J. of meteorology. – 1956. – Vol. 14. – P. 160–164.
12. Vinnichenko N. K. The kinetic energy spectrum in the free atmosphere – 1 second to 5 years // Tellus XXII. – 1970. – Vol. 2. – P. 158–166.

## Energy Structure of the Optical Atmospheric Turbulence for Various Parameters of the Mean Flow

P. G. Kovadlo, A. Yu. Shikhovtsev

**Abstract.** This paper shows the results from investigating physical and statistical relationships of meteorological parameters pulsations over wide range of scales. Analysis of observed data of temperature and wind speed in different weather conditions allowed to obtain the frequency dependence of the spectral density of the turbulence energy / energy of turbulence for strong and weak turbulence in the atmosphere. It is shown that energy properties of characteristics of small-scale (optical) turbulence depends on large-scale irregularities energy.

**Keywords:** atmospheric turbulence, optical turbulence, wind speed pulsations and air temperature pulsations.

*Ковадло Павел Гаврилович*  
доктор физико-математических наук  
профессор  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск ул. К. Маркса, 1  
тел.: 89646583999

*Kovadlo Pavel Gavrilovich*  
Doctor of Sciences (Physics and  
Mathematics), Professor  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: 89646583999

*Шиховцев Артем Юрьевич*  
аспирант  
Институт солнечно-земной физики  
СО РАН  
664033, г. Иркутск ул. Лермонтова, 126а  
тел.: (3952) 56–45–78

*Shikhovtsev Artem Yurevich*  
Postgraduate  
Institute of Solar-Terrestrial Physics  
SB RAS  
126 a, Lermontova st. , Irkutsk, 664033  
tel.: (3952) 56–45–78