

## ТУРБУЛЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 551.501.08

А.Л. Афанасьев, В.А. Банах, А.П. Ростов

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТАТИСТИКА МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАССИВА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 28.12.98 г.

Принята к печати 7.06.99 г.

С целью исследования детальной структуры турбулентности нижних слоев атмосферы проведена серия экспериментов с использованием двенадцати автоматических акустических измерителей, управляемых с помощью персонального компьютера. В процессе автоматизированных измерений осуществлялось накопление данных при различных схемах пространственного расположения датчиков в горизонтальной и в вертикальной плоскостях. На основе полученной экспериментальной информации рассмотрены некоторые пространственно-временные статистические характеристики ветровых и температурных полей и их зависимость от высоты измерений и термической стратификации приземного слоя.

#### Введение

Приземный слой атмосферы, простирающийся на несколько десятков метров от земной поверхности, может служить примером турбулентного сдвигового течения, характеристики которого, включая влияние стратификации атмосферы на динамику турбулентности, изучались наиболее интенсивно [1, 2]. Тем не менее имеется ряд нерешенных проблем, в значительной степени обусловленных недостатком соответствующих экспериментальных данных. Это связано в первую очередь с тем, что до недавнего времени основным измерительным инструментом при экспериментальном исследовании атмосферной турбулентности являлись вертушечные анемометры и ртутные термометры. Как известно, данные стандартные метеорологические приборы обладают значительными погрешностями измерений, обусловленными инерционностью и влиянием солнечной радиации.

В последнее время в практике атмосферных экспериментальных исследований начали применяться акустические измерители скорости ветра и температуры [3]. С помощью данных приборов удастся существенно повысить точность и оперативность измерений, что имеет решающее значение для выявления тонких эффектов в структуре турбулентных полей.

В экспериментальных исследованиях статистических характеристик турбулентности наиболее распространенными являются измерения временных рядов пульсаций скорости и температуры. Обычно для преобразования измеренных временных реализаций в «пространственные» используют гипотезу Тейлора. Такой подход предполагает, что течение в пограничном слое является стационарным и горизонтально однородным. Как известно, степень достоверности получаемых пространственных характеристик при этом определяется тем, насколько точно выполняются условия стационарности и однородности для измеряемых полей скорости и температуры. Однако в реальной атмосфере такие условия реализуются достаточно редко [1]. Поэтому прямые экспериментальные данные о пространственной структуре ветровых и температурных полей, полученные с

помощью многоточечных пульсационных измерений малоинерционными приборами, представляют большой интерес как для проверки и обоснования различных теоретических положений и моделирования турбулентности, так и для целого ряда конкретных практических задач.

В целях изучения пространственно-временной структуры атмосферной турбулентности был создан комплекс аппаратуры, содержащий массив ультразвуковых измерителей скорости и температуры, размещенных в приземном слое атмосферы, в различных пространственных конфигурациях с помощью системы мачт. Массив содержал 12 идентичных ультразвуковых однокомпонентных датчиков скорости и температуры. Это позволило наряду с временными (частотными) получать и пространственные статистические характеристики ветровых и температурных полей без использования гипотезы «замороженности».

Совместно с однокомпонентными датчиками была использована акустическая метеостанция [4], синхронно измеряющая три компонента скорости и температуру. В литературе авторам не встречались упоминания аналогичных примеров одновременного использования большого количества акустических датчиков при проведении измерений в атмосфере. Возможно, это объясняется повышенной технической сложностью и относительно высокой стоимостью таких приборов. Целью данной публикации является демонстрация возможностей созданного ультразвукового комплекса для исследования пространственно-временной структуры турбулентности путем проведения длительных автоматизированных высокоточных малоинерционных синхронных многоточечных пространственных измерений пульсаций скорости ветра и температуры в приземном слое. В качестве результатов рассмотрены примеры некоторых статистических характеристик турбулентности приземного слоя, измеренные с помощью данной установки.

#### Эксперимент

Во время проведения экспериментов применялись две основные схемы пространственного размещения датчиков.

Датчики располагались либо все 12 в одну линию, либо по четыре на трех взаимно перпендикулярных осях, на расстоянии 1 м друг от друга. Акустическая метеостанция обычно располагалась на уровне нижнего датчика на расстоянии 1 м с наветренной стороны. Измерения пульсаций одной компоненты скорости (в зависимости от ориентации датчиков на осях) и температуры производились всеми 12 датчиками синхронно с работой метеостанции, которая измеряла три компоненты скорости и температуру, а также средние значения давления и влажности воздуха. Таким образом, каждая измерительная серия представляла собой одновременную запись 28 реализаций процессов. Считывание информации с датчиков производилось с частотой 4 Гц. Длина реализаций составляла 4096 точек. Более подробно схема эксперимента и весь комплекс измерительной аппаратуры описаны в [5].

Данные измерений записывались на жесткий диск компьютера с одновременной частичной обработкой в реальном времени. Усреднение проводилось по всей длине реализации, что составляло примерно 17 мин. Впоследствии записанные данные были подвергнуты более детальному анализу и статистической обработке. Было проанализировано 50 серий измерений. Для каждой серии рассчитывались следующие статистические характеристики: для скорости ветра и температуры вычислялись средние значения, дисперсии, асимметрии и эксцессы, автоспектры, автокорреляционные функции в точке размещения каждого из датчиков, а также взаимные корреляционные функции, спектры когерентности и спектры фазы для датчиков, расположенных на расстоянии 1–11 м друг от друга. Кроме того, по данным ультразвуковой метеостанции вычислялись односточные моменты для трех компонент скорости ветра и температуры, вертикальные турбулентные потоки количества движения  $\tau = \langle u'w' \rangle$  и тепла  $H = \langle t'w' \rangle$ , а также масштаб скорости (скорость трения)  $u^* = \sqrt{-\langle u'w' \rangle}$ , масштаб температуры  $T^* = -\langle t'w' \rangle / u^*$ , масштаб Обухова  $L = -\langle T \rangle (u^*)^2 / (0,4 g T^*)$ , где  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  и  $t'$  – пульсации продольной, поперечной, вертикальной компонент скорости и температуры;  $\langle T \rangle$  – среднее значение абсолютной температуры;  $g$  – ускорение свободного падения.

Таким образом, в каждой серии измерений была получена весьма обширная и многообразная информация о статистических свойствах пространственно-временной

структуры температурно-ветровых полей приземного слоя атмосферы. К сожалению, в рамках одной статьи сложно проанализировать весь комплекс измеряемых и вычисляемых параметров и их взаимозависимости. Ниже мы остановимся только на некоторых статистических характеристиках и их поведении в зависимости от условий стратификации по данным наших измерений.

### Спектральные характеристики

Спектры скорости в приземном слое атмосферы отражают анизотропность турбулентных пульсаций, вызванную близостью твердой границы. По мере перехода к более мелким масштабам при стратификации, близкой к безразличной или устойчивой, влияние границы постепенно уменьшается, пульсации становятся более изотропными и спектры компонент скорости достигают равновесного интервала. Это явление хорошо известно и подтверждается многочисленными опубликованными экспериментальными данными. Причем низкочастотная граница, начиная с которой наблюдается универсальное поведение спектров, различна для разных компонент скорости и температуры. Она определяется соответствующими масштабами неоднородностей и зависит от ряда факторов, в частности от высоты точки наблюдения и метеорологической ситуации.

На рис. 1–3 представлены примеры частотных спектров для продольной, поперечной и вертикальной компонент скорости (а) и синхронно измеренные спектры температуры (б). На каждом из рисунков приведены по четыре спектральных кривых, соответствующих четырем датчикам ( $d0 - d3$ ), пространственно отстоящим на 1 м друг от друга. Небольшие отличия между спектрами на каждом рисунке обусловлены пространственной изменчивостью турбулентных пульсаций на этой базе. Для горизонтальных компонент скорости (продольной и поперечной) согласие между измеренными спектрами и законом « $-5/3$ » является довольно хорошим.

Для вертикальной скорости в высокочастотной области спектра содержится больше энергии по сравнению с теоретической зависимостью. Возможной причиной этого является генерация турбулентности сдвигом ветра, который не учитывается в рамках изотропной модели колмогоровской турбулентности.

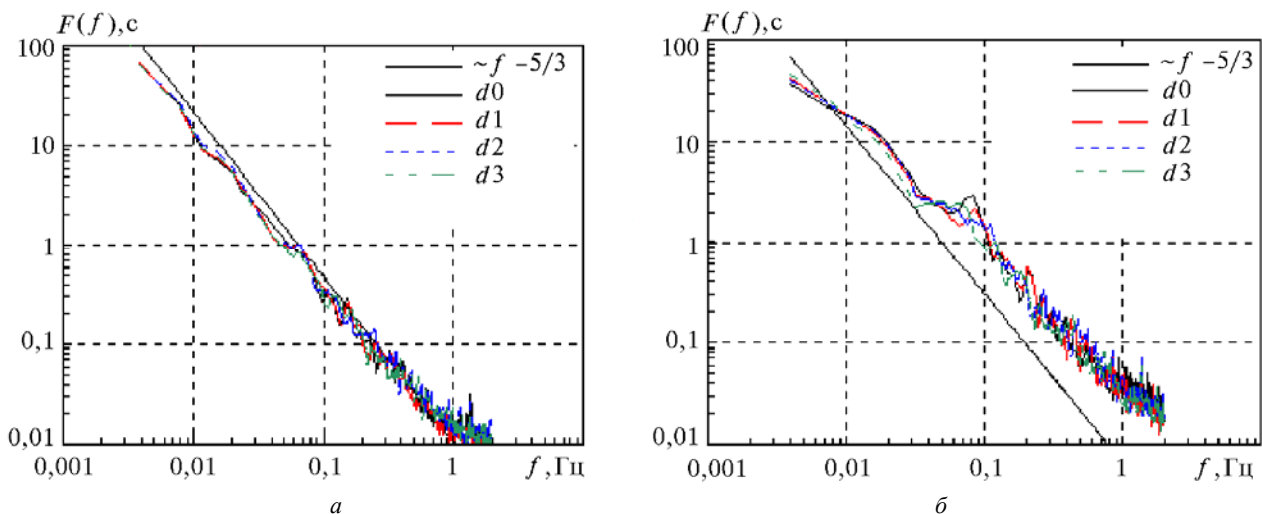


Рис. 1. Частотные спектры для продольной компоненты скорости (а) и для температуры (б)

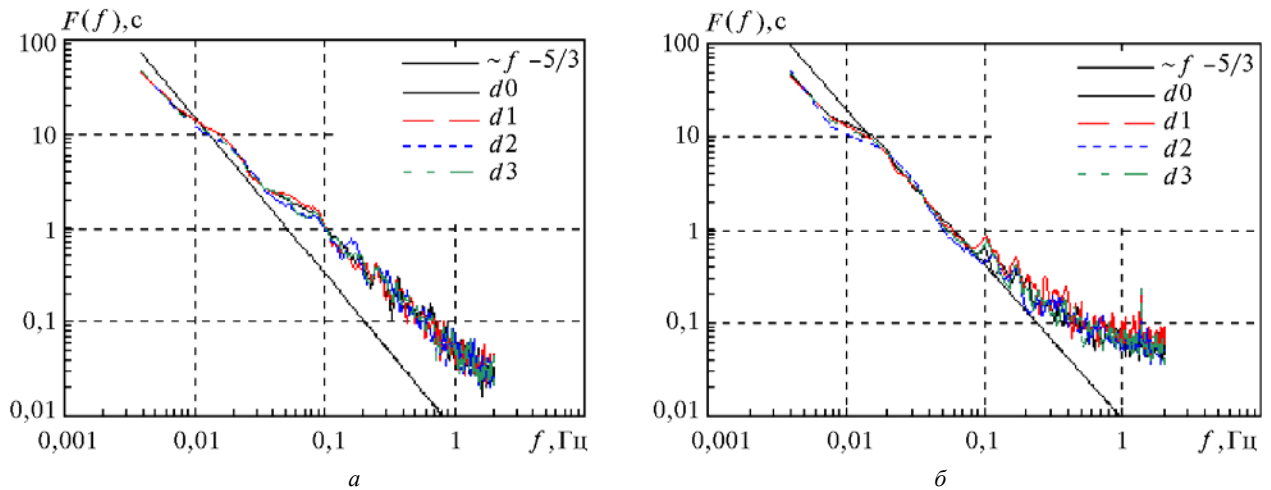


Рис. 2. Частотные спектры для поперечной компоненты скорости (а) и для температуры (б)

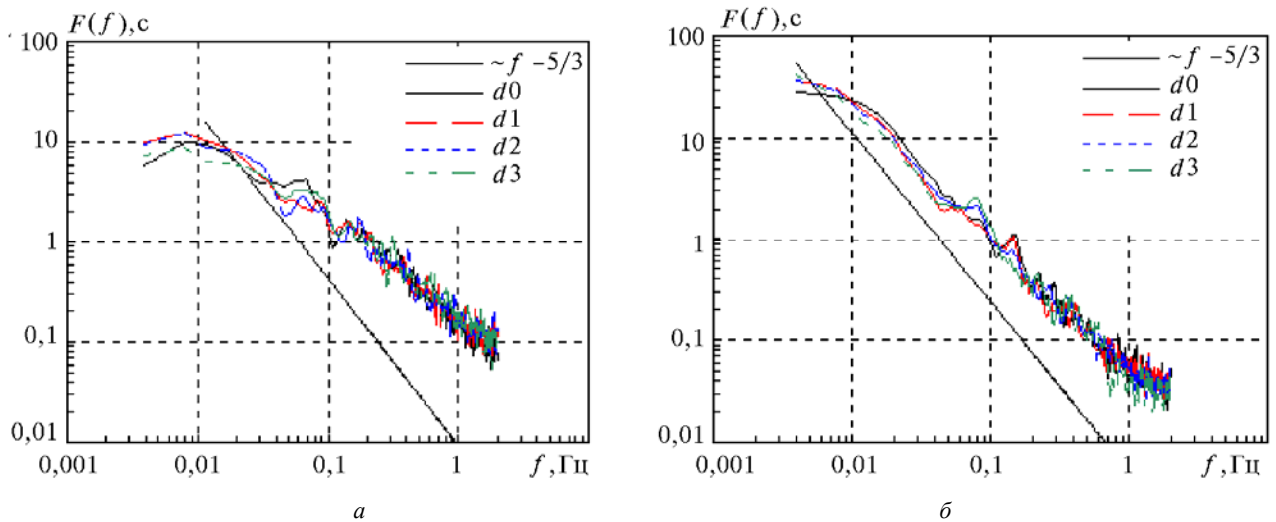


Рис. 3. Частотные спектры для вертикальной компоненты скорости (а) и для температуры (б)

### Пространственно-временные корреляции

Графики на рис. 4 дают наглядное представление о пространственно-временной корреляции продольной компоненты скорости и температуры при разнесении точек измерения в горизонтальной плоскости.

Данный пример относится к случаю очень неустойчивой стратификации (масштаб Обухова  $L = -0,737$  м). Для этого состояния происходит наиболее медленный спад корреляционных функций. При этом наблюдается хорошее совпадение смещения максимумов корреляции температуры и продольной скорости, т.е. температурное поле переносится полем скорости как «консервативная примесь». Пунктирными линиями на графике для сравнения изображены пространственно-временные корреляционные функции продольной компоненты скорости, полученные с использованием гипотезы Тейлора и данных одного 1-го ультразвукового датчика, когда временная задержка положения максимумов корреляции определяется как  $\tau_3 = R/v_R$ , где  $v_R$  – средняя скорость ветра вдоль линии разнесения датчиков. В данном случае  $v_R = 0,75$  м/с, а угол между линией датчиков и направлением средней горизонтальной скорости

ветра составлял  $76^\circ$  (т.е. направление пространственного размещения точек измерения было близко к поперечному).

Таким образом, из рис. 4 видно, что форма кривых, величина и положения максимумов пространственно-временной корреляции, рассчитанной в предположении «замороженности» и полученной при многоточечных измерениях, перестают соответствовать друг другу уже на расстоянии  $R$ , равном нескольким метрам. Из рисунка видно также, что корреляция для температуры убывает по мере увеличения расстояния между датчиками значительно быстрее, чем для ветра. Это говорит о том, что основной вклад в корреляцию температуры вносят неоднородности с масштабом, меньше характерного масштаба продольной скорости. Поскольку при неустойчивой стратификации генерация температурных пульсаций обусловлена в основном пульсациями вертикальной компоненты скорости, то характер изменения корреляции температуры больше соответствует поведению корреляционных функций вертикальной компоненты, чем продольной. Соответствующие графики корреляционных функций для вертикальной компоненты и для температуры в горизонтальной плоскости, полученные при слабо неустойчивой стратификации ( $L = -60,7$  м), приведены на рис. 5.

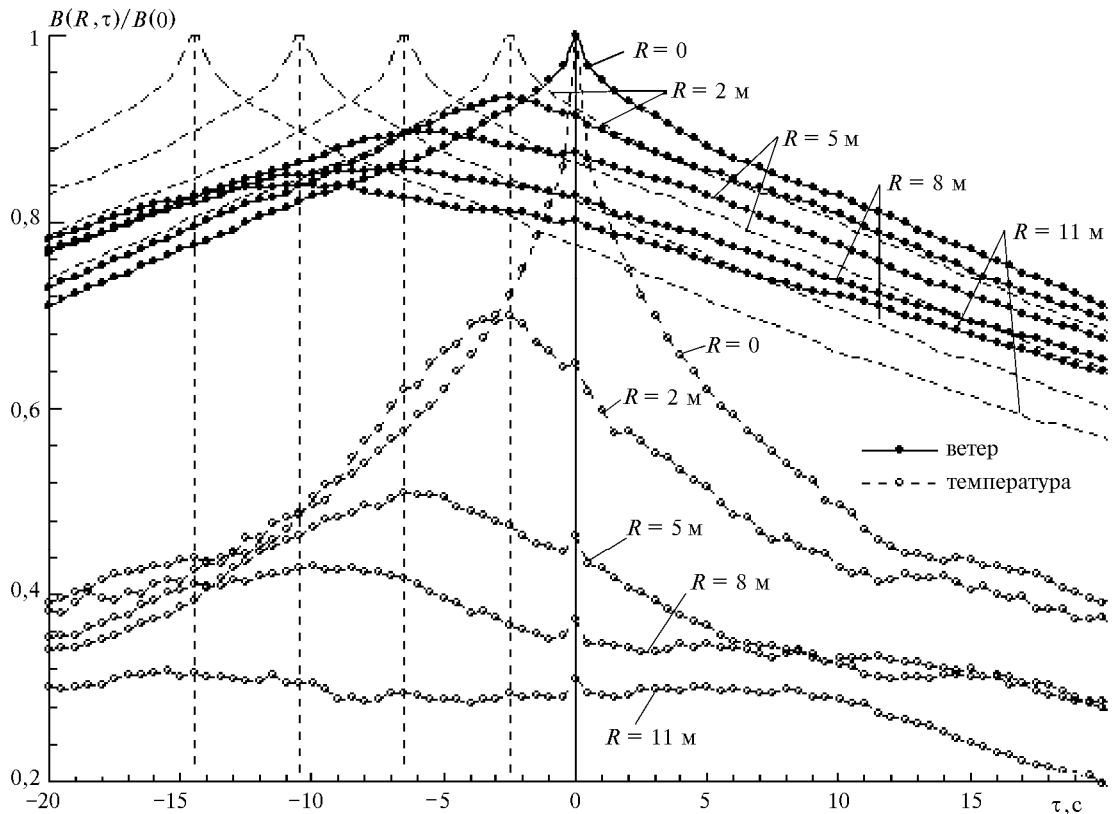


Рис. 4. Пространственно-временная корреляция для продольной компоненты скорости ветра и для температуры в горизонтальной плоскости

Следует отметить, что для случая устойчивой стратификации в приземном слое корреляция и скорости, и температуры уменьшается практически до нуля уже на расстоянии нескольких метров.

Пространственную однородность полей скорости и температуры можно оценить по изменению пространственных корреляционных функций при смещении пары точек наблюдения на одинаковую величину в одном и том же направлении (рис. 6), а именно для случая, представленного на рис. 4 (при смещении в горизонтальном направлении исход-

ной точки отсчета расстояния  $R$ ). Датчики были расположены в одну линию на расстоянии 1 м друг от друга, на высоте 2,5 м. Цифрами 1 – 12 обозначены кривые, соответствующие выбору 1-го – 12-го датчика в качестве опорного, по отношению к которому рассчитывалась корреляция.

Из рис. 6 видно, что горизонтальная однородность поля температуры в данной реализации имеет несколько меньшую протяженность, чем однородность поля скорости. (Этим также объясняется более быстрый спад корреляции температуры на рис. 4.)

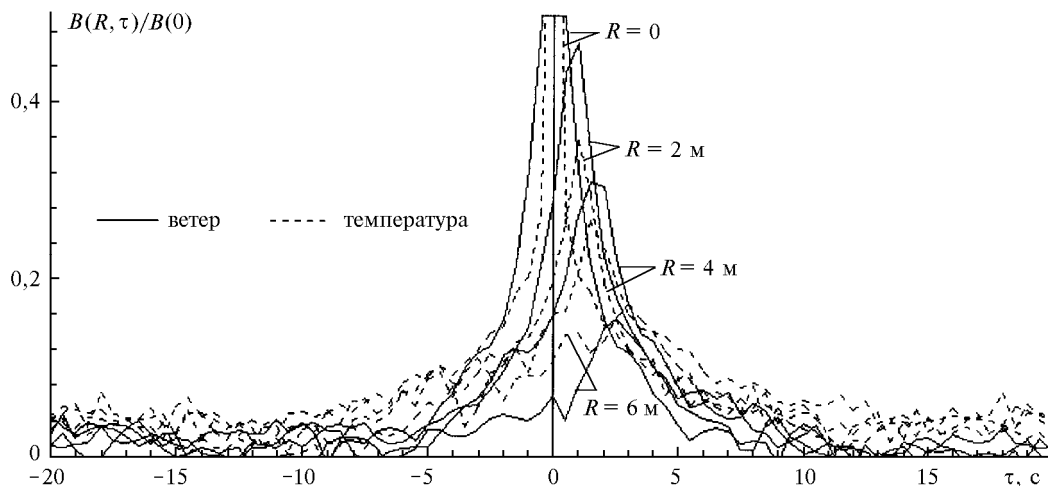


Рис. 5. Пространственно-временная корреляция для вертикальной компоненты скорости ветра и для температуры в горизонтальной плоскости

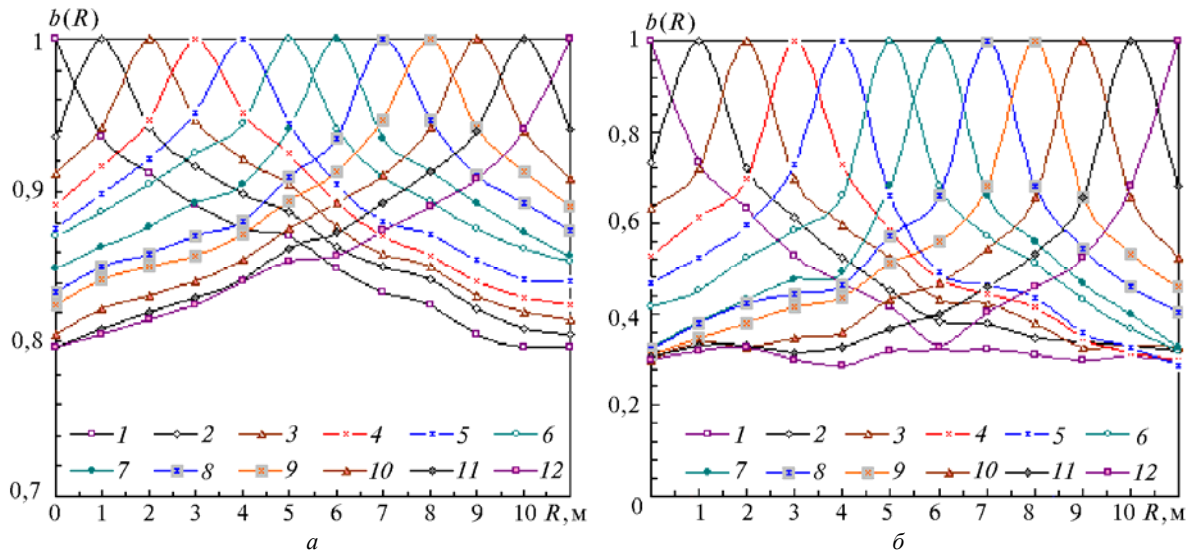


Рис. 6. Пространственная корреляция для продольной компоненты скорости ветра (а) и для температуры (б) в горизонтальной плоскости

Согласно [2] высотная корреляция продольной компоненты скорости зависит не только от расстояния между уровнями измерений, но и от высоты исходного уровня, по отношению к которому рассчитывается корреляция, а также и от направления сдвига от него вверх или вниз.

На рис. 7 приведены зависимости пространственных коэффициентов корреляции для датчиков, размещенных в приземном слое с шагом 1 м в вертикальном направлении. Датчики пронумерованы сверху вниз – с первого по двенадцатый. Кривая 1 на рис. 7 отображает убывание коэффициента пространственной корреляции между первым датчиком и остальными при увеличении расстояния сверху вниз, а кривая 12 – ход корреляции относительно нижнего (двенадцатого) датчика при увеличении разноса снизу вверх.

Представленный здесь случай относится к условиям очень устойчивой стратификации (масштаб Обухова  $L = 6,68$  м). Видно, что, например, кривые 1 и 12 на рис. 7,а, соответствующие высотам 13,5 и 2,5 м и направлениям отсчета вниз и вверх соответственно, достаточно сильно отличаются между собой. Высотная корреляция температуры на

рис. 7,б разрушается уже на расстоянии 1 – 2 м и носит нерегулярный характер. Возможной причиной являются волновые движения, возникающие в приземном слое при устойчивой стратификации и, как отмечается в [1], их сосуществование с пульсациями турбулентного происхождения искажает общую картину и затрудняет интерпретацию данных измерений. Все это свидетельствует о сложности структуры и сильной пространственной неоднородности турбулентности в вертикальном направлении, в особенности при устойчивой стратификации. В настоящее время данный тип стратификации является наименее изученным. Основной трудностью является то, что интенсивность турбулентных пульсаций измеряемых параметров здесь является наиболее слабой. При использовании обычных вертушечных анемометров спектральный анализ и оценка корреляции затруднены вследствие влияния шумов и результаты становятся не достоверными. В связи с этим использование разработанного нами измерительного комплекса, благодаря повышенной точности акустических измерений, является довольно перспективным.

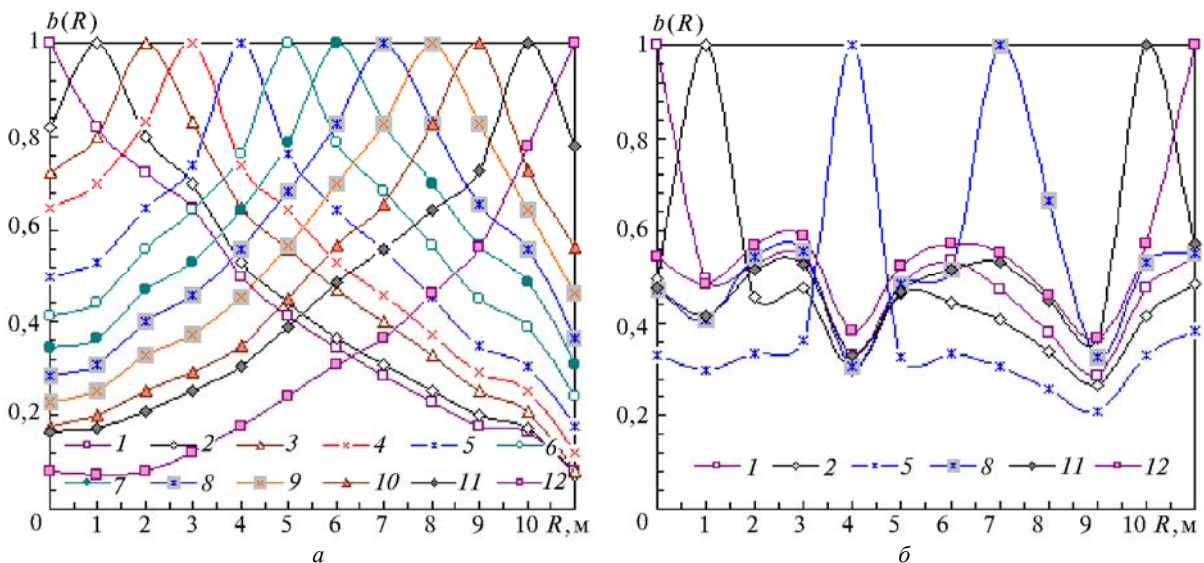


Рис. 7. Пространственная корреляция для продольной компоненты скорости ветра и для температуры в вертикальном направлении (обозначения те же, что и на рис. 6)

### Статистические моменты третьего и четвертого порядков

Во многих теоретических работах по моделированию пульсаций скорости ветра и температуры используется нормальный закон распределения. В [2] утверждается, что распределение пульсаций для всех трех компонентов в обычных условиях и при соблюдении стационарности подчиняется законам, близким к нормальному. Эксперименты показывают, что это достаточно справедливо для пульсаций горизонтальной скорости в области инерционного интервала, т.е. когда условия проведения измерений соответствуют приближению изотропной колмогоровской турбулентности. Однако по мере расширения диапазона в сторону низких частот – в энергетическую область либо при рассмотрении вертикальной компоненты скорости распределение перестает быть гауссовым.

Количественной мерой оценки отличия распределения от нормального являются асимметрия

$$As_v = \langle V^3 \rangle / \sigma_v^3 \quad (1)$$

и эксцесс

$$Ek_v = \langle V^4 \rangle / \sigma_v^4 - 3. \quad (2)$$

В [1] отмечается, что асимметрия и эксцесс вертикальных пульсаций скорости и их зависимость от устойчивости и высоты являются чрезвычайно важными характеристиками, но, к сожалению, публикаций, посвященных их определению, недостаточно и поэтому имеется очень мало данных о реально встречающихся значениях этих параметров. В [6], где обобщены немногочисленные экспериментальные данные о значениях  $As_{vz}$  в приземном слое, приводятся значения 0,3 при неустойчивой и -0,2 при устойчивой стратификации. В [6] получена следующая формула, описывающая изменение асимметрии пульсаций вертикальной компоненты скорости  $As_{vz}$ :

$$As_{vz} = \frac{-0,77 z/L}{(1 - 15 z/L)^{-1/4} - 1,8 z/L} + 0,1, \quad (3)$$

где  $z$  – высота измерений;  $L$  – масштаб Обухова. По данным [7], для неустойчивой стратификации  $As_{vz} = 0,63$  и  $Ek_{vz} = 0,17$ .

На рис. 8 и 9 соответственно показаны экспериментальные значения асимметрии и эксцесса в зависимости от параметра устойчивости  $z/L$  для вертикальной компоненты  $w$ , температуры  $t$  и модуля скорости

$\text{mod} V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ , а также расчет по формуле (3) и линейные аппроксимационные выражения, по данным наших измерений.

При неустойчивой стратификации асимметрия распределения пульсаций вертикальной компоненты скорости положительна. (Напомним, что для нормального закона распределения асимметрия и эксцесс равны нулю.) В среднем для типичных дневных условий с преобладанием направленных вверх пульсаций скорости  $As_{vz}$  близко к 0,2. С повышением устойчивости асимметрия начинает убывать. Это объясняется тем, что при устойчивой стратификации энергия турбулентности расходуется на преодоление сил плавучести и вероятность положительных выбросов вертикальной компоненты уменьшается. Наблюдается хорошее соответствие значений, рассчитанных по формуле (3), данным наших измерений. Поведение асимметрии пульсаций температуры качественно соответствует зависимости для вертикальной компоненты, но характеризуется несколько большими положительными величинами при неустойчивости и более быстрым спадом к отрицательным значениям в области безразличной и устойчивой стратификации. Как видно из рис. 8, для модуля скорости экспериментальные точки характеризуются значительным разбросом и в среднем  $As_{\text{mod}V} \approx 0,5-0,6$ . В области неустойчивости положительная асимметрия для модуля скорости означает, что вероятность усиления ветра относительно некоторого заданного уровня больше вероятности ослабления.

Из данных, представленных на рис. 9, следует, что распределение пульсаций скорости в среднем обладает положительным эксцессом, т.е. является более «острым» (имеет более высокую и острую вершину), с повышенной плотностью вероятности для малых пульсаций по сравнению с нормальным распределением. Причем для вертикальной компоненты средняя величина эксцесса больше, чем для модуля скорости. По-видимому, такое завышенное значение объясняется тем, что поле скорости в вертикальном направлении менее однородно, чем в горизонтальном, и отклонения от нормального распределения здесь проявляются в большей степени.

Если асимметрия с ростом устойчивости понижается от положительных значений и переходит к отрицательным как для  $w$ , так и для  $t$  (т.е. скошенность распределений изменяется одинаковым образом), то поведение эксцесса пульсаций скорости противоположно поведению эксцесса для температурных пульсаций. Распределение  $w$  имеет тенденцию к повышению плотности вероятности для малых пульсаций (по сравнению с нормальным распределением) при всех типах стратификации.

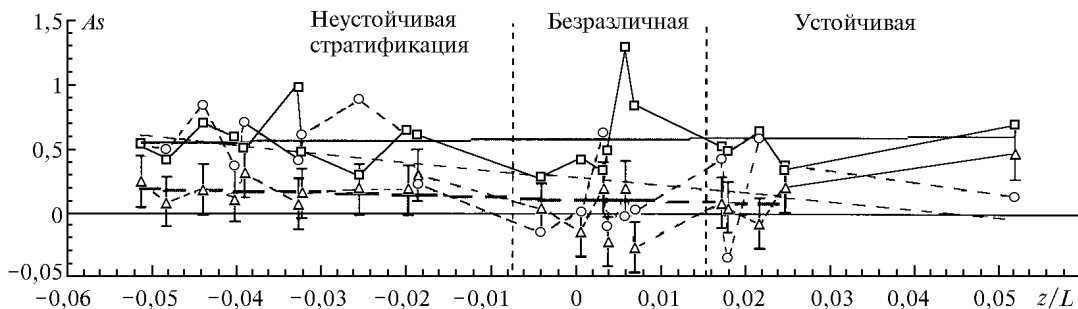


Рис. 8. Зависимость асимметрии флуктуаций скорости и температуры от стратификации. - -  $\Delta$  - - -  $w$ ; - -  $\circ$  - - -  $t$ ;  $\square$  - - -  $\text{mod} V$ ; — — — формула (3); - - - - -  $As_t = -6,2089 z/L + 0,2803$ ; — — — —  $As_{\text{mod}V} = 0,4718 z/L + 0,574$

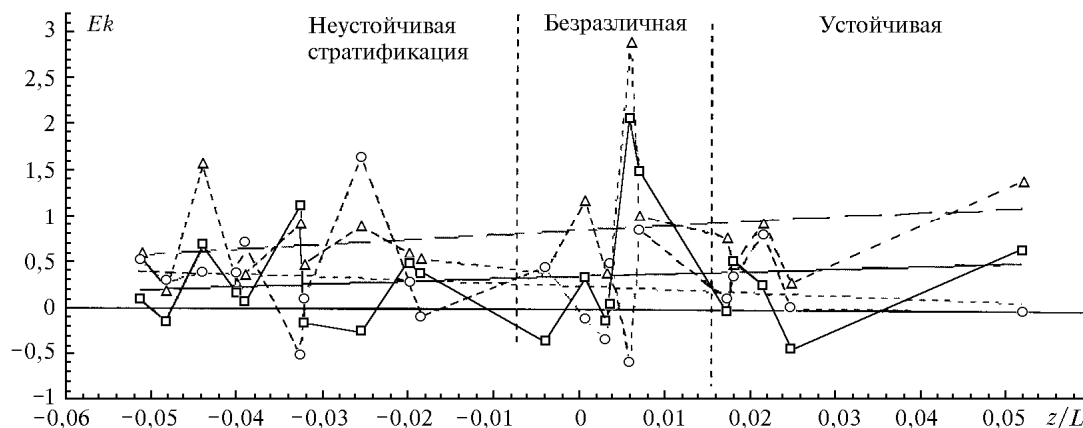


Рис. 9. Зависимость эксцесса флуктуаций скорости и температуры от стратификации. --  $\Delta$  ---  $w$ ; --  $\circ$  ---  $t$ ; --  $\square$  ---  $\text{mod}V$ ; — — —  $Ek w = 5,3949 z/L + 0,8484$ ; - - - -  $Ek t = -2,9603 z/L + 0,2452$ ; — — —  $Ek \text{mod}V = 3,2265 z/L + 0,3616$

Таким образом, предположение о гауссовом характере распределения вероятностей пульсаций вертикальной компоненты скорости не может быть состоятельным в приземном слое атмосферы. Фактическое распределение вертикальных скоростей в неустойчивом приземном слое асимметрично с коэффициентом асимметрии, равным  $\approx 0,2-0,3$ , и эксцессом  $0,5-0,8$ . Это обстоятельство необходимо учитывать при использовании законов распределения для пульсаций скорости ветра при разработке и обосновании оптических методов зондирования и при описании распространения оптического излучения в атмосфере. Правильный учет асимметричного распределения скоростей при моделировании статистических характеристик метеопараметров должен также обеспечить лучшее соответствие результатов модельного расчета данным натурных наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 98-05-03131-а и № 99-05-79084-к).

1. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Под ред. Ф.Т.М. Ньистада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
2. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
3. Hanafusa T., Fujitany T., Kobori Y., Matsuta Y. // Paper Meteorol. Geophys. 1982. V. 33. N 1. P. 1-19.
4. Ростов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 1. С. 102-106.
5. Ростов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. N 2. С. 154-158.
6. Chiba O. // J. Meteorol. Soc. Japan. 1978. V. 56. P. 140-142.
7. Lenshov D.H. // J. Appl. Meteorol. 1970 V. 9. P. 847-884.

*A.L. Afanas'ev, V.A. Banakh, A.P. Rostov. Spatiotemporal Statistics of Small-scale Turbulence in Low Atmospheric Layer from Measurements by Means of a Set of Ultrasonic Sensors.*

The results of a series of experiments with 12 acoustic computer-controllable sensors are reported in the paper. The experiments were conducted to study in detail the turbulence structure of low atmospheric layer. The measurements were accumulated at different schemes of the sensors spatial arrangement in horizontal and vertical planes. Based on the measurements obtained, some spatiotemporal characteristics of wind and temperature fields as well as their dependence on the measurement altitude and thermal stratification of the ground layer are discussed.