

**А.Л. Афанасьев, А.П. Ростов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ**

С целью изучения трехмерной мелкомасштабной турбулентности приземного слоя атмосферы проведены комплексные экспериментальные измерения пульсаций метеопараметров при помощи шести акустических датчиков, пространственно разнесенных в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На основе полученных данных рассматриваются проявления пространственной анизотропии турбулентности, а также различия в поведении статистических характеристик ветровых и температурных пульсаций, обусловленные различной зависимостью коэффициентов турбулентного обмена теплом и количеством движения от состояния устойчивости приземного слоя.

В настоящее время при разработке и теоретическом обосновании лидарных и акустических методов зондирования атмосферных параметров используется общепринятая модель колмогоровской турбулентности для локально-изотропной среды. При этом пространственно-временная структура поля скорости ветра описывается с привлечением гипотезы «локальной замороженности», а температура рассматривается как консервативная и пассивная примесь. Однако, как известно, в приземном слое атмосферы турбулентность существенно анизотропна. Кроме того, имеются различия в поведении ветровых и температурных пульсаций в зависимости от состояния устойчивости атмосферы [1].

В данной статье рассмотрены результаты серии экспериментов по изучению детальной структуры турбулентности приземного слоя атмосферы с использованием шести ультразвуковых измерителей пульсаций скорости ветра и температуры. Целью исследований являлось выяснение зависимости статистических характеристик пульсаций скорости ветра и температуры от ряда параметров – расстояния между точками измерения, направления разноса по отношению к средней скорости, частоты и условий термической стратификации приземного слоя.

Измерения проводились в течение суток каждые полчаса. Пространственно ультразвуковые датчики были расположены в одну линию на расстоянии 1 м друг от друга. Измерения пульсаций продольной компоненты скорости ветра и температуры проводились всеми шестью датчиками. Кроме того, в качестве одного из датчиков была использована акустическая метеостанция [2], которая осуществляла измерения пульсаций трех компонент скорости ветра, температуры, влажности и среднего значения давления воздуха. Измерения осуществлялись синхронно с частотой 4 Гц. Длина реализации составляла 4096 точек, т.е. время усреднения равнялось около 17,1 мин.

Работа выполнялась в течение трех последовательных этапов соответственно с продольным, вертикальным и поперечным расположением линейки измерителей относительно среднего направления ветра. Каждый этап эксперимента проводился в автоматическом режиме под управлением двух персональных компьютеров, которые также осуществляли запись и частичную обработку данных в реальном времени. Записанные данные были впоследствии подвергнуты более детальному анализу и статистической обработке.

Было проанализировано 35 серий измерений. Для каждой серии были определены следующие статистические характеристики: для продольной компоненты скорости ветра и температуры вычислялись средние значения, дисперсии, асимметрии и эксцессы, автокорреляционные функции, автоспектры, в точке размещения каждого из датчиков, а также взаимные корреляционные функции, спектры когерентности и фазы для датчиков, расположенных на расстоянии 1–5 м друг от друга. Кроме того, на основе данных ультразвуковой метеостанции вычислялись односторонние моменты и спектры для поперечной и вертикальной компонент ветра, а также масштабы скорости (скорость трения), температуры, удельной влажности, длины (масштаб Обухова), вертикальные турбулентные потоки количества движения, водяного пара, явного и скрытого тепла.

Несмотря на то, что вопрос о подобии температурных пульсаций ветровым широко обсуждался в литературе [3], в настоящее время предположение об одинаковой природе турбулентного обмена теплом и количеством движения в приземном слое атмосферы является гипотезой и нуждается в дальнейшей экспериментальной проверке. В рамках данной статьи ограничимся проведением сравнительного анализа поведения пространственно-временных корреляционных функций и спектров когерентности для пульсаций температуры и компонент скорости ветра.

Диапазон изменения условий термической стратификации в течение эксперимента по параметру  $z/L$  (где  $L$  – масштаб Обухова;  $z$  – высота наблюдения) был довольно широким, т.е. состояние приземного слоя менялось от очень устойчивого (1-й класс, по Тернеру) ночью до очень неустойчивого (7-й класс) днем. Изменение состояния приземного слоя показано на рис. 1.

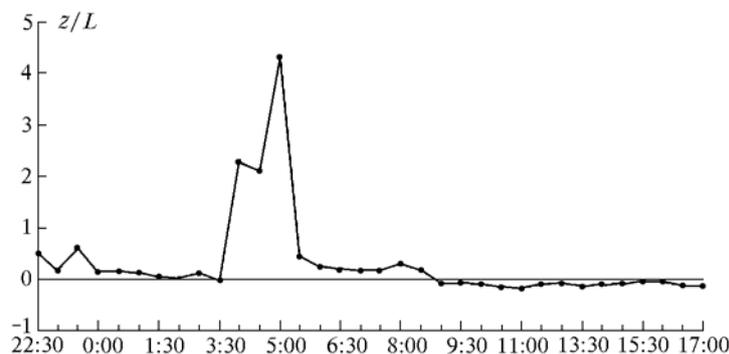


Рис. 1

Как известно [4], пульсации температуры возникают только в атмосфере, стратифицированной по высоте в отношении потенциальной температуры. Согласно [4] генерация температурных пульсаций при наличии адиабатического градиента потенциальной температуры (условия безразличной стратификации) практически отсутствует. При отклонении вертикального градиента от адиабатического перемещение по высоте элементарных объемов воздуха пульсациями вертикальной скорости приводит к возникновению локальных температурных пульсаций. Приведение дисперсии этих пульсаций  $\sigma_t^2$  к безразмерному виду осуществляется с помощью масштаба температуры  $T^*$ , определяемого равенством  $\langle t'w' \rangle = -u^* T^*$ , где  $t'$ ,  $w'$  – пульсации температуры и вертикальной компоненты скорости;  $u^*$  – скорость трения.

На рис. 2 приведен график зависимости нормированной дисперсии флуктуаций температуры от устойчивости по данным наших измерений. Видно, что при стратификации, близкой к безразличной, значение  $\sigma_t / |T^*|$  растет. В целом приведенная зависимость согласуется с теоретическими положениями и с известными экспериментальными данными.

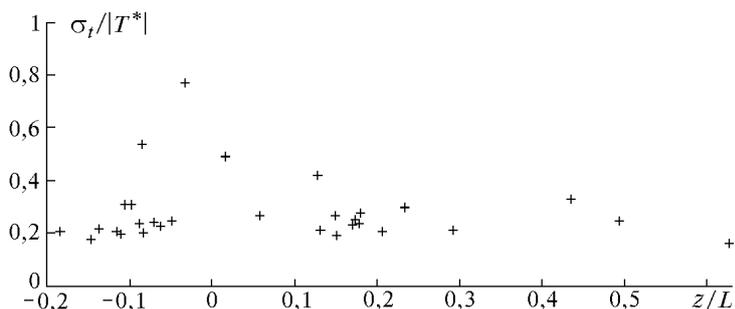


Рис. 2

В [3] используется принцип подобия спектров температурных пульсаций ветровым. Однако имеется отличие этих спектров, связанное с тем, что температурное поле не подвергается растяжению само по себе, а переносится полем скорости. При этом инерционные интервалы этих двух полей могут частично перекрываться, но они не обязательно должны совпадать [4]. Возможной причиной различия спектров температуры и скорости ветра является различное поведение коэффициентов турбулентного обмена. В настоящее время достаточно надежно установлено различие между коэффициентами турбулентного обмена в зависимости от стра-

тификации [1]. Согласно теории подобия Монина–Обухова в приземном слое атмосферы отношение  $\alpha$  коэффициентов турбулентного обмена для тепла  $K_h$  и количества движения  $K_m$  является функцией параметра устойчивости (безразмерной высоты)  $\xi = z/L : \alpha = K_h/K_m = \varphi_m(\xi)/\varphi_h(\xi)$ , однако определить вид функций  $\varphi_m(\xi)$  и  $\varphi_h(\xi)$  с помощью теории подобия невозможно. Для этого необходимы соответствующие экспериментальные данные. Согласно результатам многочисленных измерений профилей скорости и температуры, в том числе и в лабораторных условиях, значение  $\alpha = 1,16$  при  $\xi = 0$ . Поскольку по определению  $\varphi_m(0) = 1$ , то  $\varphi_h(0) = 0,86$ . Однако многие авторы считают, что характер зависимости  $\varphi_m$  и  $\varphi_h$  от  $\xi$ , полученной из обработки экспериментальных данных, требует дальнейшего уточнения [1].

Примеры нормированных на дисперсию спектров пульсаций температуры и скорости ветра, полученные нами в условиях устойчивой, безразличной и неустойчивой стратификации, приведены на рис. 3–5 соответственно. К сожалению, при устойчивом и безразличном состояниях приземного слоя интенсивность турбулентных пульсаций была очень слабая и спектральные характеристики приближались к чистому шуму. При больших значениях  $z/L$  лишь в некоторых случаях наблюдались кратковременные спорадические проявления турбулентности, длящиеся 0,5–5 мин. Поскольку время усреднения составляло примерно 17 мин, то это приводило к нарушению условий стационарности за время реализации. Из рис. 3 и 4 видно, что инерционный интервал в спектрах мал, а подъем спектральных кривых в области высоких частот объясняется влиянием шумов. Эти результаты согласуются с выводами [3] о том, что в ночном приземном слое турбулентность является перемежающейся, а также с данными аналогичных экспериментов, описанных в [1], в которых было показано, что при  $Ri \approx 0,2$  в одних сериях наблюдений наклон умноженных на частоту безразмерных спектров был близок к нулю а в других принимал значения от  $-1,2$  до  $-2,5$ .

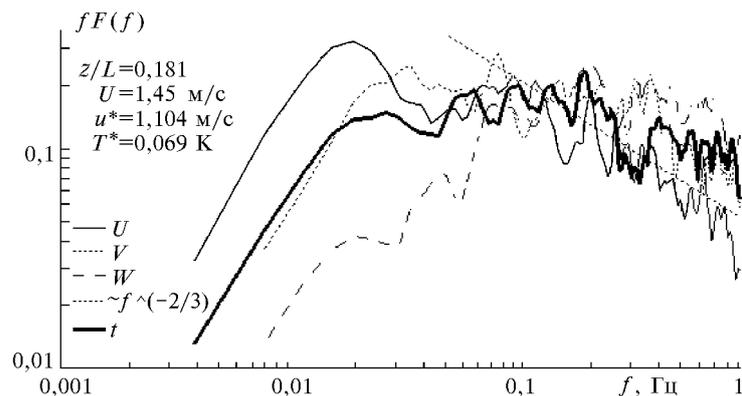


Рис. 3

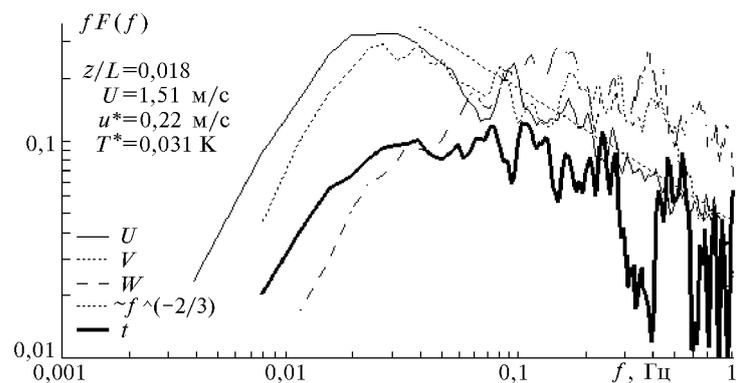


Рис. 4

Измерения пульсаций температуры при неустойчивой стратификации показали, что почти вся энергия возмущений сосредоточена вблизи хорошо выраженного спектрального максимума в области низких частот, а в инерционном интервале спектры действительно подчиняются «закону  $-2/3$ » (см. рис. 5).

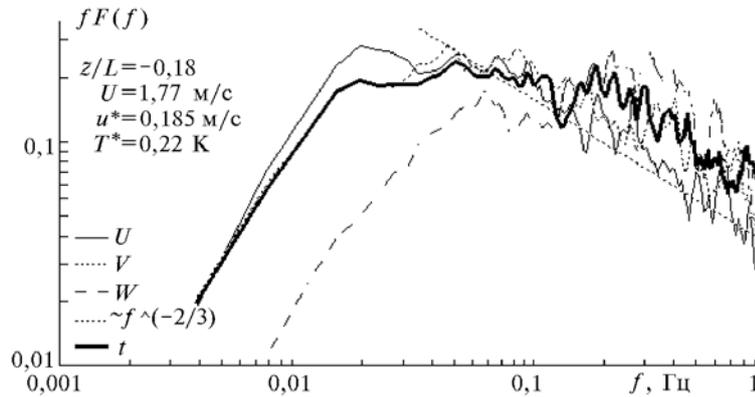


Рис. 5

Известно [1, 3, 4], что в приземном слое турбулентность является существенно анизотропной. Рассмотрим проявления анизотропии на примере измеренных в условиях неустойчивой стратификации пространственно-временных корреляционных функций пульсаций продольной компоненты скорости ветра и температуры, изображенных на рис. 6 – 8 для продольных, поперечных и вертикальных разностей точек расположения акустических измерителей соответственно.

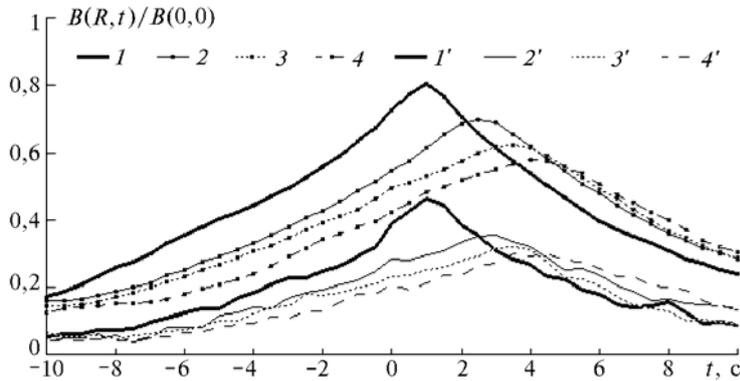


Рис. 6

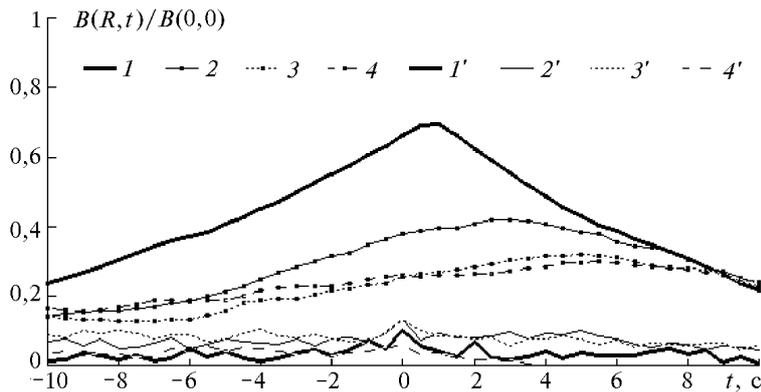


Рис. 7

В продольном направлении происходит наиболее медленный спад максимумов корреляции пульсаций и скорости (кривые 1 – 4) и температуры (кривые 1' – 4'). Причем при увеличении пространственного разнеса точек (кривые 1 – 4 соответствуют разнесам 1, 3, 4 и 5 м) наблюдаются закономерное убывание максимумов корреляции и рост временной задержки их положения, т.е. имеет место удовлетворительное выполнение гипотезы «локальной заморозки» турбулентных неоднородностей по данному направлению.

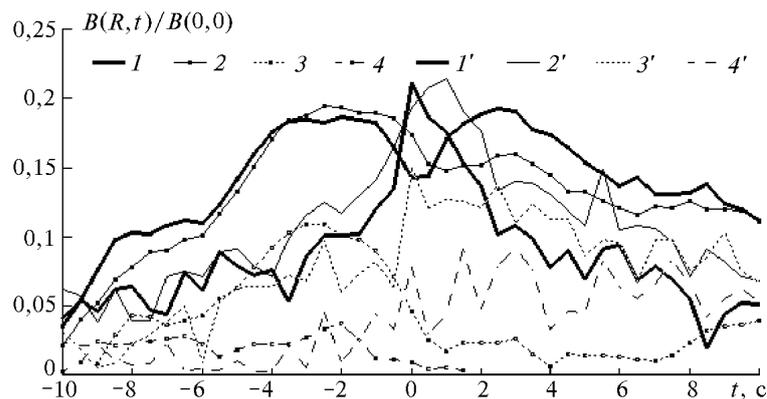


Рис. 8

В поперечном направлении спад корреляции ветровых пульсаций происходит значительно быстрее, чем в продольном, а уровень корреляции температуры значительно меньше, чем для ветра. Причем если для пульсаций продольной скорости соответствие величин максимумов и их временных задержек величинам пространственных разносов все еще прослеживается, то для температурных флуктуаций эта зависимость нарушается, а смещение максимумов вообще отсутствует.

Как видно из рис. 8, при разнесении измерителей в вертикальном направлении (здесь кривые 1 – 4 соответствуют разносам 1, 2, 3 и 4 м) корреляция пульсаций продольной скорости была наиболее низкой. Однако и здесь прослеживается уменьшение статистической взаимосвязи пульсаций по мере увеличения разности высот. Особенностью корреляции флуктуаций с вертикальными разносами является то, что максимум корреляции между уровнями (например, отстоящими друг от друга на 2 и 3 м – соответствующие кривые 2 и 3) наблюдается не при положительной временной задержке, как в случаях продольного и поперечного разносов, а при отрицательной, т.е. когда наблюдения на верхнем уровне предшествуют наблюдениям на нижнем. Такой сдвиг максимума взаимной корреляционной функции согласно [4] означает наклон турбулентных вихрей по направлению среднего движения, возникающий за счет их взаимодействия с положительным (направленным вверх) градиентом средней скорости.

Интересно, что когда расстояние между уровнями не слишком велико ( $R = 1$  м, кривая 1), то в данной реализации наблюдается наличие двух слабовыраженных локальных максимумов с противоположной по знаку временной задержкой. Возможно, что правый максимум с положительной задержкой связан с тем, что в условиях неустойчивой стратификации в приземном слое присутствует вертикальная составляющая средней скорости ветра, обусловленная потоками воздуха от нагретой подстилающей поверхности. Регулярный вертикальный перенос неоднородностей этой компонентой и должен приводить к появлению максимума с положительной задержкой. Поскольку эта компонента мала (в данном случае  $\langle w \rangle = 0,1$  м/с), то ее влияние на смещение максимума обнаруживается только для достаточно близко расположенных уровней, где влияние соответствующей разности продольных скоростей, вызванной наличием логарифмического профиля, оказывается менее существенным. Как видно из рис. 8, уже при разносе  $R = 2$  м правый максимум практически теряется (вследствие влияния обычных процессов эволюции неоднородностей скорости и турбулентного перемешивания).

Что касается пульсаций температуры, то хотя уровни корреляции такие же низкие, как и для случая поперечных разносов, однако можно заметить, что максимум функций достигается не при отрицательном временном сдвиге, как для пульсаций продольной скорости, а при положительном, т.е. за счет переноса температурных неоднородностей снизу вверх средней вертикальной компонентой скорости.

В целом рис. 6 – 8 демонстрируют, что во время проведения измерений в условиях умеренно неустойчивой стратификации приземного слоя вихри скорости были наиболее вытянуты вдоль направления среднего движения. Характерный размер вихрей в поперечном направлении был меньше, чем в продольном, но значительно больше, чем в вертикальном направлении. Пространственная корреляция температурных неоднородностей также наиболее медленно спадает при горизонтальном размещении датчиков в направлении среднего ветра. Однако в поперечном и вертикальном направлениях поведение корреляционных функций температур-

ных пульсаций существенно отличается от поведения соответствующих корреляционных функций продольных пульсаций скорости. Все это говорит о существенных различиях в структуре турбулентных полей скорости ветра и температуры, выражающихся в различных проявлениях пространственной анизотропии их статистических характеристик.

При изучении детальной структуры турбулентных полей скорости и температуры представляет интерес информация о степени статистической взаимосвязи пульсаций в различных точках пространства для конкретных значений частоты. Такую информацию дают функции когерентности

$$\text{Coh}^i(f, R_j) = [\text{Co}^2(f) + Q^2(f)] / [F_A^i(f) F_B^i(f)], \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $f$  – частота;  $F_A^i(f)$  и  $F_B^i(f)$  – спектры мощности соответственно в точках  $A$  и  $B$ ;  $R_j$  – расстояние между точками  $A$  и  $B$ ;  $\text{Co}(f)$  – коспектр и  $Q(f)$  – квадратурный спектр; индексы  $i, j = 1, 2, 3$  означают соответственно продольную, поперечную и вертикальную компоненты скорости и продольное, поперечное и вертикальное расположения измерителей относительно среднего направления ветра.

Когерентность (1) является статистической характеристикой, определяющей вклад различных частот в корреляцию между пульсациями метеопараметров в двух пространственно разнесенных точках. Применительно к скорости ветра она может трактоваться как мера устойчивости вихря скорости.

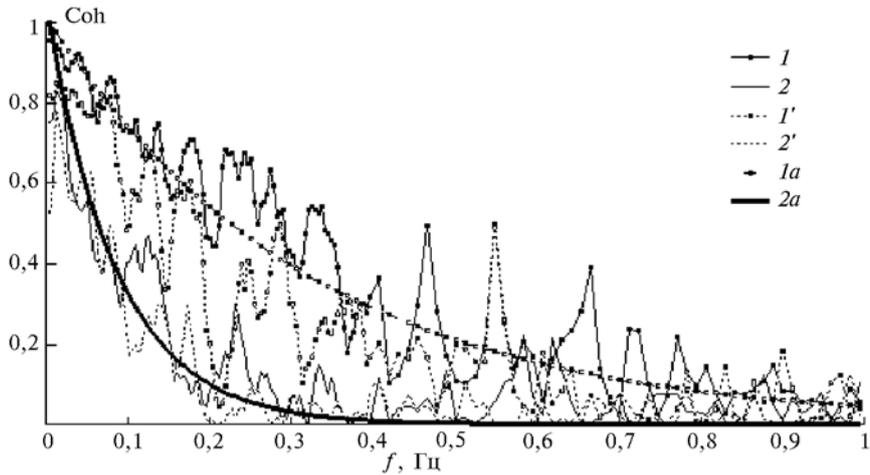


Рис. 9

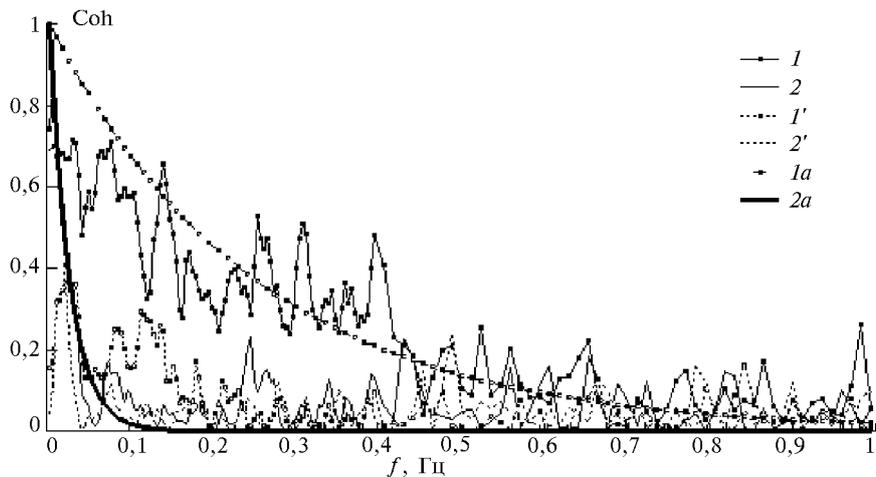


Рис. 10

На рис. 9 и 10 соответственно для условий неустойчивой и устойчивой стратификации показано поведение функций когерентности для горизонтальных компонент скорости (кривые 1 и 2) и для температуры (кривые 1' и 2'), измеренных при разносах точек наблюдения  $R = 1$  м (кривые 1, 1') и  $R = 5$  м (кривые 2, 2'), вдоль направления средней скорости ветра. На рис. 9 при неустойчивой стратификации, как и следовало ожидать, исходя из известных представлений о турбулентном движении в приземном слое [4], наблюдаются высокие значения когерентности между пульсациями в точках расположения датчиков в области низких частот.

С ростом частоты, т.е. по мере перехода к меньшим масштабам турбулентных неоднородностей, так же, как и при увеличении расстояния между точками измерения, происходит уменьшение величины когерентности. При этом, как и при рассмотрении корреляционных функций с продольным разносом датчиков, явных отличий в поведении температурных и ветровых пульсаций не обнаруживается.

Для случая устойчивой стратификации (рис. 10) спад когерентности с ростом частоты и расстояния между точками происходит быстрее, чем при неустойчивости, что можно объяснить общим уменьшением энергии турбулентности за счет работы архимедовых сил плавучести и соответствующим уменьшением всех масштабов [1]. Кроме того, наблюдается некоторое отличие в поведении температурной и ветровой когерентности в области низких частот. Если для продольной компоненты скорости ветра, как и в случае неустойчивой стратификации, когерентность растет с уменьшением частоты, то когерентность пульсаций температуры по мере перехода к все большим пространственным масштабам сначала достигает своего максимального значения, а затем начинает убывать. Наличие такого низкочастотного максимума в спектрах когерентности температурных пульсаций означает, что основной вклад в их пространственную корреляцию вносят неоднородности с масштабом меньшим, чем характерный масштаб продольной скорости.

Если учесть, что механизм генерации температурных пульсаций при стратификации, отличной от нейтральной, обусловлен в основном пульсациями вертикальной компоненты скорости, то таким масштабом должен являться характерный размер турбулентных неоднородностей в вертикальном направлении. В условиях устойчивой стратификации турбулентные вихри скорости сжаты по вертикали архимедовыми силами плавучести.

Таким образом, наряду с вышеуказанными различиями коэффициентов турбулентного обмена пространственная анизотропия турбулентных неоднородностей также является фактором, обуславливающим различное поведение спектральных характеристик для продольной компоненты скорости и температуры в области низких частот. На более высоких частотах временные масштабы меньше и вихри более изотропны.

При теоретическом обобщении экспериментальных данных о ветровой когерентности часто используются модельные представления вида [5]

$$\text{Coh}^i(f, R_j) = \exp(-K_j^i n_j) \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где  $n_j = f R_j / V_i$  – безразмерная частота;  $K_j^i$  – параметр затухания. На рис. 9 и 10 кривые 1a и 2a представляют собой экспоненциальную аппроксимацию соответствующих экспериментальных функций когерентности продольной компоненты скорости. Полученные значения коэффициентов затухания качественно подчиняются закономерностям, установленным в обзорной работе [5], на основе сопоставления большого количества экспериментальных работ, проведенных различными авторами в разных местах.

Согласно выводам [5] в условиях неустойчивой стратификации заметной зависимости  $K_1^1$  от  $R$  нет. Действительно, значения параметров затухания  $K_1^1$  для  $R = 1$  и 5 м, полученные из наших измерений, имеют близкие значения: 5,03 и 4,01 соответственно (кривые 1a и 2a на рис. 9). В то же время для устойчивой стратификации (кривые 1a и 2a на рис. 10) эти параметры равны 4,92 и 10,1 при тех же разносах. Данные величины согласуются с выводами [5] о том, что при стабильной стратификации наблюдается рост  $K_1^1$  при увеличении  $R$ . Причем если для больших разносов ( $R = 5$ ) с увеличением стабильности наблюдается рост  $K_1^1$  (значения 4,01 и 10,1 для неустойчивого и устойчивого состояний), то для малых разносов ( $R = 1$ ) параметр затухания может даже убывать (значения 5,02 и 4,92 соответственно). Такая зависимость также согласуется с результатами некоторых работ, описанных в [5].

Для получения более детальных количественных выводов о влиянии состояния устойчивости приземного слоя на степень пространственной анизотропии турбулентности требуются

более длительные эксперименты с учетом влияния ряда дополнительных факторов – высоты пограничного слоя, шероховатости подстилающей поверхности и т.д. Тем не менее из приведенного анализа видно, что подобные комплексные автоматизированные измерения представляют хорошую возможность для исследования турбулентности приземного слоя, где требуются синхронные данные для большого числа гидрометеорологических параметров. Дополнительного изучения требуют случаи слабой и перемежающейся турбулентности [1]. Положительной стороной акустических измерителей [2], с этой точки зрения, являются высокая точность и частота регистрации пульсаций скорости и температуры, позволяющие изучать тонкие эффекты в структуре турбулентных полей. Полученные данные могут быть использованы для теоретического обобщения и выявления новых закономерностей поведения мелкомасштабной турбулентности приземного слоя атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №94-05-16601).

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф. Т. М. Ньстада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
2. Ростов А. П. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 1. С. 102–106.
3. Бызова Н. Л., Иванов В. Н., Гаргер Е. К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
4. Ламли Дж., Пановский Г. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
5. Мазурин В. П. Статистические характеристики скорости ветра применительно к ветровым нагрузкам: Обзорная информация // Гидрометеорология. Обнинск, 1983. Вып. 2. 52 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
29 июля 1997 г.

**A. L. Afanas'ev, A. P. Rostov. Study of Statistic Characteristics of Wind and Temperature Fields of the Atmospheric Ground Layer with UV Detectors.**

In order to study three-dimensional small-size turbulence in the atmospheric ground layer, the fluctuation of meteoroparameters was measured by means of six acoustic detectors spaced apart in horizontal and vertical planes. Based on the obtained data, we treat the spatial anisotropy of the turbulence as well as differences in behaviour of wind and temperature characteristics fluctuations caused by different dependence of coefficients of turbulent exchange of heat and momentum on equilibrium state of the ground layer.