

И.В. Невзорова, С.Л. Одинцов

Корреляция компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.07.2004 г.

Рассмотрены оценки межуровневых корреляционных связей горизонтальной скорости ветра, измерявшейся с помощью акустического зондирования пограничного слоя атмосферы в различных регионах. Анализировалась связь корреляции с типом стратификации, с расстоянием между уровнями, с интервалами наблюдений и временем предварительного осреднения данных. Показано, в частности, что межуровневая корреляция в конвективных условиях выше, чем при устойчивой стратификации. Проведено сопоставление содарных наблюдений с результатами других авторов.

Изучение структуры атмосферного пограничного слоя (АПС) включает оценки статистических характеристик ветрового потока, в том числе выотно-временные корреляции пульсаций скорости ветра. Основные результаты по данной проблеме были получены на высотных метеорологических мачтах. В России к настоящему времени имеется только одна такая мачта — в г. Обнинске в 100 км к юго-востоку от Москвы (высота 312 м, 13 основных измерительных уровней). Обработка полученных на этой мачте результатов обеспечивает достоверную оценку статистических (корреляционных в том числе) связей случайного потока ветра в АПС [1, 2]. Однако эти оценки относятся к конкретной местности, где размещена мачта. Актуальным поэтому остается вопрос о разработке мобильных технических средств, обеспечивающих возможность дистанционной диагностики структуры АПС в любом регионе. Одним из таких средств является доплеровский содар. Изложенные ниже результаты базируются на экспериментальных данных, полученных при работе трехканального доплеровского содара ИОА СО РАН «Волна-3» [3].

Специфика работы трехканального доплеровского содара заключается в том, что данные о составляющих скорости ветра поступают из разнесенных по пространству и времени объемов АПС. Это связано с особенностями моностатических схем зондирования (совмещенность источника и приемника звукового излучения). При таких схемах содар дает информацию о радиальных составляющих V_r — проекциях вектора скорости ветра $\mathbf{V} = \mathbf{n}_1 V_1 + \mathbf{n}_2 V_2 + \mathbf{n}_3 V_3$ на оси диаграмм направленности антенн. Здесь \mathbf{n}_r — направляющие векторы косоугольной системы координат.

Для определения высотного профиля $\mathbf{V}(z)$ требуется не менее трех разнонаправленных измерительных каналов. Обычно антенны содара размещаются рядом. При использовании фазированных

антенных решеток с электронным сканированием диаграммы направленности все измерительные каналы вообще имеют один и тот же источник/приемник излучения. В результате формируется «веер» из направлений зондирования, диагностирующий различные области АПС. Кроме того, обычная практика многоканального акустического зондирования подразумевает последовательный режим излучения/приема импульсных сигналов каждым измерительным каналом. Эти факторы («веерность» и последовательность излучения) ответственны за пространственно-временное разнесение оценок V_r . Подобная технология зондирования накладывает определенные ограничения на разрешающую способность зондирующей системы, формируя специфический пространственно-временной фильтр, не позволяющий оценивать мелкомасштабные и короткопериодные пульсации $\mathbf{V}(Z)$.

Приведенные ниже результаты были получены при одном вертикальном канале зондирования (V_1) и двух наклонных каналах (V_2 и V_3) с отклонением от зенита на угол $\varphi = 20^\circ$ и разностью углов по азимуту 90° . Такая схема отвечает оценкам V_r на высоте Z в вершинах равнобедренного треугольника со сторонами $l = 0,364 Z$ (м) и гипотенузой $L = 0,515 Z$ (м). Таково пространственное разнесение точек наблюдения. Временные сдвиги определялись требованиями максимальной дальности (высоты) зондирования и составляли 15–17 с между последовательными отсчетами на уровне Z в каждом измерительном канале.

Необходимо также отметить, что ширина луча содара «Волна-3» составляет $\approx 8^\circ$ (по половинной мощности). Следовательно, принимаемый в момент времени t сигнал формируется в области с характерным поперечным размером $D \approx 0,149 Z$ (м). Продольный размер этой области определяется длительностью зондирующего импульса τ и скоростью звука c , составляя величину $d = c\tau/2$. Обыч-

ная длительность импульса содара «Волна-3» $\tau = 0,15$ с. Взяв стандартную скорость звука $c = 330$ м/с (при температуре 0°C), получаем оценку $d = 25$ м. Таким образом, в некоторый момент времени содар получает информацию из объема атмосферы порядка $0,435 Z^2$ (м^3). Если еще учесть, что для получения оценок доплеровских сдвигов в спектре принятых сигналов требуется иметь выборку длительностью Δt , то продольный размер увеличивается еще на некоторую величину Δd . В приведенных ниже результатах шаг Δd обычно составлял 12–15 м. Это позволяло получать порядка 50 оценок V_r в диапазоне высот до 700 м. Технология получения таких оценок подробно изложена в [4, 5].

Чтобы выявить связь пульсаций горизонтальной составляющей скорости ветра $\mathbf{V}(Z)$ на разных высотных уровнях, была поставлена задача определения их коррелированности в зависимости от геофизических условий, от расстояния между уровнями измерений, от интервала оценивания, а также от времени предварительного осреднения. Кроме того, оценивались межуровневые корреляционные связи радиальных составляющих V_r скорости ветра. Использовались данные зондирования в разных географических районах: в пригороде Томска, на полигоне в степном районе и в прибрежной зоне оз. Байкал. Для оценки межуровневых корреляционных связей были выбраны измерения в относительно стационарных условиях, когда отсутствовали резкие изменения термодинамического состояния АПС. Рассматривались случаи температурных инверсий и развитой конвекции. На рис. 1 приведены типичные факсимильные записи амплитуды сигнала содара для устойчивой (а) и неустойчивой (б) температурной стратификации. Для соблюдения статистической обеспеченности получаемых данных исследовался в основном диапазон высот от 90 до

300 м. Для заполнения в первичных профилях V_r значений, отбракованных по тем или иным причинам на каком-либо уровне Z в момент t , использовалась процедура линейной (межуровневой) интерполяции, предварительно проверенная на модельных выборках. Проверка алгоритма интерполяции показала, что корреляционная функция сначала искусственно прореженного, а затем восстановленного с помощью линейной интерполяции профиля V_r в целом удовлетворительно согласовывалась с корреляционной функцией исходного профиля. Вычисления межуровневых корреляций проводились по формуле

$$\tilde{\rho}_V(Z_i, Z_l) = \frac{\tilde{K}_V(Z_i, Z_l)}{\sqrt{\tilde{D}(Z_i)\tilde{D}(Z_l)}}, \quad (1)$$

где

$$\tilde{K}_V(Z_i, Z_l) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n [V(Z_i, t_k) - \tilde{M}_V(Z_i)][V(Z_l, t_k) - \tilde{M}_V(Z_l)]$$

– корреляционный момент для пары высот Z_i и Z_l ; $\tilde{M}_V(Z_i)$ – математическое ожидание скорости ветра на высоте Z_i ; $\tilde{D}(Z_i)$ – дисперсии ветра на этой высоте; n – объем выборки (отвечает за длительность обрабатываемого интервала).

Прежде всего, были сопоставлены результаты содарных оценок с экспериментальными данными, приведенными в работе [2]. С этой целью строились корреляционные функции для каждого уровня Z_i по отношению к другим уровням Z_l в высотном диапазоне от 90 до 300 м. На рис. 2 представлены результаты сравнения для некоторых опорных уровней при типичных стратификациях АПС.

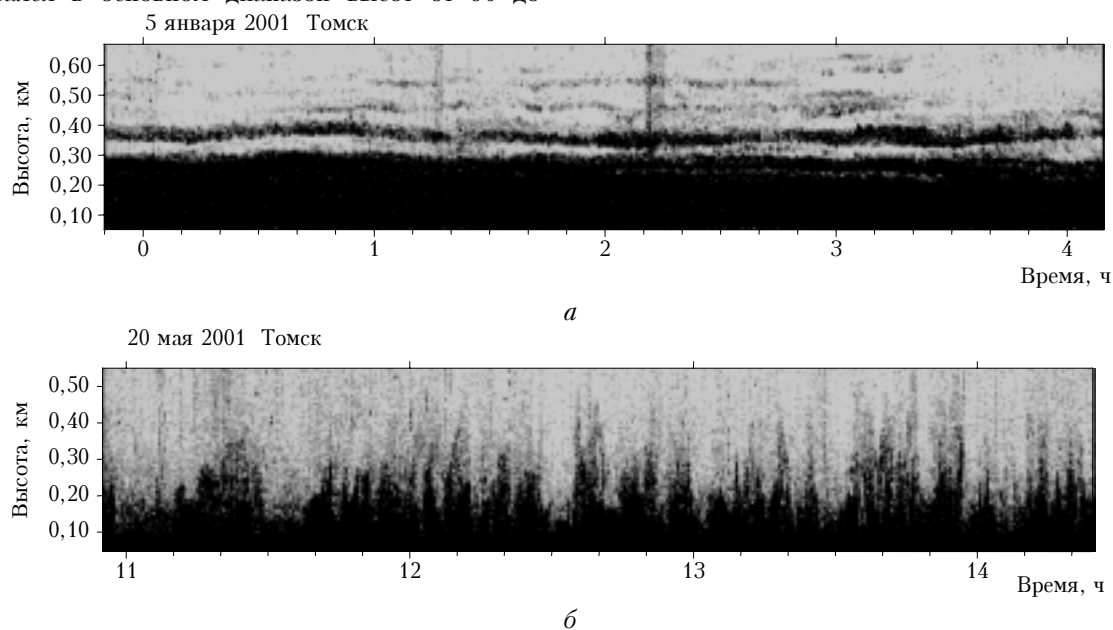


Рис 1. Типичные примеры факсимильных записей при различных типах стратификации (пригород Томска): а – зимняя инверсия; б – весенняя конвекция

Как видно из рис. 2, совпадение результатов, полученных разными средствами, вполне удовлетворительное, несмотря на то что измерения проводились в разных географических районах. Это позволяет надеяться на то, что оценки, получаемые из содарных измерений, могут давать корректное описание статистических характеристик динамических процессов в АПС. Следует отметить, что полученные на основе содарных измерений корреляционные связи не всегда подобны тем, которые приведены на рис. 2.

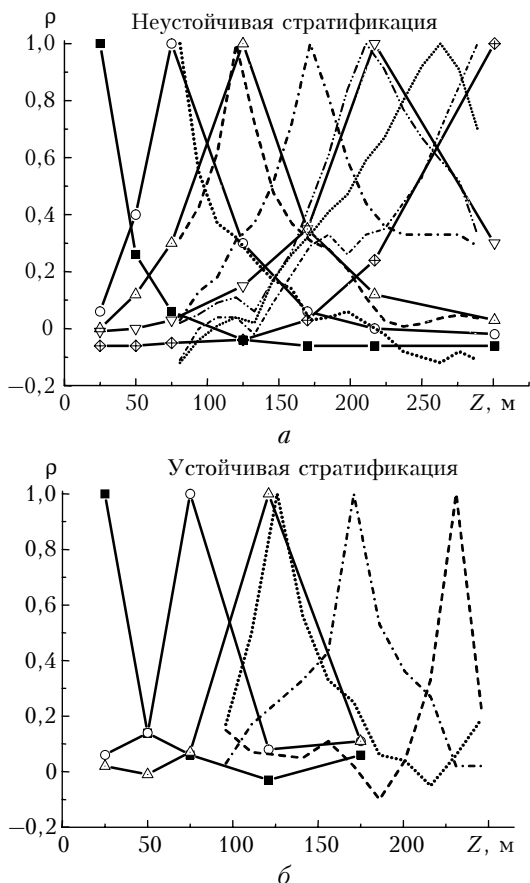


Рис. 2. Корреляции горизонтального ветра между различными уровнями в пограничном слое атмосферы при неустойчивой (а) и устойчивой (б) стратификациях по данным акустического зондирования (штриховые линии разного типа) и по данным метеорологической мачты в Обнинске (линии с символами)

Были исследованы межуровневые корреляционные связи радиальных составляющих скорости ветра по двум наклонным и одному вертикальному каналу зондирования, и проведено их сравнение с межуровневой корреляцией горизонтального ветра. Приведенные на рис. 3 типичные примеры подобного сравнения показывают, что корреляция несколько выше для радиальных составляющих скорости ветра по сравнению с горизонтальным ветром. При этом межуровневые корреляционные связи вертикального компонента скорости ветра слабее по сравнению со скоростью ветра в наклонных каналах зондирования.

Проверка связи корреляционных свойств радиальных составляющих скорости ветра с направлением набегающего потока не выявила устойчивых закономерностей. Для наглядности графического материала на рис. 3 приведены корреляционные функции только по отношению к одному опорному уровню $Z_0 = 170$ м.

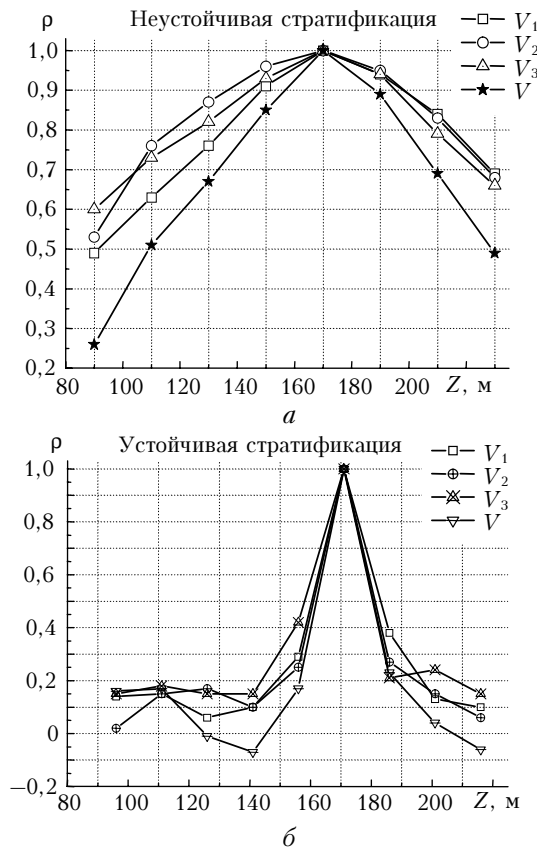


Рис. 3. Сравнение типичных корреляционных функций трех радиальных составляющих (V_1 – вертикальный канал зондирования, V_2 и V_3 – наклонные каналы) и горизонтального ветра V , полученных по интервалу времени 60 мин: а – развитая конвекция в степном районе; б – приземная инверсия температуры в пригороде Томска

Во всех рассмотренных выше примерах межуровневых корреляционных связей отчетливо наблюдается их зависимость от типа стратификации атмосферы: при устойчивой стратификации корреляционные связи быстрее спадают, чем при конвективных условиях. Этот же вывод формулируется и в [1, 2].

Одним из важных вопросов при оценивании корреляционных связей случайного потока ветра является выбор длительности обрабатываемого интервала для получения устойчивых статистических оценок. Были проведены вычисления корреляционных матриц по формуле (1) с разными интервалами оценивания (объемами выборки n). Интервалы составляли 2, 10, 30 и 60 мин. Анализируя полученные результаты, приходим к выводу, что вид корреляционных функций зависит от времени оценки, причем их разброс уменьшается с увеличением интервала. Так, если при обработке по 2-минутным

интервалам наблюдается довольно большой разброс этих функций, то при оценивании по 10 мин и более корреляции приобретают устойчивый характер. На рис. 4 приведены примеры корреляции по отношению к высоте $Z_0 = 170$ м, полученные по разным временным интервалам в условиях конвекции в пределах 1 ч.

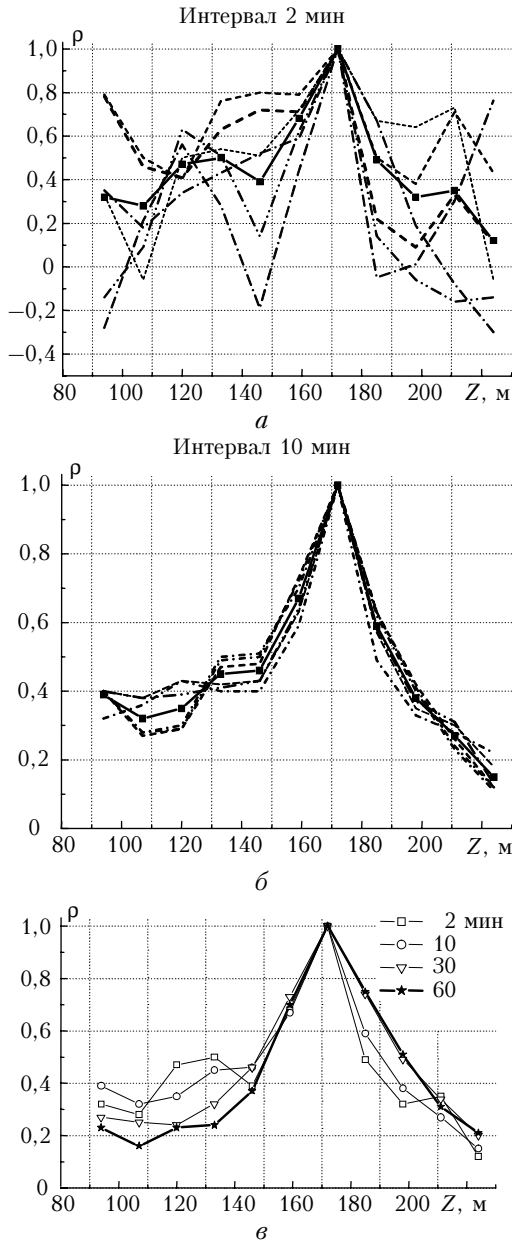


Рис. 4. Примеры поведения корреляционных кривых в зависимости от интервала оценки в условиях конвекции (измерения в пригороде Томска)

Рис. 4, а содержит результаты расчетов корреляционной матрицы (1) по 2-минутным интервалам. Приведены только несколько из 30 оценок межуровневой корреляции, а также их осредненное значение (сплошная линия с символами). На рис. 4, б показаны шесть оценок по 10-минутным интервалам, а также их осредненное значение (сплошная линия с символами). Очевидно, что устойчивость

оценок во втором случае гораздо выше, чем при 2-минутных интервалах осреднения. На рис. 4, в показаны средние значения, полученные по 2-, 10- и 30-минутным интервалам, а также по всему (часовому) интервалу времени.

Приведенные выше результаты характеризуют корреляционные связи потока ветра на какой-либо высоте с выше- и нижележащими уровнями. Корреляционные матрицы имеют определенную симметрию относительно опорного уровня, хотя корреляция с нижележащими несколько выше корреляции с вышележащими уровнями. Если не учитывать такую асимметрию корреляционных матриц, то можно оценить корреляционные связи пульсаций скорости ветра в зависимости от расстояния между слоями внутри АПС. С этой целью были оценены средние межслойные корреляционные функции модуля горизонтального ветра по формуле

$$B(rh) = \frac{1}{N-r} \sum_{i=1}^{N-r} \bar{\rho}_V(Z_i, Z_{i+r}), \quad r=0, 1, \dots, (N-1), \quad (2)$$

где h — шаг по высоте между уровнями при оценках скорости ветра; N — количество рассматриваемых уровней; r — номер шага; $\bar{\rho}_V$ — элемент, вычисляемой по формуле (1) корреляционной матрицы, оценивающий степень корреляции пульсаций скорости ветра между уровнями Z_i и Z_{i+r} . На рис. 5 приведены типичные примеры межслойных корреляционных функций при устойчивой и неустойчивой стратификации для различных районов наблюдений. Очевидно, что корреляция в конвективных условиях выше, чем в инверсионных.

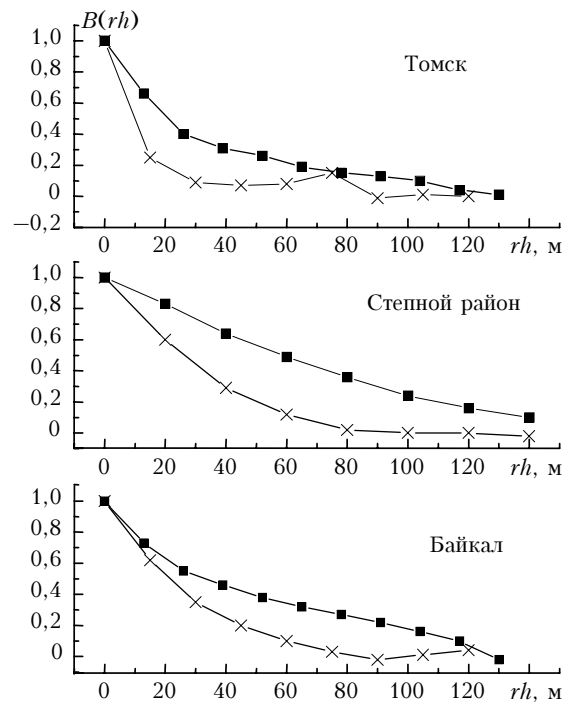


Рис. 5. Корреляционные функции для устойчивой (крестики) и неустойчивой (квадраты) стратификаций. Интервал оценки корреляционных связей 60 мин

Немаловажным является вопрос о том, как влияет на корреляционные связи предварительное осреднение данных. В работе [6] были получены корреляционные матрицы продольной скорости ветра при устойчивом и неустойчивом состояниях атмосферы по осредненным за 10 мин данным, взятым с Обнинской метеомачты. Мы провели подобные вычисления по содарным измерениям в соответствующих геофизических условиях и затем сопоставили наши результаты с результатами работы [6]. Сравнение показывает (рис. 6), что поведение корреляционных функций достаточно однотипно.

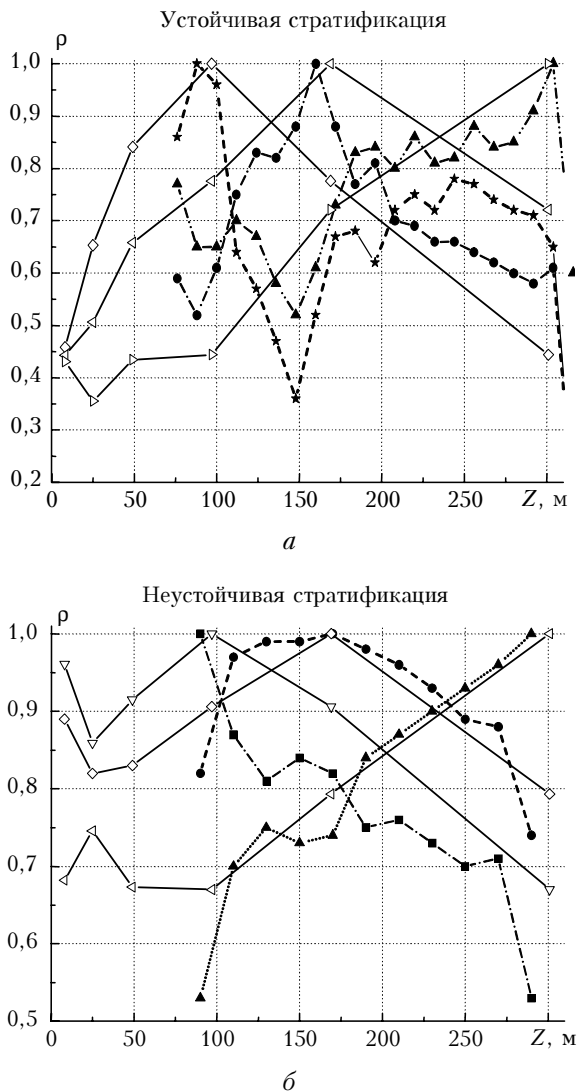


Рис. 6. Корреляции горизонтального ветра между различными уровнями в пограничном слое атмосферы при устойчивой и неустойчивой стратификациях по предварительно осредненным за 10 мин данным акустического зондирования (штриховые линии разного типа с символами) и метеорологической мачты в г. Обнинске (линии с символами)

Анализ результатов обработки большого массива данных свидетельствует о том, что корреляционные связи, построенные по осредненным данным,

гораздо выше, чем по мгновенным, и это легко объяснимо: предварительно усредняя данные, мы фактически отфильтровываем мелкомасштабные флуктуации, вносящие существенные случайные составляющие и понижающие степень корреляции скорости ветра на разных уровнях. Пример сравнения корреляционных функций при предварительном 10-минутном осреднении и без него приведен на рис. 7.

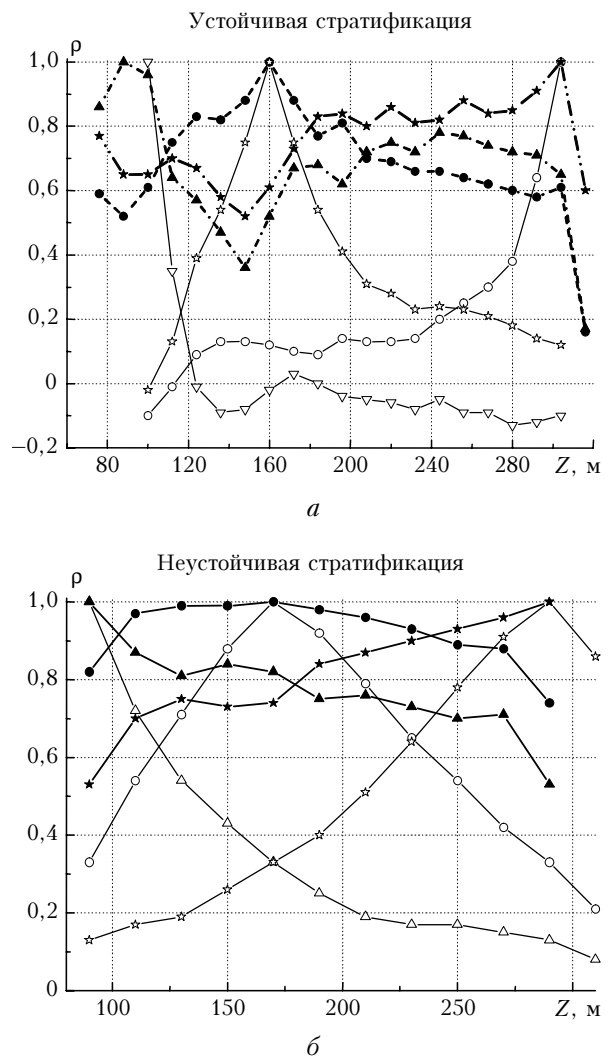


Рис. 7. Корреляционные функции, построенные по осредненным за 10 мин (штриховые линии с символами) и мгновенным (сплошные линии с символами) данным о скорости ветра в различных геофизических условиях. Общий интервал оценки 180 мин

Подводя итог, подчеркнем, что на данном этапе работы мы не ставили цель детального исследования межуровневых корреляционных связей скорости ветра и их параметризации в зависимости от различных геофизических условий. Основными задачами являлись отработка технологии проведения соответствующих оценок на основе содарных данных и их сравнение с результатами других технических средств диагностики. Дальнейшая работа

будет заключаться в поиске параметризирующих функций и их анализе.

Авторы выражают благодарность В.А. Федорову за полезные обсуждения представленных в статье материалов.

1. Волковицкая З.И., Иванов В.Н. Высотно-временные корреляции в пограничном слое атмосферы // Метеорол. и гидрол. 1972. № 2. Р. 25–31.
2. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 264 с.

3. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А. Акустический доплеровский содар «Волна-3» // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 437–444.
4. Федоров В.А. Измерение содаром «Волна-3» параметров радиальных компонент вектора скорости ветра // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 2. С. 151–155.
5. Федоров В.А. К измерению содаром параметров продольных и поперечных компонент горизонтальной скорости ветра // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 913–920.
6. Багаев Ю.М., Матвеев Л.Т. О статистических закономерностях распределения скорости ветра в пограничном слое атмосферы // Метеорол. и гидрол. 1973. № 1. С. 20–27.

I.V. Nevzorova, S.L. Odintsov. Correlation of wind velocity components in the atmospheric boundary layer.

The inter-level correlations of the horizontal wind velocity have been estimated based on the data of acoustic sounding of the atmospheric boundary layer in different regions. The relation of the correlation to the type of stratification, the separation between levels, observation intervals, and the time of data pre-averaging has been analyzed. It has been shown, in particular, that the inter-level correlation under the convective conditions is higher than in the case of stable stratification. Sodar observations have been compared with the data of other authors.