

А.В. Лавриненко, С.Н. Ильин, В.А. Гладких, В.С. Комаров, А.В. Креминский,
И.В. Невзорова, Ю.Б. Попов, А.И. Попова, В.А. Федоров

Исследование временной корреляции ортогональных составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы по данным акустического зондирования

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 15.07.2005 г.

Обсуждаются результаты статистического анализа временной корреляции мгновенных и осредненных (по 0,5-, 2-, 10-, 20- и 30-минутным интервалам) значений горизонтальных составляющих скорости ветра, измеренной в различных регионах с помощью трехканального доплеровского содара «Волна-3». Наряду с рассмотрением особенностей временных корреляционных функций горизонтальных составляющих скорости ветра приводятся их аппроксимации с помощью найденных аналитических выражений.

Введение

Внедрение в практику мониторинга окружающей среды эффективных средств дистанционного зондирования, и особенно лазерного и акустического зондирования, открыло широкие возможности для детального изучения структуры и динамики пограничного слоя атмосферы (ПСА), в том числе и для исследования временной корреляции мгновенных и осредненных (по различным интервалам времени) значений скорости ветра на разных высотных уровнях. Важным обстоятельством при этом является то, что сведения о подобной корреляции необходимы не только для изучения особенностей поведения микроколебаний и осредненных значений скорости ветра в ПСА для малых временных сдвигов (от несколько минут до нескольких часов), но и для обеспечения реализации ряда практических задач. К ним, в частности, можно отнести задачи ноукастинга и сверхкраткосрочного прогноза поля ветра (т.е. прогноза с заблаговременностью до 1 ч и от 2 до 12 ч соответственно [1]), проводимого на основе динамико-стохастического подхода в интересах метеорологического обеспечения мониторинга атмосферных загрязнений на ограниченной территории (например, в пределах большого города).

Следует также отметить, что до сих пор временная корреляция мгновенных и осредненных значений ортогональных составляющих скорости ветра в ПСА для малых сдвигов во времени (от одной до нескольких десятков минут) еще слабо изучена. Неизвестны нам и работы по проблеме параметризации временных корреляционных функций ортогональных составляющих скорости ветра для малых сдвигов во времени.

С учетом этого в настоящей статье обсуждаются результаты анализа и параметризации временных корреляционных функций ортогональных со-

ставляющих скорости ветра, рассчитанных для ее мгновенных и осредненных значений, которые были получены по данным акустического зондирования пограничного слоя атмосферы в районе г. Томска и в прибрежной зоне оз. Байкал.

1. Некоторые методические вопросы и характеристика исходного материала

Известно, что всякую случайную функцию времени рассматривают обычно с точки зрения возможности ее считать стационарной [2]. При этом для атмосферных случайных процессов предположение об их стационарности оправдывается лишь для сравнительно небольших интервалов времени и оно не выполняется при увеличении этих интервалов. В нашем случае вычисления временных нормированных корреляционных функций ортогональных составляющих (зонального U и меридионального V компонентов) скорости ветра проводились на малых интервалах времени (порядка 3 ч), для которых предполагались эргодичность процесса и его стационарность в широком смысле (постоянство средних и дисперсий).

Поэтому для расчета нормированных корреляционных (в дальнейшем просто корреляционных) функций $\mu_{\xi}(\tau_k)$ можно использовать формулу, записанную для стационарного процесса в виде [2, 3]:

$$\hat{\mu}_{\xi}(\tau_k) = \frac{1}{N-k} \frac{\sum_{i=1}^{N-k} [\xi(t_i) - \hat{m}_{\xi}][\xi(t_i + \tau_k) - \hat{m}_{\xi}]}{\hat{\sigma}_{\xi}^2}, \quad (1)$$

где \hat{m}_{ξ} и $\hat{\sigma}_{\xi}^2$ — оценки среднего и дисперсии метеорологической величины ξ ; $\tau_k = k\Delta t$ ($k = 0, 1, 2, \dots, m$) —

Исследование временной корреляции ортогональных составляющих скорости ветра в пограничном слое... 49

сдвиг во времени; $\xi(t_i)$ и $\xi(t_i + \tau_k)$ – члены последовательности наблюдений за метеорологической величиной ξ (в нашем случае за U и V); $t_i = i\Delta t$ и $t_i + \tau_k = (i + k)\Delta t$ (здесь Δt – интервал между соседними членами временного ряда); N – число членов временного ряда.

Вычисления нормированных корреляционных функций $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$ проводились (следуя [2]) по независимым десятичасовым реализациям ортогональных компонентов скорости ветра $U(i\Delta t)$ и $V(i\Delta t)$, которые на этих временных интервалах можно считать стационарными [3]. Далее, полагая примерную однотипность $\mu_U(\tau_k)$, $\mu_V(\tau_k)$ для конкретного анализируемого термодинамического состояния атмосферы, мы осуществляли усреднение получаемых выборочных значений $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ и $\hat{\mu}_V(\tau_k)$. Для минимизации влияния возможного суточного хода $U(i\Delta t)$, $V(i\Delta t)$ на $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ и $\hat{\mu}_V(\tau_k)$ их расчет проводился до максимального временного сдвига τ_k , не превышающего 3 ч.

Следует обратить внимание на еще одно важное обстоятельство, отмеченное также в [2]. На вычисление $\mu_\xi(\tau_k)$ оказывает большое влияние наличие белого шума $n(t)$ в обрабатываемых данных. Это может приводить к значительным систематическим ошибкам оценивания $\mu_\xi(\tau_k)$, а именно к существенному занижению при $\tau_k > 0$ рассчитанных $\hat{\mu}_\xi(\tau_k)$ относительно их истинных значений. В данном случае в качестве $n(t)$ выступают главным образом случайные ошибки $\varepsilon_U(i\Delta t)$, $\varepsilon_V(i\Delta t)$ измерения содаром ветровых компонентов $U(i\Delta t)$ и $V(i\Delta t)$. Их дисперсии $D(\varepsilon_U)$ и $D(\varepsilon_V)$ определяются в основном уровнями и флуктуациями принятого из атмосферы акустического сигнала и окружающего шума, т.е. достигаемыми во время измерений отношениями сигнал-шум. Искажающее влияние ε_U и ε_V может быть устранено при анализе скачков $\hat{\mu}_\xi(k\Delta t)$ при $k = 0$ [2]. Для этого необходимо провести аппроксимацию $\hat{\mu}_\xi(k\Delta t)$ вблизи нулевых временных сдвигов с дальнейшей экстраполяцией в точку $\tau_k = 0$.

В данной статье для компенсации систематических ошибок определения $\mu_\xi(\tau_k)$ мы используем другой подход, более простой и лучше приспособленный для реализации оперативного ветрового прогноза. Он заключается в проведении предварительного осреднения текущих значений $\xi(i\Delta t)$ за время T_m . Например, для четного M

$$\xi_m(iT_m) = \frac{1}{M} \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \xi[(i+m)\Delta t], \quad (2)$$

где $M = T_m/\Delta t$ – число усредняемых отсчетов $\xi(i\Delta t)$. При реализации (2) в M раз уменьшается дисперсия белого шума $n(t)$, что в итоге приводит к уменьшению смещения оценки (1) (при замене ξ на ξ_m и Δt на T_m) относительно истинных значений $\mu_\xi(\tau_k)$. Также происходит подавление вклада мел-

комасштабной турбулентности в оценку $\mu_\xi(\tau_k)$. Этот высокочастотный турбулентный диапазон не информативен при прогнозировании поля скорости ветра и поэтому не является предметом наших исследований (значения ветра, соответствующие данному диапазону, практически некоррелированы за интервалом времени 20–70 с [4]). Однако чрезмерно большие значения T_m могут приводить к подавлению и анализируемых нами мезомасштабных компонентов. В итоге полученные $\hat{\mu}_\xi(\tau_k)$ также будут искажены. В частности, при определенных соотношениях между T_m , радиусом корреляции исследуемых процессов и уровнем белого шума в них величины $\hat{\mu}_\xi(\tau_k)$ будут уже завышены относительно истинных значений $\mu_\xi(\tau_k)$. Следовательно, существует проблема выбора оптимального интервала осреднения T_m . В [5] для модуля скорости ветра рекомендуется выбирать T_m порядка 10–20 мин.

В связи с тем что в нашем случае используется не модуль скорости ветра, а его ортогональные составляющие, вопрос выбора интервала осреднения T_m для этих составляющих остается открытым. Поэтому нами в данной статье применительно к ортогональным составляющим скорости ветра проведено исследование по выбору оптимального интервала осреднения T_m , который позволяет получать для U - и V -компонентов наиболее устойчивые корреляционные функции $\mu_\xi(\tau_k)$ (с точки зрения возможности их применения в задаче ноукастинга и сверхкраткосрочного прогноза поля ветра).

Наряду с исследованием временной корреляции ортогональных составляющих скорости ветра была проведена также и аналитическая аппроксимация соответствующих корреляционных функций. Здесь следует подчеркнуть, что имеется ряд аналитических выражений для аппроксимации временных корреляционных функций (см., например, [2]), но ни одно из них не подходит для описания полученных нами эмпирических зависимостей, поскольку они относятся к макромасштабным процессам. Поэтому были проведены исследования по выбору таких аппроксимирующих выражений, которые позволяли бы адекватно описать ход эмпирических корреляционных функций $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ и $\hat{\mu}_V(\tau_k)$ в области мезомасштаба (т.е. в области с характерным временем процессов от десятков минут до часов [6]).

В заключение остановимся коротко на описании исходного материала, использованного для вычисления эмпирических временных корреляционных функций ортогональных составляющих (U - и V -компонентов) скорости ветра в пограничном слое атмосферы. С этой целью были использованы данные о микроколебаниях скорости ветра с временным интервалом между последовательными измерениями порядка 15–17 с, полученные в районе г. Томска и в прибрежной зоне оз. Байкал с помощью трехканального доплеровского содара ИОА СО РАН «Волна-3» (описание этого содара дается в [7], а специфика его работы рассматривается

в [8]). Сразу подчеркнем, что для оценки временных корреляционных связей ортогональных составляющих скорости ветра были использованы соударные измерения в относительно стационарных условиях, т.е. при отсутствии резких изменений термодинамического состояния пограничного слоя атмосферы. Нами рассматривались случаи устойчивой (температурные инверсии) и неустойчивой (развитая конвекция) стратификаций атмосферы, взятые только для района г. Томска, поскольку для прибрежной зоны оз. Байкал, где из-за сложной местной циркуляции отмечаются очень низкие корреляционные связи, такое разделение не имеет никакого смысла.

Объем исходных выборок, использованных для вычисления временных корреляционных функций для района г. Томска, составил по 5000 измерений для условий устойчивой и неустойчивой стратификаций, а для прибрежной зоны оз. Байкал – порядка 10000 измерений.

Следует также отметить, что оценка временных корреляционных функций проводилась для четырех высотных уровней (100, 150, 200 и 250 м) в районе г. Томска и трех уровней (100, 150 и 200 м) в прибрежной зоне оз. Байкал. Кроме того, для оценки указанных функций наряду с мгновенными значениями были использованы и осредненные значения ортогональных составляющих скорости ветра, рассчитанные для разных интервалов осреднения $T_m = 0,5, 1, 2, 10, 20, 30$ мин. Это позволило решить важные (с практической точки зрения) вопросы о том, как влияет на временные корреляционные связи ветра процедура осреднения исходных данных и каков при этом оптимальный интервал такого осреднения.

2. Особенности временной корреляции мгновенных и осредненных значений скорости ветра в зависимости от типа температурной стратификации

В данном разделе основное внимание будет уделено изложению результатов статистического анализа временных корреляционных связей мгновенных и осредненных (по 0,5-, 1-, 2-, 10-, 20- и 30-минутным интервалам) значений ортогональных составляющих скорости ветра, оцененных для пограничного слоя атмосферы (до высоты 250 м) в зависимости от типа температурной стратификации.

Прежде всего рассмотрим поведение эмпирических временных корреляционных функций, рассчитанных по мгновенным и осредненным (по 0,5- и 1-минутным интервалам) значениям U - и V -компонентов, которые получены для района г. Томска в условиях устойчивой стратификации атмосферы. На рис. 1 в качестве примера приведены временные корреляционные функции U - и V -компонентов скорости ветра, построенные по данным микроколебаний ветра, измеренных соударом на высоте 150 м с интервалом 15 с между последовательными отсче-

тами, а также по осредненным (за 0,5 и 1 мин) данным.

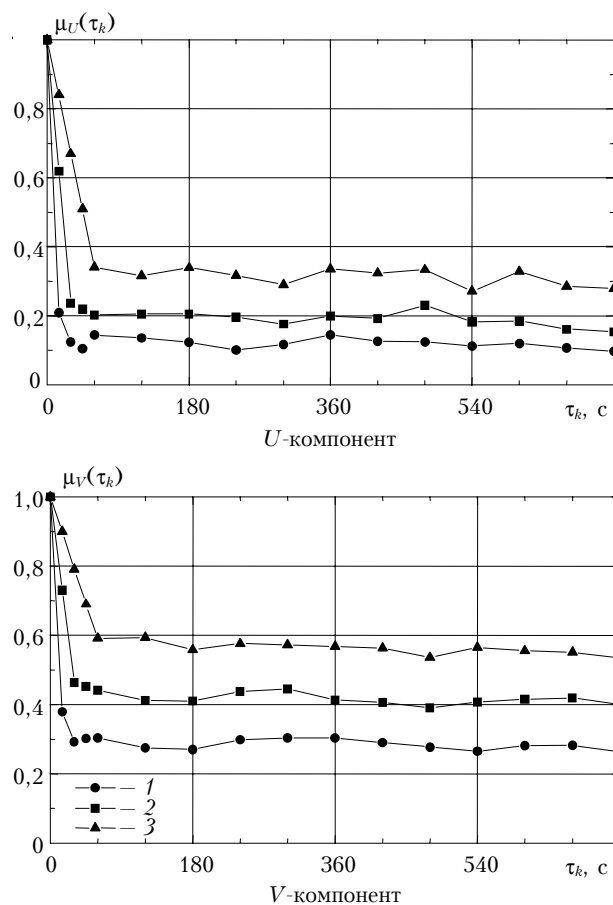


Рис. 1. Временные корреляционные функции ортогональных составляющих скорости ветра, построенные для высоты 150 м по мгновенным (1), осредненным за 0,5 (2) и 1 мин (3) данным акустического зондирования в районе г. Томска

Из анализа рис. 1 можно сделать вывод о существенном влиянии случайных ошибок измерения U - и V -компонентов на оценки $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$. Это подтверждается резким уменьшением значений временных корреляционных функций вблизи $\tau_k = 0$, что характерно для оценок, искаженных белым шумом [2]. Заметим, что при неустойчивой стратификации атмосферы, т.е. при наличии конвекции, характер временной корреляционной связи мгновенных и осредненных ($T_m = 0,5$ и 1 мин) значений ортогональных составляющих скорости ветра не изменяется. Очевидно, что интервал $T_m = 1$ мин ($M = 4$) не обеспечивает нейтрализацию систематических ошибок оценки искомым коэффициентов корреляции.

На рис. 2 и 3 представлены примеры эмпирических временных корреляционных функций U - и V -компонентов скорости ветра при устойчивой и неустойчивой стратификации при увеличении интервала осреднения до 2, 10 и 30 мин. Отмеченные выше резкие уменьшения значений $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ и $\hat{\mu}_V(\tau_k)$

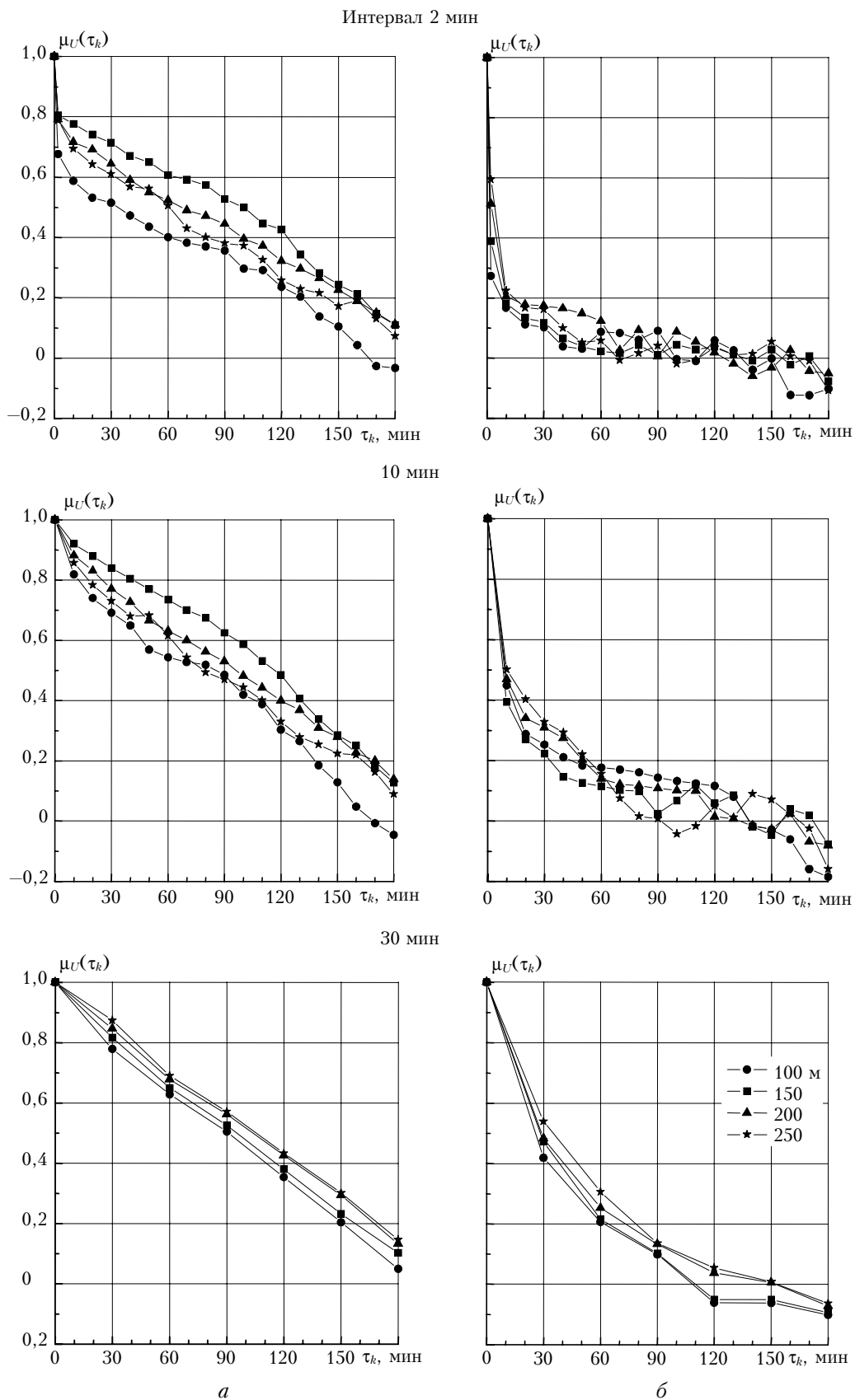


Рис. 2. Временные корреляционные функции U -компонента скорости ветра, построенные для условий устойчивой (*a*) и неустойчивой (*б*) стратификации по предварительно осредненным за различные интервалы времени данным содарных наблюдений в районе г. Томска

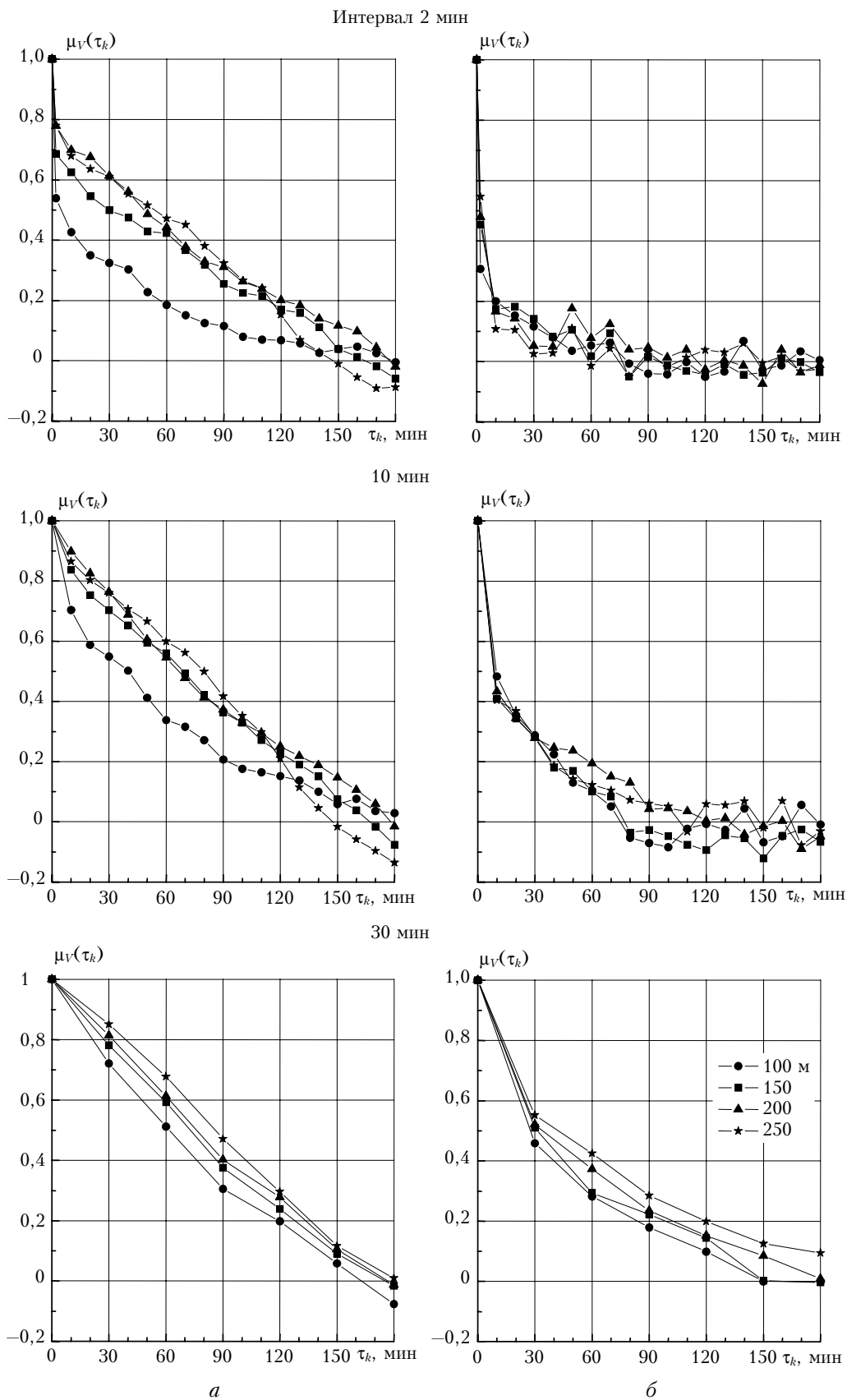


Рис. 3. Временные корреляционные функции V -компонента скорости ветра, построенные для условий устойчивой (*a*) и неустойчивой (*б*) стратификации по предварительно осредненным за различные интервалы времени данным содарных наблюдений в районе г. Томска

вблизи $\tau_k = 0$, хотя и менее выраженные, наблюдаются и при времени усреднения 2 мин ($M = 8$), что также свидетельствует о недостаточной величине данного T_m . Подобный характер поведения $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ и $\hat{\mu}_V(\tau_k)$ уже не отмечается при приближении T_m к 10 мин. При этом вид временных корреляционных связей сохраняется для каждой из рассматриваемых высот практически неизменным при увеличении T_m до 30 мин. Но он заметным образом зависит от типа температурной стратификации, что следует из анализа рис. 2 и 3. Главным является то, что при устойчивой стратификации атмосферы значения $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$ достигают нуля в среднем за время примерно 2,5–3 ч, а при неустойчивой за 1,5–2 ч.

При $T_m > 30$ мин происходят искажения $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$ за счет факторов, кратко рассмотренных в предыдущем разделе. Это утверждение основано на результатах сравнения с $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$, полученных при реализации вышеотмеченной методики [2], т.е. при аппроксимации выборочных значений $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ и $\hat{\mu}_V(\tau_k)$ вблизи малых $\tau > 0$ и их экстраполяции в точку $\tau = 0$.

Данный способ позволяет нейтрализовать смещающее воздействие измерительных шумов на оценки искомых временных корреляционных функций без искажения их частотных компонентов. Флуктуации же $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ и $\hat{\mu}_V(\tau_k)$ уменьшаются при дальнейшем усреднении по ансамблю. При этом выборочно использовались как исходные реализации $U(i\Delta t)$, $V(i\Delta t)$, так и осредненные по 0,5- и 1-минутным интервалам, где еще не происходит подавления анализируемых мезомасштабных ветровых компонентов. Полученные $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$ далее сравнивались с вычисленными основным способом с помощью (2) при $T_m = 2, 10, 20, 30, 40$ мин. Преимущественно такой процедуре подвергались U - и V -компоненты, соответствующие устойчивой стратификации атмосферы (рис. 4).

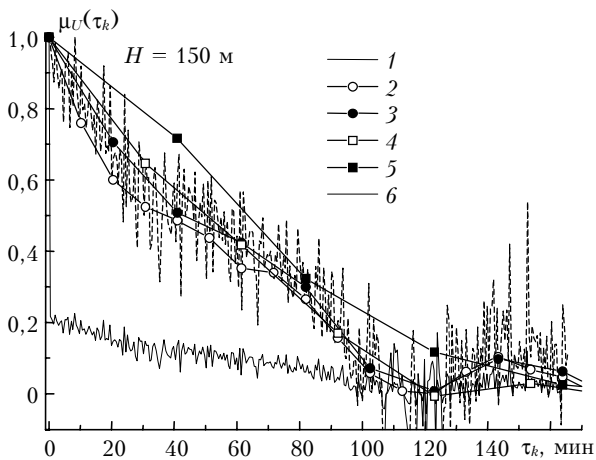


Рис. 4. Сравнение эмпирических корреляционных функций U -компонента скорости ветра, полученных при различных интервалах осреднения T_m : 0,5 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4) и 40 мин (5), по методике [2] (6)

В результате отмечено, что чаще всего (при обычно достигаемых во время измерений отношениях сигнал-шум) наибольшей близости коэффициентов $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$, рассчитанных двумя способами, соответствовала величина $T_m = 20$ мин. При увеличении отношения сигнал-шум, что проявляется в уменьшении пропусков ветровых данных [5], наилучшие совпадения наблюдались при $T_m = 10$ мин, а при уменьшении — $T_m = 30$ мин. Использование же $T_m = 2$ мин должно сопровождаться процедурой нейтрализации остатков белого шума [2] после применения (2).

Часть вышеизложенного хорошо иллюстрирует рис. 4, где в качестве примера показаны выборочные корреляционные функции $\hat{\mu}_U(\tau_k)$, которые получены для высоты 150 м при использовании различных интервалов осреднения T_m текущих значений $U(i\Delta t)$ и соответствуют устойчивой стратификации атмосферы, наблюдаемой 4 января 2000 г. в районе г. Томска. Здесь же приводится точечная кривая, которая показывает результат восстановления (по методике [2]) корреляционной функции $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ из предварительно рассчитанной $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ при $T_m = 0,5$ мин. Поведение $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ характеризуется сильными флуктуациями, что является следствием наличия большого уровня белого шума в обрабатываемых данных. В этом конкретном случае отношение сигнал-шум по мощности составляло всего 0,29. Достаточно сложному среднему ходу $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ лучше всего соответствует $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ при $T_m = 20$ мин. Удовлетворительное согласие наблюдается при $T_m = 10$ и 30 мин. Использование же $T_m = 40$ мин, из-за чрезмерного подавления частотных компонентов, присутствующих в исходной выборке $U(i\Delta t)$, характеризуется заметными искажениями $\hat{\mu}_U(\tau_k)$ относительно $\hat{\mu}_U(\tau_k)$.

В отличие от района Томска, расположенного на территории с достаточно устойчивыми геофизическими условиями, ветровой режим в прибрежной зоне оз. Байкал характеризуется значительной неустойчивостью как во времени, так и по высоте, что связано с локальными особенностями атмосферной циркуляции в пункте наблюдений [9]. Поэтому временные корреляционные связи осредненных (за 2, 10, 20 и 30 мин) значений ортогональных составляющих скорости ветра в прибрежной зоне оз. Байкал имеют заметные отличия от подобных связей, установленных при устойчивой стратификации для района г. Томска (они близки к корреляционным связям в условиях неустойчивой стратификации). Для иллюстрации подобных отличий воспользуемся рис. 5, на котором в качестве примера приведены временные корреляционные функции U - и V -компонентов, построенные для прибрежной зоны оз. Байкал по данным осредненных (за 2, 10 и 30 мин) значений скорости ветра на разных высотах (100, 150 и 200 м).

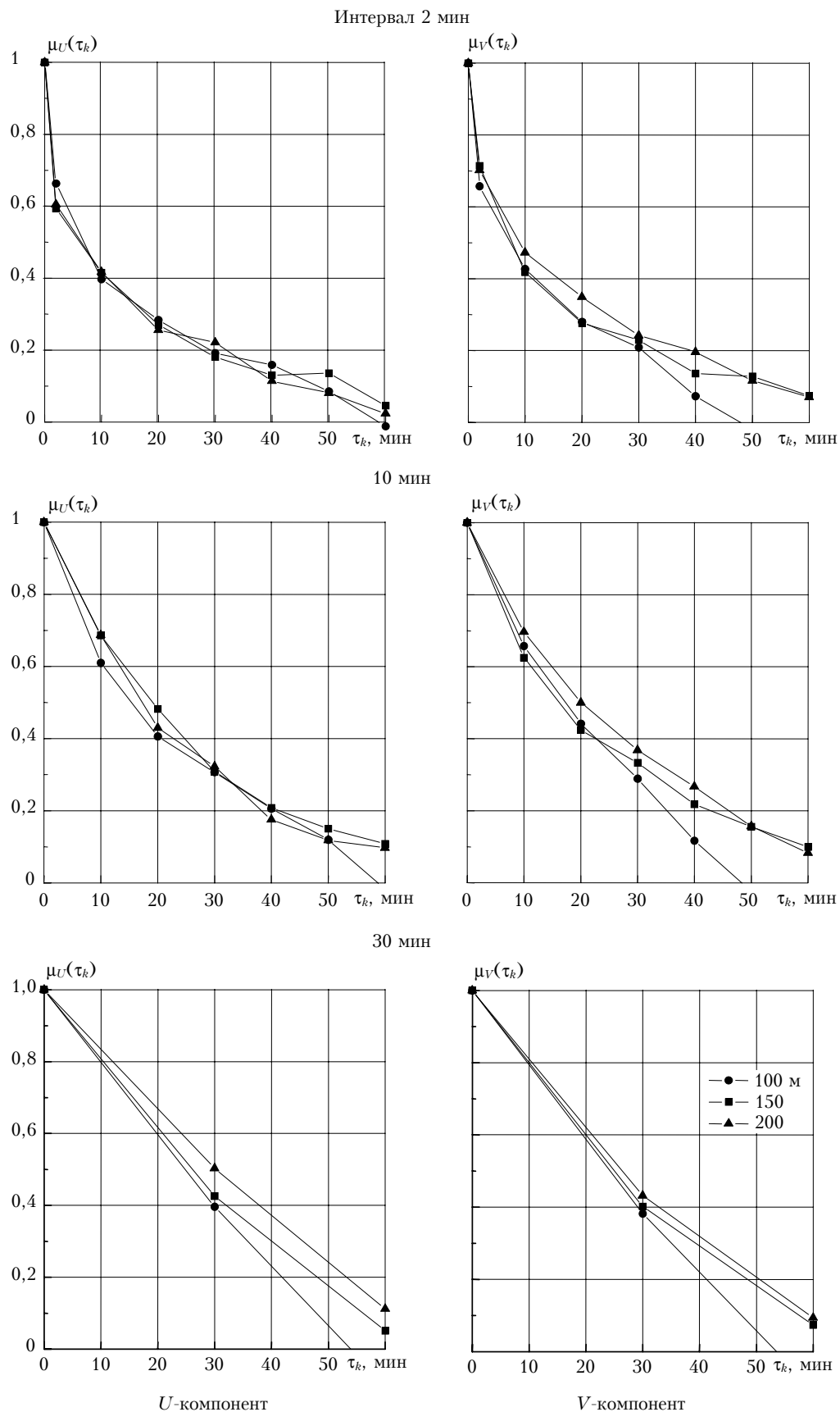
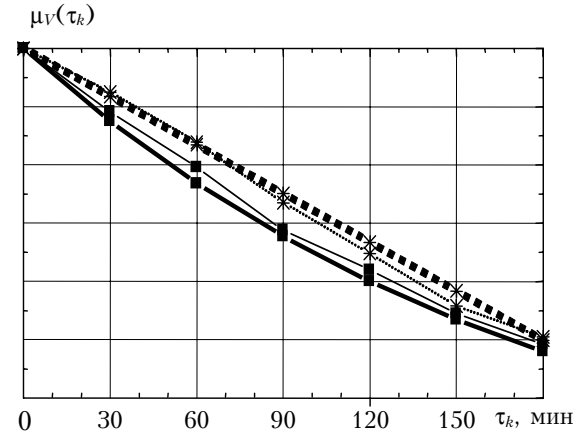
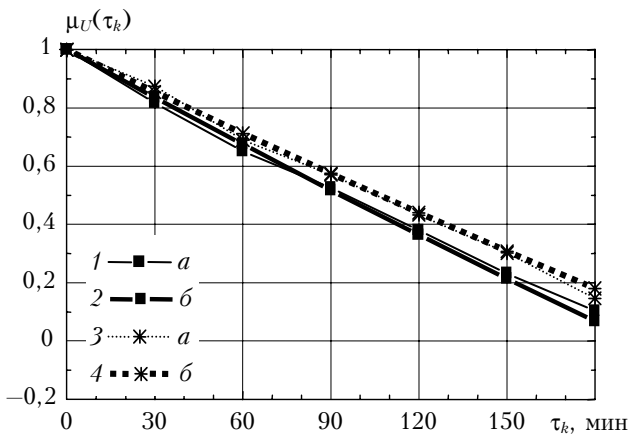


Рис. 5. Временные корреляционные функции ортогональных составляющих скорости ветра, построенные по данным содарных наблюдений, осредненных за различные интервалы времени. Прибрежная зона оз. Байкал

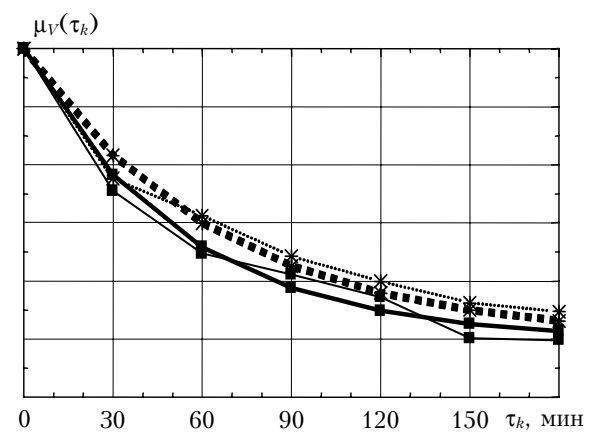
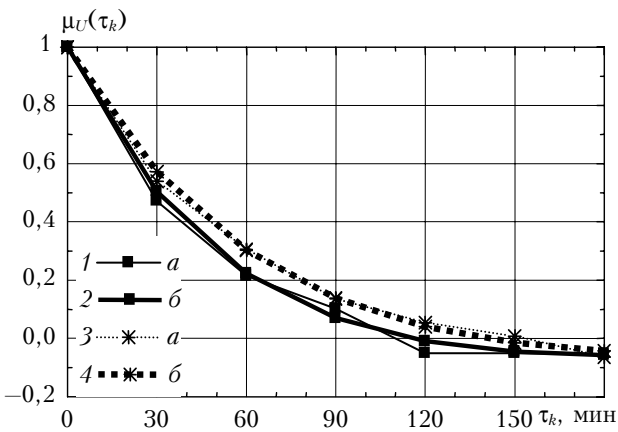
г. Томск, условия устойчивой стратификации

U -компонент

V -компонент



г. Томск, условия неустойчивой стратификации



Прибрежная зона оз. Байкал

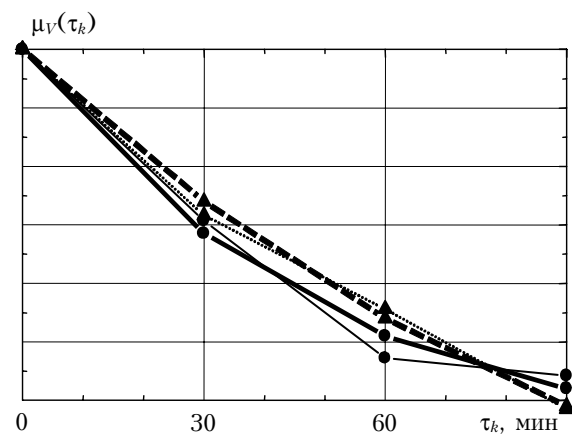
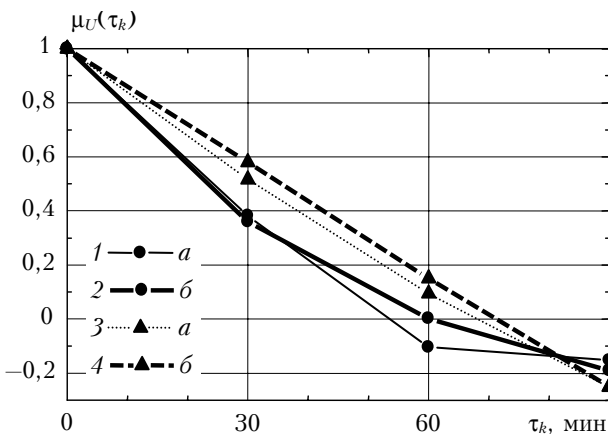


Рис. 6. Эмпирические (a) и аппроксимированные (b) временные корреляционные функции U - и V -компонентов скорости ветра, построенные по усредненным за 30-минутный интервал времени данным содарных наблюдений для высот 150 (1, 2) и 250 (3, 4) (г. Томск), 100 (1, 2) и 200 м (3, 4) (прибрежная зона оз. Байкал)

Из анализа рис. 5 следует, что:

- временные корреляционные связи U - и V -компонентов, полученные по осредненным (за 2 мин) данным, уже при сдвиге $\tau_k = 30$ мин гораздо слабее, чем те же связи, но определенные по данным акустических измерений в районе г. Томска при устойчивой стратификации (см. рис. 2,а и 3,а). Действительно, независимо от составляющих коэффициентов корреляции при временном сдвиге $\tau_k = 30$ мин и интервале осреднения $T_m = 2$ мин составляют в прибрежной зоне оз. Байкал лишь 0,18–0,24, а в районе г. Томска при устойчивой стратификации они находятся на уровне 0,50–0,71;

- при увеличении интервала осреднения до 10, 20 и 30 мин значения коэффициентов временной корреляции U - и V -компонентов скорости ветра, рассчитанных по данным содарных измерений в прибрежной зоне оз. Байкал, заметно возрастают. Так, например, для того же временного сдвига $\tau_k = 30$ мин и интервала осреднения $T_m = 30$ мин значения коэффициентов корреляции $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$ независимо от высоты увеличиваются до 0,39–0,51;

- с увеличением временного сдвига τ_k более 30 мин коэффициенты корреляции U - и V -компонентов скорости ветра довольно быстро уменьшаются по своей величине (это характерно для всех взятых интервалов осреднения) и уже при $\tau_k = 60$ мин приближаются к нулю или даже переходят через него.

В заключение следует отметить, что анализ всех полученных данных позволяет также констатировать: в качестве оптимального интервала осреднения для достоверного оценивания нормированных корреляционных функций U - и V -компонентов скорости ветра по содарным данным целесообразно использовать, причем независимо от региона, типа температурной стратификации и высотного уровня, интервал T_m , равный примерно 20 мин. При этом допустимы значения $T_m = 10$ и 30 мин, которые можно считать нижней и верхней границей использования временных осреднений при решении поставленных в статье задач.

3. Некоторые результаты параметризации временных корреляционных функций U - и V -компонентов скорости ветра

На практике обычно применяются не сами эмпирические временные корреляционные функции $\mu_\xi(\tau_k)$, а некоторые аналитические выражения, аппроксимирующие эти функции. С учетом данного обстоятельства нами была сделана попытка найти такие аналитические выражения, которые позволили бы описать эмпирические временные корреляционные функции U - и V -компонентов скорости ветра, полученные для пограничного слоя атмосферы по данным содарных измерений.

Здесь следует подчеркнуть, что аналитической аппроксимации в полном объеме были подвержены только те корреляционные функции $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$, которые были получены по осредненным (за 10, 20 и 30 мин) данным, т.е. из диапазона рекомендуемых T_m . Для двух случаев в качестве сравнения приведены указанные аппроксимации для $T_m = 2$ мин.

В результате проведенных исследований установлено, что для аппроксимации эмпирических временных корреляционных функций $\mu_U(\tau_k)$ и $\mu_V(\tau_k)$, полученных по осредненным (за 2, 10, 20 и 30 мин) данным, можно использовать единое (независимо от составляющей скорости ветра, региона и интервала осреднения) аналитическое выражение вида

$$\mu_\xi(\tau_k) = [\exp(-\alpha\tau_k)](1 - \beta\tau_k). \quad (3)$$

Здесь α и β – эмпирические коэффициенты; τ_k – сдвиг во времени, где $\tau_k = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, k\Delta t$, а $\Delta t = t_{i+1} - t_i = \text{const}$ – интервал между соседними членами временного ряда.

О значениях коэффициентов α и β можно судить из таблицы.

Интервал осреднения, мин	α	β
<i>Район г. Томска. Устойчивая стратификация</i>		
2	0,0147	0,0036
10, 20, 30	0,0068	0,0047
<i>Район г. Томска. Неустойчивая стратификация</i>		
10, 20, 30	0,0260	0,0100
<i>Прибрежная зона оз. Байкал</i>		
2	0,0650	0,0003
10, 20, 30	0,0153	0,0157

Использование аналитического выражения (3) и соответствующих эмпирических коэффициентов, приведенных в таблице, позволяет описать эмпирические временные корреляционные функции U - и V -компонентов скорости ветра с абсолютной погрешностью, не превышающей в основном 0,05–0,10. Этот вывод подтверждается и рис. 6, на котором в качестве примера дается сравнение эмпирических корреляционных функций U - и V -компонентов скорости ветра, рассчитанных при $T_m = 30$ мин по данным Томска (для устойчивой и неустойчивой стратификаций) и наблюдениям в прибрежной зоне оз. Байкал, с соответствующими аналитическими функциями, построенными с помощью выражения (3).

Таким образом, полученная аппроксимационная формула может быть с успехом применена на практике, в том числе и в динамико-стохастическом алгоритме, используемом в процедурах ноукастинга и сверхкраткосрочного прогноза поля ветра в пограничном слое атмосферы.

1. Комаров В.С., Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 236 с.

2. *Казакевич Д.И.* Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 319 с.
3. *Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я.* Климатическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 295 с.
4. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 264 с.
5. *Панчев С.* Случайные функции и турбулентность. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 447 с.
6. *Исследование* взаимодействия мезо- и макромасштабных процессов в атмосфере и применение статистических методов в метеорологии / Под ред. Е.П. Борисенкова, Г.Н. Чичасова, М.И. Юдина. М.: Гидрометеоздат, 1985. 235 с.
7. *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.
8. *Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Корреляция компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 124–129.
9. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Анализ структуры поля ветра в нижнем слое атмосферы на побережье оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 902–908.

A.V. Lavrinenko, S.N. Il'in, V.A. Gladkikh, V.S. Komarov, A.V. Kreminskii, I.V. Nevzorova, Yu.B. Popov, A.I. Popova, V.A. Fedorov. **Study of time correlation of wind velocity orthogonal components in the boundary atmospheric layer by acoustic sensing data.**

The results of statistical analysis of time correlation of instantaneous and averaged (over 0,5, 2, 10, 20 and 30 min intervals) values of horizontal wind velocity components measured in different regions with the use of VOLNA-3 three-channel Doppler sodar are discussed. Together with consideration of peculiarities of time correlation functions for wind velocity horizontal components, their approximations with found analytical formulae are presented.