

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 551.501.755 + 551.501.796

Л.Г. ШАМАНАЕВА^{1,2}, Н.П. КРАСНЕНКО^{3,4}, О.Ф. КАПЕГЕШЕВА²**СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ТРЕХ КОМПОНЕНТОВ СКОРОСТИ ВЕТРА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ***

Проанализирована суточная динамика среднеквадратичных отклонений (СКО) трех компонентов скорости ветра, измеренных мини-содаром в пограничном слое атмосферы. Статистический анализ данных измерений показал, что значения СКО для x - и y -компонентов σ_x и σ_y лежат в интервале от 0.2 до 4 м/с, а $\sigma_z = 0.1\text{--}1.2$ м/с. Рост σ_x и σ_y с высотой довольно хорошо описывается степенным законом с показателем степени, изменяющимся от 0.22 до 1.3 в зависимости от времени суток, а σ_z растет по линейному закону. Определены константы аппроксимации и оценены погрешности их использования. Найдено, что максимальный суточный разброс значений СКО составляет 56 % для σ_x и σ_y и 94 % для σ_z . Установленные физические закономерности и полученные константы аппроксимации позволяют описывать суточную динамику СКО для трех компонентов скорости ветра в пограничном слое атмосферы и могут быть рекомендованы для использования в моделях атмосферного пограничного слоя.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, акустическое зондирование, содар, компоненты скорости ветра, среднеквадратичные отклонения, суточная динамика.

Информация о пространственно-временной динамике вектора скорости ветра, его среднего значения и СКО его компонентов в атмосферном пограничном слое (АПС) имеет важное как фундаментальное, так и прикладное значение [1–3]. Она необходима для изучения динамики атмосферных процессов, прогноза состояния воздушного бассейна, оценки переноса загрязняющих примесей, расчета потоков тепла и количества движения, построения моделей АПС, составления метеорологических прогнозов погоды и т.д. Данные о статистических характеристиках скорости ветра и, в частности, об СКО играют важную роль в расчетах конструкционных нагрузок сооружений, при разработке систем связи и локации.

Целесообразно для получения этой важной информации применять содары (акустические локаторы), например для измерения скорости ветра в АПС, чему посвящено большое количество исследований [4–6]. Гораздо меньше работ по содарным измерениям и анализу дисперсии скорости ветра в АПС, причем в большинстве из них рассматривается высотная зависимость дисперсии только вертикального компонента скорости ветра [5, 7–9]. Однако этого, естественно, крайне недостаточно. Для восполнения этого пробела в [10] анализируется пространственно-временная динамика дисперсии скорости ветра в АПС по измерениям доплеровским мини-содаром [11]. В продолжение исследований этого направления в данной работе представлены результаты суточного исследования СКО для трех компонентов скорости ветра $\sigma_x(z, t)$, $\sigma_y(z, t)$, $\sigma_z(z, t)$ мини-содаром и проведена аналитическая аппроксимация полученных экспериментальных данных.

Методика эксперимента и алгоритм обработки данных

СКО $\sigma_x(z, t)$, $\sigma_y(z, t)$, $\sigma_z(z, t)$ измерялись непрерывно в течение суток с $t_{\text{нач}} = 1$ (10 ч 16 сентября) до $t_{\text{кон}} = 25$ (10 ч 17 сентября) мини-содаром с рабочей частотой 4900 Гц, длительностью импульса излучения 60 мс и периодом повторения импульсов 4 с. Излучение в одном цикле зондирования последовательно посылалось в трех направлениях – вертикально и под углами $\alpha = 14^\circ$ к вертикали в двух взаимно ортогональных плоскостях. Обрабатывались результаты измерений мини-содаром в диапазоне высот $z = 5\text{--}200$ м в строках z_j , $j = 1, \dots, 40$, вертикальной протяженностью $\Delta z = 5$ м. СКО рассчитывались по формулам

* Результаты получены при поддержке по проекту задания Минобрнауки РФ № 5.3279.2017/4.6 и по проекту фундаментальных исследований СО РАН № IX.138.2.5.

$$\sigma_x(z_j, t_k) = \sqrt{\left\langle \left(V'_x(z_j, t_k) \right)^2 \right\rangle} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(V_{xij}(t_k) - \langle V_x(z_j, t_k) \rangle \right)^2}; \quad (1)$$

$$\sigma_y(z_j, t_k) = \sqrt{\left\langle \left(V'_y(z_j, t_k) \right)^2 \right\rangle} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(V_{yij}(t_k) - \langle V_y(z_j, t_k) \rangle \right)^2}; \quad (2)$$

$$\sigma_z(z_j, t_k) = \sqrt{\left\langle \left(V'_z(z_j, t_k) \right)^2 \right\rangle} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(V_{zij}(t_k) - \langle V_z(z_j, t_k) \rangle \right)^2}. \quad (3)$$

Здесь $V_{xij}(t_k)$, $V_{yij}(t_k)$, $V_{zij}(t_k)$ – значения компонент скорости ветра в j -м строке i -го измерения в k -й серии, начавшейся в момент времени t_k . Обработывались данные 25 почасовых серий соударных измерений с 10:00 местного времени 16 сентября до 10:00 местного времени 17 сентября.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 в векторном представлении [12] показана пространственно-временная динамика средней горизонтальной скорости ветра $V_h(z_j, t_k)$ по результатам измерений 16 и 17 сентября. Видно, что 16 сентября ветер был более сильным, особенно в нижнем 100-метровом слое. Прослеживается увеличение высоты максимума V_h с 45 м в 10 ч местного времени до 100 м в 14 ч. Это связано с подъемом ночной приземной температурной инверсии. В профиле горизонтальной скорости ветра отчетливо наблюдается наличие такого опасного для авиации, например, явления, как сдвиг ветра [3]. В 18 ч юго-западное направление струйного течения сменилось на северо-западное, высота струи вначале выросла со 100 м в 20 ч до 125 м в 21 ч, а затем уменьшилась до 75 м в 22 ч. К 23 ч направление ветра сменилось на юго-восточное, и он стал менее сильным. В ночь с 16 на 17 сентября $V_h(z_j, t_k)$ не превышала 1 м/с, при этом направление скорости сильно варьировалось с высотой. К 04:00 в нижнем 100-метровом слое прослеживается увеличение скорости ветра, связанное с подъемом приземной температурной инверсии. Нерегулярное поведение скорости ветра в нижнем 20-метровом слое можно объяснить влиянием шероховатости подстилающей поверхности и ее неравномерным прогревом.

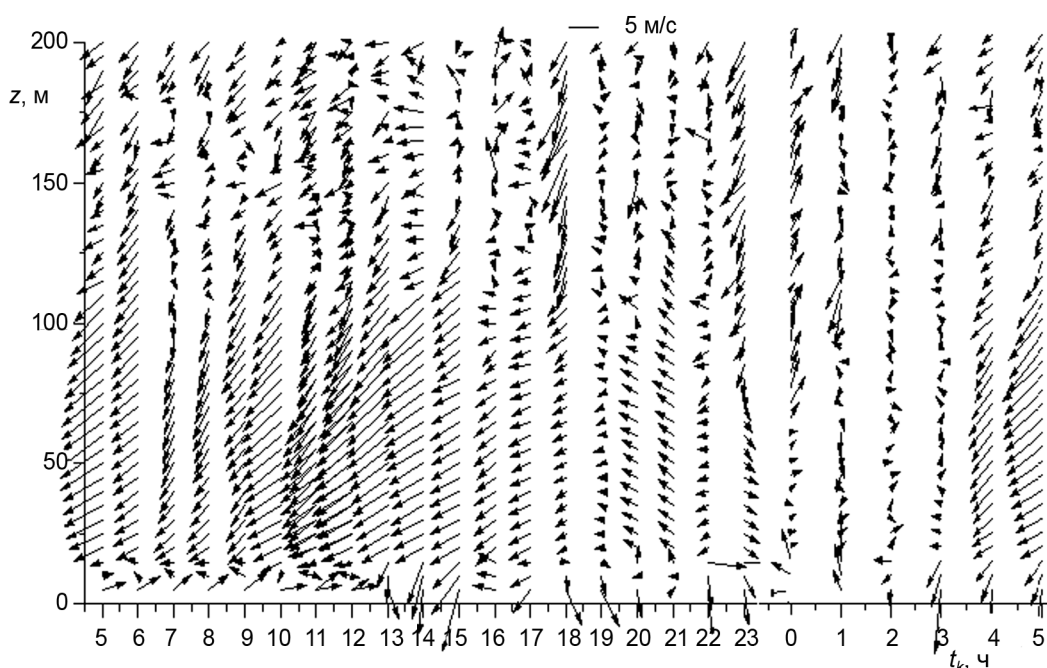


Рис. 1. Почасовая пространственно-временная динамика горизонтальной скорости ветра в векторном представлении по результатам мини-соударных измерений 16 и 17 сентября. Ориентация: сверху – север, слева – запад

На рис. 2 приведен суточный ход СКО для трех компонент скорости ветра по данным мини-содарных измерений. Представлены данные для серий измерений с 3-часовым интервалом между ними. Из рисунка видно, что σ_x , σ_y , и σ_z растут с высотой. Обращает на себя внимание изотропия СКО для x - и y -компонентов скорости ветра: их суточный ход и значения совпадают в пределах погрешности измерений, за исключением приземного слоя 5–20 м, где существенным образом сказывается влияние подстилающей поверхности [2]. Из рис. 2, *а* и *б* видно, что значения σ_x , σ_y лежат в интервале от 0.2 до 4 м/с, а $\sigma_z = 0.1$ –1.2 м/с (рис. 2, *в*). Значения σ_z быстро растут с высотой в пределах приземного слоя. Для больших высот рост σ_z замедляется. При этом минимальные значения СКО для высот измерения $z_{\min} = 5$ м и $z_{\max} = 200$ м наблюдались в 13:00 $\sigma_{x\min} = 0.7$ –2.8 м/с и $\sigma_{y\min} = 0.7$ –3.3 м/с, а их максимальные значения для этих высот $\sigma_{x\max} = 1.4$ –3.6 м/с и $\sigma_{y\max} = 1.6$ –3.4 м/с наблюдались в 07:00, причем $\sigma_{z\min} = 0.1$ –0.5 м/с наблюдались в 13:00, а $\sigma_{z\max} = 0.5$ –1.1 м/с в 01:00. При этом максимальный разброс значений СКО для фиксированных высот, рассчитанный по формуле $\Delta\sigma_i(z) = \frac{\sigma_{i\max}(z) - \sigma_{i\min}(z)}{\sigma_{i\max}(z)} \cdot 100\%$, может достигать 56 % для $\sigma_{x,y}(z)$ и 94 % для $\sigma_z(z)$. Проведенный статистический анализ суточной динамики измеренных высотных профилей СКО показал, что рост $\sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y(z, t)$ с высотой описывается степенной зависимостью, а $\sigma_z(z, t)$ линейно зависит от высоты:

$$\tilde{\sigma}_x(z, t) = C_1(t)z^{N_1(t)}; \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma}_y(z, t) = C_2(t)z^{N_2(t)}; \quad (5)$$

$$\tilde{\sigma}_z(z, t) = A(t) + B(t)z. \quad (6)$$

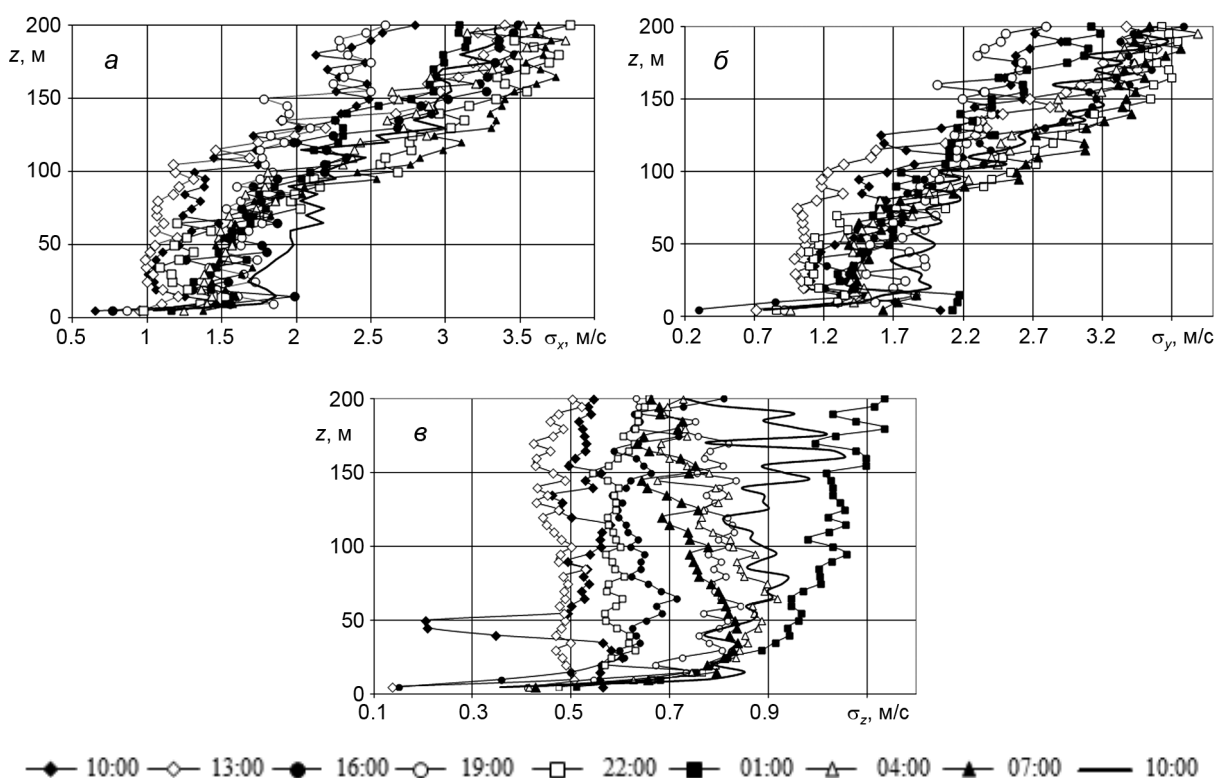


Рис. 2. Суточная динамика СКО для трех компонент скорости ветра по результатам мини-содарных измерений 16–17 сентября. Время начала каждой серии измерений с 3-часовыми интервалами между сериями указано под рисунком

Соответствующие константы аппроксимации приведены на рис. 3. Погрешности аппроксимации, оцененные по величине среднеквадратичного отклонения $\tilde{\sigma}_x(z, t)$, $\tilde{\sigma}_y(z, t)$ и $\tilde{\sigma}_z(z, t)$ от их измеренных значений, составили 0.015–0.045, 0.011–0.051 и 0.0031–0.0048 м/с соответственно.

Из рис. 3 видно, что константы аппроксимации для $\tilde{\sigma}_x(z, t)$ и $\tilde{\sigma}_y(z, t)$ изменяются синхронно в течение суток, проявляя общую тенденцию к уменьшению с увеличением времени измерения, а их значения практически совпадают в пределах погрешности аппроксимации, что подтверждает вывод об их изотропии. Кроме того, на суточном ходе $N_1(t)$ и $N_2(t)$ отчетливо видны два локальных минимума при $t_1 = 15$ ч и $t_2 = 23$ ч, появление которых сопровождается усилением высотной зависимости СКО, практически до линейной в 23 ч, когда показатели степени $C_1(t_2)$ и $C_2(t_2)$ приближаются к 1 (см. формулы (4) и (5)). Что касается высотной зависимости профилей СКО, определяемой коэффициентами $C_1(t)$ и $C_2(t)$, из рис. 3, а видно, что с 10:00 до 14:00 СКО практически не зависят от высоты, затем с 14:00 до 16:00 наблюдается рост с высотой $\sim z^{0.2}$, а с 16:00 до 23:00 видно усиление высотной зависимости практически до линейной. В 24:00 $C_1(t)$ и $C_2(t)$ уменьшаются практически до 0. С 01:00 они снова увеличиваются до 0.6. Таким образом, из представленных на рис. 3, а результатов можно сделать вывод о полусуточной динамике СКО для x - и y -компонентов скорости ветра и наличии двух локальных минимумов в 15:00 и 23:00 ч.

Для $\tilde{\sigma}_z(z, t)$ характерен линейный рост с высотой (см. формулу (6)), с коэффициентом пропорциональности $B(t)$, показанном на рис. 3, б. При этом приземные значения СКО для z -компонента скорости ветра (кривая 5 на рис. 3, а) растут с течением времени наблюдения от 0.4 до 0.9 м/с и имеют два локальных максимума в 15:00 и 23:00 ч.

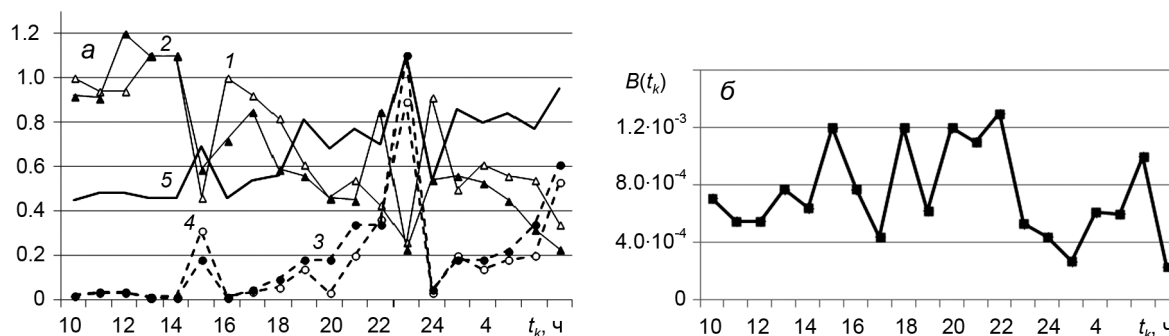


Рис. 3. Константы аппроксимации суточного хода СКО трех компонент скорости ветра по формулам (4) – (6): а – константа аппроксимации $N_1(t_k)$ – кр. 1, $N_2(t_k)$ – кр. 2, $C_1(t_k)$ – кр. 3, $C_2(t_k)$ – кр. 4, $A(t_k)$ – кр. 5; б – константа аппроксимации $B(t_k)$

Заключение

Анализ суточной динамики профилей СКО для трех компонент скорости ветра показал, что рост $\sigma_x(z, t)$ и $\sigma_y(z, t)$ с высотой z хорошо описывается степенным законом, а $\sigma_z(z, t)$ растет с z по линейному закону. Найдены константы аппроксимации СКО и оценены погрешности их использования. Максимальный суточный разброс значений составляет 56 % для σ_x и σ_y и 94 % для σ_z . Установленные физические закономерности и полученные константы аппроксимации позволяют описывать высотную и суточную динамику СКО для трех компонент скорости ветра и могут быть рекомендованы для использования в моделях АПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бызова Н.Л., Иванов В.И., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 263 с.
2. Атмосфера: справочник. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
3. Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И.М. Авиационная метеорология. – М.: Транспорт, 1985. – 262 с.
4. Coulter R.L. and Kallistratova M.A. // Meteorol. Atmospher. Phys. – 2004. – V. 85. – No. 1–2. – P. 3–19.
5. Coulter R.L. // Proc. 11th ISARS. – Rome, 2002. – P. 321–327.
6. Bradley S., Atmospheric Acoustic Remote Sensing: Principles and Applications. – Boca; London; New York: CRC Press Taylor&Francis Group, 2007. – 296 p.
7. Emeis S., Baumann-Stanzer K., Piringer M., et al. // Meteorologische Z. – 2007. – V. 16. – No. 4. – P. 393–406.
8. Lokoshchenko M.A., Perepelkin V.G., and Semenova N.V. // Meteorologische Z. – 2007. – V. 16. – No. 4. – P. 407–417.

9. Lokoshchenko M.A., Perepelkin V.G., Elansky N.F., and Korneva I.A. // Proc. ISARS. Poster PME/14. – Paris, 2010. – P. 4.
10. Kapegesheva O.F., Krasnenko N.P., Tarasenzov M.V., and Shamanaeva L.G. // Proc. SPIE. – 2015. – V. 9680. – P. 96804E-1–96804E-4. DOI: 10/1117/12.2205801.
11. <http://minisodar.org>.
12. Красненко Н.П., Тарасенков М.В., Шаманаева Л.Г. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 11. – С. 77–83.

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 30.05.17.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
г. Томск, Россия

⁴ Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Шаманаева Людмила Григорьевна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, доцент НИ ТГУ, e-mail: sima@iao.ru;

Красненко Николай Петрович, д.ф.-м.н., гл. науч. сотр. ИМКЭС СО РАН, профессор ТУСУРа, e-mail: krasnenko@imces.ru;

Капегешева Ольга Федоровна, аспирантка, e-mail: kapegesheva_o_o@mail.ru.