

КОНФЕРЕНЦИЯ С
ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА
ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

СОДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ДЛЯ ТРЕХ КОМПОНЕНТОВ СКОРОСТИ ВЕТРА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Л.Г. Шаманаева^{1,2}, Н.П. Красненко^{3,4}, О.Ф. Капегешева²

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

⁴Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: sima@iao.ru; krasnenko@imces.ru; kapegesheva_o_@mail.ru

Ключевые слова: атмосфера, пограничный слой, акустическое зондирование, содар, скорость ветра.

В докладе анализируется динамика среднеквадратичных отклонений (СКО) для трех компонент скорости ветра, измеренных мини-содаром в пограничном слое атмосферы. Результаты измерений показали, что 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. Найдены константы аппроксимации и оценены погрешности их использования. Установленные физические закономерности и полученные константы аппроксимации позволяют описывать суточную динамику СКО для трех компонент скорости ветра в пограничном слое атмосферы и могут быть рекомендованы для использования в моделях АПС.

Информация о пространственно-временной динамике вектора скорости ветра, его среднего значения, и среднеквадратичного отклонения (СКО) его компонент в пограничном слое атмосферы (ПСА) имеет как фундаментальное [1, 2], так и прикладное значение [3]. Она необходима для изучения динамики атмосферных процессов, прогноза состояния воздушного бассейна, оценки переноса загрязняющих примесей, расчета потоков тепла и количества движения, построения моделей ПСА, и составления метеорологических прогнозов погоды. Данные об СКО скорости ветра также используются в расчетах конструкционных нагрузок различных высотных сооружений, при разработке оптических и акустических систем связи, локации, дальнометрических и лидарных устройств.

Применению содаров (акустических локаторов) для измерения скорости ветра в АПС посвящено большое количество работ. Обзор литературы приведен, например, в [4]. Гораздо меньше работ посвящено анализу дисперсии скорости ветра при содарных измерениях в АПС. В большинстве из них рассматривалась высотная зависимость дисперсии только вертикального компонента скорости ветра (см. [5, 6]).

В работе [7] нами уже анализировалась пространственно-временная динамика дисперсии скорости ветра в АПС. Были использованы результаты 5-суточных непрерывных измерений доплеровским мини-содаром [8]. Измерения проводились в осенний период с 12 по 16 сентября. Рабочая частота мини-содара составляла 4900 Гц, длительность импульса излучения 60 мс, излучение в одном цикле зондирования последовательно посылалось в трех направлениях –

вертикально и под углами $\alpha = 14^\circ$ к вертикали в двух взаимно ортогональных плоскостях, после чего рассчитывались ортогональные компоненты вектора скорости ветра.

В данной работе анализируется пространственно-временная динамика СКО для трех компонентов скорости ветра. Обработывались результаты измерений компонентов скорости ветра в высотных стробах z_j , где $j = 1, \dots, 40$, вертикальной протяженностью $\Delta z = 5$ м, в диапазоне высот 20–200 м. СКО для x -, y -, и z -компонентов рассчитывалась по следующим формулам:

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

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

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

Здесь $V_{xij}, V_{yij}, V_{zij}$ – значения x -, y -, z -компонентов скорости ветра в j -том стробе для i -того измерения в серии, штрихами обозначены пульсации соответствующих компонентов скорости ветра, а угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций, N – число циклов зондирования (высотных профилей скорости ветра). Обработывались серии из 150 высотных профилей измерений компонентов скорости ветра, что обеспечивало усреднение за 10-минутный период измерения.

Анализ измеренных высотных профилей СКО показал, что их значения растут с высотой, при этом рост σ_x и σ_y описывается степенным законом, а σ_z растет по линейному закону. Это позволило аппроксимировать их высотные зависимости следующими аналитическими соотношениями:

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

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

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

Погрешности аппроксимации i -того высотного профиля оценивались по величине среднеквадратичного отклонения аппроксимированных значений $\tilde{\sigma}_{x,i}$, $\tilde{\sigma}_{y,i}$, $\tilde{\sigma}_{z,i}$ от измеренных $\sigma_{x,i}$, $\sigma_{y,i}$, $\sigma_{z,i}$:

$$\mu_{x,i} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{j=1}^N (\sigma_{x,i}(z_j) - \tilde{\sigma}_{x,i}(z_j))^2}, \quad (7)$$

$$\mu_{y,i} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{j=1}^N (\sigma_{y,i}(z_j) - \tilde{\sigma}_{y,i}(z_j))^2}, \quad (8)$$

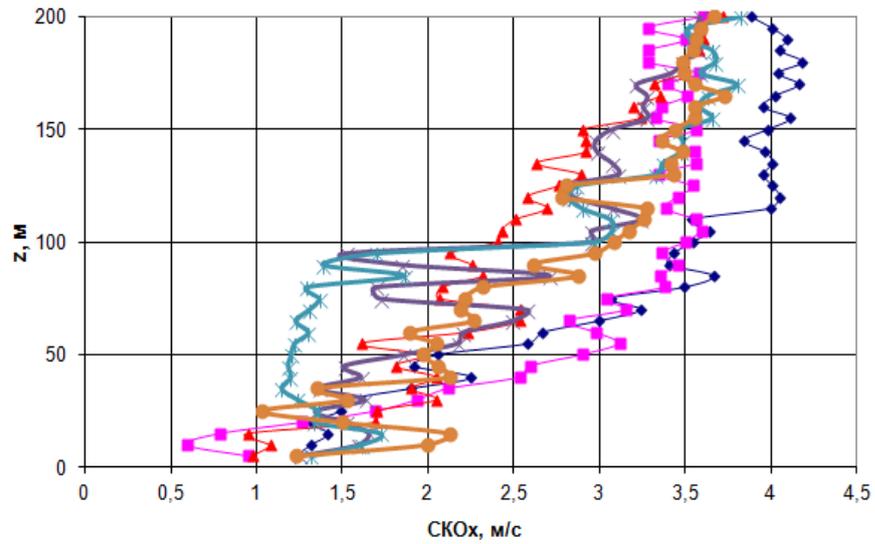
$$\mu_{z,i} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{j=1}^N (\sigma_{z,i}(z_j) - \tilde{\sigma}_{z,i}(z_j))^2}. \quad (9)$$

Из таблицы 1 и рисунка 1 видно, что рост $\sigma_{x,j}$ и $\sigma_{y,j}$ с высотой удовлетворительно описывается степенными законами (4) и (5), с показателем степени $N_1 = 0,37-0,93$ и $N_2 = 0,38-0,7$ в зависимости от времени. При этом обращает на себя внимание их изотропия: значения СКО совпадают в пределах погрешности аппроксимации за исключением измерений в приземном слое 5–20 м, где существенным образом сказывается влияние подстилающей поверхности [2]. Для $\sigma_{z,i}$ характерен ее слабый рост с высотой (близкие к нулю значения константы аппроксимации B).

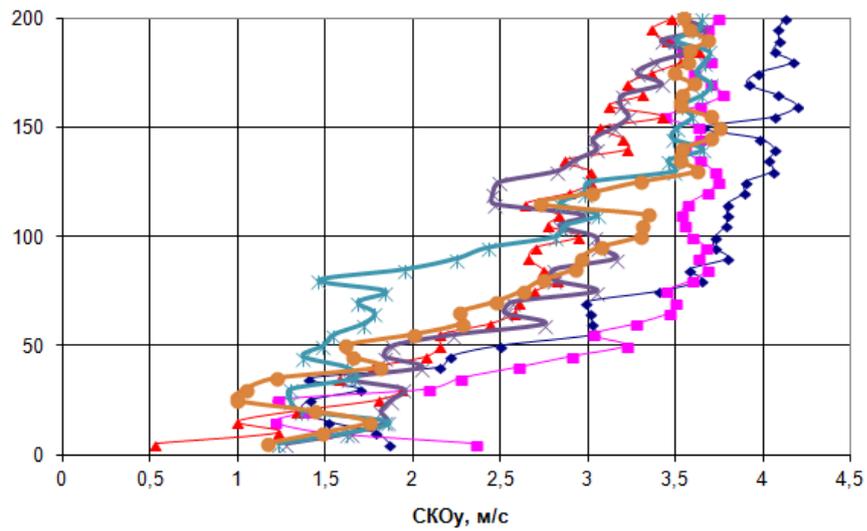
Таблица 1. Константы аппроксимации $\sigma_{x,i}$, $\sigma_{y,i}$, $\sigma_{z,i}$ по формулам (4)–(6) и их погрешности, рассчитанные по формулам (7)–(9)

| Время, ч | $\sigma_{x,i}$ | | | $\sigma_{y,i}$ | | | $\sigma_{z,i}$ | | |
|-------------|----------------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------------|----------|----------|
| | C_1 | N_1 | μ_x | C_2 | N_2 | μ_y | A | B | μ_z |
| 12 сентября | | | | | | | | | |
| 0 | 2,66 E-01 | 5,48E-01 | 3,77E-02 | 2,44E-01 | 5,71E-01 | 4,64E-02 | 5,43E-01 | 2,69E-03 | 4,27E-03 |
| 1 | 5,85E-01 | 3,67E-01 | 3,63E-02 | 3,48E-01 | 4,91E-01 | 5,88E-02 | 6,74E-01 | 3,20E-03 | 1,07E-02 |
| 2 | 3,25E-01 | 4,52E-01 | 2,29E-02 | 4,74E-01 | 3,84E-01 | 1,53E-02 | 4,82E-01 | 1,01E-03 | 6,07E-03 |
| 3 | 1,47E-01 | 6,21E-01 | 3,50E-02 | 4,12E-01 | 4,15E-01 | 2,79E-02 | 6,04E-01 | 1,67E-04 | 5,03E-03 |
| 4 | 3,18E-02 | 9,32E-01 | 4,09E-02 | 1,00E-01 | 7,03E-01 | 2,81E-02 | 4,50E-01 | 9,64E-04 | 4,48E-03 |
| 5 | 1,91E-01 | 5,79E-01 | 2,66E-02 | 1,20E-01 | 6,82E-01 | 3,86E-02 | 5,01E-01 | 1,04E-03 | 7,30E-03 |

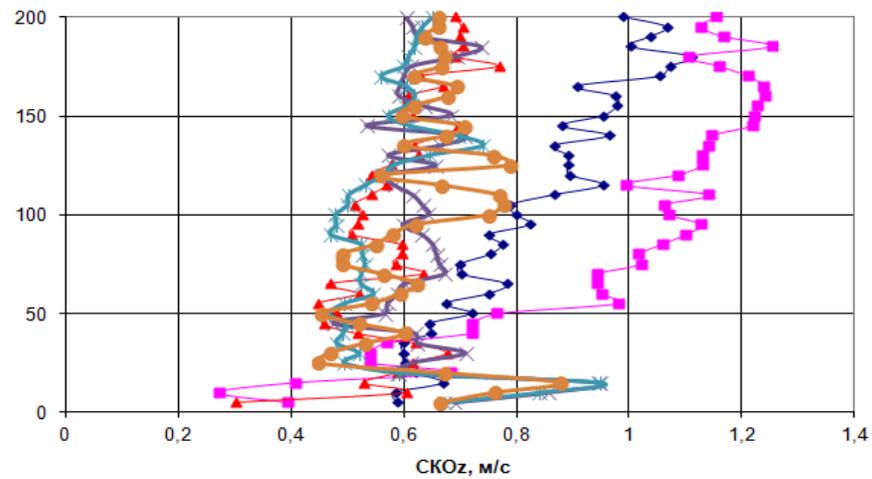
Приземное значение $\sigma_{z,i}$ на протяжении измерений $A = 0,45-0,6$ м/с, что согласуется с результатами Палоу и др. [9], согласно которым в условиях атмосферной стабильности $\sigma_{z,i} = 0,05-0,7$. По данным [5], $\sigma_{z,i}$ в осенний период варьирует от 0,4 до 0,8 м/с. Как видно из рис. 1в, $\sigma_{z,i}$ лежит в интервале от 0,27 до 1,25 м/с, что хорошо согласуется с имеющимися в литературе данными. Результаты 5-суточных непрерывных мини-сонарных измерений показали, что высотная зависимость σ_z определяется значением константы аппроксимации B и демонстрирует значительную изменчивость. Так, 12 сентября, при $B < 0$, σ_z уменьшалось с высотой; 16 сентября, при $B > 0$, она росла с высотой, а 13 и 15 сентября, при B близком к нулю, она оставалась практически постоянной. Обращает на себя внимание временной ход σ_z 14 сентября, а именно, наличие области минимума в 17:00, местного времени. Следует отметить, что в [10] также отмечалась существенная изменчивость высотного хода σ_z , при этом наблюдались как уменьшение, так и рост ее с высотой, а также нейтральный высотный ход.



a



б



в

Рис. 1. Временная динамика высотных профилей СКО трех компонент скорости ветра в ночные часы по данным минисодарных измерений 12 сентября: 01:00–01:10 (ромбики), 02:00–02:10 (квадратики), 03:00–03:10 (треугольники), 04:00–04:10 (косые крестики), 05:00–05:10 (звездочки), 06:00–06:10 (кружки)

Анализ полученных высотных профилей СКО для трех компонентов скорости ветра показал, что рост σ_x и σ_y с высотой довольно хорошо описывается степенным законом, а σ_z изменяется по линейному закону. Найдены константы аппроксимации СКО и оценены погрешности их использования. Установленные физические закономерности и полученные константы аппроксимации позволяют описывать высотную и суточную динамику СКО для трех компонентов скорости ветра и могут быть рекомендованы для использования в моделях АПС.

1. Бызова Н.Л., Иванов В.И., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 263 с.
2. Атмосфера. Справочник. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
3. Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И.М. Авиационная метеорология. – Москва: Транспорт, 1985. – 262 с.
4. Coulter R.L., Kallistratova M.A. // *Meteorology and Atmospheric Physics*. – 2004. – V. 85. – Nos. 1–2. – P. 3–19.
5. Lokoshchenko M.A., Perepelkin V.G., Semenova N.V. Standard deviation of the wind vertical component and its dynamics in Moscow by the sodar data // *Meteorologische Zeitschrift*. – V. 16. – No. 4. – P. 407–414.
6. S. Emeis, K. Baumann-Stanzer, M. Piringer, et al. // *Meteorologische Zeitschrift*. – V. 16. – No. 4. 393–406 (2007).
7. Kapegesheva O.F., Krasnenko N.P., Tarasenkov M.V., Shamaeva L/G. Analysis of temporal dynamics of the standard deviation of three wind velocity components from the data of acoustic sounding, *Proc. SPIE* 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356Y (November 29, 2016); doi:10.1117/12.2249272; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2249272>.
8. <http://minisodar.org>
9. Pahlow M., Parlange M.B., Porté-Agel F. // *Boundary-Layer Meteorol.* – 2001. – V. 99. – No. 2. – P. 225–248.
10. Banta R. M., Pichugina Y. L., Brewer W. A // *J. Atm. Sci.* – V. 63. – 2006. – P. 2700–2719.