

УДК 534.2+551.5

*К.Х. АНДЕРВУД\*, Л.Г. ШАМАНАЕВА\*\****ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Обсуждается временная динамика высотных профилей продольной и поперечной структурных функций и характеристик поля скорости ветра, рассчитанных на основе оригинальной методики из регулярных измерений вертикальных профилей вектора скорости ветра мини-содаром с рабочей частотой 4900 Гц. Найдено, что структурные функции вначале растут с увеличением разнота точек наблюдения, а затем насыщаются, при этом продольная структурная функция много больше поперечной, что согласуется с имеющимися в литературе данными. Поведение структурной характеристики скорости ветра с высотой хорошо описывается предсказанной теорией  $z^{-2/3}$ -зависимостью, при этом структурная функция, рассчитанная из одноточечных измерений вертикальной скорости ветра, больше, чем соответствующая структурная функция для вертикального разнота точек наблюдений, что также согласуется с выводами теории изотропной турбулентности.

**Ключевые слова:** мини-содар, временная динамика продольной и поперечной структурных функций и характеристик поля скорости ветра.

**Введение**

Знание характеристик атмосферной турбулентности имеет фундаментальное значение для исследования структуры и динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) и построения его математической модели. Статистические характеристики атмосферной турбулентности зависят от высоты над земной поверхностью. При анализе случайного поля скорости ветра в атмосфере в качестве основных характеристик мелкомасштабных пульсаций используются структурные функции – средние квадраты разностей компонентов скорости ветра, измеренных в двух различных точках [1]. Применение содаров позволяет получать длинные временные ряды наблюдений вертикальных профилей вектора скорости ветра и рассчитать структурные функции поля скорости ветра для разнота точек наблюдения вплоть до нескольких сотен метров [2–8]. Стоит отметить, что мини-содаы имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными [8, 9], прежде всего, меньшую начальную высоту зондирования (5–20 м), более высокое пространственное разрешение ( $\sim 5$  м) и более высокую частоту посылки зондирующих импульсов.

В работе представлена временная динамика высотных профилей продольной и поперечной структурных функций и характеристик поля скорости ветра, рассчитанных по оригинальной методике из временных рядов регулярных наблюдений вертикальных профилей вектора скорости ветра автономным доплеровским мини-содаром AV4000 Atmospheric Systems Corporation [10]. Обсуждается почасовая и суточная динамика поперечной и продольной структурных функций поля скорости ветра, рассчитанных по данным регулярных мини-содарных измерений высотной зависимости вектора скорости ветра и их связь со скоростью ветра, усредненной за 10-минутные периоды наблюдений. Анализируется временная динамика структурной характеристики поля скорости ветра.

**1. Временная динамика структурных функций поля скорости ветра**

Методика, аппаратура и процедура выборки данных при анализе временной динамики поперечной и продольной структурных функций поля скорости ветра описаны в [5]. Регулярные измерения высотных профилей вектора скорости ветра производились мини-содаром AV4000 с солнечной батареей и 50-элементной фазированной антенной решеткой [10]. Рабочая частота содара составляла 4900 Гц, длительность импульса излучения 60 мс, излучение посылалось под углами 76, 76 и 90° к горизонту. Высотные профили трех компонентов  $V_x(z_k)$ ,  $V_y(z_k)$  и  $V_z(z_k)$  вектора скорости ветра  $V(z_k)$  измерялись в  $M = 40$  строках  $z_k$  вертикальной протяженностью  $\Delta z = 5$  м в диапазоне высот 20–200 м. Обрабатывались серии из  $N = 150$  профилей, что обеспечивало получение струк-

турных функций, усредненных за 10-минутный период. Временная продольная и поперечная структурные функции поля скорости ветра для каждого строба  $z_k$  рассчитывались по формуле [5]

$$D_{rr}(z_k, n\Delta t \langle V(z_k) \rangle) = \frac{1}{N-n-1} \sum_{j=1}^{N-n-1} [V'_{j+n}(z_k) - V'_j(z_k)]^2, \quad n=1, \dots, N/5; \quad (1)$$

$$D_{tt}(z_k, n\Delta t \langle V_z(z_k) \rangle) = \frac{1}{N-n-1} \sum_{j=1}^{N-n-1} [V_{z,j+n}(z_k) - V_{z,j}(z_k)]^2, \quad n=1, \dots, N/5. \quad (2)$$

Здесь

$$V'_j(z_k) = \{V_{x,j} \langle V_x(z_k) \rangle + V_{y,j}(z_k) \langle V_y(z_k) \rangle + V_{z,j}(z_k) \langle V_z(z_k) \rangle\} / \langle V(z_k) \rangle \quad (3)$$

– продольный компонент вектора скорости ветра в стробе  $z_k$  по результатам единичного измерения;

$$\langle V_i(z_k) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_{i,j}(z_k), \quad i=x, y, z; \quad (4)$$

$$|V(z_k)| = \sqrt{\langle V_x(z_k) \rangle^2 + \langle V_y(z_k) \rangle^2 + \langle V_z(z_k) \rangle^2}; \quad (5)$$

$\langle V(z_k) \rangle$  – вектор скорости ветра в стробе  $z_k$ , усредненный за период измерения  $T = N\Delta t$ .

Почасовая суточная динамика поперечной и продольной структурных функций поля скорости ветра анализировалась по 12-ти последовательным 10-минутным сериям мини-содарных измерений профиля вектора скорости ветра 13 сентября 2006 г., выполнявшихся каждый час с 11 ч 10 мин до 22 ч 20 мин. Ограниченный объем статьи не позволяет проиллюстрировать результаты, полученные во всех 12-ти серий измерений. В качестве примера на рис. 1, а показаны вертикальные профили вектора средней скорости ветра ( $V_{av}(z)$ , треугольники) и его x- ( $V_{avx}(z)$ , квадратики) и y-компонентов ( $V_{avy}(z)$ , кружки), а на рис. 1, б – z-компонент ( $V_{avz}(z)$ , ромбики) для 5-й серии из-

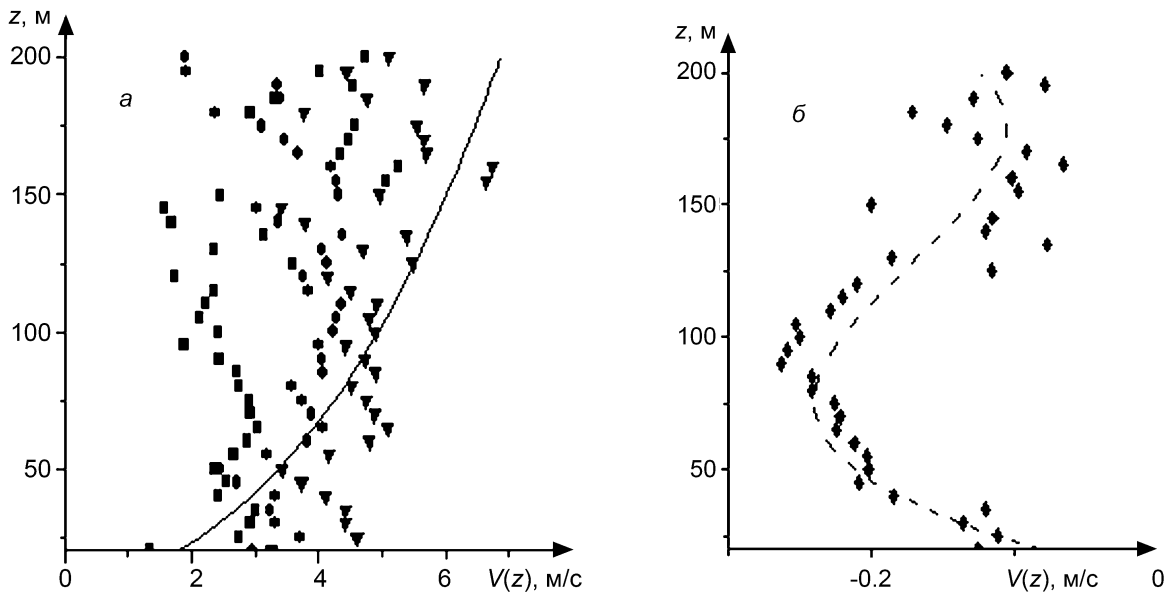


Рис. 1. Вертикальные профили а – вектора средней скорости ветра ( $V_{av}(z)$ , треугольники) и его x- ( $V_{avx}(z)$ , квадратики) и y-компонентов ( $V_{avy}(z)$ , кружки) и б – z-компонент средней скорости ветра ( $V_{avz}(z)$ , ромбики), рассчитанных по результатам мини-содарных измерений 13 сентября 2006 г. с 15 ч 10 мин до 15 ч 20 мин (5-я серия измерений). Сплошная кривая (а) иллюстрирует аппроксимацию полученной экспериментальной зависимости  $V_{av}(z)$  по формуле (6); пунктиром (б) показана аппроксимация экспериментальной зависимости  $V_{avz}(z)$  по формуле (7)

мерений с 13 ч 10 мин до 13 ч 20 мин. На рис. 2, *а* показана временная продольная структурная функция поля скорости ветра  $D_{rr}(z, \Delta t)$ , на рис. 2, *б* – временная поперечная структурная функция  $D_{tt}(z, \Delta t)$  для этой серии измерений, рассчитанные по формулам (1) и (2) соответственно.

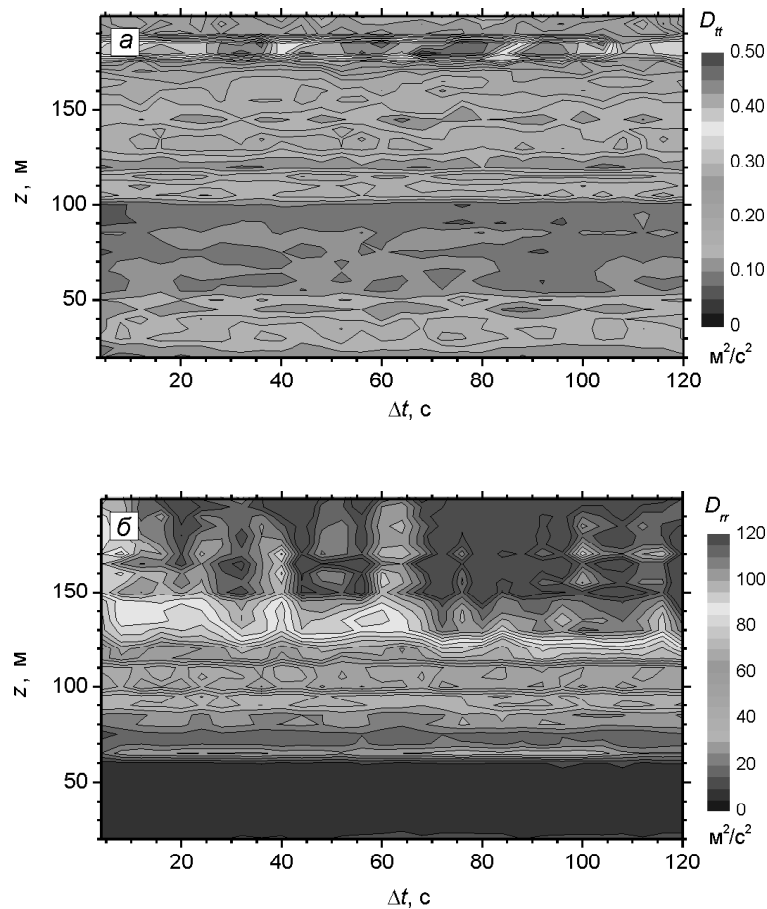


Рис. 2. Временные продольная (*а*) и поперечная (*б*) структурные функции поля скорости ветра, рассчитанные по результатам мини-содарных измерений 13 сентября 2006 г. с 15 ч 10 мин до 15 ч 20 мин (5-я серия измерений)

Сплошная кривая на рис. 1, *а* иллюстрирует аппроксимацию полученной экспериментальной зависимости модуля средней скорости ветра по формуле

$$|V_{av}(z)| = \left( \frac{\ln(z)}{A} \right)^B, \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  – константы аппроксимации, приведенные в табл. 1 для 12-ти последовательных серий измерений. В последнем столбце указана величина среднеквадратичного отклонения, характеризующая качество аппроксимации. Следует отметить, что все серии измерений, кроме 11-й, удовлетворительно аппроксимируются формулой (6) с показателем степени  $B$ , лежащим в интервале от 1,44 до 5,18. Для 11-й серии измерений использовалась аппроксимация полиномом третьей степени

$$V_{avz}(z) = Ez^3 + Fz^2 + Gz + H, \quad (7)$$

где  $E = -2,55 \cdot 10^{-6}$ ;  $F = 6,46 \cdot 10^{-4}$ ;  $G = -3,09 \cdot 10^{-2}$ ;  $H = 3,72$ , что обеспечивало СКО = 0,508 м/с.

Пунктирной кривой на рис. 1, *б* показана аппроксимация экспериментальной зависимости  $z$ -компонента вектора средней скорости ветра  $V_{avz}(z)$  полиномом третьей степени с использованием соотношения (7). Значения констант  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $H$  в формуле (7) для 12-ти последовательных серий измерений приведены в табл. 2 вместе со среднеквадратичными отклонениями, характеризующими качество аппроксимации. Из табл. 2 видно, что  $V_{avz}(z)$  удовлетворительно аппроксимируется зависимостью (7).

Величина структурных функций, в градациях серого цвета, указана справа на рис. 2, *а* и *б*. Видно, что  $D_{rr}(z, \Delta t)$  много меньше  $D_{rr}(z, \Delta t)$ , что отмечалось ранее в [4–6]. Экспериментальные результаты [11] также демонстрируют сильную анизотропию временных спектров флуктуаций амплитуды звуковой волны при ее продольном и поперечном относительно скорости ветра распространении. При этом корреляция в продольном направлении была намного сильнее, чем в поперечном. Результаты акустического зондирования, представленные в [7], также свидетельствуют о сильной анизотропии атмосферных флуктуаций в продольном и поперечном направлении и сдавливании («squeezing») мелкомасштабной динамической турбулентности в вертикальном направлении.

Таблица 1  
Константы аппроксимации модуля средней скорости ветра по формуле (6)

| № серии | $A$  | $B$  | СКО, м/с |
|---------|------|------|----------|
| 1       | 2,68 | 2,72 | 2,12     |
| 2       | 1,81 | 1,58 | 0,83     |
| 3       | 1,91 | 1,80 | 0,99     |
| 4       | 2,31 | 2,25 | 1,00     |
| 5       | 2,33 | 2,34 | 2,21     |
| 6       | 2,23 | 2,06 | 0,79     |
| 7       | 3,01 | 5,18 | 0,69     |
| 8       | 2,68 | 2,58 | 0,89     |
| 9       | 1,56 | 1,44 | 1,24     |
| 10      | 2,15 | 1,98 | 1,10     |
| 12      | 1,87 | 1,76 | 0,89     |

Из рис. 2, *а* видно, что временная поперечная структурная функция  $D_{rr}(z, \Delta t)$  растет с высотой наблюдения и затем насыщается. Отчетливо видны мелкомасштабные неоднородности со временем жизни от 5 с до 2 мин, а также слои с повышенной интенсивностью турбулентности на высотах 20–50, 100–120 и 180–190 м. Временная продольная структурная функция  $D_{rr}(z, \Delta t)$  (рис. 2, *б*) также растет с увеличением высоты и затем насыщается. Отчетливо видны мелкомасштабные неоднородности со временем жизни от 5 с до 2 мин и широкий слой с повышенной интенсивностью турбулентности выше 130 м.

Таблица 2  
Константы аппроксимации вертикального компонента скорости ветра по формуле (7)

| № серии | $E$                   | $F$                   | $G$                   | $H$                   | СКО, м/с          |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 1       | $9,31 \cdot 10^{-8}$  | $-1,85 \cdot 10^{-5}$ | $2,60 \cdot 10^{-4}$  | $-6,22 \cdot 10^{-2}$ | $6 \cdot 10^{-2}$ |
| 2       | $-7,53 \cdot 10^{-8}$ | $2,48 \cdot 10^{-5}$  | $-1,92 \cdot 10^{-3}$ | $-1,13 \cdot 10^{-1}$ | $4 \cdot 10^{-2}$ |
| 3       | $2,13 \cdot 10^{-7}$  | $-6,58 \cdot 10^{-5}$ | $5,64 \cdot 10^{-3}$  | $-2,06 \cdot 10^{-1}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ |
| 4       | $1,23 \cdot 10^{-7}$  | $-3,82 \cdot 10^{-5}$ | $3,24 \cdot 10^{-3}$  | $-1,67 \cdot 10^{-1}$ | $4 \cdot 10^{-2}$ |
| 5       | $-2,4 \cdot 10^{-7}$  | $9,19 \cdot 10^{-5}$  | $-9,77 \cdot 10^{-3}$ | $7,79 \cdot 10^{-2}$  | $6 \cdot 10^{-2}$ |
| 6       | $9,01 \cdot 10^{-8}$  | $-2,84 \cdot 10^{-5}$ | $2,84 \cdot 10^{-3}$  | $-1,65 \cdot 10^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| 7       | $5,93 \cdot 10^{-8}$  | $-1,04 \cdot 10^{-5}$ | $3,81 \cdot 10^{-3}$  | $-1,83 \cdot 10^{-1}$ | $6 \cdot 10^{-2}$ |
| 8       | $-2,22 \cdot 10^{-7}$ | $8,71 \cdot 10^{-5}$  | $-8,89 \cdot 10^{-3}$ | $-2,88 \cdot 10^{-3}$ | $6 \cdot 10^{-2}$ |
| 9       | $-1,36 \cdot 10^{-7}$ | $5,19 \cdot 10^{-5}$  | $-5,23 \cdot 10^{-3}$ | $-1,38 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ |
| 10      | $-7,78 \cdot 10^{-8}$ | $3,27 \cdot 10^{-5}$  | $-4,33 \cdot 10^{-3}$ | $1,10 \cdot 10^{-1}$  | $6 \cdot 10^{-2}$ |
| 11      | $1,12 \cdot 10^{-7}$  | $-3,08 \cdot 10^{-5}$ | $2,13 \cdot 10^{-3}$  | $-1,29 \cdot 10^{-1}$ | $4 \cdot 10^{-2}$ |
| 12      | $-1,83 \cdot 10^{-7}$ | $6,13 \cdot 10^{-5}$  | $-5,20 \cdot 10^{-3}$ | $-1,51 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ |

Следует отметить, что в дополнение к традиционным факсимильным записям содаров, которые иллюстрируют динамику температурной турбулентности в пограничном слое атмосферы, представленный рисунок иллюстрирует динамику ветровой турбулентности, наглядно показывая слои более интенсивной ветровой турбулентности, что может быть использовано, например, для повышения безопасности полетов.

Для 2, 8, 10 и 12-й серий измерений прослеживается связь структурных функций с вертикальной изменчивостью скорости ветра, отмеченная ранее в [13], а именно величина структурных функций меньше для более гладких профилей средней скорости ветра, с меньшим значением СКО (см. табл. 1). В [14] также отмечена зависимость интенсивности турбулентности от порывистости ветра («gustiness»), а именно интенсивность турбулентности обычно больше для больших ветровых сдвигов и порывистости ветра.

Наши результаты также показывают зависимость структурных функций от времени суток. В утренние часы, в 1-й серии измерений с 11 ч 10 мин до 11 ч 20 мин,  $D_{tt \max}(z, \Delta t) = 0,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$  и  $D_{rr \max} = 76,48 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Максимальные за период наблюдения значения  $D_{tt \max}(z, \Delta t) = 0,46 \text{ м}^2/\text{с}^2$  и  $D_{rr \max} = 134,13 \text{ м}^2/\text{с}^2$  наблюдались в 5-й серии измерений с 15 ч 10 мин до 15 ч 20 мин. Затем структурные функции уменьшались со временем. На аналогичную зависимость интенсивности турбулентности от времени суток указывалось также в [15], где отмечалось, что интенсивность турбулентности существенно больше ранним утром, чем поздним вечером.

По поведению  $D_{rr}(\Delta t)$  можно судить о динамике верхней границы высоты слоя перемешивания  $h$ . Так, для 1-й серии измерений с 11 ч 10 мин  $h \sim 80$  м; она превышала 200 м в полдень, затем через 2 ч уменьшалась примерно до 170 м и лежала в интервале 90–110 м для 3, 4, 6 и 7-й серий измерений, достигая минимума  $h \sim 60$  м в 5-й серии с 15 ч 10 мин (см. рис. 2, б). В 8, 10, и 12-й сериях она превышала 200 м. Это согласуется с оценками [12], согласно которым высота слоя перемешивания достигает максимума  $h \sim 200$  м к полудню и затем уменьшается со временем.

## 2. Временная динамика структурной характеристики поля скорости ветра

Исследовалась также почасовая суточная динамика структурной характеристики поля скорости ветра, которая рассчитывалась по формуле [2]:

$$C_V^2(z_k, r) = \left\langle \left[ V_{z,j}(z_k + r) - V_{z,j}(z_k) \right]^2 \right\rangle r^{-2/3}. \quad (8)$$

Согласно [8], разнос точек наблюдения может быть выбран либо в горизонтальном (одноточечные измерения), либо в вертикальном направлении. В качестве примера на рис. 3 показаны усредненные за 10-минутный период (по 150 индивидуальным профилям) вертикальные профили

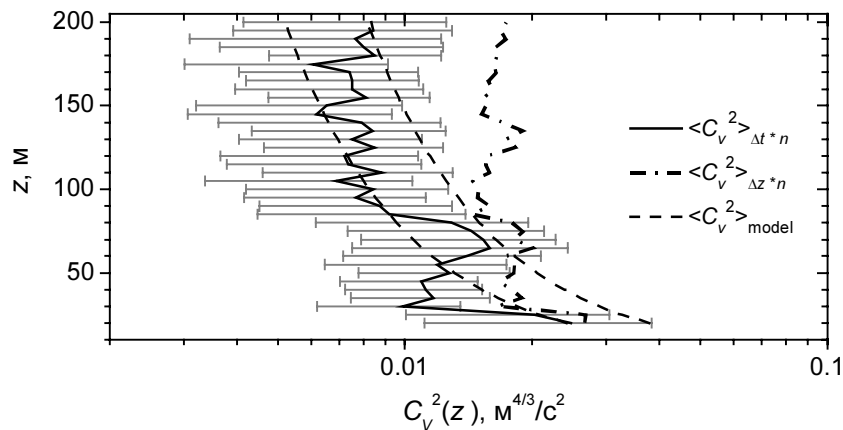


Рис. 3. Структурные характеристики поля скорости ветра, рассчитанные по результатам мини-содарных измерений 13 сентября 2006 г. с 22 ч 10 мин до 22 ч 20 мин (12-я серия измерений). Штрихпунктирная кривая показывает профиль  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta z * n}$ , рассчитанный для вертикального разноса точек наблюдения. Сплошной кривой показан профиль  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta t * n}$ , рассчитанный из одноточечных измерений для горизонтального разноса точек наблюдения. Пунктирные кривые иллюстрируют аппроксимацию полученных экспериментальных зависимостей по формуле (9). Горизонтальными линиями отмечены 95 %-е доверительные интервалы для  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta t * n}$

$C_V^2(z)$ , рассчитанные для 12-й серии измерений. Здесь  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta t * n}$  обозначены профили  $C_V^2(z_k)$ , рассчитанные из одноточечных измерений вертикальной скорости ветра в строке  $z_k$  с временной задержкой  $n_t \Delta t$  с использованием гипотезы замороженной атмосферной турбулентности, где  $n_t = 1, \dots, N/5$  – порядковый номер профиля скорости ветра в серии,  $N = 150$ ,  $\Delta t = 4$  с – период посылки звуковых импульсов, а  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta z * n}$  обозначены соответствующие профили, рассчитанные для вертикального разнеса точек наблюдения на расстояние  $\Delta r = n_z \Delta z$ , где  $n_z = 1, \dots, M/3$  – порядковый номер строка,  $M = 40$  и  $\Delta z = 5$  м – вертикальная протяженность строка [18]. Пунктирная кривая иллюстрирует аппроксимацию полученной высотной зависимости по формуле

$$C_V^2(z) = C_{V0} \cdot z^{-2/3}, \quad (9)$$

предсказанной теоретически в [2] для условий развитой конвекции. Константы аппроксимации для двух групп кривых  $C_{V0} = C_{V1,2}^2(1 \text{ м})$  и среднеквадратичные отклонения СКО<sub>1,2</sub>, характеризующие качество аппроксимаций, приведены в табл. 3. Горизонтальными отрезками на рис. 3 показан 95 %-й доверительный интервал для  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta t * n}$ . Соответствующий доверительный интервал для  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta z * n}$  опущен, чтобы не загромождать рисунок.

Таблица 3

Константы аппроксимации структурных характеристик поля скорости ветра по формуле (9)

| № серии | $C_{V1}^2(1 \text{ м}), \text{ м}^{4/3}/\text{с}^2$ | СКО <sub>1</sub> , $\text{ м}^{4/3}/\text{с}^2$ | $C_{V2}^2(1 \text{ м}), \text{ м}^{4/3}/\text{с}^2$ | СКО <sub>2</sub> , $\text{ м}^{4/3}/\text{с}^2$ |
|---------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1       | $1,39 \cdot 10^{-1}$                                | $8,67 \cdot 10^{-3}$                            | $2,40 \cdot 10^{-1}$                                | $8,67 \cdot 10^{-3}$                            |
| 2       | $1,11 \cdot 10^{-1}$                                | $6,96 \cdot 10^{-3}$                            | $1,90 \cdot 10^{-1}$                                | $6,96 \cdot 10^{-3}$                            |
| 3       | $1,16 \cdot 10^{-1}$                                | $1,24 \cdot 10^{-2}$                            | $2,41 \cdot 10^{-1}$                                | $1,24 \cdot 10^{-2}$                            |
| 4       | $9,59 \cdot 10^{-2}$                                | $6,23 \cdot 10^{-3}$                            | $1,72 \cdot 10^{-1}$                                | $6,23 \cdot 10^{-3}$                            |
| 5       | $1,04 \cdot 10^{-1}$                                | $9,47 \cdot 10^{-3}$                            | $2,06 \cdot 10^{-1}$                                | $9,47 \cdot 10^{-3}$                            |
| 6       | $1,43 \cdot 10^{-1}$                                | $7,88 \cdot 10^{-3}$                            | $2,12 \cdot 10^{-1}$                                | $7,88 \cdot 10^{-3}$                            |
| 7       | $1,12 \cdot 10^{-1}$                                | $8,85 \cdot 10^{-3}$                            | $2,27 \cdot 10^{-1}$                                | $8,85 \cdot 10^{-3}$                            |
| 8       | $9,90 \cdot 10^{-2}$                                | $5,72 \cdot 10^{-3}$                            | $1,69 \cdot 10^{-1}$                                | $5,72 \cdot 10^{-3}$                            |
| 9       | $1,39 \cdot 10^{-1}$                                | $8,88 \cdot 10^{-3}$                            | $2,48 \cdot 10^{-1}$                                | $8,88 \cdot 10^{-3}$                            |
| 10      | $1,25 \cdot 10^{-1}$                                | $6,55 \cdot 10^{-3}$                            | $2,20 \cdot 10^{-1}$                                | $6,55 \cdot 10^{-3}$                            |
| 11      | $1,22 \cdot 10^{-1}$                                | $9,56 \cdot 10^{-3}$                            | $2,25 \cdot 10^{-1}$                                | $9,56 \cdot 10^{-3}$                            |
| 12      | $1,78 \cdot 10^{-1}$                                | $6,10 \cdot 10^{-3}$                            | $2,79 \cdot 10^{-1}$                                | $6,10 \cdot 10^{-3}$                            |

Из графиков видно синхронное высотное поведение и хорошее согласие профилей  $C_V^2(z)$  с учетом соответствующих доверительных интервалов. Вместе с тем следует отметить систематическое (на 48–67 %) занижение значений  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta z * n}$  по сравнению с  $\langle C_V^2 \rangle_{\Delta t * n}$ . В [7] также отмечалось, что в зависимости от класса атмосферной стабильности энергия вертикальных пульсаций скорости ветра на 30–50 % меньше, чем для изотропной турбулентности. Из табл. 3 видно, что  $C_{V1}^2(1 \text{ м}) = 0,099 - 0,178 \text{ м}^{4/3}/\text{с}^2$  и  $C_{V2}^2(1 \text{ м}) = 0,169 - 0,279 \text{ м}^{4/3}/\text{с}^2$  для проведенных серий измерений, то есть за период наблюдений структурные характеристики менялись на 44 и 39 % соответственно.

### Заключение

В работе представлены высотные профили характеристик атмосферной турбулентности, таких, как временные продольная и поперечная структурные функции поля скорости ветра и структурная характеристика скорости ветра, рассчитанные по оригинальной методике из временных рядов регулярных наблюдений вертикальных профилей вектора скорости ветра автономным доплеровским мини-содаром. Найдено, что структурные функции вначале растут с увеличением разнеса точек наблюдения, а затем насыщаются, что согласуется с имеющимися в литературе данными.

ми. Эффективность предложенной в [9–11] методики обработки данных мини-содара подтверждается тем, что высотные профили структурных характеристик, полученные с использованием продольной и поперечной структурных функций, согласуются и хорошо описываются предсказанной теорией  $z^{-2/3}$ -зависимостью. На основе проведенных регулярных мини-содарных измерений проанализированы почасовая суточная динамика этих характеристик турбулентности.

Предложенная методика обработки содарных данных может использоваться для визуализации крупномасштабных неоднородностей поля скорости ветра в атмосферном пограничном слое, обеспечивая информацию о пространственной структуре и перемежаемости атмосферной ветровой турбулентности в режиме реального времени. В дополнение к традиционным факсимильным записям содаров, которые наглядно иллюстрируют динамику температурной турбулентности в пограничном слое атмосферы, она дает срез ветровой турбулентности в реальном масштабе времени, что может быть использовано, например, для повышения безопасности полетов. Она также позволяет рассчитать структурные функции скорости ветра для больших разносов точек наблюдения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967.
2. Богушевич А.Я., Шаманаева Л.Г. // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12. – № 1. – С. 54–57.
3. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. – Ч. II. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.
4. Shamaeva L.G. // Proc. 14<sup>th</sup> Int. Symp. for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing. – Denmark, 2008. – P. 012007-1–012007-6.
5. Андервуд К.Х., Шаманаева Л.Г. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 5. – С. 85–90.
6. Underwood K. and Shamaeva L. // 14<sup>th</sup> International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing ISARS 2010. <http://www.isars2010.uvsg.fr>, P. O-TUR/05-1–O-TUR/05-4.
7. Kouznetsov R. and Kallistratova M. // 14<sup>th</sup> International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing ISARS 2010. <http://www.isars2010.uvsg.fr>, P. O-TUR/02-1–O-TUR/02-4.
8. Coulter R.L. // Bound. Layer Meteor. – 1990. – V. 52. – P. 75–91.
9. Kaimal J.C. // Ibid. – 1973. – V. 4. – P. 289–309.
10. <http://minisodar.org>.
11. Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Акустич. журн. – 1996. – Т. 42. – №1. – С. 88–90.
12. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. – Томск: Изд-во «Водолей», 2001.
13. DeLoach R. // On the excess attenuation of sound in the atmosphere. Technical Note NASA TN D-7823. – 1975. – 71 p.
14. Ingard U. // J. Acoust. Soc. Amer. – 1953. – V. 25. – No. 3. – P. 405–411.
15. Beran D.W., Reynolds R.M., and Getting J.T. // Sound Attenuation in the Free Atmosphere. — Project EAR, Publ. No. 17, Rep. No. V, Univ. Melbourne. – 1970.

\*Atmospheric Systems Corporation, Santa Clarita, CA, USA

E-mail: ascken@gmail.com

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

E-mail: sima@iao.ru

Поступила в редакцию 12.01.10.