

## Пространственно–временная динамика характеристик атмосферной турбулентности по результатам акустического зондирования

Н. П. Красненко<sup>1,2\*</sup> Л. Г. Шаманаева<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, д. 10/3

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
радиотехнический факультет, кафедра радиотехнических систем, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, д. 40

<sup>3</sup>Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН,  
Россия, 634021, Томск, площадь Академика Зуева, д. 1

(Статья поступила 16.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Анализируется пространственно-временная динамика трех компонентов скорости ветра, продольных и поперечных структурных функций поля скорости ветра, структурных характеристик температуры и скорости ветра, скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, и внешних масштабов температурной и динамической турбулентности в атмосферном пограничном слое. Использован замкнутый итерационный алгоритм обработки содарных данных с учетом турбулентного ослабления звука по трассе распространения, позволяющий одновременно восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик полей температуры и скорости ветра и исследовать их взаимосвязь. Эффективность его использования подтверждена сравнением полученных результатов с данными лидарного зондирования и согласием полученных результатов с имеющимися теоретическими оценками.

PACS: 92.60.±e

УДК: 551.501.7

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

### ВВЕДЕНИЕ

Знание характеристик атмосферной турбулентности имеет фундаментальное значение для исследования структуры и динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) и построения его математической модели, широко используемой для целей синоптического прогноза, теоретического анализа и прогноза распространения электромагнитного и акустического излучений, а также диффузии загрязняющих примесей. 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 компонент скорости ветра в двух точках. Для измерения характеристик турбулентности в АПС в основном используются средства лазерного (лидары) и акустического (содары) зондирования. Применение содаров позволяет получать длинные временные ряды наблюдений вертикальных профилей вектора скорости вектора и рассчитывать структурные функции поля скорости ветра для разноса точек наблюдения вплоть до нескольких сотен метров [1–6].

В данной статье анализируется пространственно-временная динамика характеристик атмосферной турбулентности, включая три компонента скорости ветра,

продольные и поперечные структурные функции поля скорости ветра, структурные характеристики температуры и скорости ветра, скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, и внешние масштабы температурной и динамической турбулентности, рассчитанные из временных рядов вертикальных профилей вектора скорости ветра, измеренных содаром «Звук-2» с рабочей частотой 1700 Гц и мини-содаром AV4000 с рабочей частотой 4900 Гц [7] с использованием замкнутого итерационного алгоритма обработки содарных данных с учетом турбулентного ослабления звука по трассе распространения до зондируемого объема и обратно, позволяющего впервые одновременно восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик полей температуры и скорости ветра и исследовать их взаимосвязь.

### 1. МЕТОД ЗОНДИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Доплеровские содары позволяют получать длинные временные ряды вертикальных профилей мощности обратнорассеянного сигнала  $P_j(z_k)$  и трех компонент скорости ветра  $V_{i,j}(z_k)$  в высотных стробах  $z_k$ , где  $i = x, y, z$ ,  $j = 1, \dots, N$  обозначает порядковый номер профиля в серии из  $N$  измерений, и  $k = 1, \dots, M$  обозначает порядковый номер строба. Их можно использовать для расчета временных продольных и поперечных структурных функций для каждого высотного

\*E-mail: krasnenko@imces.ru

†E-mail: sima@iao.ru

строба  $z_k$ :

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

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

Здесь

$$|\mathbf{V}(z_k)| = \sqrt{\langle V_x(z_k) \rangle^2 + \langle V_y(z_k) \rangle^2 + \langle V_z(z_k) \rangle^2}, \quad (3)$$

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

$$V'_j(z_k) = \{V_{x,j} \langle V_x(z_k) \rangle + V_{y,j}(z_k) \langle V_y(z_k) \rangle + V_{z,j}(z_k) \langle V_z(z_k) \rangle\} / |\langle V(z_k) \rangle| \quad (5)$$

— продольный компонент вектора скорости ветра по результатам единичного измерения для высотного строга  $z_k$ , и  $\langle \mathbf{V}(z_k) \rangle$  — вектор скорости ветра для строга  $z_k$  усредненный за период измерения  $T = Nt$ . Вертикальные профили структурной характеристики скорости ветра  $C_V^2(z_k)$  рассчитывались по формуле [8]

$$C_V^2(z_k) = \left\langle [V_{z,j}(z_k + r) - V_{z,j}(z_k)]^2 \right\rangle \cdot r^{-2/3}. \quad (6)$$

Согласно [9], разнос точек наблюдения может быть выбран либо в горизонтальном направлении, либо в вертикальном направлении. В первом случае,  $C_{V_t}^2(z_k)$  рассчитывается из вертикального компонента скорости ветра, измеренного в строге  $z_k$  с временной задержкой  $n_t \Delta t$  ( $n_t = 1, \dots, N/5$ ,  $N$  — число измерений в серии и  $\Delta t$  — период повторения импульсов; в этом случае,  $r = n_t \Delta t \langle \mathbf{V}(z_k) \rangle$ ). Во втором случае,  $C_{V_z}^2(z_k)$  рассчитывается из вертикального компонента скорости ветра, измеренного в различных строгах, разнесенных на расстояние  $r = n_z \Delta z$  (здесь  $\Delta z$  — вертикальная протяженность строга, и  $M$  — число стробов в интервале высот зондирования).

Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности  $\varepsilon(z_k)$  рассчитывалась по структурной характеристике скорости ветра с использованием формулы [9]

$$\varepsilon(z_k) = \left[ \frac{C_V^2(z_k)}{1.97} \right]^{3/2}. \quad (7)$$

По мощности сигнала обратного рассеяния  $P_j(z_k)$ , с использованием итерационного алгоритма, рассчитывался вертикальный профиль структурной характеристики температуры и внешний масштаб температурной турбулентности.

Математически, внешний масштаб температурной турбулентности вычислялся с использованием замкнутого итерационного алгоритма, учитывающего дополнительное турбулентное ослабление сигнала. Выражение для  $i$ -той итерации внешнего масштаба температурной турбулентности  $L_{0T}^{(i)}$  в зависимости от высоты  $z_k$  над подстилающей поверхностью имеет вид

$$L_{0T}^{(i)}(z_k) = \left[ \frac{C_T^{2(i)}(z_k)}{2.8\gamma_a^2} \right]^{3/4}. \quad (8)$$

Здесь  $\gamma_a$  — адиабатический градиент температуры,  $C_T^{2(i)}(z_k)$  —  $i$ -тая итерация структурной характеристики температуры, которая для  $j$ -того измерения рассчитывается по формуле

$$C_{T_j}^{2(i)}(z_k) = \frac{2.7 \cdot 10^2 A_c \lambda^{1/3} T^2 z^2 P_j(z_k)}{\gamma_1 \gamma_2 c \tau A_t P_0 L^{(i-1)}(z_k)}, \quad (9)$$

$c$  — скорость звука,  $\lambda = c/f$  — длина волны,  $f$  — рабочая частота содара,  $T$  — поверхностная температура воздуха,  $\tau$  — длительность импульса содара,  $A_c$  — инструментальная константа,  $A_t$  — площадь приемопередающей антенны содара,  $P_j(z_k)$  — мощность сигнала обратного рассеяния с высоты  $z_k$  в  $j$ -том измерении,  $j = 1, \dots, N$ ,  $P_{0j}$  — мощность излучаемого сигнала,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — коэффициенты преобразования электрического сигнала в акустический и наоборот,

$$L^{(i)}(z_k) = L_{abs}(z_k) \cdot L_{turb}^{(i)}(z_k) \quad (10)$$

—  $i$ -тая итерация фактора ослабления,  $i = 1, \dots, M$ , обусловленная классическим и молекулярным поглощением звуковых волн и его турбулентным ослаблением [10] при распространении от передатчика до рассеивающего объема и обратно.

Пространственная структурная функция скорости ветра в зависимости от разнота точек наблюдения  $r$  в инерционном ( $l_{0V} \ll r \ll L_{0V}$ , где  $l_{0V}$  — внутренний и  $L_{0V}$  — внешний масштабы динамической турбулентности) и энергетическом интервалах ( $L_{0V} \ll r$ ) описывается следующими соотношениями [11]:

$$D(z_k, r) = \begin{cases} C_V^2(z_k) \cdot r^{2/3}, & l_{0V} \ll r \ll L_{0V}(z_k), \\ C_V^2(z_k) \cdot L_{0V}(z_k)^{2/3}, & L_{0V}(z_k) \ll r. \end{cases} \quad (11)$$

Она пропорциональна  $r^{2/3}$  в инерционном интервале и затем насыщается на постоянную величину. Точка перегиба зависимости структурной функции от разнота точек наблюдения в степени  $2/3$  и определяет

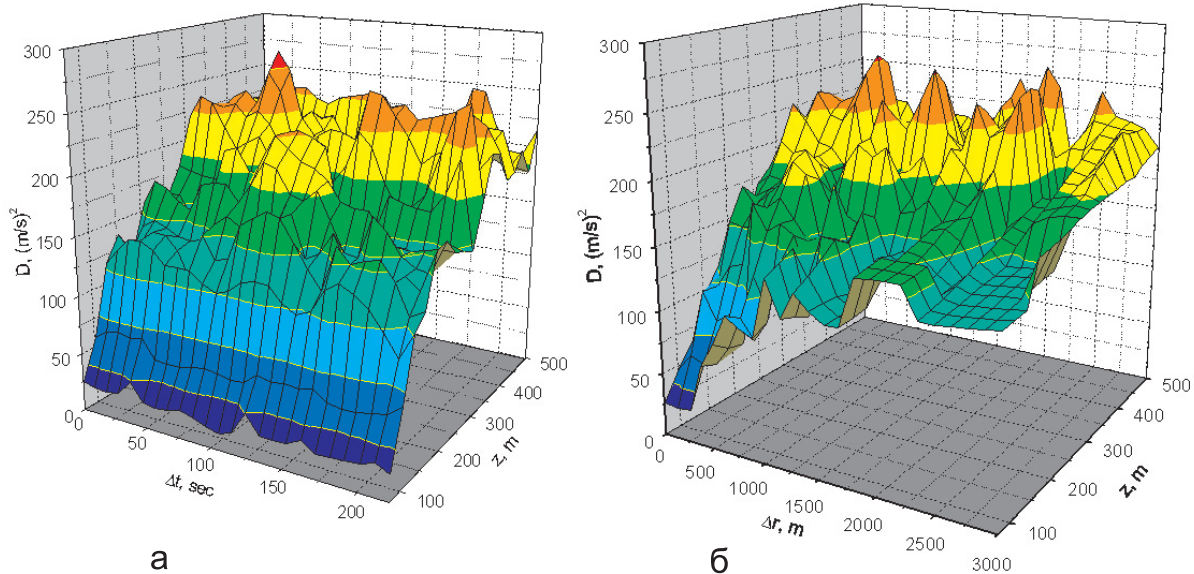


Рис. 1: Продольная временная (а) и пространственная (б) структурные функции скорости ветра по результатам измерений содаром «Звук-2»

величину внешнего масштаба  $L_{0V}(z_k)$  динамической турбулентности. Формулы (1), (2) и (6)–(9) были реализованы в замкнутом итерационном вычислительном алгоритме.

Измерения проводились трехкомпонентным моноста- тическим доплеровским содаром «Звук-2» [12] с ра- бочей частотой 1700 Гц, периодом посылки импульсов 11,5 с, длительностью импульса 150 мс. Одна прием- ная антенна содара была ориентирована вертикально, а две другие наклонены под углом  $20^\circ$  к вертика- ли в ортогональных плоскостях. Нормированная мощ- ность сигнала обратного рассеяния измерялась с вы- сотным разрешением  $\Delta z = 2$  м, минимальная высота зондирования варьировала от 48 до 74 м в зависимости от шумовой обстановки в период измерения. Итерации прекращались на высоте  $z_M$ , когда они начинали рас- ходиться. При этом дополнительно контролировалось отношение сигнал/шум по факсимильной записи сиг- нала. Обработывались серии из  $N = 53$  измерений, что обеспечивало 10-мин период усреднения. Аппара- турные константы содара «Звук-2», входящие в фор- мулу (9), были определены в [13] путем калибров- ки содара по результатам независимых измерений  $C_T^2$  ультразвуковым термометром/анемометром в условиях развитой конвекции.

Обработывались также результаты измерений до- плеровским мини-содаром AV4000 [7]. Рабочая ча- стота мини-содара составляла 4900 Гц, длительность импульса излучения  $\tau = 60$  мс, период посылки зон- дирующих импульсов 4 с. Излучение последовательно посылалось и принималось в трех направлениях — вер- тикальном и наклонных под углами  $\alpha = 14^\circ$  к вер- тикали в двух взаимно ортогональных плоскостях.

Высотные профили трех компонент скорости вет- ра  $V_{i,j}(z_k)$ ,  $i = x, y, z$ ,  $j = 1, \dots, N$  измерялись в  $M = 40$  строках  $z_k$  шириной  $\Delta z = 5$  м в диапазоне высот 20–200 м. Серии из  $N = 150$  профилей обеспечи- вали получение структурных функций скорости ветра с 10-мин усреднением.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1а приведен типичный пример времен- ной продольной структурной функции скорости ветра  $D_{rr}(z, \Delta t)$ , рассчитанной по формуле (1) по резуль- татам измерений содаром «Звук-2» летом в утренние часы с 10:00 до 10:10 местного времени над степной поверхностью Земли, а на рис. 1б показана соответ- ствующая ей пространственная структурная функция  $D_{rr}(z, \Delta r)$ , полученная с использованием гипотезы за- мороженной турбулентности [8]. Видно, что времен- ные структурные функции с увеличением интервала времени наблюдений остаются практически постоян- ными, испытывая только локальные осцилляции. Их значения растут с увеличением высоты зондирования. Пространственные структурные функции вначале рас- тут с увеличением разнеса точек наблюдения, а затем выходят на режим насыщения, как и предсказывается теорией [8, 11]. Анализ полученных результатов пока- зал, что с увеличением высоты зондирования, насыще- ние наблюдается при меньших разнесах  $\Delta r$ .

На рис. 2 показана продольная временная структу- рная функция скорости ветра рассчитанная с использо- ванием уравнения (1). Высотные профили вектора ско- рости ветра измерялись мини-содаром 25 мая 2006 г.

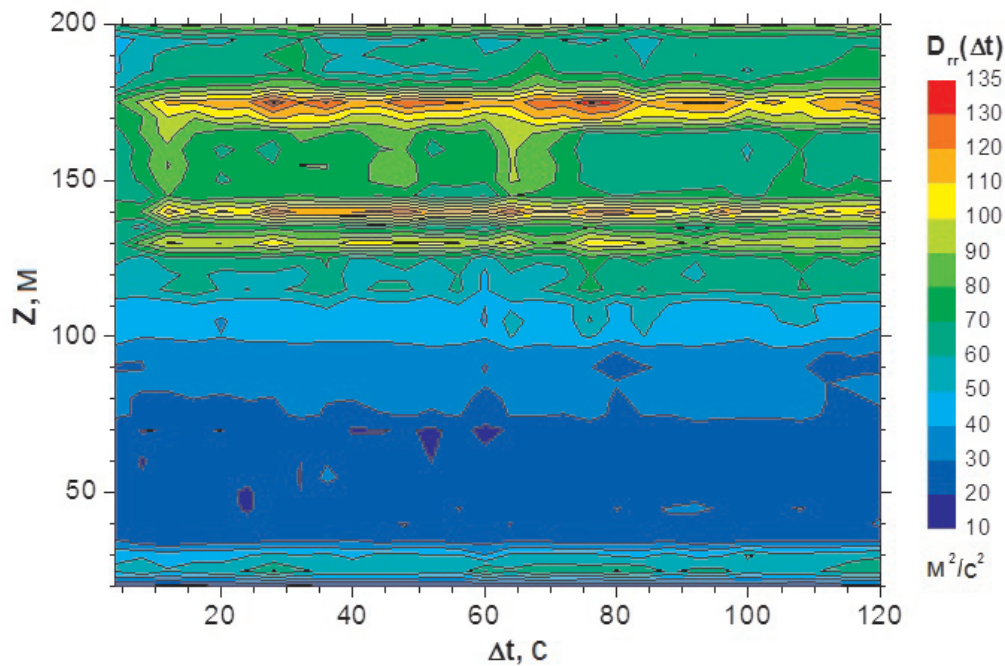


Рис. 2: Продольная временная структурная функция скорости ветра  $D_{rr}(z, \Delta t)$ , рассчитанная по результатам измерений мини-содаром

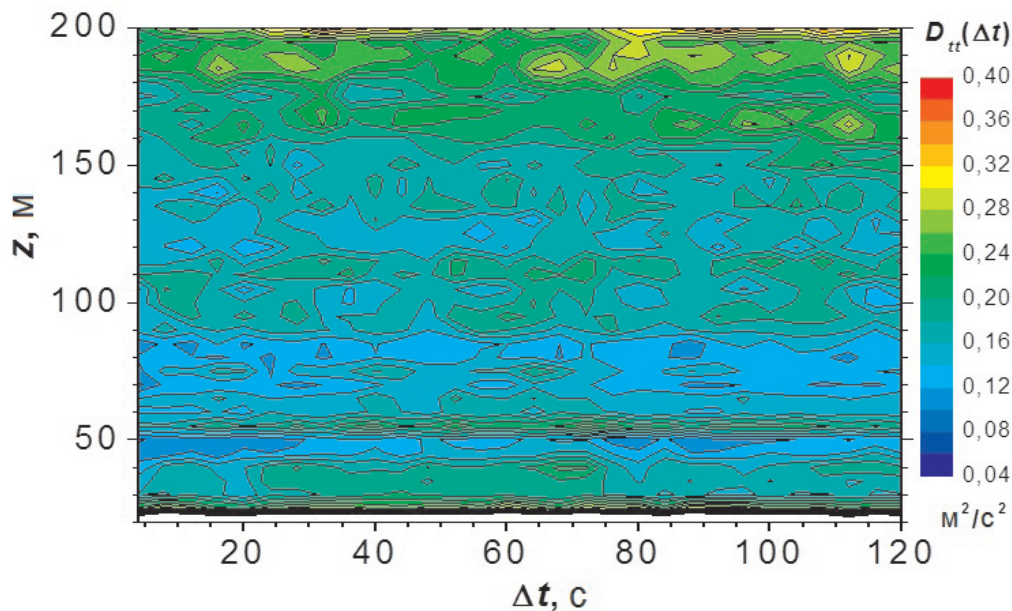


Рис. 3: Поперечная временная структурная функция скорости ветра  $D_{tt}(z, \Delta t)$ , рассчитанная по результатам измерений мини-содаром

с 16 ч до 16 ч 10 мин. Видно, что поле скорости ветра однородно во времени; оно остается практически неизменным с увеличением времени и растет с высотой точки наблюдения. При этом с увеличением высоты наблюдения с 30 до 110 м, значение структурной

функции возрастает с  $\sim 10 \text{ м}^2/\text{с}^2$  до  $\sim 50 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Для больших высот,  $D_{rr}(z, \Delta t)$  увеличивается быстрее, достигая  $\sim 100 \text{ м}^2/\text{с}^2$  для  $z = 125 \text{ м}$ . Два слоя интенсивной турбулентности, в которых  $D_{rr}(z, \Delta t)$  достигает  $135 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , располагаются на высотах 125–145 м и 170–

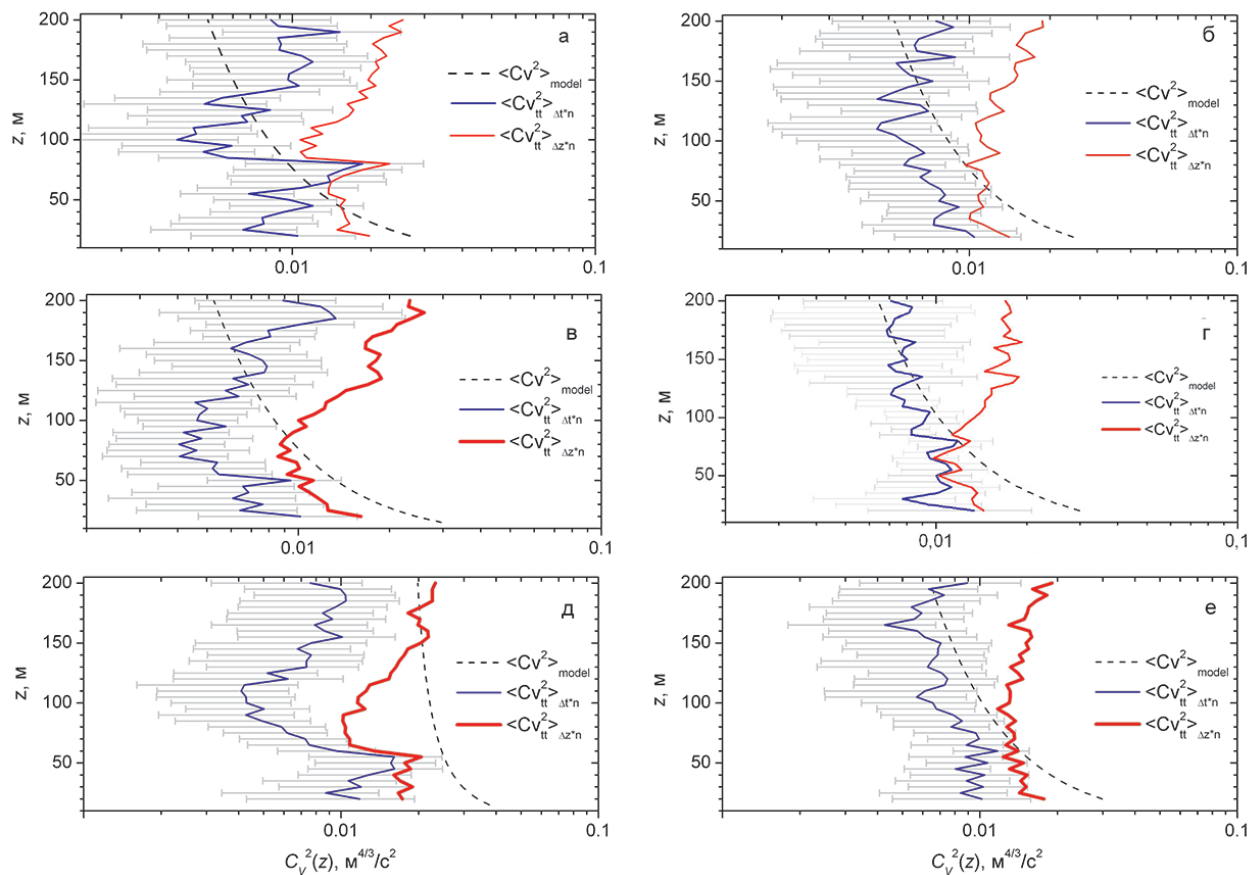


Рис. 4: Почасовая динамика структурной характеристики поля скорости ветра. Горизонтальными линиями отмечены 95% доверительные интервалы

180 м. Для высот более 180 м, структурная функция насыщается на  $D_{rr}^{\text{sat}}(z, \Delta t) \approx 100 \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

Соответствующая временная поперечная структурная функция  $D_{tt}(z, \Delta t)$ , рассчитанная по формуле (2), приведена на рис.3. Она много меньше  $D_{rr}(z, \Delta t)$ , что отмечалось ранее в [3–5]. Сильная анизотропия временных спектров флуктуаций амплитуды звуковой волны при ее продольном и поперечном распространении относительно скорости ветра отмечалась также в [14]. При этом корреляция в продольном направлении была намного более сильной, чем в поперечном. Временная поперечная структурная функция, в отличие от продольной, изменяется со временем. С увеличением высоты, она растет, и насыщается на  $D_{tt}^{\text{sat}}(z, \Delta t) \approx 0,23 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Отчетливо видны мелко-масштабные неоднородности со временем жизни порядка 10 с.

Следует отметить, что в дополнение к традиционным факсимильным записям содаров, которые иллюстрируют динамику температурной турбулентности в пограничном слое атмосферы, представленные результаты иллюстрируют динамику ветровой турбулентности, наглядно показывая слои более интенсивной ветровой турбулентности, что может быть использовано, напри-

мер, для повышения безопасности полетов.

Суточная динамика структурной характеристики поля скорости ветра иллюстрируется на рис.4, где показаны вертикальные профили  $C_V^2$ , рассчитанные по данным дневных измерений мини-содаром 13 сентября 2006 г., усредненные за период 10 мин (по 150 индивидуальным профилям). Здесь профили (а) получены с 11 ч 10 до 11 ч 20 мин, (б) с 12 ч 10 до 12 ч 20 мин, (в) с 15 ч 10 до 15 ч 20 мин, (г) с 16 ч 10 до 16 ч 20 мин, (д) с 19 ч 10 до 19 ч 20 мин, (е) с 20 ч 10 мин до 20 час 20 мин. Пунктирная кривая иллюстрирует высотную зависимость  $C_V^{2(\text{теор})}(z) \sim z^{-2/3}$ , предсказанную теоретически в [8] для условий развитой конвекции. Из полученных результатов видно, что для представленной серии измерений,  $C_V^{2(\text{теор})}(1 \text{ м})$  остается постоянной и равной  $0,18 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^2$  с 11 до 15 ч, затем в 16 ч уменьшается до  $0,12 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^2$ , с 17 ч растет с  $0,15 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^2$  до  $0,22 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^2$  в 18 ч, достигая максимального значения  $0,25 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^2$  в 19 и 20 ч, затем уменьшается до  $0,1 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^2$  в 21 ч, и вновь возрастает до  $0,22 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^2$  в 22 ч.

Временная динамика вертикального профиля скорости диссипации кинетической энергии турбулентности  $\varepsilon$ , рассчитанная по формуле (7) из данных минисо-

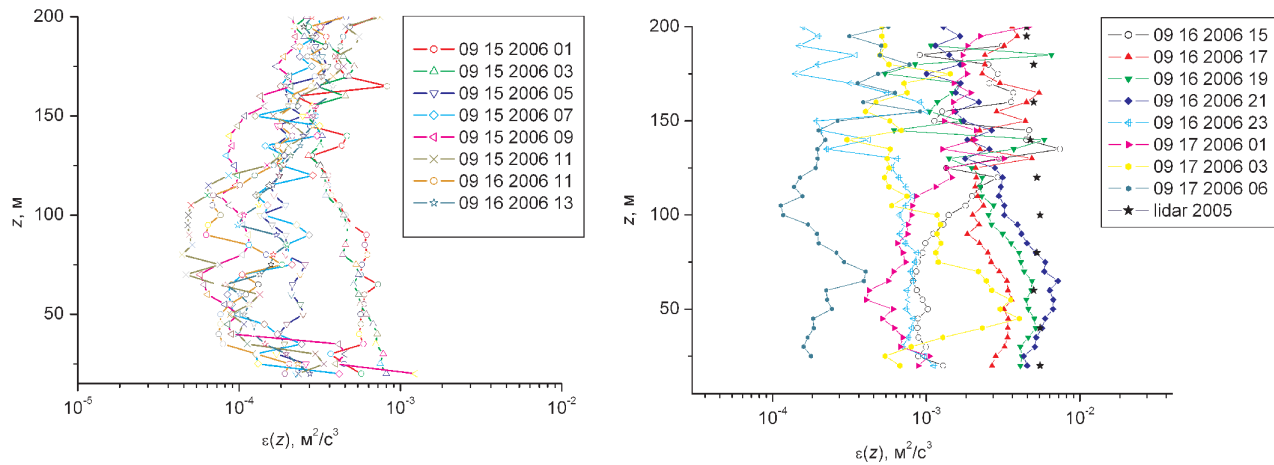


Рис. 5: Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности по результатам измерений мини-содаром

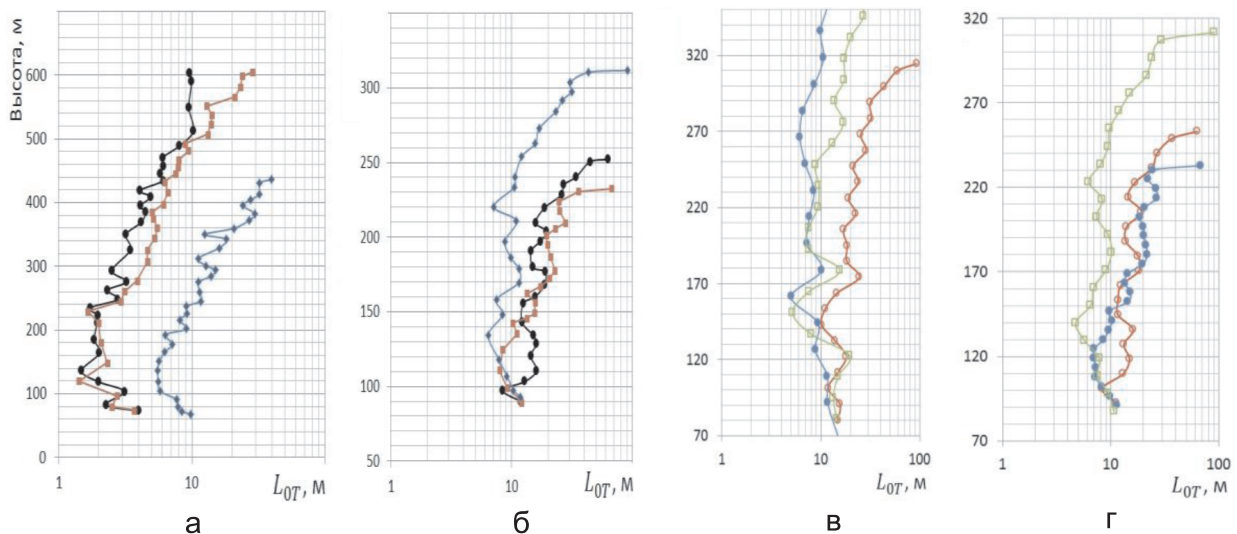


Рис. 6: Внешний масштаб температурной турбулентности для 3-х последовательных 10-минутных серий измерений содаром «Звук-2» (кружки, ромбики, квадратики) в условиях развивающейся (а) и развитой конвекции (б) и в условиях устойчивой стратификации (светлые кружки, темные кружки, светлые квадратики) (в, г) с 01:00 местного времени

дара с учетом дополнительного турбулентного ослабления, приведена на рис. 5. Месяц, число, год, и время начала 10-мин серии содарных измерений указаны справа на рисунке. Для сравнения, звездочками показаны результаты восстановления  $\varepsilon$  по измерениям 2-мкм когерентным доплеровским лидаром, опубликованные в [15].

Видно хорошее согласие результатов лидарных и акустических измерений. Анализ результатов, представленных на рис. 5 показал, что  $\varepsilon(z)$  уменьшается примерно на порядок с увеличением местного времени измерений с 01:00 до 09:00, что согласуется с результатами лидарных измерений, представленных в [16]. Она достигает минимума в 11:00. Скорость диссипации 16 сентября растет примерно на полтора порядка,

когда местное время измерения увеличивается с 11:00 до 21:00, а затем начинает уменьшаться, когда время измерений увеличивается до 23:00. Для  $z = 100$  м 17 сентября, она уменьшается с  $\sim 8 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^2$  в 01:00 до  $1 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^2$  в 05:00.

На рис. 6 приведены результаты измерений внешнего масштаба температурной турбулентности  $L_{0T}(z)$ , выполненных в условиях развивающейся конвекции (а) в утренние часы (с 10:00 местного времени), развитой дневной конвекции (б) (с 15:00 местного времени), и в условиях устойчивой стратификации (в, г) для различных ночей.

Видно, что внешний масштаб температурной турбулентности растет с высотой, что согласуется с его моделями, обзор которых представлен в [15].

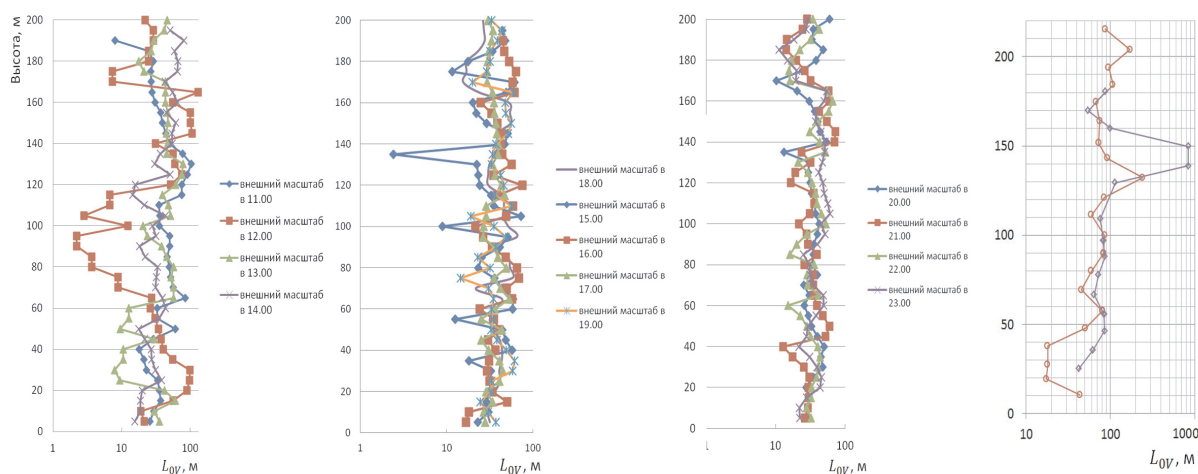


Рис. 7: Полусуточная почасовая динамика высотных профилей внешнего масштаба динамической турбулентности по результатам мини-содарных изменений. Время начала измерения профиля, усредненного за 10 мин период, указано справа от кривых

На рис. 7 приведена полусуточная почасовая динамика вертикальных профилей внешнего масштаба динамической турбулентности, рассчитанных по 10-минутным сериям мини-содарных измерений с 11:00 до 23:00 местного времени. Из рисунка видно, что внешний масштаб динамической турбулентности лежит в интервале от 5 м до 100 м, что хорошо согласуется с результатами его теоретической оценки в [17] и результатами самолетных измерений в [18]. Прослеживается также общая тенденция роста внешнего масштаба с высотой, отмеченная в [17, 18]. Что касается временной динамики, видно, что максимальные значения внешнего масштаба наблюдаются в утренние и вечерние часы. При этом внешний масштаб изменяется утром больше, чем в дневное и вечернее время, и его вертикальная стратификация также более ярко выражена в утренние часы.

Для сравнения, на рис. 7г показан высотный профиль внешнего масштаба динамической турбулентности по данным ночных измерений [19] 2-мкм доплеровским лидаром с 23:23 до 23:40 местного времени с использованием азимутальной структурной функции после пространственной фильтрации лидарных данных (кружки) а также с использованием радиальной структурной функции после пространственной фильтрации лидарных данных (ромбики). Из рисунка видно хорошее согласие наших результатов с данными лидарных измерений. Также обращает на себя внимание наличие ярко выраженной слоистой структуры внешнего мас-

штаба динамической турбулентности как по содарным, так и по лидарным данным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений характеристик турбулентности показали, что поперечная структурная функция поля скорости ветра значительно меньше продольной, что указывает на сильную анизотропию атмосферных флуктуаций в продольном и поперечном направлении и сдвливании мелкомасштабной турбулентности в вертикальном направлении. При этом вертикальные профили структурных характеристик скорости ветра, рассчитанные с использованием продольной и поперечной структурных функций, хорошо согласуются между собой и описываются предсказанной теорией  $z^{-2/3}$  зависимостью от высоты. В течение суток, значения скорости диссипации кинетической энергии турбулентности изменяются на 2 порядка, при этом она минимальна в утренние часы, затем увеличивается, достигая максимума в вечерние часы, а затем вновь уменьшается примерно на порядок в ночные часы. С ростом высоты, скорость диссипации вначале уменьшается, а затем остается практически постоянной. В реальном масштабе времени визуализируется структура как температурной, так и ветровой турбулентности, что очень важно для практических приложений.

- [1] Coulter R.L., Kallistratova M.A. *Meteorology and Atmospheric Physics*. **85**, N 1-3. P. 3. (2004).  
 [2] Богушевич А.А., Шаманаева Л.Г. *Опт. атм. океана*. **12**, № 1. С. 54. (1999).

- [3] Shamaeva L.G. *Proc. 14th Int. Symp. for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing*. Denmark. P.012007-1. (2008).  
 [4] Андервуд К.Х., Шаманаева Л.Г. *Известия Вузов. Фи-*

- зика. № 5. С. 85. (2010).
- [5] *Underwood K., Shamanaeva L.* 14th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing ISARS 2010. P. O-TUR/05-1-O-TUR/05-4. [Электронный ресурс] Режим доступа. URL: <http://www.isars2010.uvsq.fr>.
- [6] *Андервуд К.Х., Шаманаева Л.Г.* Известия Вузов. Физика. № 11. С. 102. (2011).
- [7] <http://minisodar.org>.
- [8] *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. (М.: Наука, 1967).
- [9] *Coulter R.L.* Bound. Layer Meteor. **52**, P. 75. (1990).
- [10] *Baikalova R.A., Krekov G.M., Shamanaeva L.G.* J. Acoust. Soc. Am. **83**, N 4. P. 1332. (1988).
- [11] *Рытов С.М., Кравицов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля. (М.: Наука, 1978). 463 с.
- [12] *Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G.* Meteorol. Z. **7**. P. 392. (1998).
- [13] *Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G.* Proc. 9th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans, Vienna. P. 223-226. (1998).
- [14] *Патрушев Г.Я., Ростов А. П.* Акуст. журн. **42**, № 1. С. 88. (1996).
- [15] *Банах В.А., Рам С., Смалихо И.Н., Фалиц А.В.* Оптика атмосферы и океана. **20**, № 12. С. 1115. (2007).
- [16] *Банах В.А., Смалихо И.Н., Пичугина Е.Л., Брюер А.* Оптика атмосферы и океана. **22**, № 10. С. 966. (2009).
- [17] *Ostashev V.E., Wilson D.K.* Acta Acustica. **86**. P. 260. (2000).
- [18] *Lenschow D.H., Stankov B.B.* J. Atm. Sciences. **43**, N 12. P. 1198. (1986).
- [19] *Frehlich R., Meillier Y., Jensen M. L.* J. Atm. Oceanic Technol. **25**, N 8. P. 1328. (2008).

## Spatiotemporal dynamics of the characteristics of atmospheric turbulence from the data of acoustic sounding

**N.P. Krasnenko<sup>1,2,a</sup>, L.G. Shamanaeva<sup>3,b</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk 634055, Russia, 10/3, Akademicheskii Av*

<sup>2</sup>*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk 634050, Russia, 40, Lenina Av.*

<sup>3</sup>*V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634021, Russia, 1, Academician Zuev square*

*E-mail: <sup>a</sup>krasnenko@imces.ru, <sup>b</sup>sima@iao.ru*

Spatiotemporal dynamics of three wind velocity components, longitudinal and transverse structure functions of the wind velocity field, structure characteristics of temperature and wind velocity, turbulent kinetic energy dissipation rate, and outer scales of temperature and dynamic turbulence is analyzed in the atmospheric boundary layer. A closed iterative algorithm of sodar data processing is used that takes into account the turbulent attenuation of acoustic waves propagating along the sounding path and allows vertical profiles of the structure characteristics of temperature and wind velocity fields to be reconstructed simultaneously and hence their interrelation to be investigated. The efficiency of the suggested algorithm is confirmed by a comparison of the results obtained with the data of lidar sensing and by the agreement of the results obtained with the available theoretical estimates.

PACS: 92.60.±e

Keywords: atmosphere, boundary layer, turbulence, wind velocity, acoustic sounding, sodar.

Received 16.11.2014.

### Сведения об авторах

1. Красненко Николай Петрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник; тел.: (3822) 49-24-18, e-mail: [krasnenko@imces.ru](mailto:krasnenko@imces.ru).

2. Шаманаева Людмила Григорьевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; e-mail: [sima@iao.ru](mailto:sima@iao.ru).