

УДК 551.596; 53.082.4

О.Ф. КАПЕГЕШЕВА, Н.П. КРАСНЕНКО**,***, П.Г. СТАФЕЕВ**,***, Л.Г. ШАМАНАЕВА******ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ И ВЕТРОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ**

Обсуждается временная динамика структуры температурной и ветровой турбулентности в нижнем 200-м слое атмосферы по данным измерений доплеровским мини-содаром.

Ключевые слова: акустическое зондирование, пограничный слой атмосферы, динамика температурной и ветровой турбулентности.

Знание характеристик атмосферной турбулентности имеет фундаментальное значение для исследования структуры и динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) и построения его математической модели. В [1–5] нами предложен и реализован метод акустического зондирования вертикальных профилей структурных характеристик температуры и скорости ветра с учетом турбулентного ослабления звука, впервые позволяющий одновременно получать эти параметры и исследовать их взаимосвязь. Метод базируется на оригинальном замкнутом итерационном алгоритме обработки содарных данных. В данной работе предложенный метод используется для анализа временной динамики структуры температурной и ветровой турбулентности в пограничном слое атмосферы.

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 [6]. Применение содаров для зондирования атмосферы позволяет получать длинные временные ряды вертикальных профилей вектора скорости ветра и рассчитать структурные функции для разнеса точек наблюдения вплоть до нескольких сотен метров [7–10] с использованием соотношения

$$D_{V_i}(\Delta r) = \left\langle \left[V_i(r) - V_i(r + \Delta r) \right]^2 \right\rangle, \quad (1)$$

где Δr – разнос точек наблюдения, одна из которых расположена в точке r ; V_i – компонент скорости ветра вдоль направления наблюдения, и угловыми скобками обозначено усреднение по ансамблю реализаций. В соответствии с [10] разнос точек наблюдения выбирался в горизонтальном или вертикальном направлении. В первом случае рассчитывалась структурная функция D_{tt} из вертикального компонента скорости, измеренного содаром в одном строке с разной временной задержкой, а во втором случае рассчитывалась структурная функция D_{ttz} из вертикального компонента скорости ветра, измеренного содаром в разных строках, разнесенных на различные расстояния. Структурные характеристики скорости ветра $C_{V_i}^2$ рассчитывались из соответствующих структурных функций

$$C_{V_i}^2 = D_{V_i} / \Delta r^{2/3}. \quad (2)$$

Временная динамика структурных функций и характеристик скорости ветра рассчитывалась из данных регулярных наблюдений вертикальных профилей вектора скорости ветра автономным доплеровским минисодаром AV4000 с солнечной батареей и 50-элементной фазированной антенной решетки [11]. Рабочая частота минисодара составляла 4900 Гц, длительность импульса излучения 60 мс, период послышки импульсов $\Delta t = 4$ с, 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 $\mathbf{V}(z_k)$ измерялись в $M = 40$ строках z_k вертикальной протяженностью $\Delta z = 5$ м в диапазоне высот 20–200 м. Обрабатывались серии из $N = 150, 300$, и 375 профилей, что обеспечивало получение структурных функций, усредненных за 10-, 20- и 25-минутный период соответственно. Ме-

тодика, аппаратура и процедура выборки данных при анализе временной динамики поперечной и продольной структурных функций поля скорости ветра описаны в [10].

Временная продольная и поперечная структурные функции поля скорости ветра для каждого строга z_k рассчитывались по формулам

$$D_{rr}(z_k, n\Delta t \langle V(z_k) \rangle) = \frac{1}{N-n-1} \sum_{j=1}^{N-n-1} [V'_{j+n}(z_k) - V'_j(z_k)]^2, n=1, \dots, N/5; \quad (3)$$

$$D_{tt}(z_k, n\Delta t \langle V_z(z_k) \rangle) = \frac{1}{N-n-1} \sum_{l=1}^{N-n-1} [V_{z,j+n}(z_k) - V_{z,j}(z_k)]^2, n=1, \dots, N/5, \quad (4)$$

где

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

– продольный компонент вектора скорости ветра в строге z_k по результатам единичного измерения,

$$\langle V_i(z_k) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_{i,j}(z_k), i = x, y, z; \quad (6)$$

$$|V(z_k)| = \sqrt{\langle V_x(z_k) \rangle^2 + \langle V_y(z_k) \rangle^2 + \langle V_z(z_k) \rangle^2}; \quad (7)$$

$$V'_j(z_k) = \{V_{x,j} \langle V_x(z_k) \rangle + V_{y,j} \langle V_y(z_k) \rangle + V_{z,j}(z_k) \langle V_z(z_k) \rangle\} / |V(z_k)| \quad (8)$$

– продольный компонент вектора скорости ветра по результатам единичного измерения для высотного строга z_k ; $\langle V(z_k) \rangle$ – вектор скорости ветра в строге z_k , усредненный за период измерения $T = N\Delta t$.

На рис. 1 приведены зависимости поперечных структурных функций D_{tt} , в $\text{м}^2 \cdot \text{с}^2$, от $\Delta r^{2/3}$ для баз r , указанных в подписи к рисунку, построенные по результатам содарных измерений 13 сентября 2006 г. Из рисунка видно, что формула (2) хорошо выполняется для баз 20 и 50 м, удовлетворительно описывает поведение D_{tt} для базы 80 м и не выполняется для базы 200 м. Данные зависимости могут служить критерием применимости формулы (2) для нахождения структурной характеристики скорости ветра из структурных функций [12].

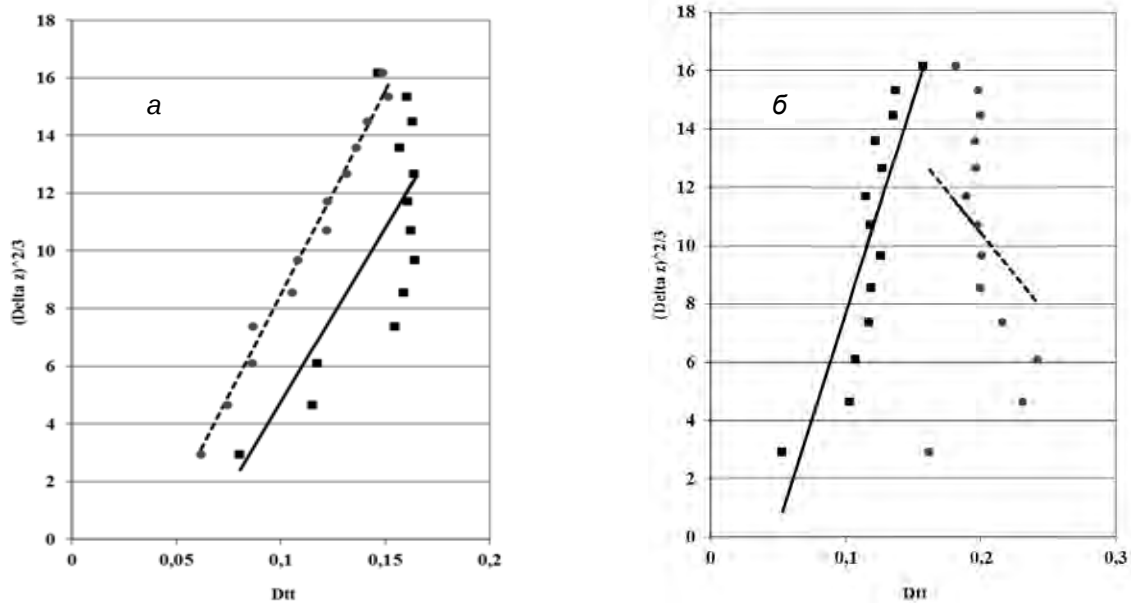
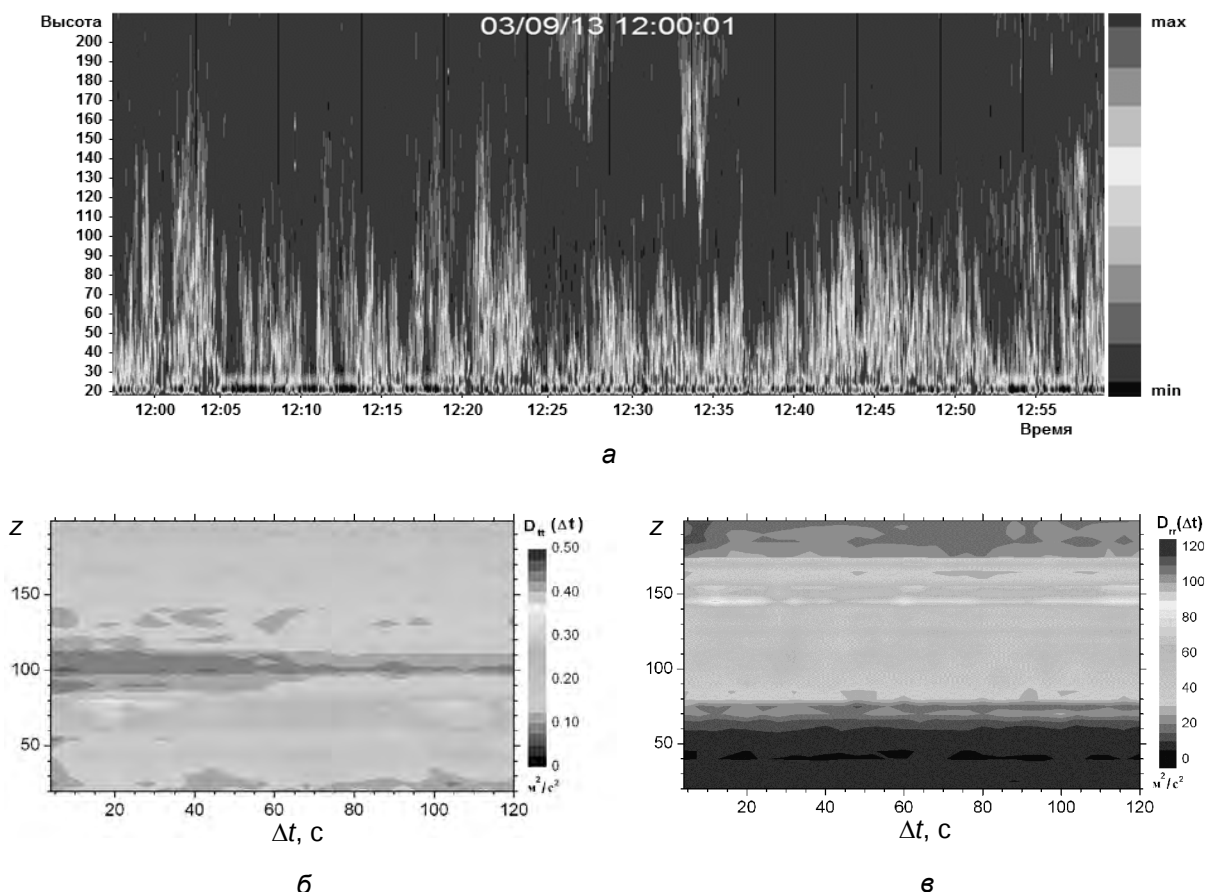


Рис. 1. Поперечные структурные функции скорости ветра в зависимости от разнота точек наблюдения для различных баз r : а – 20 м (кружки) и 80 м (квадратики); б – 50 м (кружки) и 200 м (квадратики). Прямыми линиями показаны результаты аппроксимации полученных зависимостей

Рис. 2, *a–и* иллюстрирует синхронную временную динамику температурной и ветровой турбулентности в нижнем 200-м слое атмосферы в градациях серого цвета для трех последовательных серий измерений с интервалом ~ 5 мин. Дата и время начала измерений указаны на факсимильных записях сигнала (*a*, *г*, *ж*). Обработывались данные непрерывных минисодарных измерений в течение 6 сут. Для построения факсимильной записи сигнала для каждого суток измерений, из файла данных брались амплитуды сигнала за 1 ч, нормировались по заданному растровому файлу палитры, и распределялись по высоте. Для динамического представления, факсимильные записи вычислялись с заданным сдвигом во времени, который в нашем случае составлял 16 с. Временные поперечная (*б*, *д*, *з*) и продольная (*в*, *е*, *и*) структурные функции поля скорости ветра вычислялись по аналогичному алгоритму.

На факсимильных записях отчетливо видна перьевая структура, характерная для условий дневной конвекции, верхняя граница которой подвержена квазипериодическим колебаниям и имеет выраженную тенденцию к увеличению высоты за период наблюдения.

Величины поперечной (*б*, *д*, *з*) и продольной (*в*, *е*, *и*) структурных функций в $\text{м}^2/\text{с}^2$, в градациях серого цвета, указаны справа от рисунков. Видно, что поперечная структурная функция много меньше продольной, что указывает на сильную анизотропию атмосферных флуктуаций в продольном и поперечном направлении и сдвливании мелкомасштабной турбулентности в вертикальном направлении, отмеченном также в [13]. Поведение продольной структурной функции также характеризует динамику высоты слоя перемешивания h [14]. Так, если из рис. 2, *в* и *е* следует, что $h \sim 170$ м и остается практически неизменной в течение 10 мин, то из рис. 2, *и* видно, что еще через 5 мин она превышает максимальную дальность зондирования минисодара равную 200 м.



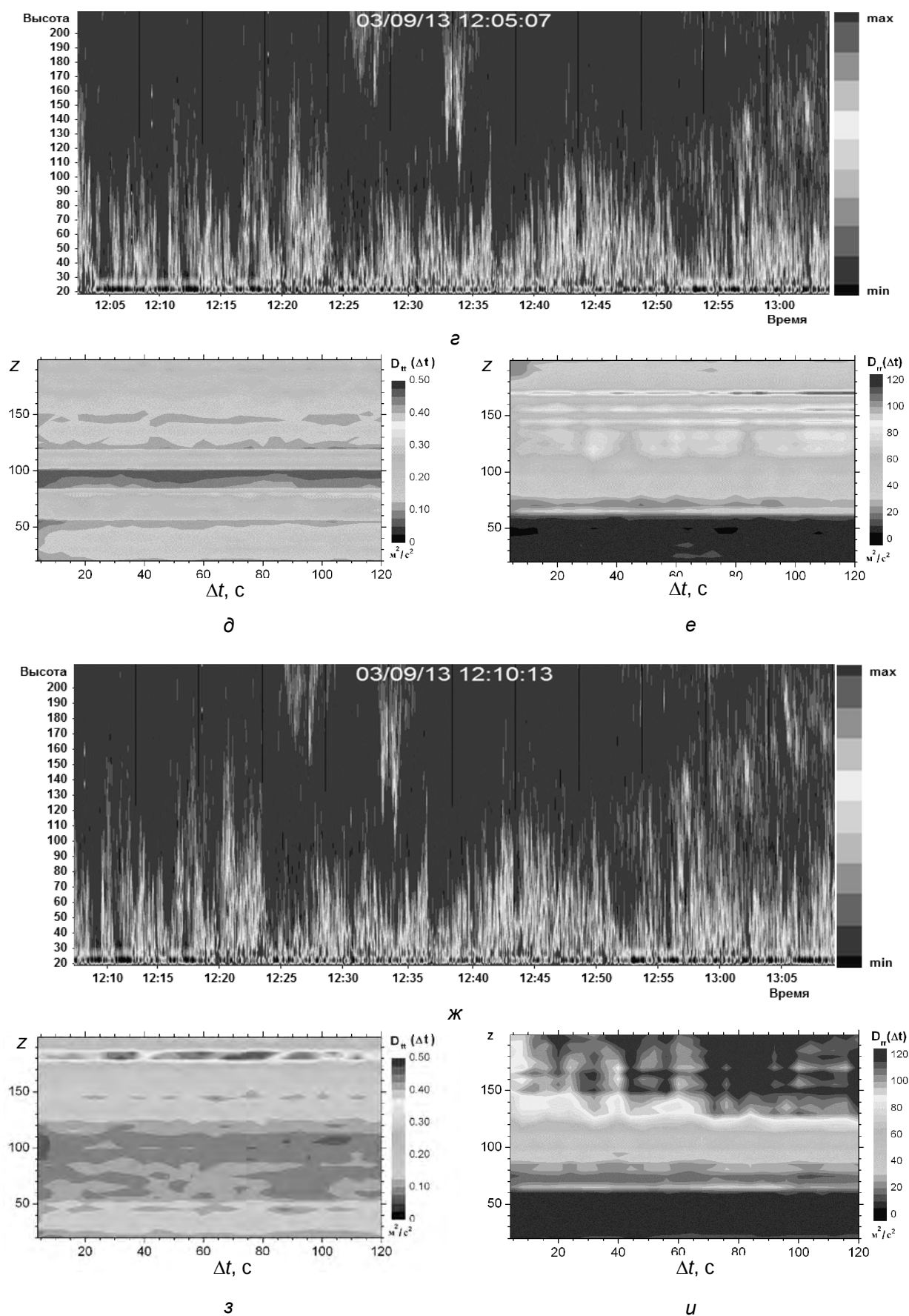


Рис. 2. Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности в нижнем 200-метровом слое атмосферы в реальном масштабе времени

Полученный массив изображений склеивался в три видеофайла. Это впервые позволило визуализировать структуру как температурной, так и ветровой турбулентности в нижнем 200-метровом слое атмосферы в реальном масштабе времени, что, к примеру, может быть использовано в метеорологических службах аэропортов для обнаружения ветровых сдвигов и соответственно для повышения безопасности взлета и посадки самолетов.

Из рис. 2, а, з, ж видна картина перемежающейся температурной турбулентности в условиях неустойчивой стратификации атмосферы (термики), а из рис. 2, б, в, д, е, з, и видно периодическое появление ветровых сдвигов различных масштабов.

Акустические локации (содары) являются как раз тем инструментом, который позволяет оперативно, в реальном времени, контролировать структуру и динамику нижней атмосферы.

Авторы благодарят Кена Андервуда за предоставление данных акустического зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krasnenko N.P. and Shamanaeva L.G. // Meteorol. Zeitschrift. – 1998. – V. 7. – No. 6. – P. 392–397.
2. Shamanaeva L.G. // Proc. SPIE. – 1999. – V. 3983. – P. 344–349.
3. Shamanaeva L.G. // Proc. SPIE. – 2000. – V. 4341. – P. 316–322.
4. Шаманаева Л.Г. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 11. – С. 84–90.
5. Krasnenko N.P. and Shamanaeva L.G. // Extended Abstracts of Presentations from the 16th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. – Boulder, Colorado, 2012. – P. 64–67.
6. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II: Случайные поля. – М: Наука, 1978.
7. Богушевич А.Я., Шаманаева Л.Г. // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12. – № 1. – С. 54–57.
8. Shamanaeva L.G. // Proc. 14th ISARS. – Denmark, 2008. – P. 012007-1–012007-6.
9. Андервуд К.Х., Шаманаева Л.Г. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 5. – С. 85–90.
10. Coulter R.L. // Bound. Layer Meteor. – 1990. – V. 52. – P. 75–91.
11. <http://minisodar.org>.
12. Coulter R.L., Pekour M.S., and Martin T.J. // Proc. 12th ISARS. – Cambridge, UK, 2004. – P. 181–184.
13. Kouznetsov R. and Kallistratova M. // Proc. 14th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. – Paris, 2010. – <http://www.isars2010.uvsq.fr>. – P. O-TUR/02-1–O-TUR/02-4.
14. Stafeev P.G., Kapegeshcheva O.F., Krasnenko N.P., and Shamanaeva L.G. // Proc. SPIE. – V. A100. – 7 P.

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

Поступила в редакцию 20.07.12.

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

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

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

E-mail: sima@iao.ru

Капегешева Ольга Федоровна, студентка;

Красненко Николай Петрович, д.ф.-м.н., профессор, ведущ. науч. сотр.;

Стафеев Павел Георгиевич, к.т.н., науч. сотр.;

Шаманаева Людмила Григорьевна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.