

А.Я. Богушевич, Л.Г. Шаманаева

**СТРУКТУРНЫЕ ФУНКЦИИ ПОЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА В АТМОСФЕРЕ  
ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 28.08.98 г.

Принята к печати 10.10.98 г.

Приводятся продольные структурные функции поля скорости ветра в пограничном слое атмосферы, рассчитанные из доплеровских измерений содаром профилей вектора скорости ветра. Показано, что поле скорости ветра может иметь сильную пространственную неоднородность в горизонтальной плоскости. Предложенная методика обработки данных акустического зондирования позволяет выполнять наглядную визуализацию крупномасштабной неоднородной структуры поля скорости ветра в атмосфере при расстояниях наблюдения до 3 км.

Акустические локаторы (содары) нашли широкое применение для исследования характеристик динамической турбулентности в атмосферном пограничном слое. В частности, содары уже использовались для дистанционных измерений таких величин, как структурные постоянные флуктуаций температуры ( $C_T^2$ ) и скорости ветра ( $C_V^2$ ), скорость диссипации турбулентной энергии, внешний масштаб турбулентности (см., например, [1–6]).

Одной из наиболее важных характеристик векторного случайного поля скорости ветра в атмосфере  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  является структурный тензор второго ранга [7]:

$$D_{ik}(\mathbf{r}, \Delta\mathbf{r}) = \langle [v_i(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) - v_i(\mathbf{r})] [v_k(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) - v_k(\mathbf{r})] \rangle,$$

где  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$ ;  $\Delta\mathbf{r}$  – приращение  $\mathbf{r}$ ;  $\langle \rangle$  – символ статистического усреднения;  $v_i(\mathbf{r})$  – проекция вектора  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  на  $i$ -ую ось декартовой системы координат  $(x, y, z)$ . В общем случае тензор  $D_{ik}(\mathbf{r}, \Delta\mathbf{r})$  может иметь до 9 независимых компонент. В теории атмосферной турбулентности поле скорости ветра обычно полагают локально изотропным [7, 8], что сводит число независимых компонент  $D_{ik}(\mathbf{r}, \Delta\mathbf{r})$  до двух, называемых продольной  $D_{rr}(\mathbf{r}, \Delta\mathbf{r})$  и поперечной  $D_{rr}(\mathbf{r}, \Delta\mathbf{r})$  структурными функциями. Доплеровские содары позволяют получать длительные реализации мгновенных значений трех компонент скорости ветра. Используя эти данные, можно попытаться вычислить и рассмотреть структурные функции поля скорости ветра в атмосфере  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  при расстояниях наблюдений до нескольких сотен метров. В данной статье приводятся продольные структурные функции  $D_{rr}(\mathbf{r})$  скоростей ветра в атмосфере для разных высот над поверхностью земли, рассчитанные по результатам содарных измерений последовательных серий высотных профилей мгновенных значений скорости ветра  $\mathbf{v}(z)$ .

Измерения профилей скоростей ветра были выполнены с помощью трехканального моностатического доплеровского содара «Звук-2» [9, 10]. В этих измерениях содар имел частоту излучаемых колебаний, равную 1700 Гц, длительность зондирующего импульса составляла 150 мс, период посылки импульсов в каждом из каналов в отдельности  $\Delta t$  был равен 10,5 с. Значения трех компонент скорости ветра определялись по доплеровскому сдвигу частоты обратно рассеянного сигнала, регистрируемого в каждом из трех каналов. При этом одна из приемопередающих антенн содара была ориентирована вертикально, а две дру-

гие наклонены в ортогональных плоскостях под углом 20° от вертикали. Полученные мгновенные профили ортогональных компонент скорости ветра  $v_i(z)$  (здесь  $i = x, y, x$ ) представляли собой набор их дискретных значений  $v_i(z_k)$  для 24 уровней по высоте  $z_k$  от 75 до 535 м через 20 м. Число таких профилей в каждой единичной серии измерений составляло  $N = 53$ .

С учетом имеющихся данных нами рассчитывались временные продольные структурные функции  $D_{rr}(z_k, n\Delta t)$  для каждого из уровней  $z_k$  с шагом, равным  $\Delta t$ . Применяя гипотезу «замороженной» турбулентности, они также приводились к пространственным структурным функциям  $D_{rr}(z_k, \Delta\mathbf{r})$  с шагом  $\Delta t \langle \mathbf{v}(z_k) \rangle$ , где  $\langle \mathbf{v}(z_k) \rangle$  – средний за период измерений  $T = N\Delta t$  полный вектор скорости ветра на высоте  $z_k$ . При этом основная расчетная формула имела вид

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

$$n = 1, 2, \dots, N/5,$$

где  $j \leq N$  – порядковый номер мгновенного профиля ветра;

$$|\langle \mathbf{v}(z_k) \rangle| = \sqrt{\langle v_x(z_k) \rangle^2 + \langle v_y(z_k) \rangle^2 + \langle v_z(z_k) \rangle^2},$$

$$\langle v_i(z_k) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{i,j}(z_k) \quad (i = x, y, x),$$

$$v'_j(z_k) = \{v_{x,j}(z_k) \langle v_x(z_k) \rangle + v_{y,j}(z_k) \langle v_y(z_k) \rangle + v_{z,j}(z_k) \langle v_z(z_k) \rangle\} / |\langle \mathbf{v}(z_k) \rangle|$$

– продольная относительно направления  $\langle \mathbf{v}(z_k) \rangle$  компонента мгновенного ветра. Не трудно заметить, что вектор разности точек наблюдения  $\Delta\mathbf{r} = n\Delta t \langle \mathbf{v}(z_k) \rangle$  здесь практически всегда можно полагать лежащим в горизонтальной плоскости, поскольку в атмосфере вертикальная составляющая скорости ветра обычно значительно меньше горизонтальной.

На рис. 1,а – 3,а представлены примеры временных продольных структурных функций скорости ветра  $D_{rr}(z, t)$ , а на рис. 1,б – 3,б – соответствующие им пространственные структурные функции  $D_{rr}(z, \Delta\mathbf{r})$ , рассчитанные из данных акустического зондирования 5 октября 1996 г. в ночное время с 01:00 по 01:10, 25 июня 1997 г. в утренние часы с 10:00

по 10:10 и 2 июля 1997 г. также в утренние часы с 10:00 по 10:10 местного времени. Высотные профили средней скорости  $V_h$  и направления  $F$  горизонтального ветра, относящиеся к использованным здесь данным акустического зондирования, показаны на рис. 1,а,г – 3,в,г. Эти данные были отображены нами с целью показать наиболее интересные типы функций  $D_{rr}(z, \Delta r)$ , полученных при обработке содарных измерений мгновенных профилей ветра  $\mathbf{v}(z)$ .

На всех рисунках модуль скорости горизонтального ветра  $V_h$  увеличивается ростом с высоты  $z$  от  $1,5 \div 2$  м/с на самом нижнем уровне измерений до  $9 \div 14$  м/с, начиная с высот порядка 300 м. Выше 300 м значения ветра осциллируют с явно замедляющейся тенденцией к увеличению  $V_h(z)$ . На рис. 1,в,г, относящихся к измерениям в ночное время, наблюдается выраженный сдвиг ветра на высоте порядка 380 м.

Обнаруживается характерная особенность временных структурных функций, полученных из данных акустического зондирования, заключающаяся в том, что при

увеличении времени наблюдения они остаются практически постоянными (по крайней мере, одного порядка величины), испытывая только локальные осцилляции. В то же время значения этих функций возрастают с увеличением высоты измерений  $z$ . Можно заметить подобие их высотной зависимости с поведением профиля горизонтального ветра  $V_h(z)$ .

Рис. 1,б – 3,б показывают, что продольные пространственные структурные функции  $D_{rr}(z, \Delta r)$  из данных акустического зондирования можно получать вплоть до разностей точек наблюдения  $\Delta r$  на расстояния порядка 3000 м. Наиболее типичным нам представляется поведение пространственных структурных функций, показанных на рис. 2,б. С увеличением разности точек  $\Delta r$  они вначале возрастают, а затем выходят на режим насыщения. При этом чем больше высота зондирования  $z$ , тем при меньших значениях  $\Delta r$  наблюдается указанное насыщение вследствие больших в этом случае скоростей ветра.

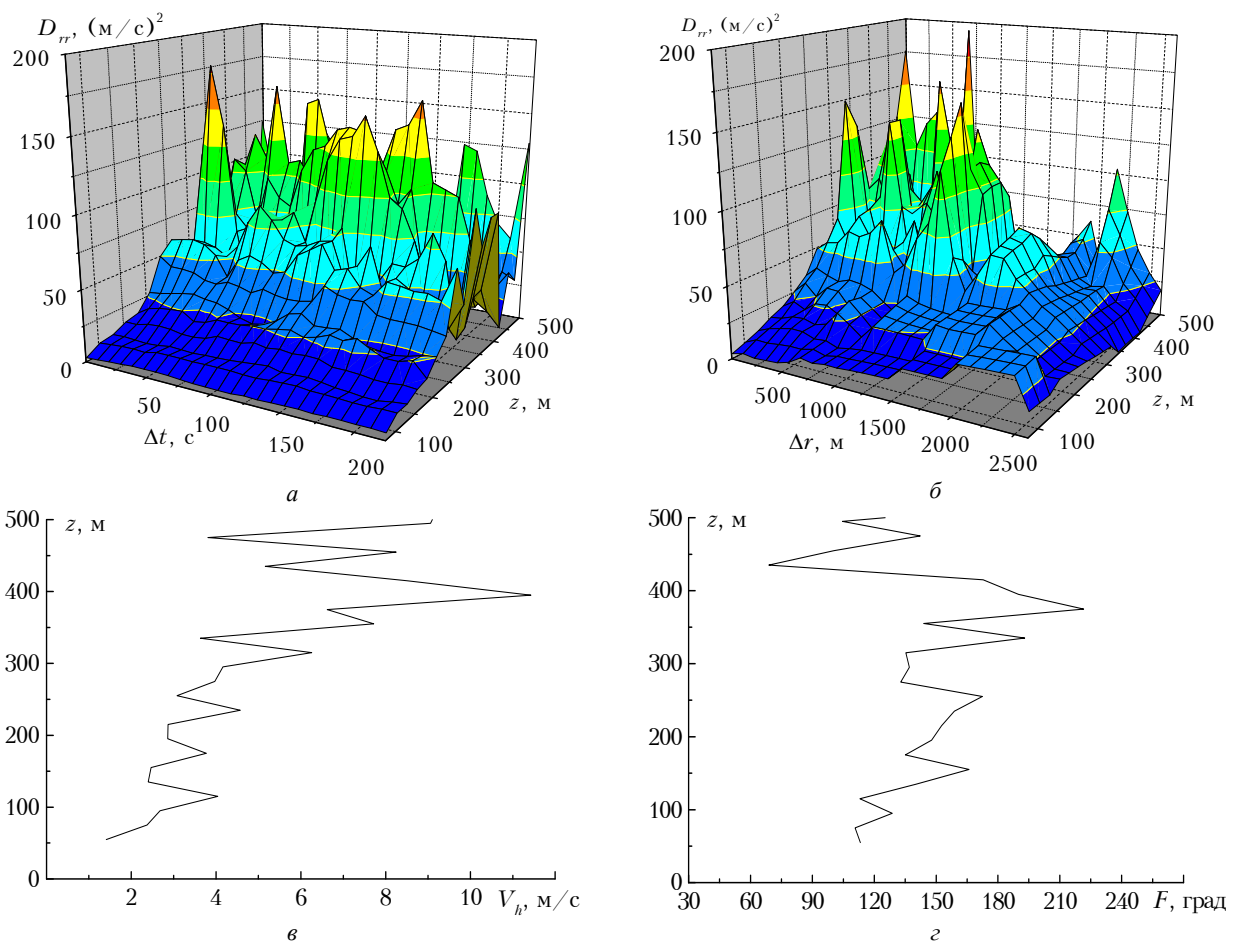


Рис. 1

Интересную особенность имеет пространственная структурная функция  $D_{rr}(z, \Delta r)$  при наличии ветрового сдвига (см. рис. 1,б). Ниже высоты ветрового сдвига значения  $D_{rr}(z, \Delta r)$  заметно подавлены при любых разностях точек наблюдения  $\Delta r$ , а выше этой высоты они резко возрастают, но только при относительно малых  $\Delta r \leq 1000$  м. Для функции  $D_{rr}(z, \Delta r)$ , показанной на рис. 3,б, на всех высотах зондиро-

вания  $z$  отчетливо наблюдаются три ее максимума при разностях точек наблюдения  $\Delta r$  на 250, 1000 и 1500 м. Положение на оси  $\Delta r$  каждого из этих максимумов указывает пространственный масштаб наиболее сильных неоднородностей поля скорости ветра  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ . Такой вид структурной функции должен соответствовать многомодальному пространственному спектру  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ .

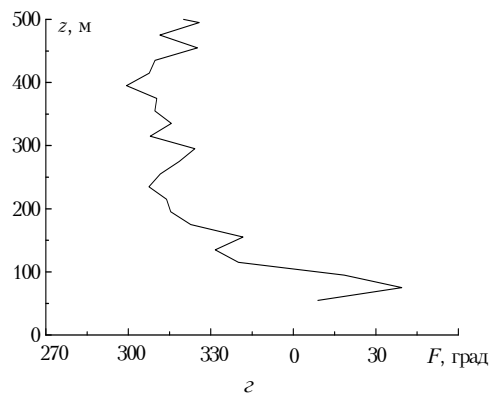
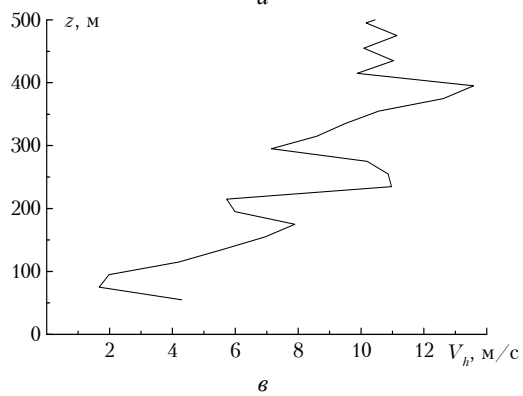
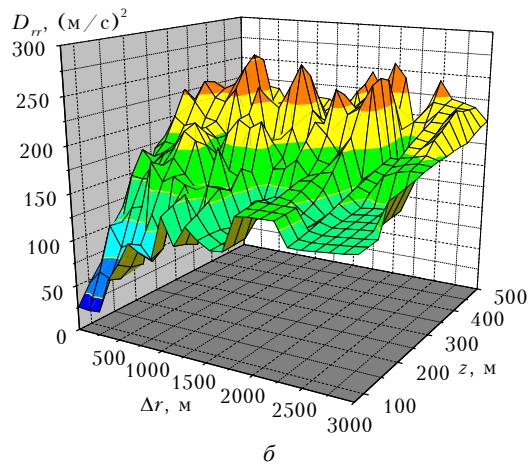
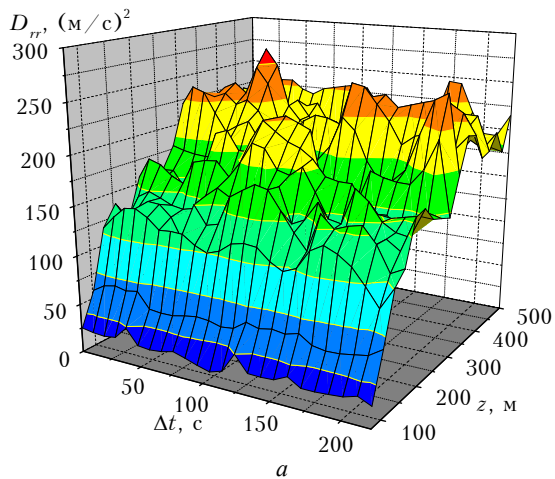


Рис.2

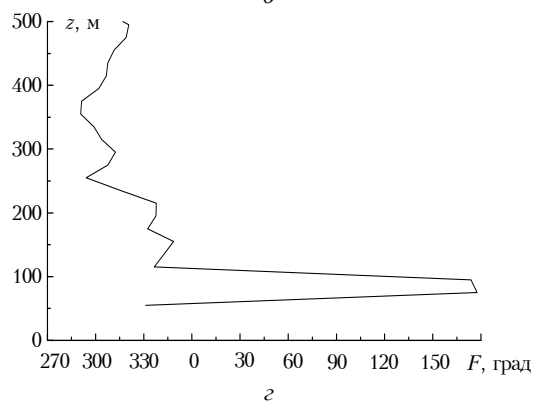
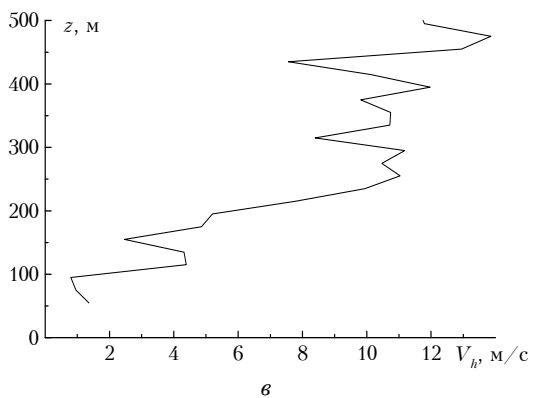
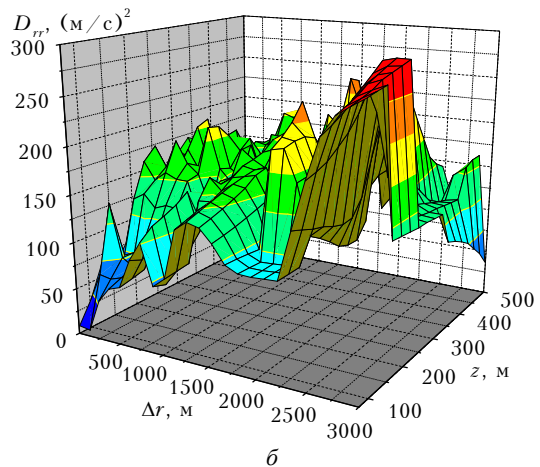
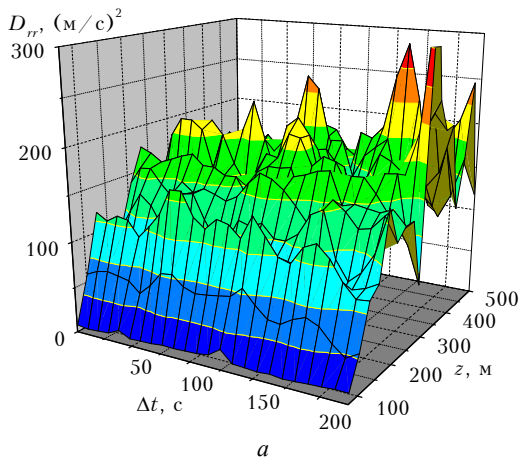


Рис.3

В заключение отметим, что анализ поведения продольных структурных функций поля скорости ветра свидетельствует о его сильной пространственной неоднородности, в том числе и в горизонтальной плоскости. При этом могут наблюдаться перемежающиеся области, в которых значения этих функций заметно отличаются. Предложенная нами методика обработки данных акустического зондирования позволяет выполнять наглядную пространственную визуализацию крупномасштабной неоднородной структуры поля скорости ветра для пограничного слоя атмосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, код проекта № 98-05-03177.

1. *Brown E.H., Hall F.F.* // Rev. Geophys. And Space Phys. 1978. V. 16. N 1. P. 47–110.
2. *Neff N.D.* Quantitative evaluation of acoustic echoes from the

- planetary boundary layer // Report ERL 322-WPL 38. Boulder, Colo., 1975. 34 p.
3. *Caughey S.J., Crease B.A., Asimakopoulos D.N., Cole R.S.* // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1978. V. 104. P. 147–161.
  4. *Gaynor J.E.* // J. Appl. Meteorol. 1977. V. 16. N 2. P. 148–155.
  5. *Герасюк Н.Е., Каллистратова М.А., Карюкин Г.А. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. АО. 1981. Т. 17. № 1. С. 98–102.
  6. *Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 1. С. 65–70.
  7. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. М.: Наука, 1978. 463 с.
  8. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
  9. *Гладких В.А., Карпов В.И., Красненко Н.П., Федоров В.А.* // 3-й Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана» (Тез. докл.). Томск: ТНЦ СО РАН, 1996. С. 168.
  10. *Gladkikh V.A., Krasnenko N.P., Fedorov V.A.* // COST-76 Profiler Workshop. 1997. V. 1. P. 174–177.

*A.Ya. Bogushevich, L.G. Shamanaeva.* **Structure Functions of the Wind Velocity Field in the Atmosphere from the Data of Acoustic Sounding.**

Longitudinal structure functions of the wind velocity field for the atmospheric boundary layer are calculated from the Doppler sodar measurements of the vertical profiles of the wind velocity vector. It is demonstrated that the wind velocity field may be highly inhomogeneous in the horizontal plane. The technique of acoustic sounding data processing described in the present paper is capable of visualization of large-scale inhomogeneities of the wind velocity field in the atmosphere for observation distances up to 3 km.