

УДК 551.501.755 + 551.501.796

*О.Ф. КАПЕГЕШЕВА**, *Н.П. КРАСНЕНКО**,***, *П.Г. СТАФЕЕВ**,***, *Л.Г. ШАМАНАЕВА*****

ОЦЕНКА ВНЕШНЕГО МАСШТАБА ДИНАМИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Предложен новый метод оценивания внешнего масштаба динамической турбулентности по результатам акустического зондирования. Эффективность метода подтверждается сравнением полученных результатов с имеющимися в литературе данными.

Ключевые слова: акустическое зондирование атмосферы, внешний масштаб динамической турбулентности.

Внешний масштаб играет важную роль в теории атмосферной турбулентности. Он определяет низкочастотную границу инерционного интервала спектра флуктуаций скорости ветра, является одним из основных параметров для оценки и прогноза дополнительного турбулентного ослабления звуковых волн в атмосфере, определяет точностные характеристики при работе больших оптических телескопов и т.д. В данной работе представлен метод оценки внешних масштабов температурной и динамической турбулентности по результатам акустического зондирования.

Внешний масштаб динамической турбулентности определяется по пространственной структурной функции скорости ветра, измеренной содаром. В зависимости от разнеса точек наблюдения r в инерционном ($l_{0V} \ll r \ll L_{0V}$, где l_{0V} – внутренний и L_{0V} – внешний масштаб динамической турбулентности) и энергетическом ($L_{0V} \ll r$) интервалах, пространственная структурная функция скорости ветра описывается следующими соотношениями:

$$D(r) = \begin{cases} C_V^2 \cdot r^{2/3}, & l_{0V} \ll r \ll L_{0V}, \\ C_V^2 \cdot L_{0V}^{2/3}, & L_{0V} \ll r. \end{cases} \quad (1)$$

То есть, она пропорциональна $r^{2/3}$ в инерционном интервале и затем насыщается на константу. На этом базируется метод оценивания внешнего масштаба динамической турбулентности по содарным измерениям структурной функции скорости ветра.

Пространственные структурные функции вычислялись из высотных профилей вектора скорости ветра, измеренных мини-содаром AV4000. Рабочая частота мини-содара составляла 4900 Гц, длительность импульса излучения 60 мс, период повторения импульсов 4 с. Разнос точек наблюдения при вычислении структурных функций выбирался в горизонтальном или вертикальном направлении. В первом варианте, пространственная поперечная структурная функция рассчитывалась из вертикального компонента скорости ветра, измеренного мини-содаром в одном стробе с разной временной задержкой, а во втором варианте, который представлен в данной работе, пространственная поперечная структурная функция $D_{ii}(r)$ рассчитывалась из вертикального компонента скорости ветра, измеренного мини-содаром в разных стробах. При этом разнос точек наблюдения $r = n_z \Delta z$, где $\Delta z = 5$ м – вертикальная протяженность строба, $n_z = 1, \dots, M/3$, и $M = 40$ – общее число стробов в диапазоне высот зондирования 5–200 м. Обработывались серии из $N = 150$ профилей, что обеспечивало получение структурных функций, усредненных за 10-минутный период.

На рис. 1 показаны пространственные поперечные структурные функции $D_{ii}(r^{2/3})$, измеренные мини-содаром, которые наглядно иллюстрируют предложенный метод. Измерения проводились в дневное время с 14:00 до 14:10 местного времени (рис. 1, а) и с 16:00 до 16:10 местного времени (рис. 1, б). Видно, что для высоты зондирования 20 м полученная зависимость хорошо аппроксимируется двумя прямыми линиями, точка пересечения которых и определяет верхнюю границу инерционного интервала $L_{0V}^{2/3}(20 \text{ м}) = 9,8 \text{ м}^{2/3}$, откуда следует $L_{0V}(20 \text{ м}) = 9,8^{3/2} \text{ м} = 30,6 \text{ м}$. Из рис. 1, б получаем $L_{0V}^{2/3}(80 \text{ м}) = 15,16 \text{ м}^{2/3}$, откуда получаем оценку внешнего масштаба динамической турбулентности $L_{0V}(80 \text{ м}) = 15,16^{3/2} \text{ м} = 59 \text{ м}$. Проводя расчеты L_{0V} для различных высот (баз) z , можно получить высотный профиль внешнего масштаба динамической турбулентности.

Был разработан автоматизированный адаптивный вычислительный алгоритм для построения профиля внешнего масштаба динамической турбулентности из структурных функций. Окно программы в режиме адаптивной подстройки внешнего масштаба приведено на рис. 2. Для каждой базы строятся две аппроксимирующие прямые (по умолчанию, число точек измерения делится пополам). Автоматически построенный профиль можно адаптировать, увеличивая или уменьшая количество точек измерения, используемых для аппроксимации прямыми линиями для данной базы. Для этого предусмотрена визуализация структурной функции и изменение количества точек аппроксимации бегунком под графиком структурной функции (показанном в правом верхнем углу). На пересечении аппроксимирующих прямых получаем $L_{0V}^{2/3}$. В данном окне для каждой базы строятся две линии регрессии. Внизу окна строится график $L_0(z)$. Все изменения автоматически на нем отражаются. Кнопка – экспорт данных профиля $L_0(z)$ в сводную таблицу. Программа предназначена для автоматического построения профиля внешнего масштаба на основании данных структурных функций.

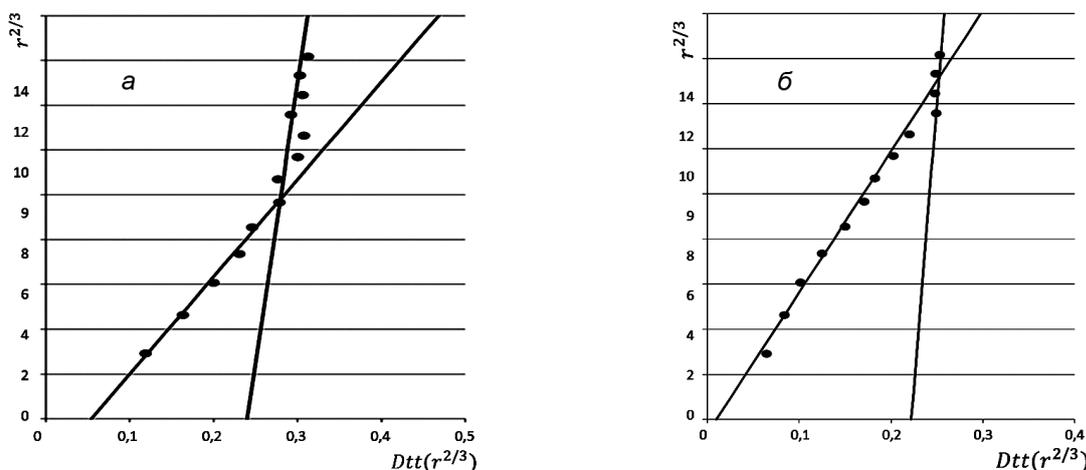


Рис. 1. Пространственные поперечные структурные функции для высот зондирования 20 и 80 м, рассчитанные для серии дневных мини-содарных измерений с 14:00 до 14:10 местного времени (а) и с 16:00 до 16:10 местного времени (б)

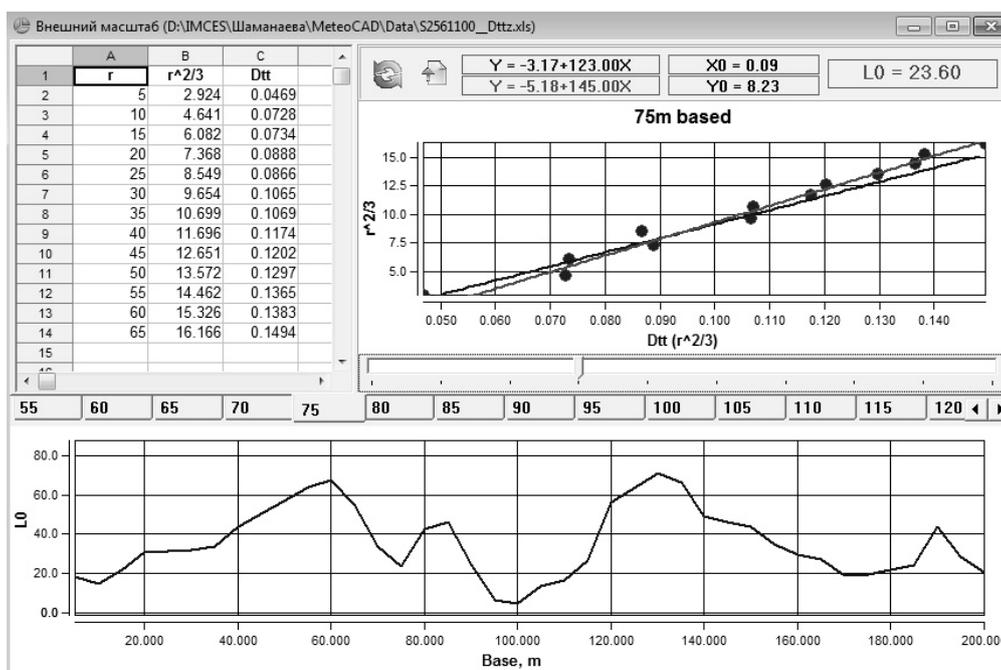


Рис. 2. Окно автоматизированной программы вычисления высотного профиля внешнего масштаба динамической турбулентности в режиме адаптивной подстройки

Приведено описание алгоритмов обработки содарных данных и представлены вертикальные профили внешних масштабов динамической турбулентности. Эффективность предложенных методов подтверждена сравнением результатов с теоретическими оценками внешнего масштаба ветровой турбулентности для звуковых волн, которые демонстрируют хорошее согласие.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Поступила в редакцию 28.09.13.
г. Томск, Россия
**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, гл. науч. сотр.;
Стафеев Павел Георгиевич, к.т.н., науч. сотр.;
Шаманаева Людмила Григорьевна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.

O.F. KAPEGESHEVA, N.P. KRASNENKO, P.G. STAFEEV, L.G. SHAMANAeva

ESTIMATION OF THE OUTER SCALE OF THE DYNAMIC TURBULENCE FROM THE RESULTS OF ACOUSTIC SOUNDING OF THE ATMOSPHERE

A new method of estimation of the outer scale of the dynamic turbulence from the results of acoustic sounding is suggested in the present work. The efficiency of the method is confirmed by a comparison of the results obtained with the data available from the literature.

Keywords: *acoustic sounding of the atmosphere, outer scale of the dynamic turbulence.*