

Внешний масштаб динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы

О.Ф. Капегешева¹, Н.П. Красненко^{2,3}, П.Г. Стафеев^{2,3}, Л.Г. Шаманаева^{4*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 28.03.2013 г.

Предложен метод акустического зондирования внешнего масштаба динамической турбулентности. При интерпретации данных зондирования использовался разработанный авторами адаптивный алгоритм. Работоспособность предложенного метода подтверждается сравнением полученных результатов с имеющимися в литературе данными.

Ключевые слова: акустическое зондирование атмосферы, внешний масштаб динамической турбулентности; acoustic sounding of atmosphere, outer scale of dynamic turbulence.

Внешний масштаб играет важную роль в теории атмосферной турбулентности. Он определяет низкочастотную границу инерционного интервала спектров флуктуаций атмосферных метеопараметров, используется для построения моделей турбулентности и является одной из основных характеристик структуры турбулентных полей. Информация о нем, в частности, играет важную роль при оценке эффективности работы астрономических телескопов и интерферометров наземного базирования. Отсюда актуальны методы и средства определения внешнего масштаба турбулентности.

Так, например, в [1] внешние масштабы скорости ветра, температуры, влажности и концентрации озона определялись из прямых, самолетных, измерений спектров плотности мощности для указанных метеопараметров. Была экспериментально продемонстрирована их зависимость от высоты над поверхностью земли, свойств подстилающей поверхности и типа атмосферной стратификации.

Для оптических волн показатель преломления определяется флуктуациями атмосферной температуры, а внешний масштаб температурной турбулентности в приземном слое атмосферы вычисляется по результатам измерений дисперсии флуктуаций фазы оптической волны при ее распространении по при-

земным трассам [2]. На распространение звуковых волн в атмосферном пограничном слое влияют одновременно флуктуации температуры, обусловленные термической конвекцией, и флуктуации скорости ветра (динамическая турбулентность, обусловленная сдвигом ветра). Их относительный вклад, по данным [3], зависит от отношения внешних масштабов температурной и динамической турбулентности.

В [4–6] нами был предложен и реализован метод акустического зондирования высотных профилей структурной характеристики температуры и внешнего масштаба температуры. В настоящей статье представлен новый метод акустического зондирования внешнего масштаба для динамической турбулентности.

1. Описание метода

Из теории атмосферной турбулентности известно, что в зависимости от разности точек наблюдения r в инерционном ($l_{0V} \ll r \ll L_{0V}$, где l_{0V} – внутренний, L_{0V} – внешний масштабы динамической турбулентности) и энергетическом ($L_{0V} \ll r$) интервалах пространственная структурная функция скорости ветра описывается следующими соотношениями [7]:

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

То есть она пропорциональна $r^{2/3}$ в инерционном интервале и затем насыщается на константу. На этом

* Ольга Федоровна Капегешева (kapegesheva_o@mail.ru); Николай Петрович Красненко (krasnenko@imces.ru); Павел Георгиевич Стафеев (pavel.stafeev@mail.ru); Людмила Григорьевна Шаманаева (sima@iao.ru).

базируется предлагаемый метод оценивания внешнего масштаба динамической турбулентности по структурной функции скорости ветра, измеренной содаром.

Пространственные структурные функции вычислялись на основе данных высотных профилей вектора скорости ветра, измеренных мини-содаром AV4000 [8]. Рабочая частота мини-содара составляла 4900 Гц, длительность импульса излучения 60 мс, период повторения импульсов 4 с. Излучение посылалось под углами 76; 76 и 90° к горизонту. Разнос точек наблюдения при вычислении структурных функций выбирался в горизонтальном или вертикальном направлениях [9]. В первом варианте пространственная поперечная структурная функция рассчитывалась из вертикальной компоненты скорости ветра, измеренной мини-содаром в одном стробе с разной временной задержкой, а во втором варианте, который представлен в настоящей статье, пространственная поперечная структурная функция $D_{tt}(r)$ рассчитывалась из вертикальной компоненты вектора 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 150 профилей, что обеспечивало получение структурных функций, усредненных за 10-минутный период.

На рис. 1 показаны примеры пространственной поперечной структурной функции D_{tt} , измеренные мини-содаром AV4000, которые наглядно иллюстрируют работу предложенного метода [10].

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 имеем $L_{0V}^{2/3}(80 \text{ м}) = 15,16 \text{ м}^{2/3}$, 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 , получаем высотный профиль внешнего масштаба динамической турбулентности.

2. Алгоритм обработки данных

Для реализации метода был разработан автоматизированный адаптивный вычислительный алгоритм построения профиля внешнего масштаба динамической турбулентности из структурных функций, полученных по содарным данным. Окно программы в режиме адаптивной подстройки внешнего масштаба приведено на рис. 2.

Для каждой базы строятся две аппроксимирующие прямые. В начале работы алгоритма число точек измерения делится пополам. Далее автоматически построенный профиль можно адаптировать, увеличивая или уменьшая количество точек измерения, используемых для аппроксимации прямыми линиями для данной базы. Для этого предусмотрены визуализация структурной функции и изменение количества точек аппроксимации бегунком под графиком

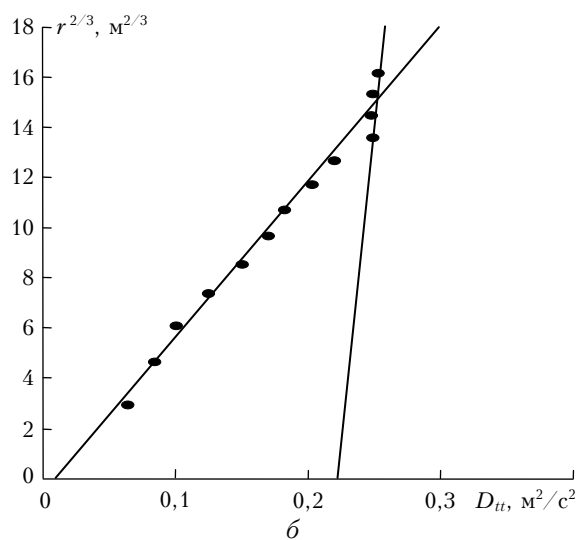
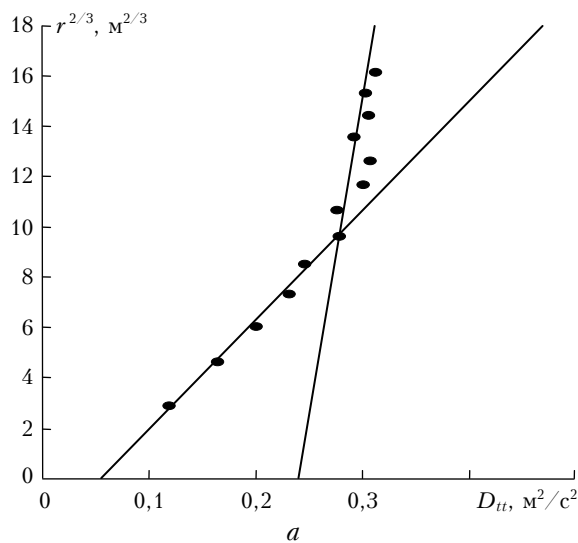


Рис. 1. Пространственные поперечные структурные функции D_{tt} для высот зондирования 20 (а) и 80 м (б), рассчитанные для серии минисодарных измерений 13 сентября 2003 г. с 14:00 до 14:10 (а) и с 16:00 до 16:10 местного времени (б)

структурной функции (см. правый верхний угол рис. 2). На пересечении аппроксимирующих прямых получаем $L_{0V}^{2/3}$. В данном окне для каждой базы строятся две линии регрессии. Внизу окна строится график $L_{0V}(z)$. Все изменения автоматически на нем отражаются. Также производится экспорт данных профиля $L_{0V}(z)$ в сводную таблицу. Программа предназначена для автоматического построения профиля внешнего масштаба на основании данных акустического зондирования структурных функций.

3. Результаты измерений

На рис. 3 приведена временная динамика внешнего масштаба динамической турбулентности для двух стробов на высотах 50 и 200 м над земной поверхностью, построенная по данным минисодарных измерений 14 сентября 2003 г. Видно, что внешний

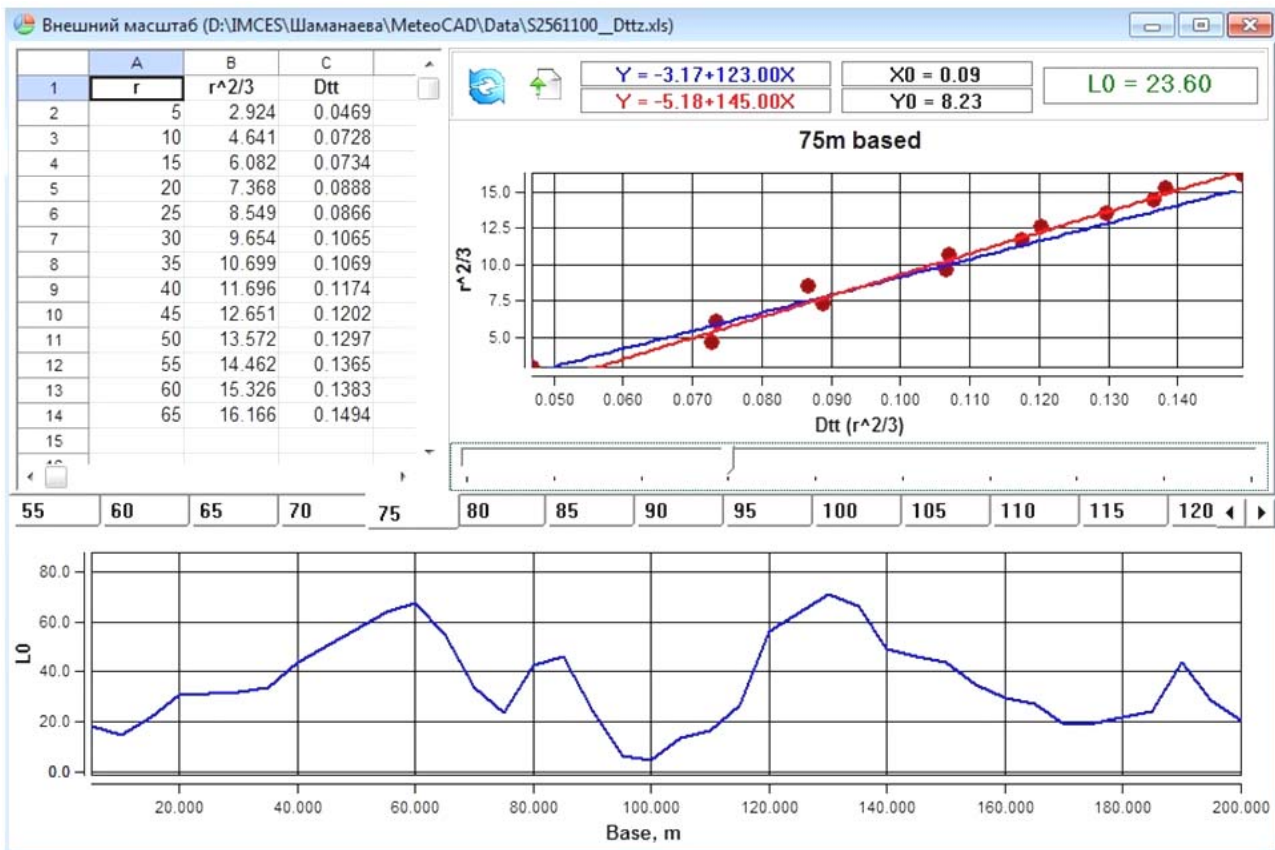


Рис. 2. Окно автоматизированной программы вычисления высотного профиля внешнего масштаба динамической турбулентности в режиме адаптивной подстройки

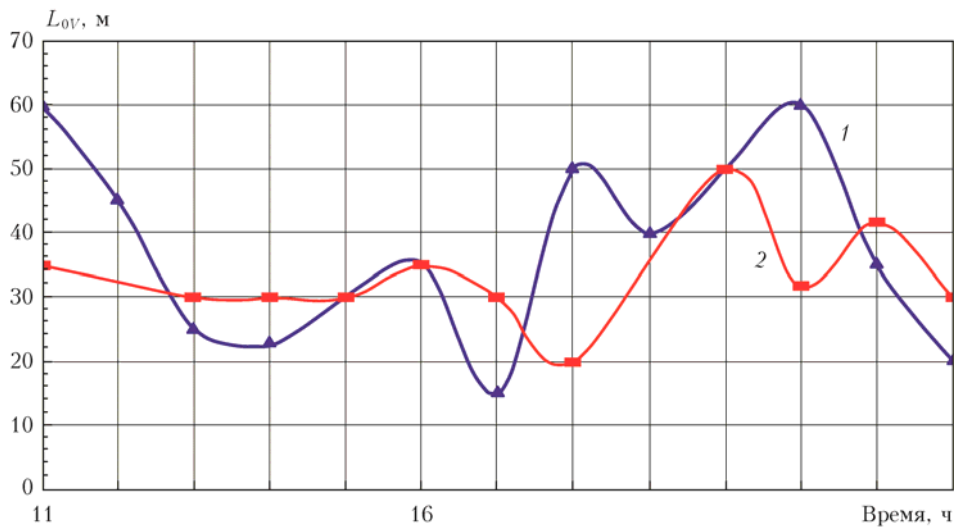


Рис. 3. Временная динамика внешнего масштаба динамической турбулентности для высот 50 (1) и 200 м (2) по результатам минисодарных измерений 14 сентября 2003 г.

масштаб динамической турбулентности максимален в утренние и вечерние часы по местному времени и минимален в 17:00–18:00 ч. Так, для $z = 50$ м $L_{0V} = 60$ м в 11:00, 15 м в 17:00 и 60 м в 21:00; для $z = 200$ м $L_{0V} = 35$ м в 11:00, 30 м в 17:00 и 50 м в 20:00.

На рис. 4, а–в приведена полусуточная почасовая динамика вертикальных профилей внешнего масштаба динамической турбулентности, рассчитанных по 10-минутным сериям минисодарных измерений 13 сентября 2003 г. с 11:00 до 23:00 местного времени.

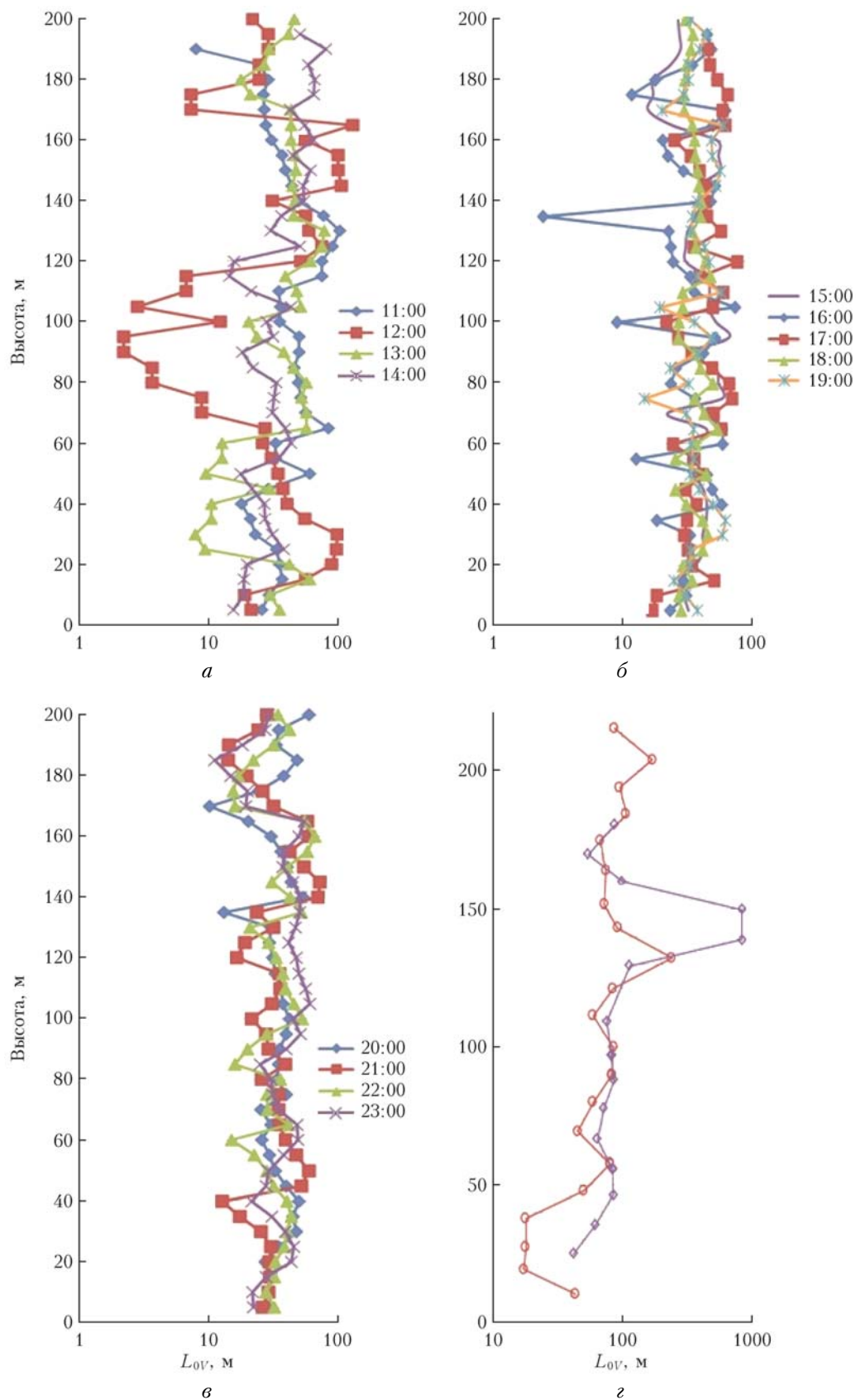


Рис. 4. Полусуточная почасовая динамика высотных профилей внешнего масштаба динамической турбулентности по результатам минисодарных измерений (а–в) и по данным ночных измерений [11] 2-мкм доплеровским лидаром с 23:23 до 23:40 местного времени (г). Время начала измерения профиля, усредненного за 10-мин период, указано справа от кривых

Видно, что внешний масштаб динамической турбулентности лежит в интервале от 5 до 100 м, что хорошо согласуется с результатами его теоретической оценки в [3] и результатами самолетных измерений в [1]. Прослеживается также общая тенденция роста внешнего масштаба с высотой, отмеченная в [1, 3]. Что касается временной динамики, то 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. 4, z показан высотный профиль внешнего масштаба динамической турбулентности по данным ночных измерений [11] 2-микронным доплеровским ветровым лидаром с 23:23 до 23:40 местного времени с использованием азимутальной структурной функции скорости ветра после пространственной фильтрации лидарных данных (кружки), а также с использованием радиальной структурной функции после пространственной фильтрации лидарных данных (ромбики).

Видно хорошее согласие результатов акустического зондирования с данными лидарных измерений. Наши данные хорошо согласуются также с оценками [12] внешнего масштаба динамической турбулентности по поперечной структурной функции скорости, измеренной 2-микронным лидаром в дневное время, согласно которым в нижнем 400-метровом слое атмосферы внешний масштаб увеличивается с высотой от 20 до 150 м.

1. *Lenshow D.H., Stankov B.B.* Length scales in the convective boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 1986. V. 43, N 12. P. 1198–1209.
2. *Лукин В.П.* Оптические измерения внешнего масштаба атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5, № 4. С. 354–377.

3. *Ostashev V.E., Wilson D.K.* Relative contributions from temperature and wind velocity fluctuations to the statistical moments of a sound field // *Acust. Acta acust.* 2000. V. 86, N 2. P. 260–268.
4. *Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G.* Sodar measurements of the structural characteristics of temperature fluctuations and the outer scale of turbulence // *Meteorol. Zeitschrift.* 1998. V. 7, N 12. P. 392–397.
5. *Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Временная динамика вертикальных профилей структурных функций и характеристик скорости ветра в нижней атмосфере // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник докл. XVIII Междунар. симпоз. [Электронный ресурс] – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. D-221–D-224.*
6. *Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G.* Sodar derived vertical profiles of the structural characteristics of temperature fluctuations and the outer scale of turbulence // *Proc. 9th Int. Sympos. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans.* Vienna, 1998. P. 223–226.
7. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 463 с.
8. URL: <http://minisodar.org>
9. *Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г.* Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности в нижних слоях атмосферы по результатам акустического зондирования // *Изв. вузов. Физ.* 2012. Т. 55, № 9/2. С. 228–232.
10. *Красненко Н.П., Капегешева О.Ф., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г.* Внешние масштабы температурной и динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы // *Изв. вузов. Физ.* 2013. Т. 56, № 6. С. 57–62.
11. *Frehlich R., Meillier Y., Jensen M.L.* Measurements of boundary layer profiles with in situ sensors and Doppler lidar // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2008. V. 25, N 8. P. 1328–1340.
12. *Банах В.А., Рам С., Смалихо И.Н., Фалиц А.В.* Измерение параметров атмосферной турбулентности сканирующим в вертикальной плоскости импульсным когерентным ветровым лидаром // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 12. С. 1115–1120.

O.F. Kapegeshева, N.P. Krasnenko, P.G. Stafeev, L.G. Shamanaeva. **Outer scale of dynamic turbulence retrieved from results of acoustic sounding of the atmosphere.**

An original method of acoustic sounding of the outer scale of dynamic turbulence is suggested in the paper. An adaptive algorithm, developed by the authors, was used for interpretation of results of acoustic sounding. The efficiency of the suggested method is confirmed by a comparison of the results obtained with the data available from the literature.