

## Одновременные измерения структурной характеристики показателя преломления атмосферы оптическим и акустическим методами

В.П. Лукин<sup>1,2</sup>, Н.Н. Ботыгина<sup>1</sup>, О.Н. Емалеев<sup>1</sup>, Л.В. Антошкин<sup>1</sup>, П.А. Коняев<sup>1</sup>,  
В.А. Гладких<sup>1</sup>, В.П. Мамышев<sup>1</sup>, С.Л. Одинцов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 9.03.2011 г.

Выполнены сравнительные измерения уровня турбулентности в приземном слое атмосферы оптическим и акустическим способами с помощью комплектов оригинальной аппаратуры, разработанной в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Исследовался уровень турбулентности в приземном слое атмосферы на высоте 1,65 м. Обнаружено устойчивое различие между данными, полученными оптическим и акустическим способами.

*Ключевые слова:* акустические волны, оптические волны, зондирование, структурный параметр, когерентные структуры; acoustic waves, optical waves, remote sensing, structure parameter, coherent structures.

### Введение

В настоящее время существуют достаточно развитые неконтактные методы определения уровня турбулентности (структурной характеристики показателя преломления атмосферы  $C_n^2$ ), основанные на технике оптического зондирования (просвечивание трассы) и на измерении флуктуаций акустических волн (пульсационные). В процессе применения тех или иных методик естественно возникает проблема сопоставления данных. Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева развивает методики определения уровня турбулентности (структурных характеристик показателя преломления  $C_n^2$  и температуры  $C_T^2$ ), используя как акустические, так и оптические волны.

Всегда, так или иначе, возникал вопрос о возможности пересчета одних данных измерений в другие. В этой связи в 2010 г. были осуществлены одновременные (синхронные) измерения уровня турбулентности (структурного параметра показателя преломления атмосферы  $C_n^2$ ) в приземном слое атмосферы двумя различными измерителями – оптическим и акустическим.

Прежде всего, дадим краткое описание используемой аппаратуры. В качестве оптического измерителя использовался дифференциальный измеритель турбулентности (ДИТ-2), разработанный в ИОА СО РАН. Он предназначается для измерения уровня турбулентности и может быть использован для оперативного контроля текущих значений структурного параметра турбулентности атмосферы, а также для оценки влияния турбулентности на работу различных оптических устройств. Данный измеритель позволяет определять уровень турбулентности на различных атмосферных трассах и оценивать пригодность атмосферной трассы для проведения оптических наблюдений. Физические основы оптического метода, применяемого в нем для измерения параметров атмосферной турбулентности, достаточно подробно изложены в [1, 2]. Использование дифференциального метода в приборе, измеряющем параметры турбулентности по дрожанию изображения, вызванному атмосферной турбулентностью, позволяет уменьшить погрешность измерений, связанную с вибрацией конструкций прибора. В работе [2] проведено обоснование дифференциального метода и получены формулы для определения из измерений дрожания изображения источника оптического излучения.

### Технические характеристики измерителя ДИТ-2

Дифференциальный измеритель турбулентности для трассовых измерений уровня турбулентности

\* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Нина Николаевна Ботыгина (bnp@iao.ru); Олег Назарович Емалеев (eop@iao.ru); Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru); Петр Алексеевич Коняев (petrkonyaev@gmail.com); Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Владимир Петрович Мамышев; Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

атмосферы состоит из источника лазерного излучения, который устанавливается в начале атмосферной трассы, и приемного устройства на конце трассы. Источник выполнен в виде автономного прибора. Излучателем сферической волны служит малогабаритный лазерный модуль KLM-D532-5-5, питающийся от аккумулятора. Для удобства транспортировки штатив, на котором установлен излучатель, выполнен в виде разъемной конструкции.

Приемное устройство измерителя ДИТ создано на базе серийного зеркально-линзового телескопа ТАЛ-200К. Перед объективом телескопа симметрично относительно центра установлена маска с двумя или четырьмя входными субапертурами, на которых установлены оптические клинья. Дополнительная оптическая система переносит дифракционные изображения лазерного источника из плоскости изображения объектива телескопа в плоскость фотоматрицы видеокамеры. Цифровая видеокамера Prosilica GE680 регистрирует распределение освещенности в плоскости изображения.

Оперативные вычисления параметра атмосферной турбулентности производят на основе измерения угловых смещений центров тяжести (ЦТ) каждого изображения и оценки дисперсии разности угловых смещений ЦТ двух изображений, которые сформированы вертикальной парой входных субапертур. Определение параметра атмосферной турбулентности из дисперсии разностного сигнала позволяет исключить влияние инструментальных дрожаний изображения.

Излучение лазерного источника при распространении в турбулентной среде подвергается случайным искажениям. Это приводит к случайным деформациям волнового фронта излучения, падающего на вход-

ные субапертуры. Наклоны волновых фронтов на входных субапертурах приводят к угловым смещениям центров тяжести дифракционных изображений источника в плоскости наименьшего изображения объектива телескопа. Аберрации волнового фронта вызывают перераспределение освещенности в дифракционном изображении. Набор сменных диафрагм, входящих в состав прибора, позволяет подобрать необходимый диаметр входных субапертур для получения изображения, близкого к дифракционному.

Основной метрологической характеристикой дифференциального измерителя турбулентности является угловой масштаб элемента ПЗС-матрицы видеокамеры, с помощью которой регистрируются угловые смещения изображений. Диапазон измеряемых значений структурной постоянной показателя преломления рассчитывали на основе выводов теории распространения волн в атмосфере [3, 4]. В расчетах было показано, что наиболее точные измерения турбулентности можно обеспечить на трассах протяженностью 100–200 м при работе в средних условиях приземного слоя атмосферы.

Для оценки погрешности измерения были использованы: измеренное значение шумовой составляющей дисперсии регистрируемых угловых смещений ЦТ изображения, угловой масштаб пикселя матрицы камеры, размер поля зрения, протяженность оптической трассы. Нижняя граница диапазона измеряемых значений уровня турбулентности зависит от шумов системы регистрации изображения, которые сказываются при вычислении положения центра тяжести изображения.

В табл. 1 приведены основные характеристики модификации дифференциального измерителя турбулентности.

Т а б л и ц а 1

**Основные технические характеристики ДИТ-2**

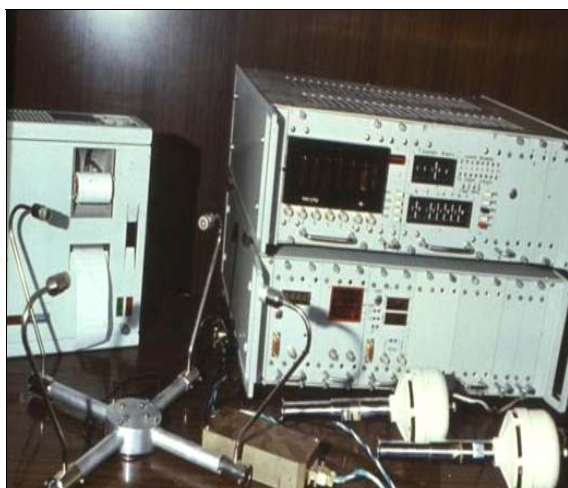
Диапазон измеряемых значений структурного параметра показателя преломления атмосферы $C_n^2, \text{ м}^{-2/3}$	$6,8 \cdot 10^{-16} - 2,3 \cdot 10^{-12}$
Относительная погрешность, приведенная к минимальному измеряемому значению $C_n^2, \%$	35
Длина трассы, м	100, 200
Диаметр субапертур, мм	30, 20, 14, 10
Разнос субапертур, мм	160
Фокусное расстояние объектива телескопа ТАЛ-200К, мм	$1700 \pm 34$
Угловой масштаб пикселя фотоматрицы, мкрад/пиксель	$1,2 \pm 0,07$
Размер элемента ПЗС-матрицы видеокамеры, мкм	$7,4 \times 7,4$
Разрешение видеокамеры, пиксель	$640 \times 480$
Рабочий диапазон ДИТ по сигналу, соответствующему максимуму освещенности дифракционного изображения, число уровней	40–255
Частота кадров в режиме «Измерение», Гц	100
Частота обновления текущих значений $C_n^2$ , Гц	1
<i>Параметры лазерного излучателя</i>	
Длина волны лазерного излучения, нм	532
Расходимость лазерного излучения, мрад	3
Максимальная мощность лазерного излучения, мВт	4,5
Начальный диаметр пучка излучения, мм	5
Время непрерывной работы от аккумулятора не менее, ч	8

**Одновременные измерения структурной характеристики показателя преломления атмосферы...**

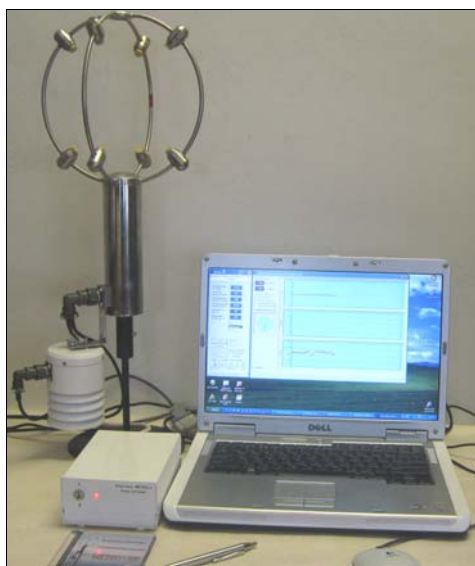
Для сопоставления результатов одновременно с измерениями среднего значения уровня турбулентности дифференциальным измерителем ДИТ-2 в приземном слое проводили измерения с помощью двух ультразвуковых метеостанций, расположенных вблизи трассы распространения лазерного излучения.

## Акустические измерители

Следует отметить, что у современной акустической (ультразвуковой) метеоаппаратуры существует достаточно много предшествующих комплексов. Первый подобный комплекс был разработан и изготовлен еще в 1983 г. [5] в ИОА СО РАН. Он успешно использовался в 1983–1986 гг. для работы в атмосфере в СССР [6] и в Болгарии. Внешний вид аппаратуры показан на рис. 1, а.



а



б

Рис. 1. Внешний вид ультразвуковых метеостанций образца 1983 г. (а) и 2006 г. (б). Акустическая головка (б) обеспечивает данные для вычисления пульсаций ветра и температуры

Используемая в настоящее время ультразвуковая метеостанция (УЗМ) «Метео-2» (рис. 1, б) является усовершенствованной модификацией и описана в [7].

При измерениях турбулентных параметров время осреднения, как известно, должно выбираться из условия, чтобы масштаб длины осредненного турбулентного течения (средняя скорость ветра, умноженная на время осреднения) существенно превышал внешний масштаб турбулентности по направлению среднего течения (т.е. время осреднения должно существенно превышать характерный временной масштаб корреляции изучаемого поля). Измерения в приземном слое над ровной поверхностью обычно производят со временем осреднения порядка 100 с [1, 2]. Соответствующий этому времени масштаб длины для скорости ветра 1–10 м/с составляет 0,1–1 км и превышает внешний масштаб турбулентности. Погрешность измерений структурных характеристик температуры определяется в первую очередь чувствительностью прибора и уменьшается с увеличением средней скорости ветра, времени осреднения и самих значений структурных характеристик. В условиях слабой турбулентности ( $C_n^2$  порядка  $5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ ) при скорости ветра 0,5–10 м/с оптимальное время осреднения составляет 2 мин.

Сравнительные измерения выполнялись в пригороде г. Томска на территории обсерватории БЭК ИОА СО РАН в июне 2010 г. в условиях теплой безоблачной погоды. Протяженность однородной оптической трассы составила 200 м. Лазерный осветитель оптического измерителя, формирующий практически сферическую волну (длина волны 532 нм), и приемное устройство ДИТ-2 были расположены на высоте 1,65 м над подстилающей поверхностью. Использовали две одновременно работающие ультразвуковые метеостанции. УЗМ № 026 была расположена на высоте 1,65 м на расстоянии 100 м от лазерного источника и 10 м от оптической трассы, УЗМ № 012 – на высоте 2,8 м на расстоянии 146 м от лазерного источника и 10 м от оптической трассы. Длительность реализаций, по которым оценивалась структурная характеристика показателя преломления, равнялась 60 с, как в оптических, так и в акустических измерениях. В оптических измерениях (прибором ДИТ-2) использовалось скользящее окно усреднения с временным сдвигом, равным 1 с. Оптические измерения проводились при двух различных режимах записи: с частотой 180 кадр/с (время экспозиции одного кадра 5,21 мс) и 100 кадр/с (30 мкс). Акустические измерения велись со скоростью 10,7 отсчетов в секунду. Измерялись ортогональные компоненты вектора скорости ветра, температура и относительная влажность воздуха, статическое атмосферное давление. Данные записывались на жесткий диск управляющего компьютера. Дальнейшая обработка экспериментальных результатов производилась с помощью специализированного программного обеспечения. Применялась гипотеза Тейлора о возможности перехода при оценках статистических характеристик турбулентности от осреднения по ансамблю реализаций к осреднению по времени.

Структурная характеристика  $C_T^2$  определялась на основе оценки структурной функции температуры при сдвиге 1 м (при переходе к сдвигу по времени использовались средние значения скорости ветра за 60-секундный интервал оценки), а затем по значению  $C_T^2$  с использованием известной формулы (см., например, [8]) вычислялась  $C_n^2$ .

## Результаты измерений

Результаты измерений  $C_n^2$ , представленные на рис. 2–5, показывают достаточно высокую корреляцию оптических и акустических данных.

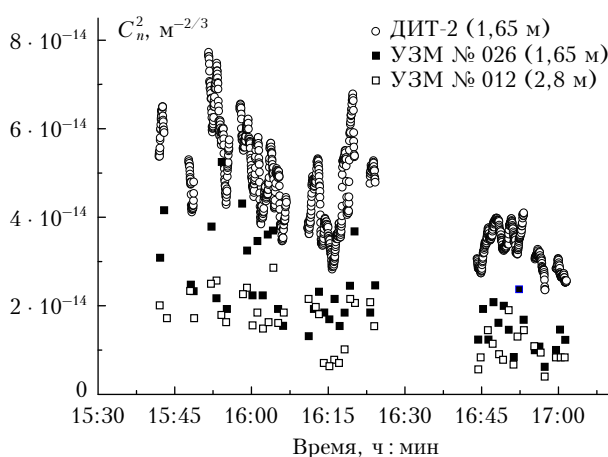


Рис. 2. Циклы одновременных измерений структурной характеристики показателя преломления атмосферы  $C_n^2$  дифференциальным измерителем турбулентности и двумя ультразвуковыми станциями

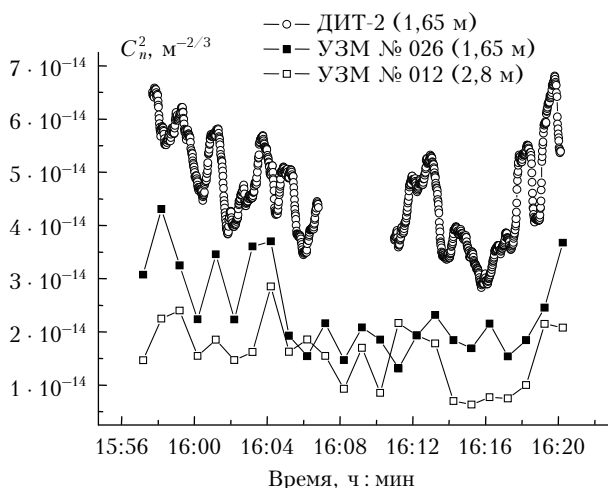


Рис. 3. Измерения  $C_n^2$  с помощью ДИТ-2 при регистрации изображения с частотой 180 кадр/с (время экспозиции 5,21 мс) и двумя ультразвуковыми станциями

Следует подчеркнуть, что из оптических измерений мы получаем непосредственно структурную характеристику показателя преломления, тогда как из акустических данных только структурную характеристику температуры  $C_T^2$ , которая линейно связана с  $C_n^2$ .

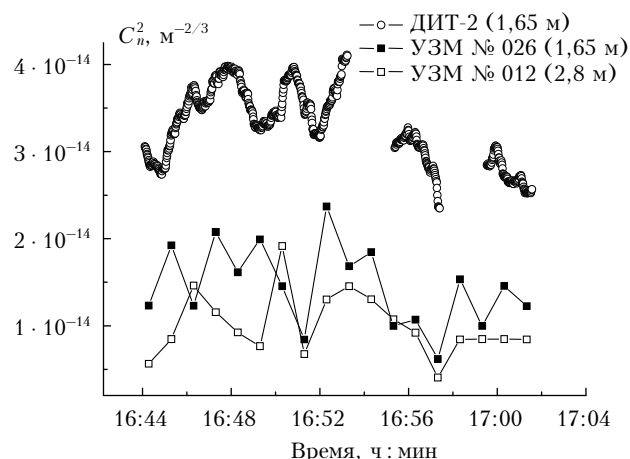


Рис. 4. Измерения  $C_n^2$  с помощью ДИТ-2 при регистрации изображения с частотой 100 кадр/с (время экспозиции 30 мкс) и двумя ультразвуковыми станциями

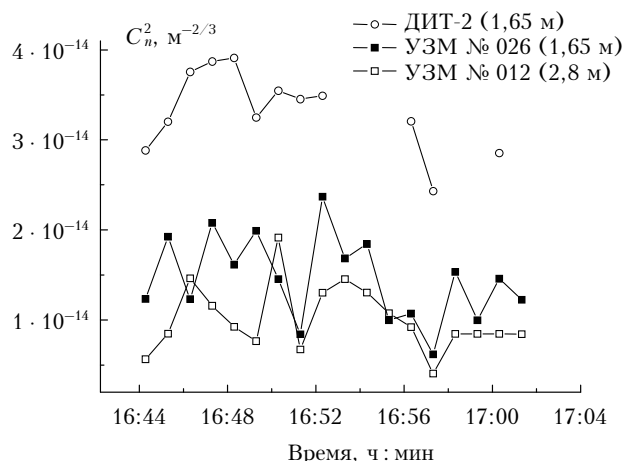


Рис. 5. Выбранные из оптических измерений значения  $C_n^2$  (см. рис. 4), соответствующие тем же интервалам усреднения, что и при акустических измерениях

Отметим, что акустические данные показывают уверенное различие результатов наблюдения уровня температурной турбулентности для высот 1,65 и 2,8 м, что косвенно подтверждает высокую чувствительность акустических методов диагностики.

Период измерений характеризовался слабым ветром (2–3 балла по шкале Бофорта) с направлением, почти перпендикулярным к оптической трассе. Среднее значение модуля скорости ветра за этот период для УЗМ № 026 (высота 1,65 м) составило 3,6 м/с, а для УЗМ № 012 (высота 2,8 м) – 3,8 м/с. Температура воздуха возросла от 22,8 до 24,5 °С, а относительная влажность уменьшилась с 29 до 24%. Структура турбулентных полей температуры и модуля скорости ветра была близка к «классической». Это подтверждают сглаженные энергетические спектры данных величин, полученные за весь период наблюдений (14:39–17:02/11.06.2010) (рис. 6).

Линейные аппроксимации спектров температуры и модуля скорости ветра в логарифмическом масштабе для УЗМ № 026 показаны на рис. 6. В свою очередь, табл. 2 содержит коэффициенты наклона

**Наклоны спектров температуры и модуля скорости ветра  
в различных диапазонах частот**

Диапазоны спектров, Гц линейный/логарифмический масштабы	Температура		Модуль скорости ветра	
	УЗМ № 026	УЗМ № 012	УЗМ № 026	УЗМ № 012
(0,007–5,0)/(–2,15–0,7)	–1,54	–1,53	–1,72	–1,71
(0,3–5,0)/(–0,52–0,7)	–1,66	–1,63	–1,83	–1,82
(1,0–5,0)/(0,0–0,7)	–1,77	–1,72	–1,93	–1,92

линейных аппроксимаций различных диапазонов спектров, представленных на рис. 6.

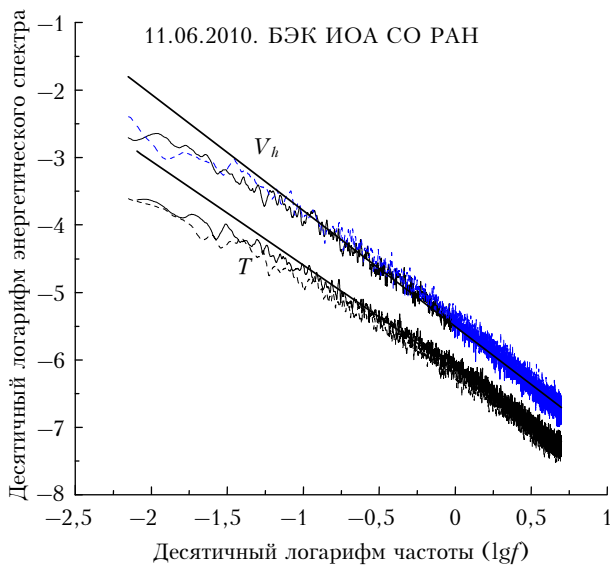


Рис. 6. Сглаженные скользящим средним спектры температуры и модуля скорости ветра (логарифмический масштаб), полученные при измерениях с помощью УЗМ «Метео-2» в двух разнесенных в пространстве точках. Прямые линии — результаты линейной аппроксимации спектров по всему диапазону частот (0,007–5,0 Гц) при измерениях на высоте 1,65 м (УЗМ № 026)

Согласно табл. 2 наклоны спектров достаточно близки к классическому закону « $-5/3$ » в инерционном интервале. При этом следует учесть, что рассматривались спектры модуля горизонтальной скорости ветра, а не его продольной составляющей.

В результате установлено, что измерения структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$  оптическим и акустическим методами при синхронизации начала и конца временных интервалов усреднения регистрируемых измерителями величин дают устойчивое различие (см. рис. 5). Данные оптических измерений примерно в 1,5–3 раза превышают данные, получаемые из акустических наблюдений. Конечно, мы не ожидали найти абсолютное совпадение, поскольку  $C_n^2$  при оптических измерениях получается усреднением по всей трассе протяженностью 200 м, тогда как акустические станции дают значение в отдельной точке.

Однако природа такого различия пока не понятна. Необходимы дальнейшие исследования в данном

направлении. Некоторые выводы по результатам подобных наблюдений и гипотезы представлены в работе [9], где развита асимптотическая теория турбулентности. В качестве гипотезы можно указать на возможное проявление локальных когерентных структур в атмосфере во время проведения измерений. Локальные когерентные структуры в атмосфере с большей вероятностью могут проявляться именно при измерениях с помощью датчиков, тогда как при усреднении по протяженной оптической трассе они уже не будут оказывать существенного влияния. А поскольку [10, 11] в когерентных структурах флуктуации интенсивности и фазы существенно меньше, чем в турбулентном потоке, то акустические данные могут давать более низкие значения уровня турбулентности.

Настоящие исследования частично финансировались в рамках Интеграционного проекта СО РАН «Развитие методов высокоточных астронаблюдений для обеспечения работы адаптивных систем», выполняемого совместно с организациями национальных академий наук стран СНГ (Узбекистан) в период 2009–2011 гг., а также Программой ОФН РАН «Фундаментальные основы и перспективные технологии акустической диагностики сложных искусственных и природных сред» (проект № 3.10.1).

1. Sarazin M., Roddier F. The ESO Differential Image Motion Monitor // Astron. and Astrophys. 1990. N 227. P. 294–300.
2. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцев С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
4. Миронов В.Л., Носов В.В., Чен Б.Н. Корреляция смещений оптических изображений лазерных источников в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 1981. Т. 24, № 12. С. 1467–1471.
5. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Суконкина В.Н., Хацко В.В., Янков А.П. Аппаратура для метеорологических исследований в атмосфере // Приборы и техн. эксперим. 1986. № 3. С. 240–241.
6. Губкин С.М., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Мутницкий Н.Г. Экспериментальные исследования астроклиматических характеристик Приэльбрусья // Астроном. ж. 1983. Т. 60, вып. 4. С. 789–794.
7. Гладких В.А., Макленко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7 (109). С. 21–25.

8. *Распространение лазерного пучка в атмосфере* / Под ред. Д. Стробена. М.: Мир, 1981. 416 с.
9. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. Полуклассическая теория анизотропной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 10. С. 845–862.
10. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Decrease of the light wave fluctuations in the coherent turbulence // Proc. SPIE. 2008. V. 7296. P. 77–81.
11. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V. Structural function of temperature fluctuations in coherent turbulence // Proc. SPIE. 2008. V. 7296. P. 94–96.

*V.P. Lukin, N.N. Botygina, O.N. Emaleev, L.V. Antoshkin, P.A. Konyayev, V.A. Gladkikh, V.P. Mamyshhev, S.L. Odintsov. Simultaneous measurements of structure characteristics of atmospheric refraction by optical and acoustic methods.*

Comparative measurements of the level of turbulences are conducted in ground-based atmospheric layer by optical and acoustic methods. The measurements were executed by means of an original equipment, designed at Zuev Institute of Atmospheric Optics. The level of turbulence in ground-based layer of atmosphere at a height of 1.65 m was studied. A stable difference between data, obtained by optical and acoustic method was found.