

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 520.1+535.31+551.5+551.55

# Сравнительные измерения уровня турбулентности атмосферы с помощью оптических и акустических измерителей

**В.П. Лукин, Н.Н. Ботыгина, В.А. Гладких, О.Н. Емалеев,  
П.А. Коняев, С.Л. Одинцов, А.В. Торгаев\***

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

Поступила в редакцию 11.11.2014 г.

Проведены комплексные измерения уровня атмосферной турбулентности с помощью дифференциального измерителя турбулентности, датчика волнового фронта, а также ультразвуковыми метеостанциями. Суточные измерения структурной постоянной показателя преломления осуществлялись на горизонтальных оптических трассах на Базовом экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Приводится сравнительный анализ полученных результатов.

*Ключевые слова:* турбулентность, атмосфера, дифференциальный метод, оптические измерения, акустические измерения; turbulence, atmosphere, differential method, optical measurements, acoustic measurements.

### Эксперимент

На основе данных, полученных в результате измерений на Базовом экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в июле—августе 2013 г., проведено сравнение оценок структурной постоянной показателя преломления воздуха, характеризующей интенсивность атмосферной турбулентности.

Физические основы оптических методов измерения параметров атмосферной турбулентности достаточно подробно изложены в работе [5]. Использование дифференциального метода при измерении параметров турбулентности по дрожанию изображения, вызванному атмосферной турбулентностью, позволяет уменьшить погрешность измерений, связанную с вибрацией конструкций прибора. В работах [6, 7] проведено обоснование дифференциального метода и получены формулы для определения структурной постоянной показателя преломления из измерений дрожания изображения источника плоской волны. Оптические измерения, выполненные дифференциальным измерителем турбулентности (ДИТ) [1] и датчиком волнового фронта (ДВФ), работающим по схеме Шэка—Гартмана [2], проводились на приземных однородных, разнесенных по горизонтали на расстояние 96 см, оптических трассах протяженностью 100 и 200 м на высоте 165 м

над подстилающей поверхностью. Оптические измерения сопровождались измерениями метеопараметров атмосферы двумя ультразвуковыми метеостанциями АМК-03 [3] и «Метео-2» [4]. Станция АМК-03 располагалась вблизи приемного устройства ДИТ и ДВФ на высоте 170 см, а станция «Метео-2» — на расстоянии 60 м от приемного устройства вдоль оптической трассы и 10 м от оптической оси ДИТ на высоте 2,3 м. Ниже дадим краткое описание используемых приборов.

### Дифференциальный измеритель турбулентности

Этот прибор предназначен для измерения астроклиматических характеристик атмосферы и оперативного контроля текущих значений параметра турбулентности атмосферы для оценки влияния турбулентности на работу различных оптических устройств. Физические основы оптических методов, применяемых в приборах измерения параметров атмосферной турбулентности, достаточно подробно изложены в работе [1]. Использование дифференциального метода в приборе, измеряющем параметры турбулентности по дрожанию изображения, вызванному атмосферной турбулентностью, позволяет уменьшить погрешность измерений, связанную с вибрацией конструкций прибора. Источник излучения выполнен в виде автономного прибора. Излучателем сферической волны служит малогабаритный лазерный модуль KLM-D532-5-5, питающийся от аккумулятора. Приемное устройство измерителя ДИТ создано на базе серийного зеркально-линзового телескопа ТАЛ-200К. Прибор ранее прошел испытания в реальной

Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Нина Николаевна Ботыгина (bnp@iao.ru); Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Олег Назарович Емалеев (eon@iao.ru); Петр Алексеевич Коняев (peter@iao.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru); Андрей Витальевич Торгаев (torgaev@iao.ru).

атмосфере. Диапазон измеряемых значений структурной постоянной показателя преломления  $C_n^2$  составляет  $3,7 \cdot 10^{-16} - 3,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ . Использование в ДИТ алгоритма скользящего интервала усреднения длительностью 60 с позволяет измерять значения  $C_n^2$  с шагом 1 с на заданной пользователем продолжительности одного цикла измерений.

### Дифференциальный измеритель на основе датчика волнового фронта

Созданный ранее в ИОА СО РАН датчик волнового фронта типа Шэка–Гартмана является высокоэффективным средством для оценки уровня турбулентности на оптических трассах. В измерениях на горизонтальной оптической трассе с использованием в качестве измерителя ДВФ применялся коллимированный лазерный пучок диаметром 100 мм с длиной волны излучения 0,66 мкм. Диаметр входной апертуры датчика волнового фронта составлял 72,4 мм. Оценка уровня турбулентности на трассе проводилась на основе измерения разности локальных наклонов волнового фронта на двух разнесенных в плоскости входного зрачка телескопа субапертурах. Применение дифференциального метода измерений позволяет уменьшить ошибку измерений, связанную с вибрацией элементов конструкции телескопа.

Оценка структурной постоянной показателя преломления проводилась на основе измерения разности локальных наклонов волнового фронта на двух разнесенных по вертикали субапертурах приемного устройства. Для оценки структурной постоянной показателя преломления использовалось шесть пар разнесенных субапертур маски Гартмана и определялось среднее значение  $C_n^2$  из шести одновременных измерений. Размер входной субапертуры ДВФ равен 6,4 мм, расстояние по вертикали между центрами используемых для оценки  $C_n^2$  субапертур 44,8 мм.

### Результаты измерений

На рис. 1 показаны оба оптических измерителя на сходной позиции на измерительном полигоне.

На рис. 2, а, б приведены результаты одновременных измерений  $C_n^2$  8 августа 2013 г. при следующих метеоусловиях: температура воздуха ночью падает от 17 до 13 °С и повышается после восхода Солнца до 18 °С, горизонтальная составляющая скорости ветра в направлении, перпендикулярном оптической оси, до восхода Солнца в среднем 1 м/с, после восхода возрастает до 1,5 м/с; во второй половине дня температура в среднем 23,5 °С, ветер около 1,5 м/с. С местным временем, указанным на графиках, связано начало интервала усреднения. Следует заметить, что данные, получаемые двумя ультразвуковыми метеостанциями АМК-03 [3] и «Метео-2» [4], также использовались для расчета структурного параметра показателя преломления атмосферы. Вертикальными отрезками на рис. 2, а и б показаны интервалы разброса экспериментальных данных.

В представленных результатах расчет  $C_n^2$  (для длины волны 0,66 мкм) по данным оптических измерений проводился в приближении плоской волны излучателя для ДВФ и сферической волны для ДИТ. При этом осуществлялся учет возможного влияния величины внутреннего масштаба турбулентности и параметров Френеля приемных субапертур ДВФ ( $\Omega = 0,25$ ) и ДИТ ( $\Omega = 1,45$ ) для оптической трассы 200 м. Внутренний масштаб турбулентности принимался равным колмогоровскому масштабу, который оценивался из измерений масштаба скорости ветра по данным, получаемым ультразвуковой метеостанцией для условий безразличной стратификации [5]. Значения  $C_n^2$ , вычисленные по данным оптических измерений ДВФ и ДИТ, отличаются в среднем на 20%. В условиях, близких к равновесным, результаты оптических измерений хорошо согласуются с результатами измерений метеостанцией АМК-03 и существенно отличаются в условиях устойчивой стратификации.



а



б

Рис. 1. Оптические измерители на измерительном полигоне: а – приемные, б – передающие части измерителя

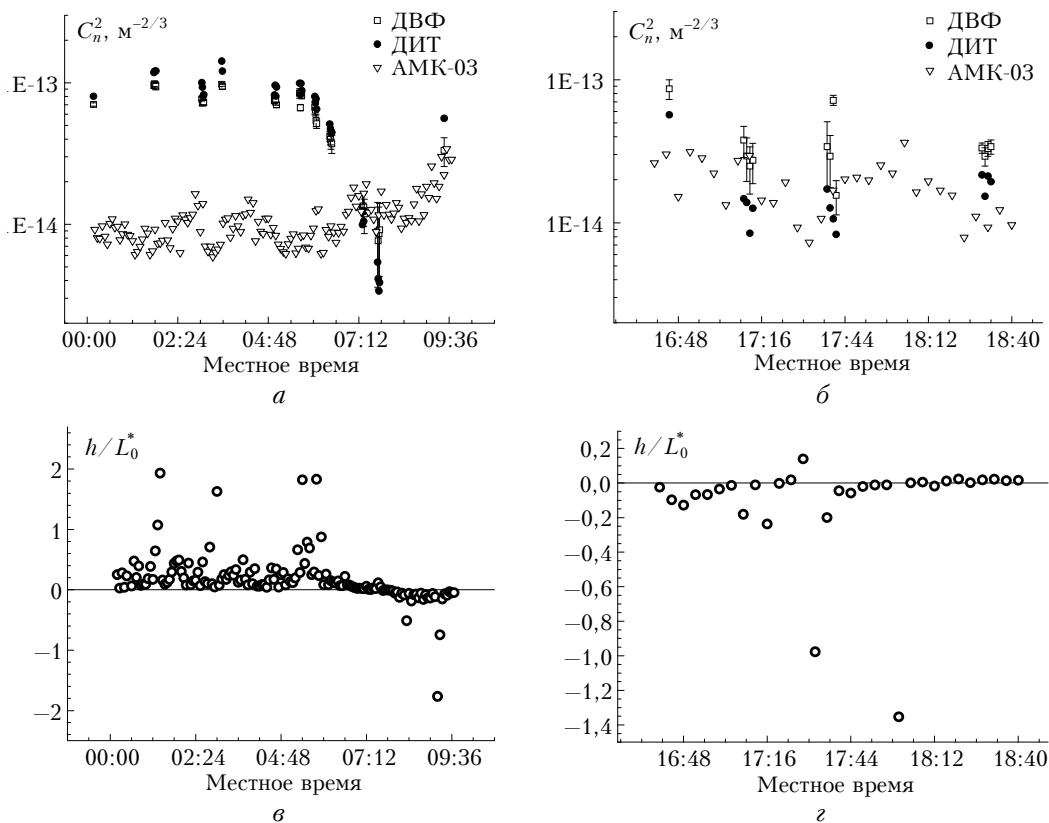


Рис. 2. Временные изменения структурной постоянной показателя преломления (*a*, *б*), полученные по данным оптических и акустических измерений, и параметра стратификации (числа Монина–Обухова  $h/L_0^*$ , где  $h$  – высота над подстилающей поверхностью,  $L_0^*$  – масштаб Монина–Обухова) (*в*, *г*) по данным акустических измерений

Анализ результатов одновременных измерений  $C_n^2$  оптическими методами на трассах 100 и 200 м и локальных измерений ультразвуковыми метеостанциями показал подобие временных изменений  $C_n^2$ , однако оценки  $C_n^2$  из оптических измерений в условиях устойчивой и неустойчивой стратификации существенно выше, чем из измерений метеостанциями. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены временные изменения структурной постоянной показателя преломления, полученные из измерений ДИТ на трассах 200 м (29 июля 2013 г.) и 100 м (26 июля 2013 г.) и ультразвуковой метеостанцией «Метео-2».

Для измерения астроклиматических характеристик атмосферы и оперативного контроля текущих значений параметров турбулентности атмосферы при работе различных оптических устройств необходимы малогабаритные компактные измерители оптических характеристик атмосферной турбулентности. Для таких целей используются трассовые оптические измерители и локальные метеостанции.

Временные измерения структурной постоянной показателя преломления, оцененные из оптических и акустических измерений, приведены на рис. 3, *б*, оценки уровня турбулентности атмосферы, полученные

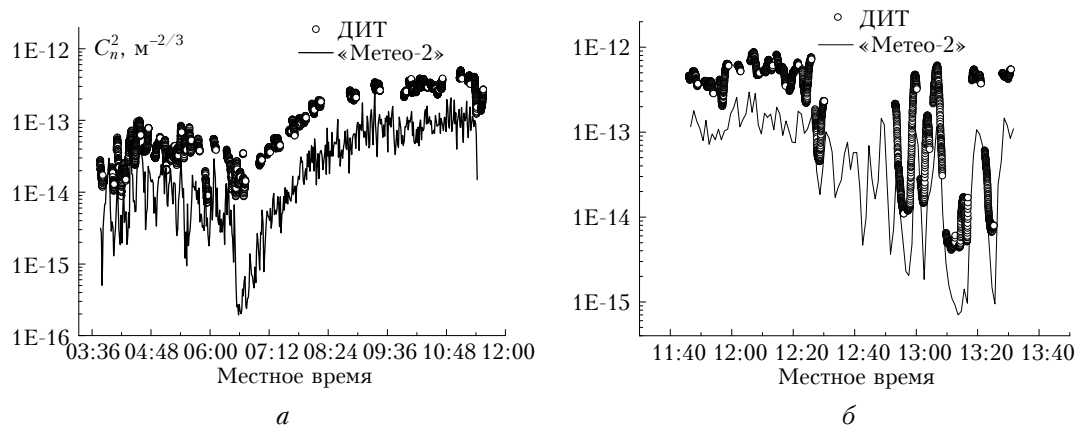


Рис. 3. Временные изменения структурной постоянной показателя преломления (данные акустических измерений приведены к длине волны 0,66 мкм) 29 (*a*) и 26 июля (*б*)

из оптических измерений, превышают оценки измерений акустической станции. Анализ результатов одновременных измерений [5] показал, что значения структурной постоянной показателя преломления, вычисленные из оптических измерений ДВФ и ДИТ, отличаются в среднем на 20% (рис. 4). Однако в большинстве случаев оценки результатов оптических измерений выше, чем измерений метеостанциями.

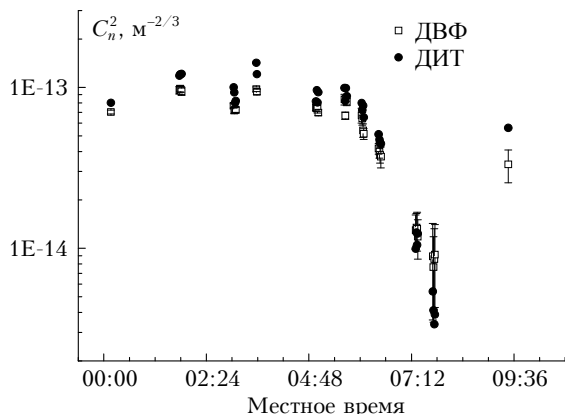


Рис. 4. Временные изменения структурной постоянной показателя преломления

Отметим, что спектральная зависимость структурной постоянной показателя преломления атмосферы от длины волны излучения в диапазоне от 0,2 до 20 мкм достаточно хорошо аппроксимируется в условиях низкой влажности зависимостью вида

$$C_n^2(\lambda) = C_n^2(\lambda \rightarrow \infty) \left( 1 + \frac{0,584}{77,6\lambda^2} \right)^2.$$

В работе [8] были исследованы некоторые аспекты зависимости угловых оптических измерений в атмосфере от спектрального состава используемого излучения. Для длины волны 0,66 мкм множитель

$$\left( 1 + \frac{0,584}{77,6\lambda^2} \right)^2 \approx 1,035,$$

поэтому данные акустических измерений необходимо умножить на числовой множитель, что увеличивает значения, полученные акустическими датчиками, примерно на 3,5%. И это далеко не перекрывает

значительное различие данных оптических и акустических измерений уровня турбулентности.

Сравнение результатов трассовых оптических измерений и локальных измерений ультразвуковыми метеостанциями показало подобие временных изменений структурной постоянной показателя преломления. В большинстве случаев оценки уровня турбулентности оптических измерений превышают оценки измерений метеостанциями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы научных исследований СО РАН и Национальной академии наук Украины «Разработка новых методов диагностики сингулярностей фазовых искажений лазерных пучков и изображений, формируемых в атмосфере» и комплексной экспедиции СО РАН «Астроклимат Сибири».

1. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Лукин В.П. Трассовый дифференциальный измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109, № 4. С. 683–689.
2. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Корольков В.П., Лавринова Л.Н., Насыров Р.К., Полещук А.Г., Черкашин В.В. Датчик Шэка–Гартмана на основе раstra низкоапертурных внеосевых дифракционных линз // Автометрия. 2009. Т. 45, № 2. С. 88–98.
3. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков А.А., Тихомиров А.А., Щелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
4. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7(109). С. 21–25.
5. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Гладких В.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Одинцов С.Л., Торгаев А.В. Сравнительные измерения уровня турбулентности атмосферы с помощью оптических и акустических измерителей // XX Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана». [Электронный ресурс]. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. – 1 CD-ROM. Новосибирск.
6. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
7. Sarazin M., Roddier F. The E.S.O. Differential Image Motion Monitor // Astron. Astrophys. 1990. N 227. P. 294–300.
8. Lukin V.P. Influence of the source spectrum on the optical measurements of turbulence // Appl. Opt. 2009. V. 48, N 1. P. A93–A97.

V.P. Lukin, N.N. Botygina, V.A. Gladkikh, O.N. Emaleev, P.A. Konyaev, S.L. Odintsov, A.V. Torgaev.  
Comparative measurements of atmospheric turbulence level with optical and acoustic meters.

The complex atmospheric turbulence measurements using differential turbulence meter, wavefront sensor, and ultrasonic meteostations were carried out. The structure constant of the refractive index were measured daily along horizontal optical paths at Basic Experimental Station of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics. The comparative analysis of data obtained is given.