

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРАССЕ

<sup>1,2</sup>Е.Л. Соин, <sup>1</sup>В.П. Лукин

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
egorsh@vtomske.ru

## COMPARATIVE MEASUREMENTS OF ATMOSPHERIC OPTICAL TURBULENCE PARAMETERS AT HORIZONTAL TRACK

<sup>1,2</sup>E.L. Soin, <sup>1</sup>V.P. Lukin

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia  
egorsh@vtomske.ru

**Аннотация.** Выполнены сравнительные измерения уровня турбулентности на горизонтальной трассе двумя оптическими методами. Первый — активный метод определения уровня турбулентности с помощью дифференциального измерителя турбулентности. Вторым — пассивный метод, основанный на измерении дрожания изображения с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры, установленной на малом астрономическом телескопе, и алгоритмов обработки в реальном времени. Обсуждаются возможные различия результатов измерений.

**Ключевые слова:** атмосфера, турбулентность, параметр Фрида, наклон фазового фронта.

**Abstract.** Comparative measurements of the turbulence level at horizontal track were performed using two optical methods. The first one used a differential turbulence meter. The second one is a passive method for determining the level of turbulence based on the measurement of image jitter using a high-speed digital video camera mounted on a small astronomical telescope and real-time processing algorithms. Possible differences in measurement results are discussed.

**Keywords:** atmosphere, turbulence, Fried parameter, phase front slope.

### СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В настоящее время существуют несколько достаточно развитых методов определения уровня турбулентности (структурной характеристики показателя преломления атмосферы  $C_n^2$ , основанных как на технике оптического зондирования (просвечивание атмосферной трассы), так и на измерении флуктуаций акустических волн (пульсационные методы). Институт оптики атмосферы СО РАН развивает различные методы и методики определения параметров атмосферной турбулентности, прежде всего, с применением оптических волн. Настоящие измерения были выполнены с помощью двух комплектов оптической аппаратуры. При использовании различных инструментов всегда возникает вопрос о возможности пересчета одних данных измерений в другие для контроля точности и сопоставления результатов измерений. В этой связи в период зимы–весны 2021 г. были осуществлены одновременные измерения структурного параметра  $C_n^2$  в приземном слое атмосферы на короткой атмосферной трассе двумя различными оптическими измерителями.

В качестве одного из этих оптических измерителей использовался дифференциальный измеритель турбулентности (ДИТ-2) [Антошкин и др., 1998]. Он является активным оптическим измерителем, использующим лазерную подсветку, и предназначен для высокоточного измерения уровня турбулентности. Этот измеритель может быть использован как для контроля текущих значений структурного параметра турбулентности атмосферы, так и для оценки влияния турбулентности на работу различных опти-

ческих устройств. ДИТ-2 позволяет определять уровень турбулентности на различных атмосферных трассах, в том числе с целью оценки пригодности атмосферной трассы для проведения оптических наблюдений.

Дифференциальный измеритель турбулентности состоит из источника лазерного излучения, который устанавливается в начале атмосферной трассы, и приемного устройства, устанавливаемого в конце трассы. Приемное устройство измерителя ДИТ-2 создано на базе зеркально-линзового телескопа.

Перед объективом телескопа симметрично относительно центра установлена маска с двумя входными субапертурами, в которых установлены оптические клинья с углом порядка 80 угл. сек. Окуляр переносит дифракционные изображения лазерного источника из плоскости изображения объектива телескопа на плоскость матрицы видеокамеры. Используется цифровая видеокамера Prosilica GE680, которая регистрирует распределение освещенности в плоскости изображения с частотой до 200 кадров в секунду. Оперативные вычисления параметра атмосферной турбулентности производятся на основе измерения угловых смещений центров тяжести каждого из двух изображений и вычисления дисперсии разности угловых смещений этих 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. Наклоны волнового фронта (ВФ) на входных суб-

апертурах приводят к угловым смещениям центров тяжести дифракционных изображений источника в плоскости наименьшего изображения объектива телескопа. Основной метрологической характеристикой дифференциального измерителя турбулентности является угловой масштаб элемента ПЗС-матрицы видеокамеры, с помощью которой регистрируются угловые смещения изображений.

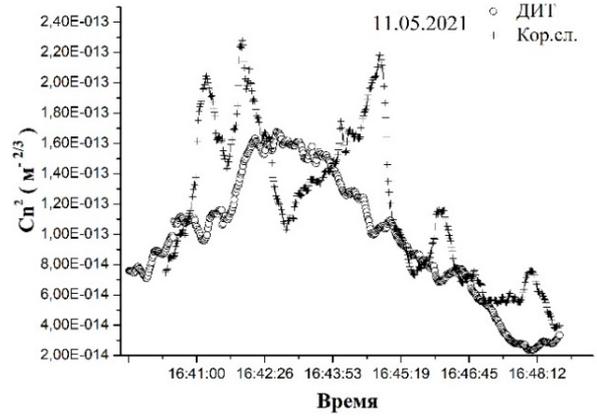
Среднее по трассе значение структурной постоянной показателя преломления рассчитывается по формуле

$$C_n^2 = 0.0463 \frac{\sigma_y^2 S^2}{D^{-1/3} \left[ 1 - 0.564 \left( \frac{d}{D} \right)^{-1/3} \right] L} \left( \text{м}^{-2/3} \right),$$

где  $\sigma_y^2$  — дисперсии разности измеряемых смещений двух изображений в направлении разноса входных субапертур, размерность пиксель;  $S$  — угловой масштаб пикселя (элемента ПЗС-матрицы), размерность радиан/пиксель;  $D$  — диаметр входных субапертур, мм;  $d$  — расстояние между центрами входных субапертур, мм;  $L$  — длина трассы, м.

Диапазон измеряемых значений структурной постоянной показателя преломления рассчитывался на основе выводов теории распространения волн в атмосфере [Кон и др., 1974]. Как показали многочисленные испытания в лабораторных и натурных условиях, рабочий диапазон измеряемых значений оказывается равным  $6.8 \cdot 10^{-16} \div 2.3 \cdot 10^{-12}$ ,  $\text{м}^{-2/3}$ . 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 расчетов величины структурной характеристики показателя преломления атмосферы использовалась формула, связывающая дисперсию разности дрожания двух изображений, формируемых вблизи фокуса телескопа ТАЛ-200, и параметры оптического инструмента: размер субапертур, расстояние между субапертурами, длину фокуса телескопа, размер пикселя видеокамеры. Использование в дифференциальном измерителе турбулентности алгоритма скользящего интервала усреднения длительностью 60 с позволяет измерять значения  $C_n^2$  с шагом 1 с в цикле измерения с заданной пользователем продолжительностью.

Вторым способом определения  $C_n^2$  был пассивный метод, основанный на измерении дрожания изображения с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры, установленной на малом астрономическом телескопе, и алгоритмов обработки в реальном времени. Данный метод прошел апробацию ранее на трассе Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН и показал свою эффективность в сравнении с активным оптическим и акустическим методами [Коняев и др., 2015]. Его основные преимущества — мобильность, оперативность в развертывании и проведении измерений. Физический принцип метода основан на зависимости величины дисперсии флуктуаций углов прихода  $\sigma_y^2$  принимаемого оптического излучения от интенсивности атмос-



Значения уровня турбулентности, измеренные двумя оптическим методами

ферной турбулентности  $C_n^2$ . Расчеты проводились согласно выражению

$$C_n^2 = r_0^{-5/3} / k^2 L / 0.159,$$

где  $r_0$  — радиус когерентности (радиус Фрида)  $r_0 = 0.159 (2\pi / \lambda)^2 D^{1/2} \sigma_y^2$ ,  $k = 2\pi / \lambda$ ;  $\lambda$  — длина волны естественного освещения;  $D$  — диаметр приемного телескопа;  $L$  — длина трассы.

Для формирования изображения естественных объектов используется телескоп с диаметром входной апертуры 15 см и фокусным расстоянием 1.5 м. Монохромные кадры оцифровываются видеокамерой Allied GE-680 с частотой до 200 кадров в секунду. Углы прихода вычислялись по смещению изображения, регистрируемого цифровой камерой, которое измерялось методом корреляционного слежения. Усреднение данных происходит на скользящем интервале длительностью 60 с с шагом 1 с. Программное обеспечение было реализовано на системе разработки LabVIEW и частично на языке программирования Python 3.X.X.

Измерения выполнялись в апреле–мае 2021 г. на горизонтальной однородной атмосферной трассе длиной 110 м, проходящей на высоте примерно 10 м над подстилающей поверхностью. На рисунке приведены временные развертки измеренных значений уровня турбулентности двумя инструментами — активным и пассивным.

Как показывает рисунок, имеется довольно высокая взаимная корреляция результатов, но о полном совпадении говорить нельзя. Это связано в том числе и с различием областей усреднения у измерителей. Кроме того, одновременно двумя измерителями было обнаружено довольно сильное волнообразное изменение уровня турбулентности за короткое время наблюдения, обусловленное, возможно, появлением неколомоговской турбулентности в атмосфере.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка величины наклона волнового фронта светового поля остается актуальной темой современных исследований как оптики атмосферы, так и адаптивной оптики. Это связано с тем, что именно с измерения наклона ВФ начинаются практически любые измерения фазы ВФ в оптике. При этом перед исследо-

вателем стоит проблема выбора наилучшего способа измерения наклона ВФ. Причем, следует отметить, что какие-либо общие рекомендации отсутствуют, а существует целый ряд способов определения наклона ВФ. Для измерения этой величины широко применяются оптические инструменты, в том числе, измерители ВФ дифференциального типа, а также датчики Шэка — Гартмана. Естественно, что при построении измерительного инструмента всегда возникают противоречивые требования по согласованию широкого диапазона измеряемых углов наклона и по обеспечению точности отдельного измерения. Это частично решается путем согласования параметров датчика, что выполняется с использованием выводов теории распространения волн в случайно-неоднородных средах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-22-00289.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н. и др. Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности. *Оптика атмосферы и океана*. 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.

Кон А.И., Миронов В.Л., Носов В.В. Флуктуации центров тяжести световых пучков в турбулентной атмосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1974. Т. 17, № 10. С. 1501–1511.

Коняев П.А., Ботыгина Н.Н. и др. Об измерении структурной характеристики показателя преломления атмосферы пассивными оптическими методами. *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28, № 8. С. 738–741.