

**ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АТМОСФЕРНЫХ СЛОЕВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
НА БОЛЬШОМ СОЛНЕЧНОМ ВАКУУМНОМ ТЕЛЕСКОПЕ**

А.В. Киселёв, П.Г. Ковадло, А.Ю. Шиховцев, В.Е. Томин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
kiselev@iszf.irk.ru

**POSSIBILITIES OF DETERMINING TURBULENT CHARACTERISTICS
OF ATMOSPHERIC LAYERS WITH LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE OBSERVATIONS**

A.V. Kiselev, P.G. Kovadlo, A.Yu. Shukhovtsev, V.E. Tomin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
kiselev@iszf.irk.ru

Аннотация. Развитие методов определения вертикальных профилей характеристик атмосферной турбулентности методами, аналогичными Slodar-технике, основано на анализе кросскорреляционных функций дрожания изображений источников света, разнесенных в пространстве на некоторый угол. В настоящей работе анализируются возможности определения вертикальных профилей атмосферной турбулентности, выявления атмосферных слоев с интенсивной атмосферной турбулентностью. Предлагается метод уточнения положения «ядра» атмосферного слоя с интенсивной турбулентностью при расчете вертикальных профилей безразмерных характеристик турбулентности.

Ключевые слова: телескоп, вертикальные профили атмосферной турбулентности.

Abstract. The development of methods for determining the height profiles of the characteristics of atmospheric turbulence by methods similar to the Slodar technique is based on an analysis of the cross-correlation functions of the motion of images of light sources spaced at a certain angle in space. This paper analyzes the possibilities of determining the height profiles of atmospheric turbulence, identifying atmospheric layers with intense atmospheric turbulence. A method for determining the position of the center of gravity of the image of the edge of the solar disk in the application to the calculation of the height profiles of atmospheric turbulence is proposed.

Keywords: telescope, the height profiles of atmospheric turbulence.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие методы определения вертикальных профилей турбулентных характеристик атмосферы с применением солнечных телескопов наземного базирования опираются на использование техники типа Slodar [Sarazin, 2006], основанной на анализе фазы падающей волны. Неоднозначность применения в различных условиях и сложность использования техник такого рода требует создания новых методов измерений высотных профилей интенсивности атмосферной турбулентности. Сведения о таких профилях обычно необходимы в атмосферной оптике (включая адаптивную оптику и астрономические наблюдения). В этом направлении накоплено много экспериментальных данных. Однако этих данных, как правило, всегда недостаточно, так как над каждой географической точкой поверхности планеты реализуется индивидуальный (случайный) профиль. Настоящая работа направлена на уточнение положений атмосферных слоев с повышенной интенсивностью турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха на отдельных высотах с применением техники перекрестных оптических пучков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ СУБИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Необходимо отметить, что определение вертикальных профилей турбулентных характеристик ат-

мосферы требует постановки специальных наблюдений дрожания изображений. В данном случае необходима информация о дрожании изображений, разнесенных в плоскости, сопряженной с апертурой телескопа. В качестве объекта наблюдений были выбраны изображения края солнечного диска. Для определения дрожания субизображений положение центра тяжести для каждого профиля находилось по его полувысоте, далее рассчитывались флуктуации центра тяжести. На рис. 1 показано распределение интенсивности в единичном изображении края солнечного диска.

Вдоль горизонтальной оси указано положение в пикселях, вдоль вертикальной оси — интенсивность. Величиной H_l обозначена амплитуда между минимумом и максимумом интенсивности между (высота профиля).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Настоящая работа является продолжением развития представлений об атмосферной турбулентности в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа [Ботыгина, 2013]. Одной из важнейших задач является разработка методов по определению вертикальных профилей характеристик турбулентности в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа. Вертикальные профили характеристик атмосферной турбулентности предлагается восстанавливать по усредненным во времени пространственным кросскорреляционным функ-

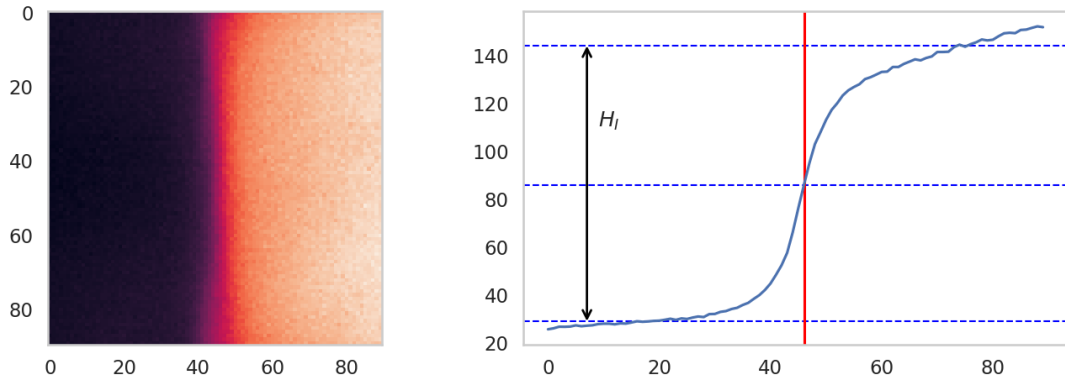


Рис. 1. Распределение интенсивности в единичном изображении края солнечного диска

циям локальных наклонов волновых фронтов от каждого из светящихся объектов в соответствии с выражением:

$$C(\delta_i, \delta_j, \delta_t) = \left\langle \frac{\sum_{i,j}^{i=n, j=m} (S_{i,j}^{(1)} S_{i+\delta_i, j+\delta_j}^{(2)})}{O(\delta_i, \delta_j)} \right\rangle, \quad (1)$$

где i, j — индексы субапертур, $S_{i,j}^{(1)}$ — локальные наклоны волнового фронта на субапертуре i, j датчика номер 1, $S_{i+\delta_i, j+\delta_j}^{(2)}$ — локальные наклоны волнового фронта на сдвинутой субапертуре $i+\delta_i, j+\delta_j$ относительно опорной i, j датчика номер 2, $O(\delta_i, \delta_j)$ — число пересекающихся субапертур. Коэффициенты $C(\delta_i, \delta_j)$, определенные по локальным наклонам волновых фронтов для каждой пары субапертур характеризуют интенсивность турбулентности на данном уровне в атмосфере. Схема определения высот атмосферных уровней Slodar-техникой показана на рис. 1. Серыми кружками схематически показаны два светящихся объекта, удаленных от апертуры астрономического телескопа диаметром D . Участкам на апертуре телескопа размером D/n позиционно соответствуют субапертуры датчиков волнового фронта Шака–Гартмана. Положения точек пересечений волновых фронтов от разнесенных на угол θ светящихся объектов соответствуют высотам атмосферных уровней, которые определяются в соответствии с выражением:

$$z = (D/n\theta) \cos \alpha, \quad (2)$$

где D — диаметр апертуры, n — количество субапертур, θ — угол между наблюдаемыми объектами, α — зенитный угол. При этом величины коэффициентов кроссвариаций для данной высоты прямо пропорциональны интенсивности турбулентности.

На рис. 2 показаны рассчитанный усредненный вертикальный профиль величины C в месте расположения Байкальской астрофизической обсерватории.

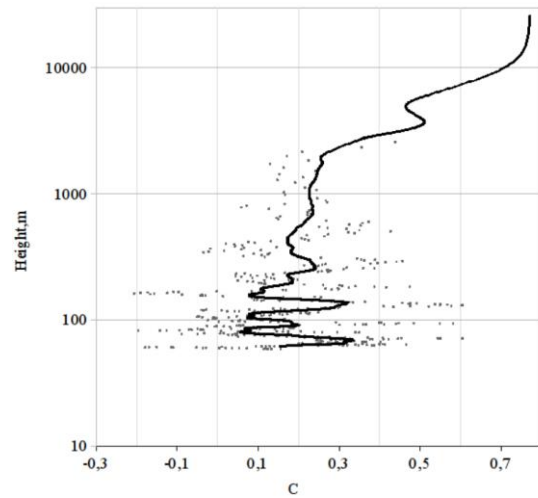


Рис. 2. Усредненный вертикальный профиль величины C

Анализ рис. 2 показывает, что величина $C(\delta_i, \delta_j, \delta_t)$, характеризующая интенсивность турбулентности распределена неравномерно с высотой. Подтверждается, что наибольшая изменчивость величины $C(\delta_i, \delta_j, \delta_t)$ отмечается в нижнем, приземном, слое атмосферы. Максимумы ковариаций наблюдаются на высотах 230, 650 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00033. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп [<http://ckp-rf.ru/usu/200615>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А. и др. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.

Sarazin M. Determination of the profile of atmospheric optical turbulence strength from SLODAR data // MNRAS. 2006. V. 369. P. 835.