

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА

П.Г. Ковадло, А.В. Киселев, В.Е. Томин

Институт солнечно земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
kovadlo2006@rambler.ru

## STUDYING TURBULENT CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER AT THE LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE SITE

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

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
kovadlo2006@rambler.ru

**Аннотация.** В данной работе приведены результаты измерений турбулентных характеристик на тонкой метеорологической мачте, установленной на верхней площадке Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории. Измерения выполнялись синхронно с регистрацией параметров волнового фронта в разомкнутом контуре адаптивной оптической системы Большого солнечного вакуумного телескопа. Анализируются изменения структурных характеристик турбулентных флуктуаций скорости ветра и турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха.

**Ключевые слова:** телескоп, атмосферная турбулентность.

**Abstract.** The paper presents the results of measurements of turbulent characteristics on a thin meteorological mast installed on the upper platform of the Large Solar Vacuum Telescope of the Baikal Astrophysical Observatory. The measurements have been performed synchronously with the recording of the wavefront parameters in the open loop of the adaptive optical system of the Large Solar Vacuum Telescope. Changes in the structure characteristics of turbulent fluctuations of wind speed and turbulent fluctuations of the air refractive index are analyzed.

**Keywords:** telescope, atmospheric turbulence.

### ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением цикла исследований структуры атмосферной турбулентности в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории [Ботыгина, 2013; Ковадло, 2013; Ковадло, 2015; Шиховцев, 2017, Ковадло, 2018].

Атмосферная турбулентность оказывает искажающее воздействие на оптическое излучение при астрономических наблюдениях. Определение характеристик воздействия турбулентной среды на излучение представляет собой важный аспект эффективной работы астрономических инструментов, при этом выбор метода по восстановлению параметров атмосферной турбулентности во многом зависит от локальных условий конкретного пункта наблюдений. Наиболее перспективные дистанционные методы определения характеристик атмосферной турбулентности основаны на анализе характеристик излучения в скрещенных оптических пучках. Эти методы по определению вертикальных профилей турбулентности, использующие фазу или амплитуду световой волны, построены на измерениях кросскорреляций с последующим решением соответствующих интегральных уравнений.

Работа направлена на получение качественных и количественных оценок характеристик атмосферной турбулентности приземном слое атмосферы с целью последующего уточнения развиваемого метода определения вертикальных профилей атмосферной турбулентности в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа Байкальской астрофизической обсерватории.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В качестве исследуемых параметров приземного слоя атмосферы были выбраны среднее значение скорости ветра  $V$  и структурная характеристика турбулентных флуктуаций скорости ветра  $C_v^2$ . Оценка величины  $V$  производилась по данным измерений метеорологических характеристик, выполненных с помощью автоматического метеорологического комплекса АМК-03 [Корольков, 2006], установленного на верхней площадке Большого солнечного вакуумного телескопа. На рис.1 показаны изменения во времени значений скорости ветра, усредненных за трехминутные интервалы времени с 28.06.2018 по 29.06.2019. В этот период, характеризующийся ясной погодой, были выполнены оптические измерения центров тяжести субизображений датчиком волнового фронта Шака-Гартмана, установленного в оптической схеме Большого солнечного вакуумного телескопа.

На рис.1 по оси абсцисс показано местное время наблюдений, по оси ординат — средние значения скорости ветра, рассчитанные по данным мачтовых измерений для высоты около 30 м над подстилающей поверхностью. Линиями показаны изменения во времени значений скорости ветра с 28.06.2018, 29.06.2018 и усредненные за этот период временные вариации средней скорости ветра соответственно.

Анализ рис. 1 показывает, что в рассматриваемый период времени, с 28.06.2018 по 29.06.2018, средняя горизонтальная скорость ветра составляла до 4 м/с с минимальными значениями в утренние и ночные часы.

Помимо средней скорости ветра на уровне 30 м также получены оценки структурной характеристики турбулентных флуктуаций скорости ветра. На рис.2 показаны изменения во времени структурной характеристики турбулентных флуктуаций скорости ветра, усредненных за трехминутные интервалы с 28.06.2018 по 29.06.2019.

По оси абсцисс отложено местное время наблюдений, по оси ординат — значения структурной характеристики турбулентных флуктуаций скорости ветра. Линиями показаны изменения во времени с 28.06.2018, 29.06.2018 и усредненные за этот период временные вариации структурной характеристики турбулентных флуктуаций скорости ветра соответственно. Анализ рис. 2 показывает, что временной ход структурной характеристики турбулентных флуктуаций скорости ветра не повторяет характер измене-

ний средней скорости ветра. В приземном слое атмосферы наблюдалось существенное подавление турбулентности с ~ 9:00 до ~14:00 ч местного времени (на несколько порядков). Этот эффект можно связать с развитием местной циркуляции в дневное время и адвекцией более холодного термически устойчивого воздуха с оз. Байкал.

Для определения структуры воздушных течений на качественном уровне синхронно с микрометеорологическими измерениями были выполнены наблюдения за болтанкой квадрокоптера. Основой для этих наблюдений является работа [Neumann, 2011], в которой показано, что углы наклоны микродрона изменяются аналогичным образом со скоростью и направлением ветра. На рис. 3 показаны изменения наклонов квадрокоптера в атмосферном слое до 300 м при его подъеме и опускании над Большим солнеч-

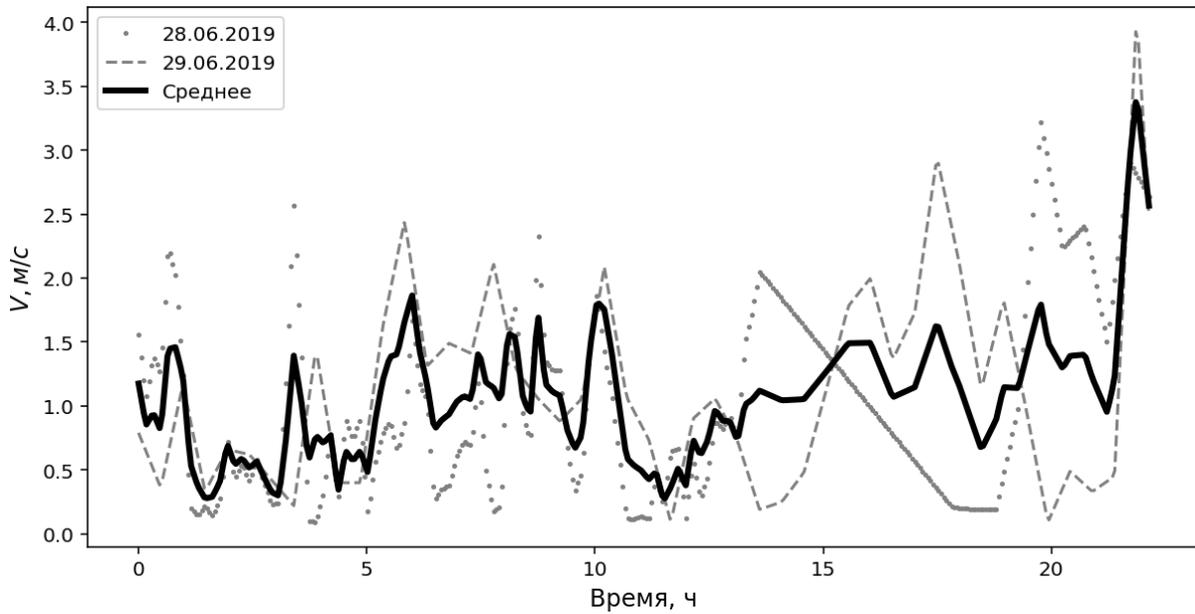


Рис.1 Изменения значений скорости ветра, усредненных за трехминутные интервалы времени с 28.06.2018 по 29.06.2019

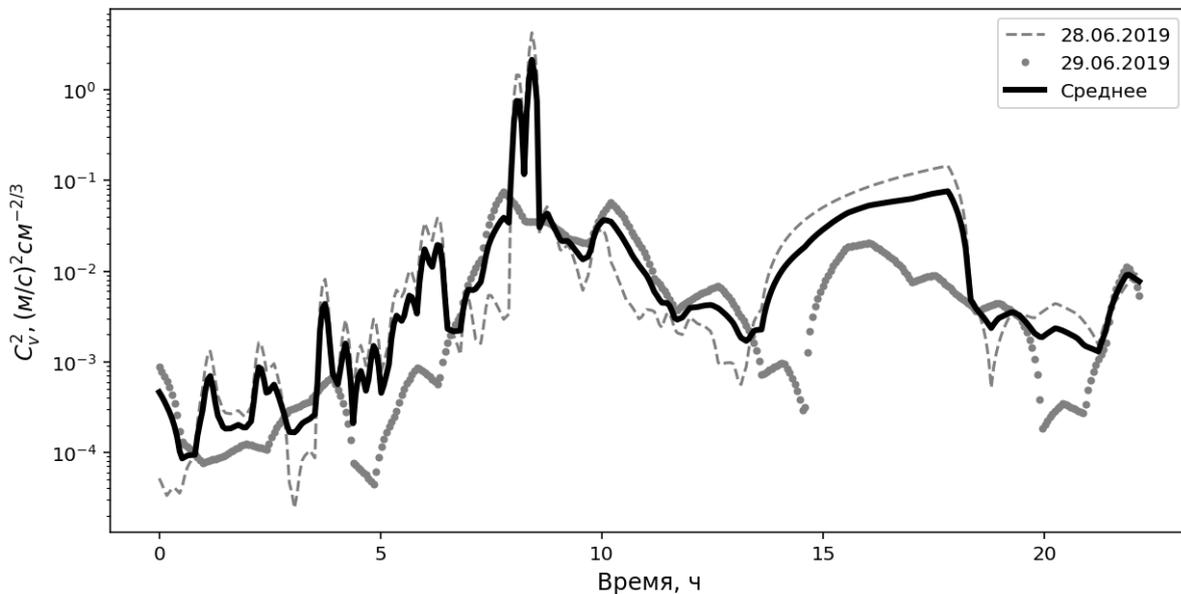


Рис. 2. Изменения структурной характеристики турбулентных флуктуаций скорости ветра, усредненных за трехминутные интервалы времени с 28.06.2018 по 29.06.2019

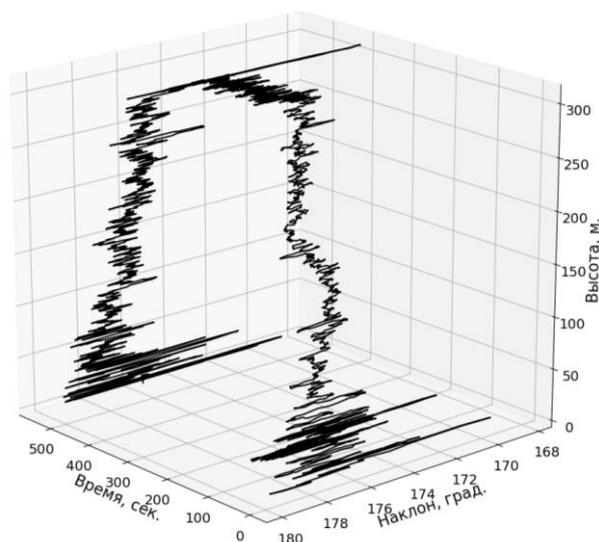


Рис.3. Изменения наклонов квадрокоптера в атмосферном слое до 300 м при его подъеме и опускании над Большим солнечным вакуумным телескопом, 28.06.2018

ным вакуумным телескопом. По оси абсцисс показаны наклоны относительно горизонтальной плоскости. По оси ординат — время, по оси аппликат — высота, м. Полагается, что изменения наклонов квадрокоптера связаны с воздействием напорного давления ветра.

Наибольшая изменчивость углов наклона наблюдается в нижнем атмосферном слое толщиной ~50 м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведены количественные оценки средней скорости ветра и структурной характеристики турбулентных флуктуаций скорости ветра на высоте около 30 м, полученные синхронно с данными оптических измерений, в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа. В дальнейшем, эти величины будут использованы как опорные значения при восстановлении вертикальных профилей атмосферной турбулентности по данным измерений в скрещенных оптических пучках. Для качественной

характеристики воздушного потока в нижнем атмосферном слое получены вертикальные профили изменений наклонов квадрокоптера в слое до 300 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.

Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. Исследование структуры атмосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов // Труды Байкальской школы по фундаментальной физики. 2013. С. 348–350.

Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю. Исследование оптической турбулентности в условиях сильно устойчивой термической стратификации атмосферы // Изв.Ирк.гос.ун-та. 2015. Т.12, С. 23–34.

Ковадло П.Г., Лукин В.П., Шиховцев А.Ю. Развитие модели турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа в приложении к адаптации изображений // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 906–910.

Корольков В.А. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, В.С. Ильичевский, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров, В.Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.

Шиховцев А.Ю. О динамике эффективной скорости атмосферных турбулентных течений в горных районах юга Восточной Сибири // Труды Байкальской школы по фундаментальной физики. 2017. С. 300–301.

Neumann P.P., Asadi S., Lilienthal A.J., Bartholmai M., Schiller H. Micro-Drone for wind vector estimation and gas distribution mapping / J. IEEE Robotics and automation magazine. 2011. V. 6, N 1. P. 11.