

УДК 551.5; 520.25.

Е.А. КОПЫЛОВ, М.В. ТУЕВ**, А.Ю. ШИХОВЦЕВ******ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПЛОЩАДКЕ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА БАЙКАЛЬСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ¹**

Приведены результаты синхронных измерений радиуса когерентности Фрида оптическим и метеорологическим методами на Большом солнечном вакуумном телескопе. Обнаружено уменьшение величины данного параметра в зимний период времени. Исследованы спектры неоднородностей температуры и скорости ветра при измерениях радиуса Фрида.

Ключевые слова: турбулентность, радиус Фрида.

При регистрации оптического излучения Солнца с помощью телескопов наземного базирования возникает необходимость компенсировать эффекты воздействия атмосферной турбулентности. Атмосферная турбулентность понижает угловое разрешение наблюдаемых объектов и искажает структуру получаемых изображений. Для того чтобы улучшить качество изображений, а в идеале приблизиться к угловому разрешению, ограниченному только дифракцией, необходимо внедрять и использовать системы адаптивной оптики. Специфика коррекции изображений при помощи адаптивной оптики состоит в том, что необходимо не только компенсировать случайные дрожания изображения как целого, но и корректировать геометрию отдельных фрагментов изображения. Эффективность функционирования адаптивной оптической системы зависит от соответствия параметров системы условиям астрономического видения в период регистрации изображений. Качество астрономического видения принято характеризовать параметром r_0 либо $0,98 \lambda/r_0$, где λ – длина волны регистрируемого излучения, r_0 – радиус когерентности Фрида [1]. Показано, что в круге диаметром r_0 среднеквадратическое отклонение аберраций волнового фронта излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере, равно одному радиану или $0,16\lambda$ [1]. При наблюдении через атмосферную турбулентность параметр r_0 определяет предельное разрешение оптической системы при длинноэкспозиционной регистрации изображения, численно равное разрешению идеальной оптической системы с входной апертурой r_0 при наблюдении в вакууме [2].

В настоящей работе приведены результаты исследования условий астрономического видения в зимнее время в районе Байкальской астрофизической обсерватории на площадке Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ). Проанализирована связь турбулентных характеристик с формой спектров атмосферных неоднородностей. Проведено сравнение условий астрономического видения в зимнее и в летнее время.

Физические основы оптических методов измерения параметров атмосферной турбулентности достаточно подробно описаны в работе [3]. Для оптических измерений радиуса Фрида использовался корреляционный датчик волнового фронта Шэка – Гартмана адаптивной оптической системы БСВТ [4]. Оценка радиуса Фрида проводилась на основе измерения разности локальных наклонов волнового фронта (ВФ) на двух разнесённых в плоскости входного зрачка телескопа субапертурах. Применение дифференциального метода измерений [4–6] позволяет уменьшить ошибку определения r_0 , связанную с вибрацией элементов конструкции телескопа. Для вычисления радиуса Фрида используется дисперсия измеренных разностей локальных наклонов волнового фронта $\sigma_{\alpha_1-\alpha_2}^2$ в направлении разноса субапертур, которая оценивалась по 3000 кадров. Метеорологические измерения характеристик турбулентности на верхней (подкупольной) площадке телескопа проводились с помощью акустической метеостанции «МЕТЕО-2» с частотой 10 Гц [7]. Метеостанция устанавливалась вблизи вакуумного иллюминатора телескопа. Значения радиуса Фрида оценивались по соотношению [1].

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда Дмитрия Зимина «Династия», фонда Михаила Прохорова «Академическая мобильность»; гранта РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-31111 мол_а; Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8703).

Основные результаты о высотных моделях структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , определяемой в основном полем неоднородностей температуры, получены для приземного слоя атмосферы (толщиной до 200 м) для случая однородной и ровной подстилающей поверхности. Сведения о турбулентности выше приземного слоя и в свободной атмосфере представлены сравнительно немногочисленными экспериментальными данными. Анализ и обобщение этих данных позволили получить высотные модели атмосферы, описывающие поведение осредненных значений C_n^2 [3]. Вид профиля $C_n^2(h)$ определяется приземными значениями структурной характеристики пульсаций показателя преломления. При расчете r_0 высотный профиль C_n^2 аппроксимировался моделью [3]. В этой модели вся толща атмосферы разбита на три характерных слоя:

- 1) $h \leq h_1 = 50$ м – приземный слой,
- 2) $50 \text{ м} < h \leq h_2 = 10^3$ м – пограничный слой,
- 3) $h > 10^3$ м – свободная атмосфера.

В качестве эквивалентной высоты в модели принимается значение $h = h_3 = 9$ км, соответствующее высоте тропопаузы.

Выбор такой высотной модели структурной характеристики пульсаций показателя преломления [3] обусловлен тем, что средние значения $C_n^2(h_*)$, полученные нами из метеорологических измерений в рассматриваемый период времени, находятся в диапазоне $5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3} \geq C_n^2(h_*) > 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$.

Оценка радиуса Фрида из синхронных оптических и метеорологических наблюдений проводилась 13 февраля 2012 г. в ясную безоблачную погоду при средней температуре воздуха $-20,7$ °С и средней скорости ветра 2,3 м/с. На рис. 1 представлены временные зависимости r_0 , где кружочками обозначены эмпирически полученные данные на основе измерения датчиком волнового фронта угловых смещений изображений солнечного пятна, треугольниками – значения r_0 , численно оцененные из метеорологических измерений структурной характеристики показателя преломления на верхней площадке телескопа вблизи входного вакуумного иллюминатора. Приземные значения $C_n^2(h_*)$ отложены на правой оси и отмечены звездочками на графике.

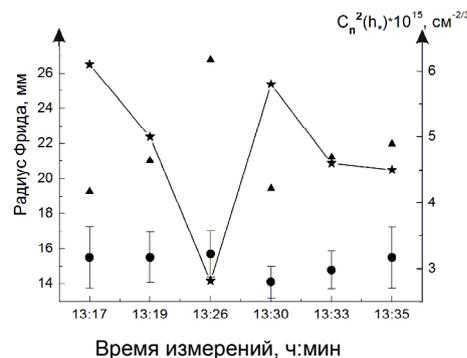


Рис. 1. Измеренные значения радиуса Фрида по данным оптических и метеорологических наблюдений и значения структурной характеристики показателя преломления, измеренные вблизи входного иллюминатора телескопа

Вертикальными линиями показаны среднеквадратические отклонения от среднего по 16-и одновременным оптическим измерениям. Разброс r_0 при одновременных измерениях обусловлен влиянием павильонной турбулентности над оптическим столом, на котором размещены элементы адаптивной системы, и ошибками самого измерителя. Подобие поведения временных изменений значений радиуса когерентности, оценённых непосредственно из оптических наблюдений и структурных метеорологических измерений, указывает на то, что качество видения телескопа зависит

от приземных значений $C_n^2(h_*)$, определяемых организацией крупномасштабных неоднородностей скорости ветра и температуры.

Исследования пространственного распределения структурных характеристик показателя преломления в области купола телескопа проводились летом 2009 г. при ясной погоде [8]. Анализ распределения дисперсии температуры показывает, что пульсации температуры возрастают при удалении от вакуумного иллюминатора. Такой сценарий изменения дисперсии температуры объясняется тем, что в обтекающем верхнюю площадку телескопа воздушном потоке при контакте с поверхностью ветрозащиты и другими элементами конструкции увеличивается интенсивность термических неоднородностей, которые выносятся вверх и попадают на луч зрения телескопа. Следует обратить внимание на измерения r_0 . Значение радиуса Фрида, вычисленное с использованием акустических измерений вблизи вакуумного иллюминатора, летом в среднем в 2 раза больше, чем зимой. Из сравнения значений радиуса Фрида, полученных из оптических измерений в августе 2010 г. [4], в августе 2011 г. и в феврале 2012 г., также следует увеличение r_0 в летний период в 3–3,5 раза. Этот эффект связан с тем, что оптическая нестабильность земной атмосферы в летний сезон ниже, чем в зимний [9]. В летнее время большая холодная акватория озера Байкал, на берегу которого находится телескоп, влияет как фактор, стабилизирующий воздушную среду за счёт минимизации приземных потоков, вследствие чего происходит уменьшение пульсаций температуры воздуха.

Поскольку атмосферная турбулентность является по существу явлением нестационарным, то ее эмпирическое изучение в широком диапазоне длин волн является сложной задачей. Для выполнения оценки зависимости энергетического уровня турбулентности от масштаба в широком спектральном диапазоне целесообразно вычислить значения энергии турбулентности в крупномасштабном диапазоне длин волн непосредственно по осредненному ряду, а в мелкомасштабном диапазоне длин волн выполнить процедуру фильтрации крупномасштабной составляющей турбулентности. Процедура фильтрации крупномасштабной турбулентности производится либо с помощью вычитания соответствующего осредненного ряда, либо вычитанием трендов путем нахождения относительно долгопериодных изменений в ряде рассматриваемой функции.

В каждый момент определения радиуса когерентности были получены спектры неоднородностей скорости воздушного потока и температуры, представленные соответственно в диапазоне периодов изменения от 180 до 0,2 с на рис. 2. Каждый спектр определен в конкретный срок τ за промежутки времени от $\tau - 1,5$ до $\tau + 1,5$ мин по ряду продолжительностью в 3 мин.

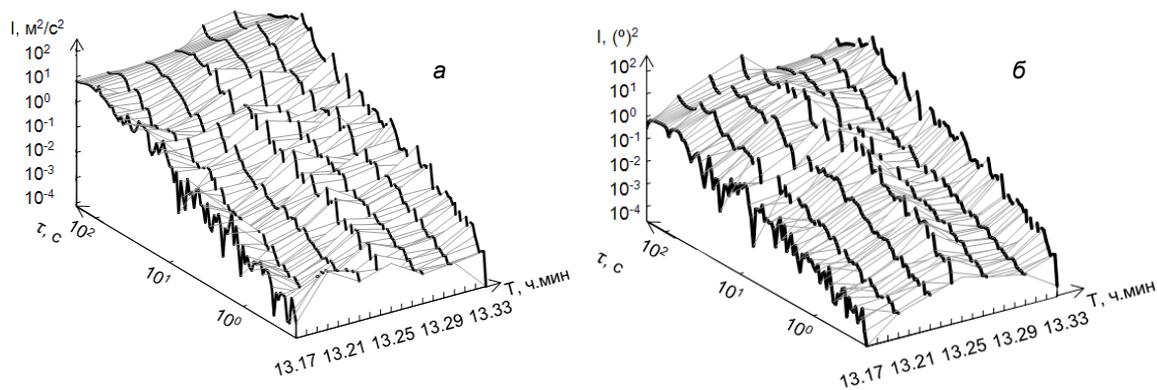


Рис. 2. Спектры неоднородностей скорости воздушного потока (а) и температуры (б)

Анализ временных изменений радиуса Фрида и форм спектров неоднородностей температуры и скорости воздушного потока показывает их подобие. При этом качество изображения определяется как наличием пульсаций температуры, так и наличием пульсаций скорости ветра. При этом повышение уровня кинетической энергии турбулентности может сопровождаться увеличением пульсаций температуры, что связано с увеличением скорости перемещения турбулентных неоднородностей. В другом случае увеличение кинетической энергии турбулентности может сопровождаться уменьшением термических пульсаций за счет улучшения смешения турбулентных неоднородностей, ведущего к их выравниванию.

Экспериментальные исследования показали, что астрономическое видение Большого солнечного вакуумного телескопа в зимнее время характеризуется низкими значениями радиуса Фрида. Полученные в эксперименте значения r_0 соответствуют предельному угловому разрешению телескопа 7,3–5,2 угл. с на длине волны регистрируемого излучения 0,535 мкм. В летний период качество видения БСВТ возрастает, значение радиуса Фрида достигает 55 мм, предельное разрешение – 1,0 угл. с.

Для проведения долговременных наблюдений с высоким разрешением в любое время года необходимо обеспечить соответствие параметров элементов адаптивной системы условиям видения БСВТ.

Сравнение спектральных кривых неоднородностей поля скорости и температуры показывает, что относительно крупномасштабная организация течения и структура поля потенциальной энергии рассматриваемых крупномасштабных неоднородностей структурируют поле мелкомасштабной турбулентности и определяют внутреннюю структуру изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fried D. L. // J. Opt. Soc. Am. – 1965. – V. 55. – P. 1427–1435.
2. Fried D. L. // IEEE J. Quantum Electron. -1967. -QE-3, -С.213.
3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1976. – С. 277.
4. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Григорьев В.М. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 12. – С. 1099–1104.
5. Sarazin M. and Roddier F. // Astron. Astrophys. – 1990. – No. 227. – P. 294–300.
6. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11. – № 11. – С. 1219–1223.
7. Гладких В.А., Макиенко А.Э. // Приборы. – 2009. – № 7(109). – С. 21–25.
8. Коваadlo П.Г., Найденов П.А., Шиховцев А.Ю. // Известия Иркут. гос. ун-та. – 2009. – Т. 2. – № 2. – С. 105–116.

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 15.07.13.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

***Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: evgen704@iao.ru

Копылов Евгений Анатольевич, мл. науч. сотр.;

Туев Михаил Владимирович, аспирант, мл. науч. сотр.;

Шиховцев Артём Юрьевич, аспирант.

E.A. KOPYLOV, V.V. LAVRINOV, M.V. TUEV

REASERCH OF OPTICAL AND STRUCTURAL METEOROLOGICAL CHARACTERISTICS OF QUALITY OF THE IMAGE ON A ASTRIDOME OF THE BIG SOLAR VACUUM TELESCOPE OF THE BAIKAL ASTROPHYSICCAL OBSERVATORY

Presents the results of synchronous measurements of the Fried's coherence length optical and meteorological methods on a Large solar vacuum telescope. Found to decrease the value of this parameter in a winter period of time. Investigated the frequency spectra of wind speed and temperature measurements of the Fried parameter

Keywords: *Fried parameter, atmospheric turbulence.*