

**ОЦЕНКА РАДИУСА ФРИДА ИЗ ОПТИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА**

¹Н.Н. Ботыгина, ²П.Г. Ковадло, ¹Е.А. Копылов, ¹В.П. Лукин, ¹М.В. Туев, ²А.Ю. Шиховцев

**FRIED RADIUS ESTIMATE FROM OPTICAL AND METEOROLOGICAL MEASUREMENTS
AT SITE OF LARGE SOLAR VACUUM TELESCOPE**

¹N.N. Botygina, ²P.G. Kovadlo, ¹E.A. Kopylov, ¹V.P. Lukin, ¹M.V. Tuyev, ²A.Y. Shikhovtsev

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

We present the results of synchronous measurements at Large Solar vacuum Telescope of Fried coherence radius using optical and meteorological methods. The decrease in this parameter value in a winter period has been found. The spectra of inhomogeneities of wind velocity and temperature when measuring Fried parameter.

Предельное разрешение оптической системы при наблюдении через атмосферную турбулентность характеризуется параметром r_0 – радиусом когерентности Фрида, который определяет численно разрешение идеальной оптической системы с входной апертурой r_0 при наблюдении в вакууме и определяет качество астрономического видения [Fried, 1965; Fried, IEEE, 1967]. 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 интегральных турбулентных характеристик с формой спектров атмосферных неоднородностей. Проведено сравнение условий астрономического видения в зимнее и летнее время.

Физические основы оптических методов измерения параметров атмосферной турбулентности достаточно подробно описаны в работе [Гурвич, и др., 1976]. Для оптических измерений радиуса Фрида использовался корреляционный датчик волнового фронта (ВФ) Шэка–Гартмана адаптивной оптической системы, установленной на БСВТ [Антошкин и др., 2011]. Датчик работал по солнечному пятну на длине волны излучения 0.535 мкм. Гартманогрмма регистрировалась с частотой 70 кадров/с при времени экспозиции кадра 30 мкс. Оценка радиуса Фрида проводилась на основе измерения разности локальных наклонов ВФ на двух разнесенных в плоскости входного зрачка телескопа субапертурах. Применение дифференциального метода измерений [Sarazin, Roddier, 1990; Гладких, Макиенко, 2009; Антошкин и др., 2011] позволяет уменьшить ошибку определения r_0 , связанную с вибрацией элементов конструкции телескопа. Радиус Фрида вычислялся по формуле

$$r_0 = (\sigma_{\alpha_1 - \alpha_2}^2)^{-3/5} 0.528 \lambda^{6/5} D^{-1/5} \left[1 - 0.562 (d/D)^{-1/3} \right]^{3/5}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\alpha_1 - \alpha_2}^2$ – дисперсия измеренных разностей локальных наклонов волнового фронта в направлении разности субапертур, D – размер субапертуры, d – расстояние между центрами субапертур. Дисперсия оценивалась по реализации длительностью 43 с (3000 кадров). Измерения проводились одновременно на 16 парах разнесенных субапертур. Размер субапертуры в

плоскости входного зрачка составляет 67.7×67.7 мм. Оценивалось среднее значение r_0 из шестнадцати измерений и его среднеквадратичное отклонение.

Метеорологические измерения характеристик турбулентности на верхней (подкупольной) площадке телескопа проводились с помощью акустической метеостанции «МЕТЕО-2», работающей с частотой 10 Гц [Гладких, Макиенко, 2009]. Метеостанция устанавливалась вблизи вакуумного иллюминатора телескопа. Радиус Фрида оценивался по соотношению [Fried, 1965]

$$r_0 = 0.185 \lambda^{6/5} (\cos \theta)^{3/5} \left(\int_{h^*}^{\infty} C_n^2(h) dh \right)^{-3/5}, \quad (2)$$

где θ – зенитный угол наблюдения, $C_n^2(h)$ – высотная модель эволюции структурного параметра показателя преломления атмосферы, h – текущая высота над подстилающей поверхностью, h^* – начальная высота. Радиус когерентности зависит от длины волны регистрируемого излучения λ и определяется набором неоднородностей показателя преломления воздуха от земной поверхности до верхней границы турбулентной атмосферы. В формуле (2) можно указать интегрирование в бесконечных пределах ввиду быстрого затухания структурного параметра показателя преломления атмосферы на больших высотах. В наших расчетах параметра r_0 в качестве высотной эволюции профиля C_n^2 использовалась модель [Гурвич, и др., 1976]. Выбор такой высотной модели структурной характеристики пульсаций показателя преломления обусловлен тем, что средние значения $C_n^2(h^*)$, полученные нами из метеорологических измерений в рассматриваемый период времени на начальной высоте h^* , соответствуют диапазону

$$5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3} \geq C_n^2(h^*) > 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3},$$

который определяет условие применимости данной модели.

Оценка радиуса Фрида из синхронных оптических и метеорологических наблюдений проводились 13 февраля 2012 г. в ясную безоблачную погоду при средней температуре воздуха $T = -20.7$ °С и средней скорости ветра 2.3 м/с. На рис. 1 показаны временные изменения измеренных значений параметра r_0 .

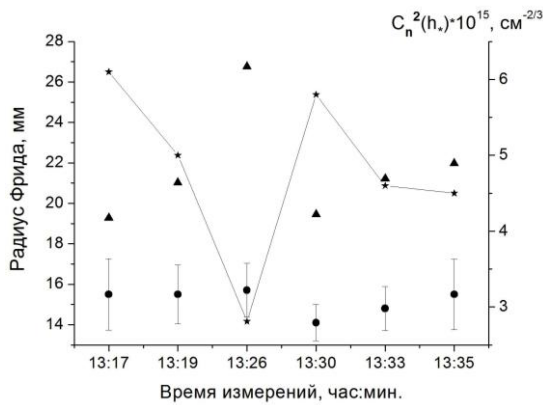


Рис. 1. Измеренные значения радиуса когерентности Фрида по данным оптических и метеорологических наблюдений и значения структурной характеристики показателя преломления, измеренные вблизи входного иллюминатора телескопа. Кружки – эмпирически полученные данные на основе измерений датчиком ВФ угловых смещений изображения солнечного пятна; треугольники – значения r_0 , численно оцененные из метеорологических измерений структурной характеристики показателя преломления на верхней площадке телескопа вблизи входного вакуумного иллюминатора телескопа; приземные значения $C_n^2(h^*)$ отложены на правой оси и отмечены звездочками.

Вертикальными линиями показаны среднеквадратичные отклонения от среднего по шестнадцать 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.

Для оценки влияния павильонной турбулентности перед началом оптических измерений r_0 проводились измерения aberrаций адаптивной оптической системы. Оказалось, что при оптических измерениях радиуса Фрида aberrации, вносимые турбулентностью над оптическим столом, составляют 10–13 % от суммарных aberrаций ВФ, вызванных атмосферной и павильонной турбулентностью. Исследования пространственного распределения структурных характеристик показателя преломления в области купола телескопа, проведенные нами летом 2009 г. [Ковadlo и др., 2009], дают основание предположить, что наблюдаемое уменьшение r_0 , вероятно, обусловлено нагреванием солнечным излучением сидеростатного зеркала и других конструкций верхней площадки телескопа, а также возникновением градиентов температуры, которые вызывают дополнительные флуктуации показателя преломления и вносят aberrации в ВФ регистрируемого излучения. Следует обратить внимание на сезонные вариации r_0 . Значение радиуса Фрида, вычисленное с использованием метеорологических измерений вблизи вакуумного иллюминатора, летом в среднем в два раза больше, чем зимой. Из сравнения значений радиуса Фрида, полученных из оптических измерений в августе 2010 [Антошкин и др., 2011], в августе 2011 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 [Ковadlo и др., 2010]. В летнее время большая холодная акватория озера Байкал, на берегу которого находится телескоп, влияет как фактор, стабилизирующий воздушную среду за счет минимизации приземных потоков, вследствие чего происходит уменьшение пульсаций температуры воздуха.

В каждый момент определения радиуса когерентности были получены спектры неоднородностей скорости воздушного потока и температуры, представленные соответственно в диапазоне периодов от 180 до 0.2 с на рис. 2. Каждый спектр определен в конкретный срок τ за промежутки времени продолжительностью 3 мин.

Анализ временных изменений радиуса Фрида и форм спектров неоднородностей температуры и скорости воздушного потока показывает их подобие. При этом качество изображения определяется наличием пульсаций как температуры, так и скорости ветра. Повышение уровня кинетической энергии турбулентности может сопровождаться ростом 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

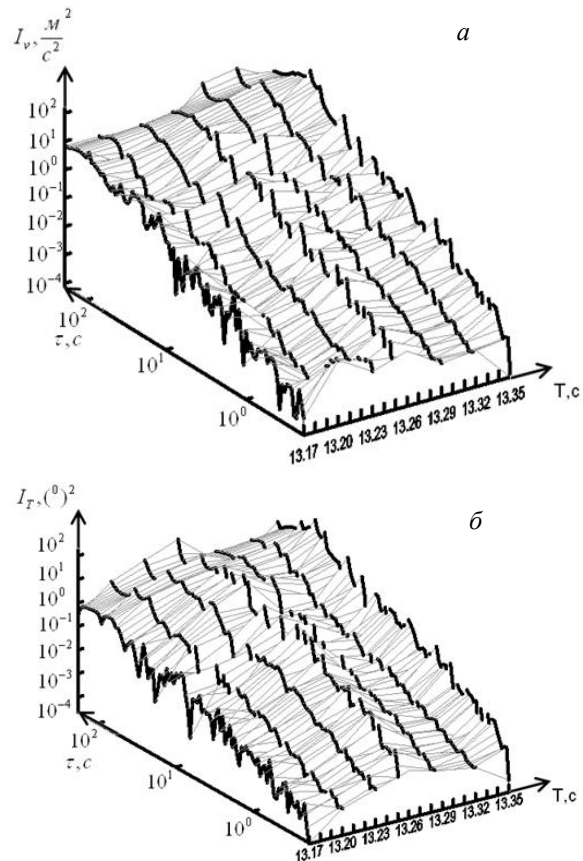


Рис. 2. Спектры неоднородностей скорости воздушного потока (а) и температуры (б).

соответствуют предельному угловому разрешению телескопа 7.3–5.2 угл. сек. на длине волны регистрируемого излучения 0.535 мкм. В летний период качество видения БСВТ возрастает, значение радиуса Фрида достигает 55 мм, предельное разрешение – 2.0 угл. сек. 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.

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

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.

Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Григорьев В.М., и др. Развитие элементов адаптивной оптики для солнечного телескопа // Там же. 2011. Т. 24, № 12. С. 1099–1104.

Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7 (109). С. 21–25.

Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. С. 277.

Ковадло П.Г., Найденов П.А., Шиховцев А.Ю. Результаты структурных измерений параметров приземного слоя атмосферы на площадке Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН // Там же. 2009. Т. 2, № 2. С. 105–116.

Ковадло П.Г., Кочеткова О.С., Шиховцев А.Ю. Исследование крупномасштабных астроклиматических характеристик // Изв. Ирк. гос. ун-та. 2010. Т. 3, № 2. С. 88–96.

Fried D.L. Statistics of geometric representation of wavefront distortion // J. Opt. Soc. Am. 1965. V. 55. P. 1427–1435.

Fried D.L. Atmospheric modulation noise in an optical heterodyne receiver // IEEE J. Quantum Electron. 1967. V. QE-3. P. 213–221.

Sarazin M., Roddier F. Differential image motion monitor // Astron. and Astrophys. 1990. N 227. P. 294–300.

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия