

УДК 551.593; 551.51

## Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений

Н.Н. Ботыгина<sup>1</sup>, П.Г. Коваadlo<sup>2</sup>, Е.А. Копылов<sup>1</sup>,  
В.П. Лукин<sup>1</sup>, М.В. Туев<sup>1</sup>, А.Ю. Шиховцев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

Поступила в редакцию 20.05.2013 г.

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 скорости ветра и температуры при измерениях радиуса Фрида.

*Ключевые слова:* атмосферная турбулентность, радиус Фрида, адаптивная оптика; atmospheric turbulence, Fried parameter, adaptive optics.

### Введение

При регистрации оптического излучения Солнца с помощью телескопов наземного базирования возникает необходимость компенсировать эффекты воздействия атмосферной турбулентности, которая уменьшает разрешающую способность телескопа и искажает структуру изображений наблюдаемых объектов. Для того чтобы улучшить качество изображений, а в идеале приблизиться к угловому разрешению, ограниченному только дифракцией, необходимо 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 параметром, пропорциональным  $\lambda/r_0$ , где  $\lambda$  — длина волны регистрируемого излучения,  $r_0$  — радиус когерентности Фрида [1]. Параметр  $r_0$  был введен для численной оценки уровня искажений волнового фронта излучения, распро-

страняющегося в турбулентной атмосфере. Показано, что в круге диаметром  $r_0$  среднеквадратическое отклонение аберраций волнового фронта равно 1 рад, 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 статье 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 в летнее время.

### Аппаратура и методика измерений радиуса Фрида

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, установленной на БСВТ [4]. Датчик работал по солнечному пятну на длине волны излучения 0,535 мкм. Гартманограмма регистрировалась с частотой 70 кадр/с при времени экспозиции кадра 30 мкс.

\* Нина Николаевна Ботыгина (bnp@iao.ru); Павел Гаврилович Коваadlo (kovadlo2006@rambler.ru); Евгений Анатольевич Копылов (evgen704@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Михаил Владимирович Туев; Артем Юрьевич Шиховцев.

Оценка радиуса Фрида проводилась на основе измерения разности локальных наклонов волнового фронта (ВФ) на двух разнесенных в плоскости входного зрачка телескопа субапертурах. Применение дифференциального метода измерений [4–6] позволяет уменьшить ошибку определения  $r_0$ , связанную с вибрацией элементов конструкции телескопа. Радиус Фрида вычислялся по следующей формуле:

$$r_0 = (\sigma_{\alpha_1 - \alpha_2}^2)^{-3/5} 0,528 \lambda^{6/5} D^{-1/5} [1 - 0,562(d/D)^{-1/3}]^{3/5}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\alpha_1 - \alpha_2}^2$  – дисперсия измеренных разностей локальных наклонов волнового фронта в направлении разнесения 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 телескопа  $67,7 \times 67,7$  мм. Оценивались среднее значение  $r_0$  из 16 измерений и его среднеквадратическое отклонение.

Метеорологические измерения характеристик турбулентности на верхней (подкупольной) площадке телескопа проводились с помощью акустической метеостанции «МЕТЕО-2», работающей с частотой 10 Гц [7]. Метеостанция устанавливалась вблизи вакуумного иллюминатора телескопа. Значения радиуса Фрида оценивались по следующему соотношению [1]:

$$r_0 = 0,185 \lambda^{6/5} (\cos \theta)^{3/5} \left( \int_{h_*}^{\infty} C_n^2(h) dh \right)^{-3/5}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – 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  $\lambda$  и определяется набором неоднородностей показателя преломления воздуха от земной поверхности до верхней границы турбулентной атмосферы. Интегрирование в бесконечных пределах в формуле (2) допустимо ввиду быстрого затухания структурного параметра показателя преломления атмосферы на больших высотах.

Основные данные для моделей высотной эволюции структурного параметра флуктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2$ , определяемого в основном полем неоднородностей температуры, получены для приземного слоя атмосферы при однородной и ровной подстилающей поверхности. Сведения о турбулентности выше приземного слоя и в свободной атмосфере представлены сравнитель-

но немногочисленными экспериментальными данными. Анализ и обобщение этих данных позволили построить высотные модели атмосферы, описывающие поведение осредненных значений  $C_n^2$  [3]. При этом высотная модель эволюции  $C_n^2(h)$  определяется приземными значениями структурного параметра показателя преломления. В наших расчетах параметра  $r_0$  в качестве высотной эволюции профиля  $C_n^2$  использовалась следующая модель [3]:

$$C_n^2(h) = C_n^2(h_*) (h/h_*)^{-2/3}, \quad h_* \leq h \leq h_1,$$

$$C_n^2(h) = C_n^2(h_1) (h/h_1)^{-4/3}, \quad h_1 < h \leq h_2,$$

$$C_n^2(h) = C_n^2(h_2) \exp\left(-\frac{h-h_2}{h_3}\right), \quad h > h_2.$$

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 этой модели принимается значение  $h = h_3 = 9$  км, которое примерно соответствует высоте тропопаузы атмосферы. Выбор такой высотной модели структурной характеристики пульсаций показателя преломления обусловлен тем, что среднее значение  $C_n^2(h_*)$ , полученное нами из метеорологических измерений в рассматриваемый период времени на начальной высоте  $h_*$ , соответствует 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 [3].

## Оценка радиуса Фрида по данным синхронных оптических и метеорологических наблюдений

Измерения проводились 13 февраля 2012 г. в ясную безоблачную погоду при средней температуре воздуха минус  $20,7$  °С и средней скорости ветра  $2,3$  м/с. На рис. 1 представлены временные изменения измеренных значений параметра  $r_0$ , где кружочками обозначены эмпирически полученные данные на основе измерений датчиком волнового фронта угловых смещений изображения солнечного пятна, треугольниками – значения  $r_0$ , численно оцененные из метеорологических измерений структурной характеристики показателя преломления на верхней площадке телескопа вблизи входного вакуумного иллюминатора. Измеренные значения  $C_n^2(h_*)$  отложены на правой оси и отмечены звездочками.

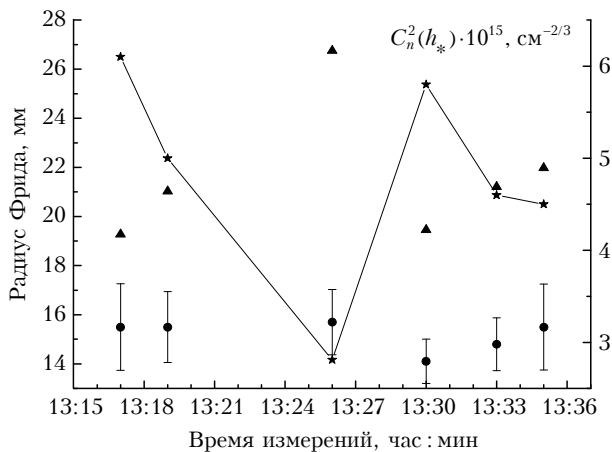


Рис. 1. Значения радиуса когерентности Фрида по данным оптических и метеорологических наблюдений и значения структурной характеристики показателя преломления, измеренные вблизи входного иллюминатора телескопа

Вертикальными линиями показаны среднеквадратические отклонения от среднего по 16 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. Павильонная турбулентность вносит дополнительные aberrации в регистрируемый волновой фронт, ухудшает качество изображений гартманограммы и тем самым вносит ошибки в измерения локальных наклонов ВФ на входной апертуре телескопа. Очевидно, влияние павильонной турбулентности в большей степени сказывается на измерениях в зимнее время, так как именно тогда возникают большие градиенты температуры вблизи элементов оптической схемы, находящихся вне вакуумной трубы телескопа, за счет низкой температуры в павильоне (около минус 20 °С) и нагревания солнечным излучением оптических элементов и их металлических оправ.

Для оценки влияния павильонной турбулентности перед началом оптических измерений  $r_0$  проводились измерения aberrаций адаптивной оптической системы. Оценивались дисперсии aberrаций ВФ, усредненные по площади выходного зрачка телескопа, в котором располагался датчик волнового фронта. Флуктуации общих наклонов волнового фронта не учитывались, так как при дифференциальном методе измерений они не вносят вклад в дисперсию разности локальных наклонов (1) и не влияют на оценку радиуса когерентности Фрида. 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.

Из рис. 1 видно, что качество видения телескопа зависит от приземных значений  $C_n^2(h_*)$ , определяемых формированием вблизи телескопа крупномасштабных неоднородностей скорости вет-

ра и температуры. Полученное максимальное значение  $r_0$  в момент времени 13:26, вероятно, обусловлено локальным уменьшением турбулентности в области купола телескопа.

В то же время значения  $r_0$ , определенные по угловым смещениям изображения солнечного пятна, в среднем на 6 мм меньше значений  $r_0$ , оцененных по метеорологическим измерениям. Исследования пространственного распределения структурных характеристик показателя преломления в области купола телескопа, проведенные нами летом 2009 г. [8], дают основание предположить, что наблюдаемое уменьшение  $r_0$ , вероятно, обусловлено в основном нагреванием солнечным излучением сидеростатного зеркала и других конструкций верхней площадки телескопа, возникновением градиентов температуры, которые вызывают дополнительные флуктуации показателя преломления и вносят aberrации в волновой фронт регистрируемого излучения. На рис. 2 показано распределение значений: дисперсии температуры (°С)<sup>2</sup>,  $C_n^2(h_*) \cdot 10^{16}, \text{см}^{-2/3}$ , и  $r_0$ , см, соответственно сверху вниз.

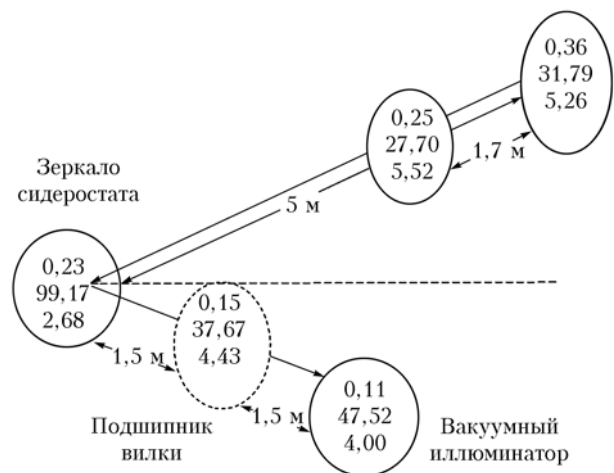


Рис. 2. Изменение значений дисперсии пульсаций температуры, структурной характеристики флуктуаций показателя преломления и радиуса Фрида (сверху вниз) на разных расстояниях от сидеростата (20–22 августа 2009 г.)

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 сезонные вариации значений  $r_0$ . Радиус Фрида, вычисленный с использованием метеорологических измерений вблизи вакуумного иллюминатора, летом в среднем в 2 раза больше, чем зимой. Из сравнения значений  $r_0$ , 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 оз. Байкал, на берегу которого находится телескоп, влияет как фактор, стабилизирующий воздушную среду за счет минимизации приземных потоков, вследствие чего происходит уменьшение пульсаций температуры воздуха.

### Спектры неоднородностей скорости ветра и температуры

Поскольку атмосферная турбулентность – явление нестационарное, 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 вычитанием либо соответствующего осредненного ряда, либо трендов путем нахождения относительно долгопериодных изменений в ряде рассматриваемой функции. Пример вычитания нелинейного тренда показан на рис. 3, где пунктирной линией показан исходный ряд температуры, а сплошной – исправленный ряд (без нелинейного тренда).

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. 4. Каждый спектр определен в конкретный срок  $\tau$  за промежуток времени от  $-1,5$  до  $+1,5$  мин по ряду продолжительностью 3 мин.

На рис. 5 представлены двумерные распределения неоднородностей скорости воздушного потока и температуры (слева направо), соответствующие приведенным выше спектрам.

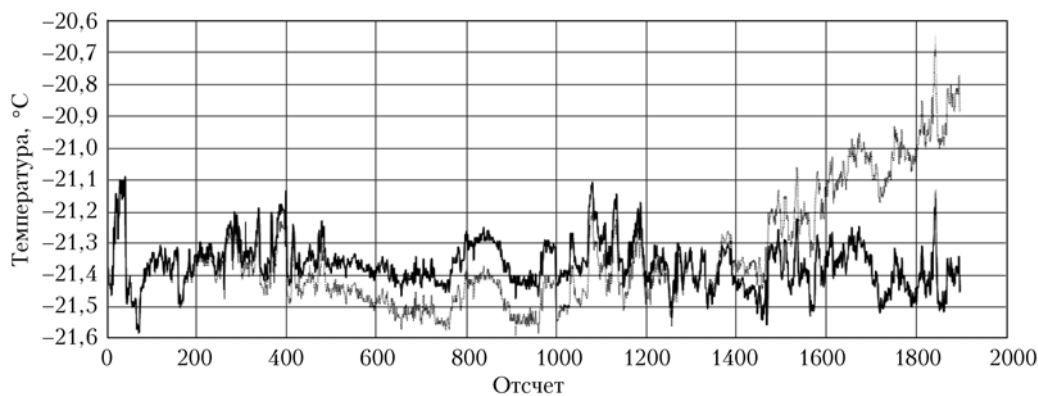


Рис. 3. Исправление нестационарности типичной временной зависимости

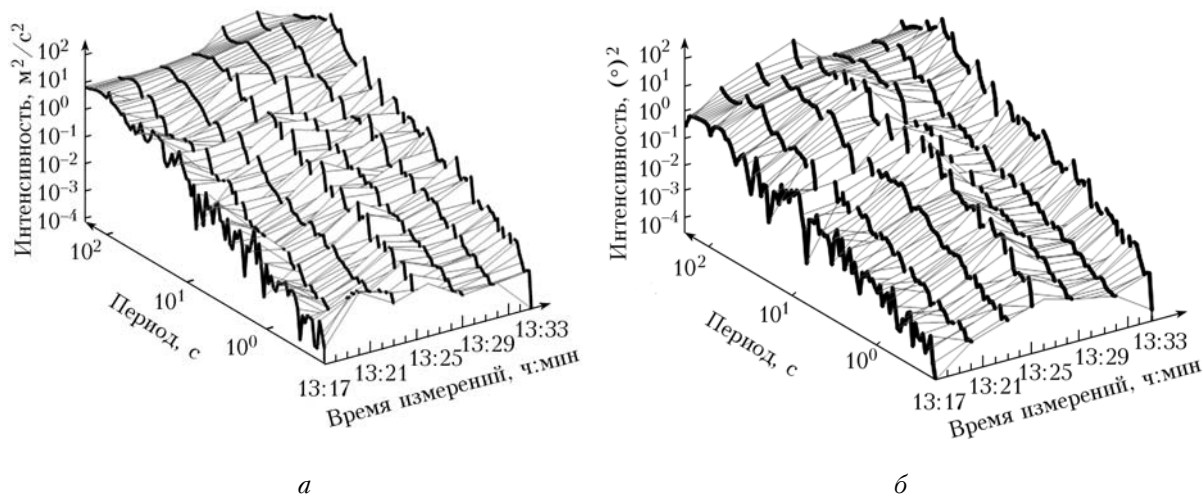


Рис. 4. Спектры неоднородностей скорости воздушного потока (а) и температуры (б)

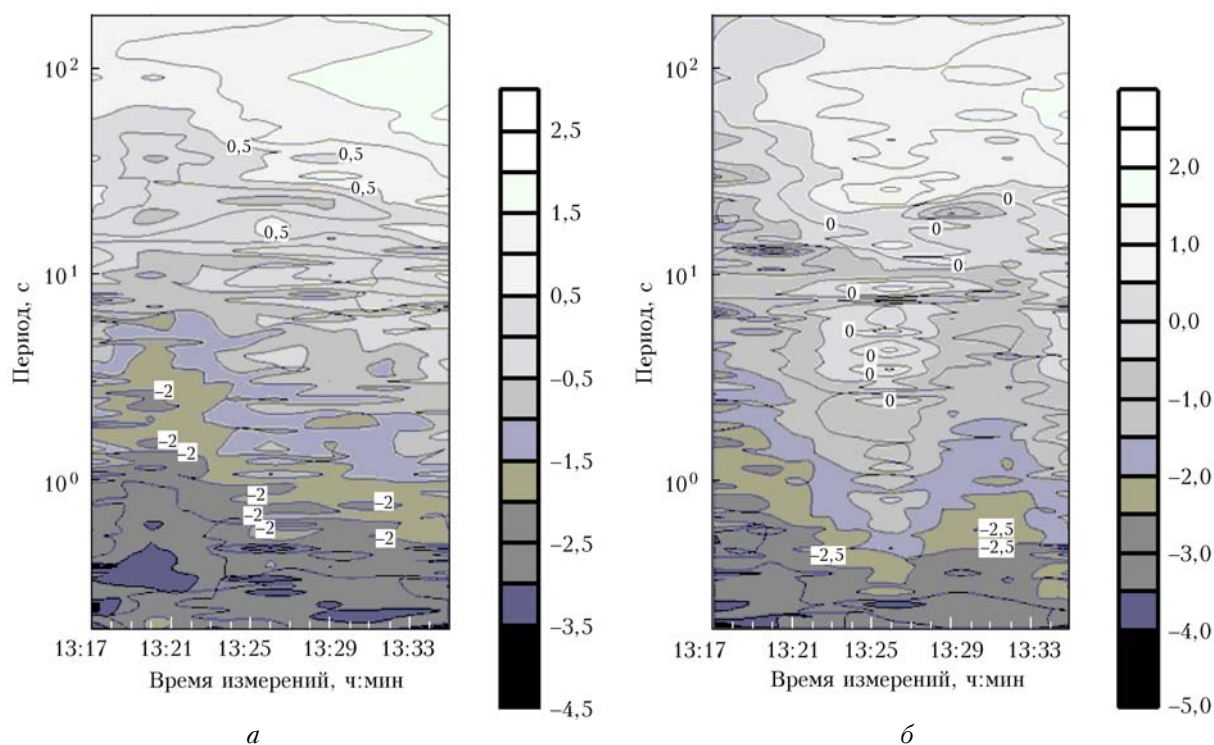


Рис. 5. Двумерные распределения неоднородностей скорости воздушного потока (а) и температуры (б)

Анализ временных изменений радиуса Фрида и форм спектров неоднородностей температуры и скорости воздушного потока показывает их соответствие. При этом качество изображения определяется наличием пульсаций температуры и скорости ветра. 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.

### Заключение

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 – 2,0 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.

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».

1. *Fried D.L.* Statistics of geometric representation of wavefront distortion // *J. Opt. Soc. Amer.* 1965. V. 55. P. 1427–1435.
2. *Fried D.L.* Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures // *J. Opt. Soc. Amer.* 1966. V. 56. P. 1372–1379.
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., Емалеев О.Н., Ковadlo П.Г., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П., Скоморовский В.И., Трифонов В.Д., Чупраков С.А.* Развитие элементов адаптивной оптики для солнечного телескопа // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 12. С. 1099–1104.
5. *Sarazin M., Roddier F.* The E.S.O. Differential Image Motion Monitor // *Astron. and Astrophys.* 1990. N 227. P. 294–300.
6. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбу-

- лентности // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
7. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. №7(109). С. 21–25.
8. Ковадло П.Г., Найденов П.А., Шиховцев А.Ю. Результаты структурных измерений параметров приземного слоя атмосферы на площадке Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН // Изв. Иркут. гос. ун-та. 2009. Т. 2, № 2. С. 105–116.
9. Ковадло П.Г., Кочеткова О.С., Шиховцев А.Ю. Исследование крупномасштабных астроклиматических характеристик // Изв. Иркут. гос. ун-та. 2010. Т. 3, № 2. С. 88–96.

*N.N. Botygina, P.G. Kovadlo E.A. Kopylov, V.P. Lukin, M.V. Tudev, A.Yu. Shikhovtsev. Estimation of the astronomical seeing quality at the Big solar vacuum telescope site from the optical and meteorological measurements.*

The results of synchronous optical and meteorological measurements of Fried's coherence length on Big solar vacuum telescope are presented. The decrease of this parameter in winter time was detected. Spectra of wind speed and temperature inhomogeneities at the time of Fried parameter measurements were investigated.