

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
В РАЙОНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

¹Е.А. Копылов, ¹В.П. Лукин, ²П.Г. Ковadlo, ²А.Ю. Шиховцев

**STUDY OF VARIABILITY OF THE ATMOSPHERIC TURBULENCE
IN LAKE BAYKAL REGION**

¹E.A. Kopylov, ¹V.P. Lukin, ²P.G. Kovadlo, ²A.Yu. Shikhovtsev

Приведены оценки кинетической энергии турбулентности в различные сезоны по данным микрометеорологических измерений в приземном слое атмосферы в районе п. Листвянка. Исследованы спектры неоднородностей скорости ветра и температуры при измерениях радиуса когерентности атмосферы. Рассмотрено, какая доля кинетической энергии преобразуется в турбулентную как меняется данное соотношение в году. Проанализирована связь интегральных турбулентных характеристик с формой спектров атмосферных неоднородностей. Проведено сравнение условий астрономического видения в зимнее и в летнее время.

Estimates of the kinetic energy of turbulence in different seasons according to the micrometeorological measurements in the atmospheric surface layer in the area p. Listvyanka. Investigated the spectra of inhomogeneities in wind speed and temperature measurements of the coherence radius of the atmosphere. Considered the proportion of the kinetic energy is converted into turbulent as changing the ratio in the year. Analyzed the correlation of the integral turbulence characteristics with the shape of the spectra of atmospheric inhomogeneities. Comparison of astronomical visions in winter and in summer.

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. Оценка радиуса атмосферной когерентности (радиуса Фрида) представляют интерес не только при астроклиматических исследованиях места, но и являются основой эффективной работы адаптивных оптических систем [Fried, 1965].

Физические основы оптических методов измерения параметров атмосферной турбулентности достаточно подробно описаны в работе [Гурвич, 1976]. Для оптических измерений радиуса Фрида использовался корреляционный датчик волнового фронта Шэка-Гартмана адаптивной оптической системы БСВТ [Антошкин, 2011]. 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 [Sarazin, 1990; Антошкин, 1998] 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 разнеса субапертур, которая оценивалась по 3000 кадров.

Метеорологические измерения характеристик турбулентности на верхней (подкупольной) пло-

щадке телескопа проводились с помощью акустической метеостанции «МЕТЕО-2», работающей с частотой 10 Гц [Гладких, 2009]. Метеостанция устанавливалась вблизи вакуумного иллюминатора телескопа. Значения радиуса Фрида оценивались по следующему соотношению [Fried, 1965]:

$$r_0 = 0.185\lambda^{6/5} (\cos\theta)^{3/5} \left(\int_{h^*}^{\infty} C_n^2(h) dh \right)^{-3/5}, \quad (1)$$

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 (1) можно указать интегрирование в бесконечных пределах ввиду быстрого затухания структурного параметра показателя преломления атмосферы на больших высотах.

Основные результаты о моделях 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 сравнительно немногочисленными экспериментальными данными. Анализ и обобщение этих данных позволили построить высотные модели атмосферы, описывающие поведение осредненных значений C_n^2 . 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 [Гурвич, 1976]:

1. $C_n^2(h) = C_n^2(h_*) \left(\frac{h}{h_*}\right)^{-\frac{2}{3}}, h_* \leq h \leq h_1;$
2. $C_n^2(h) = C_n^2(h_1) \left(\frac{h}{h_1}\right)^{-\frac{4}{3}}, h_1 \leq h \leq h_2;$
3. $C_n^2(h) = C_n^2(h_2) \exp\left(-\frac{h-h_2}{h_3}\right)^{-\frac{2}{3}}, h > h_2.$

В этой модели вся толща атмосферы разбита на три характерных слоя:

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

В качестве эквивалентной высоты в этой модели принимается значение $h = h_3 = 9 \text{ км}$, которое примерно соответствует высоте тропопаузы атмосферы. 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 $50 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3} \geq C_n^2(h_*) > 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$, который определяет условие применимости данной модели.

Синхронно проводились метеорологические измерения характеристик турбулентности с помощью акустической метеостанции «МЕТЕО-2» с частотой 10 Гц. Значения радиуса Фрида оценивались по соотношению (1). Измерения проводились в феврале 2013 [Ботыгина, 2013] и марте 2015 гг.

Оценка радиуса Фрида из синхронных оптических и метеорологических наблюдений проведенных 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 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.

На рис. 2 и 3 показаны результаты оценок радиуса Фрида проведенные период с 10.03.2015 по 12.03.2015 г. при средней температуре воздуха –9 °С. и средней скорости ветра 2.2/мс. Разница значений метеорологических наблюдений по сравнению с оптическими обуславливается расположением метеостанции в непосредственной близости к телескопу.

На рис. 4 показаны вероятностные вероятность повторяемости значений структурной характеристики

ки пульсаций показателя преломления проведенные период с 10.03.2015 по 12.03.2015 при средней температуре. Значения структурной характеристики показателя преломления воздуха соответствуют измеренным ранее зимний период.

Оказалось, что за рассматриваемый время наблюдений в зимний период наблюдений оптическим методом значения среднее значение $r_0=28 \text{ мм}$ на длине волны 0.535 мкм. Из сравнения значений радиус-

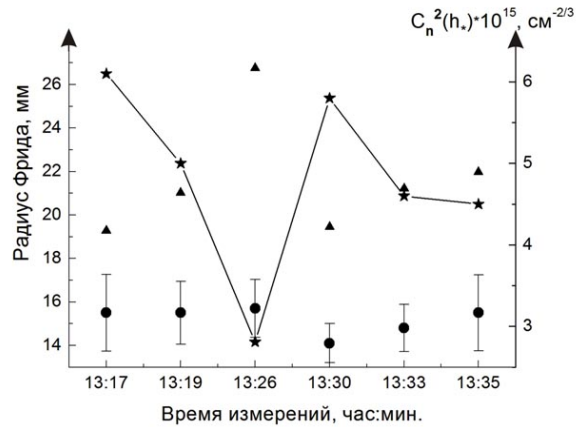


Рис. 1. Измеренные значения радиуса Фрида по данным оптических и метеорологических наблюдений и значения структурной характеристики показателя преломления, измеренные вблизи входного иллюминатора телескопа.

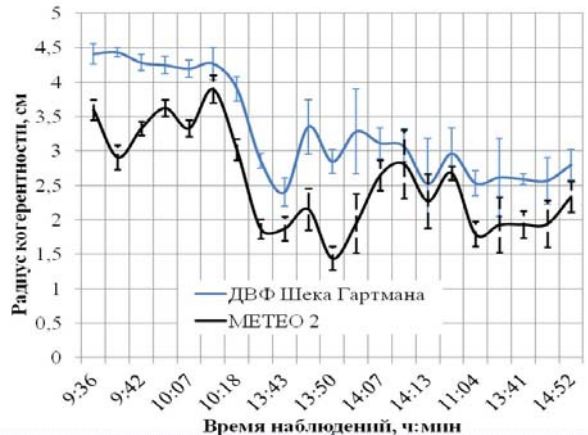


Рис. 2. Измеренные значения радиуса Фрида по данным оптических наблюдений и метеорологических наблюдений за период 10.03.15г по 12.03.15 г.

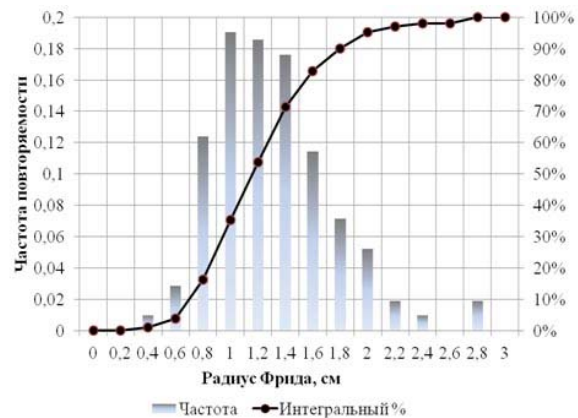


Рис. 3. Вероятность повторяемости значений радиуса Фрида за период 10.03.15 г. по 12.03.15 г.

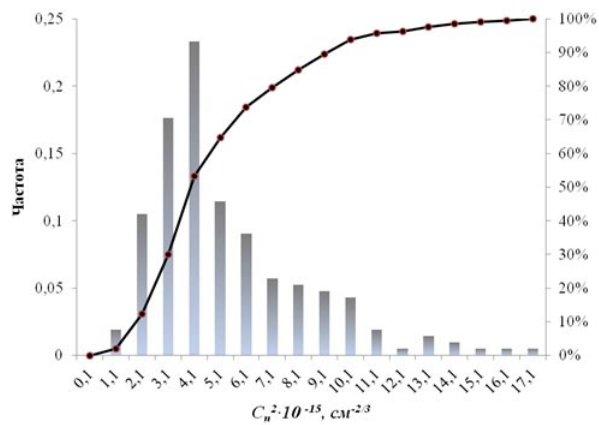


Рис. 4. Вероятность повторяемости значений структурной характеристики пульсаций показателя преломления

са Фрида, полученных из оптических измерений в августе 2010 г. [Антошкин, 2011], в августе 2011 г. и в феврале 2012 г., также следует увеличение r_0 в летний период в 3–3.5 раза. Стоит заметить, что средние (фоновые) значения радиуса Фрида в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа составляют около 40 мм. [Kovadlo, 2014].

Исследования подтвердили, что астрономическое видение Большого солнечного вакуумного телескопа в зимнее время характеризуется низкими значениями радиуса Фрида. Уровень дневной турбулентности для зимних условий превышает соответствующий уровень для условий лета.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № № 15-35-50309 мол-нр и поддержки фонда «Династия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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.

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.

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 // Наука, 1976. 277 с.

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

Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Yu. // Proc. SPIE. V. 9292. 2014. P. 92920T-1–92920T-6.

Sarazin M., Roddier F. Differential image motion monitor // Astron. Astrophys. 1990. № 227. P. 294–300.

¹Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

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