

## Особенности формирования наклонов волнового фронта на апертуре телескопа при различных вертикальных профилях оптической атмосферной турбулентности

А.Ю. Шиховцев<sup>1</sup>, П.Г. Ковадло<sup>1</sup>, Л.А. Больбасова<sup>2</sup>, В.П. Лукин<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 24.04.2019 г.

Обсуждается возможность восстановления вертикальных профилей атмосферной турбулентности по данным измерений локальных наклонов волнового фронта. Приводятся оценки характеристик амплитуд искажений волнового фронта для разных атмосферных слоев. Найдены положения границы атмосферного слоя, суммарный вклад которого в максимальные углы прихода света соответствует среднему дрожанию, формируемому турбулентностью во всей толще атмосферы.

*Ключевые слова:* оптическая турбулентность, волновой фронт, астрономический телескоп; optical turbulence, wavefront, astronomical telescope.

### Введение

Опыт применения дистанционных методов измерений, основанных на анализе распределения интенсивности света на апертуре телескопа в разных ее частях, указывает на возможность восстановления вертикальных профилей атмосферной турбулентности. При этом атмосферная турбулентность не только влияет на интенсивность фазовых искажений, но и вызывает флуктуации амплитуды световой волны. Кросскорреляционный анализ распределения интенсивности света и/или искажений волновых фронтов на приемной апертуре телескопа от светящихся объектов, разнесенных на некоторый угол, положен в основу дистанционных методов восстановления вертикальных профилей оптической турбулентности атмосферы.

Для определения вертикальных профилей характеристик оптической турбулентности, в частности флуктуаций показателя преломления воздуха, по наблюдениям разнесенных объектов на Солнце, выполненным с помощью телескопов, используются разные техники обработки данных измерений датчиков Шака-Гартмана, среди которых можно выделить Slodar, Scidar, G-Scidar, Co-Slidar, S-Dimm+ [1, 2]. Приведенные техники основаны на анализе изменений амплитуды интенсивности и/или дрожания изображений в скрещенных оптических пучках.

Определение вертикальных профилей характеристик показателя преломления воздуха осложняется тем фактом, что турбулентность неравномерно рас-

пределяется по высоте. Как правило, вклад турбулентности атмосферного пограничного слоя толщиной ~1,5 км в искажения волнового фронта в дневное время составляет от 30 до 50% по отношению к свободной атмосфере. Турбулентность верхних атмосферных слоев, помимо радиуса Фрида, влияет на значения изопланатического угла. В условиях интенсивной турбулентности в удаленных от апертуры телескопа атмосферных слоях изопланатический угол мал по величине. При этом структура солнечного изображения и распределение деформации волнового фронта и интенсивности по субапертурам существенно искажаются. Турбулентность нижних атмосферных слоев, вносящих значительный вклад в суммарное дрожание изображений, может служить причиной уменьшения точности определения вертикальных профилей структурной характеристики показателя преломления воздуха дистанционными методами. Поэтому важной задачей развития дистанционных методов измерений остается повышение точности измерений дрожания изображений от верхних слоев «оптически» активной земной атмосферы.

### Статистические характеристики оптической турбулентности и вклад в суммарное дрожание отдельных слоев атмосферы

Важнейшим статистическим параметром оптической турбулентности является структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2$ . Амплитуда и динамика этой характеристики в приземном слое атмосферы и на разных высотах во многом определяют условия работы астрономи-

\* Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@ Rambler.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@ Rambler.ru); Лидия Адольфовна Больбасова (sla@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

ческого телескопа с высоким угловым разрешением и эффективность адаптивной оптической системы.

Известно, что амплитуда дрожаний изображений в астрономических телескопах наземного базирования определяется величиной  $\int_0^H C_n^2(z) dz$  в «оптиче-

ски» активной атмосфере толщиной  $H$ . С учетом того что интенсивность оптической турбулентности, характеризуемая  $C_n^2$ , в среднем уменьшается при удалении от подстилающей поверхности, чувствительность дистанционных методов измерений турбулентных характеристик, основанных на регистрации наклонов волнового фронта (дрожания изображений), снижается к верхним слоям. За счет интенсивной турбулентности в нижних слоях атмосферы суммарное дрожание фрагментов изображений в фокальной плоскости может превышать средние и максимальные амплитуды дрожания, соответствующие верхним турбулентным слоям атмосферы.

С этой точки зрения цель работы заключается в оценке положения нижней границы верхних слоев атмосферы, суммарный вклад в максимальные углы прихода от которых соответствует среднему дрожанию изображений, вызываемому воздействием всех слоев атмосферы. Высоты, для которых суммарное дрожание равно максимальному дрожанию, вызываемому воздействием верхних слоев атмосферы, будут определены для разных вертикальных профилей  $C_n^2(z)$ .

Средние вертикальные профили структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха для Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) были получены по данным измерений турбулентных флуктуаций скорости ветра и температуры воздуха в приземном слое атмосферы и исследований энергетических спектров атмосферной турбулентности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов [3]. Средние вертикальные профили структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для лета и зимы показаны на рис. 1.

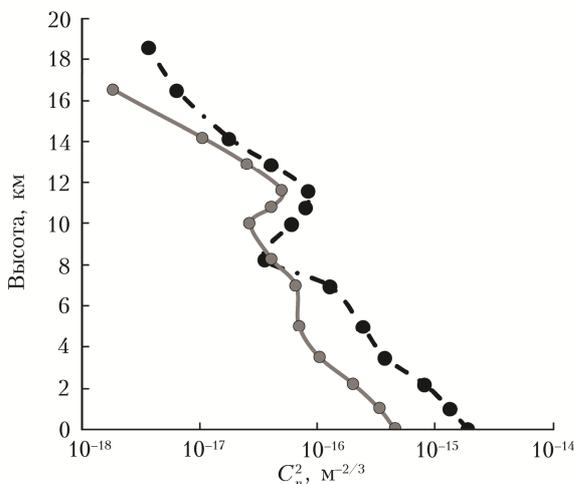


Рис. 1. Средние вертикальные профили структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для лета (серая кривая) и зимы (черная кривая)

Профили  $C_n^2(z)$  для разных сезонов года позволяют определить средние значения радиуса Фрида  $r_0$  и изопланатического угла атмосферной толщи  $\theta_0$ . Рассчитанные на основе полученных вертикальных профилей  $C_n^2(z)$  средние значения  $\langle r_0 \rangle$  на длине волны 0,5 мкм составили 6,5 и 3,7 см для летнего и зимнего сезонов соответственно. Среднее годовое значение  $\langle r_0 \rangle = 4,5$  см [3]. Характерные значения изопланатического угла, как правило, изменяются в пределах 1,3–2,1 угл. с. Они в значительной степени зависят от развитости турбулентности в верхних атмосферных слоях. Наиболее интенсивная турбулентность наблюдается в верхней тропосфере на уровне 11,5 км.

По данным архива NCEP/NCAR Reanalysis был оценен характерный диапазон изменений дисперсии температуры и структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в верхней тропосфере. На рис. 2 приведены вертикальные профили характерных изменений структурной характеристики флуктуаций показателя преломления воздуха в диапазоне высот 9–13 км.

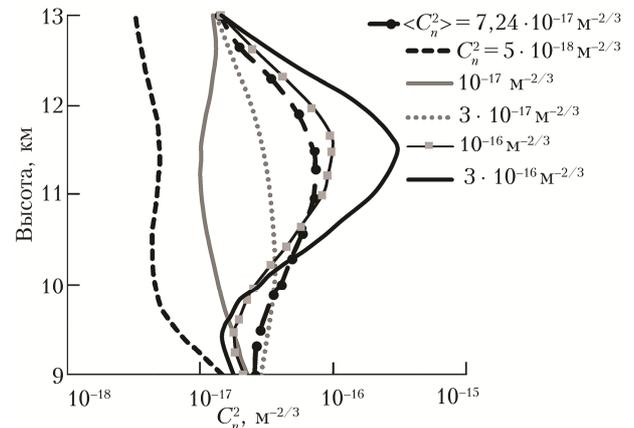


Рис. 2. Вертикальные профили характерных изменений структурной характеристики флуктуаций показателя преломления в диапазоне высот 9–13 км

Измерения параметров атмосферной турбулентности на высоте 30 м в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) БАО показали, что структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха, определенная по данным метеосистемы Метео-2, изменяется на несколько порядков, от  $10^{-17}$  до  $10^{-13}$   $M^{-2/3}$ . Измерительная система АМК-03, регистрирующая турбулентные флуктуации температуры воздуха и составляющих скорости ветра с частотой опроса датчиков 160 Гц, была установлена на мачте на площадке вблизи питающего зеркала-сидеростата БСВТ. Оценка среднего значения  $C_n^2$  на высоте 30 м, полученного по длинному ряду 3-минутных средних значений  $C_n^2$  в разные сезоны года, составила  $1,45 \cdot 10^{-15}$   $M^{-2/3}$ .

Среднее значение  $C_n^2$  в приземном слое атмосферы, рассчитанное по данным измерений метеосистемы, было использовано при определении значений  $C_n^2$  методом спектральной оценки турбулентных характеристик по форме энергетических спектров в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.

Исследования, выполненные на разных астрономических обсерваториях, указывают на то, что функции вероятности повторяемости радиуса Фрида подобны по форме. Устойчивость формы функции вероятности повторяемости позволяет оценивать максимальное и минимальное дрожание, используя среднее значение радиуса Фрида. Это позволяет определять высоту атмосферы, до которой возможно восстановление вертикальных профилей турбулентности методами, основанными на анализе волнового фронта. Примеры распределений радиуса Фрида показаны на рис. 3, 4.

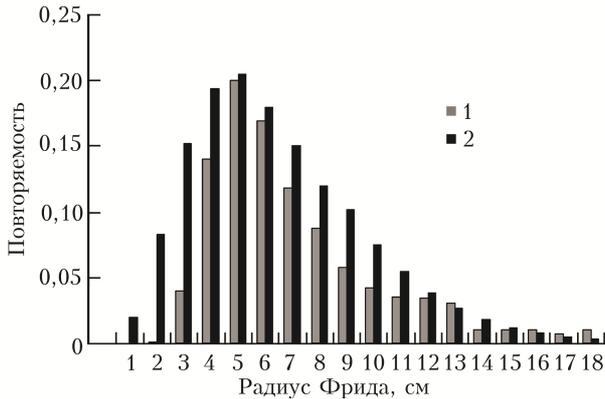


Рис. 3. Распределения радиуса Фрида для Саянской солнечной обсерватории: 1 – оценки из измерений дифференциального монитора дрожания изображений; 2 – гамма-распределение; формула (1):  $\theta = 0,25$ ,  $K = 4$ ,  $A_1 = 0,18$

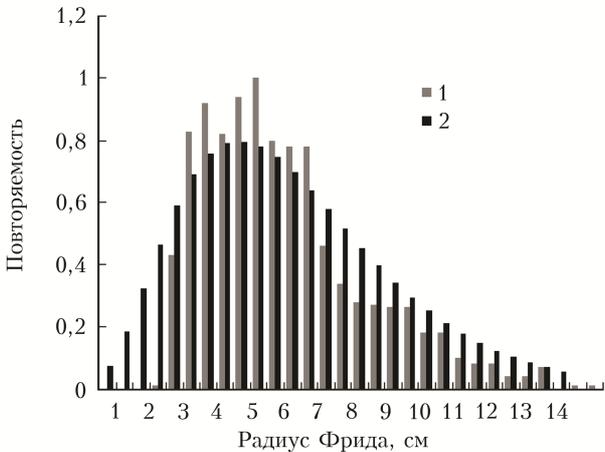


Рис. 4. Распределения радиуса Фрида для места расположения TUV ITAK National Observatory [9]: 1 – оценки из измерений дифференциального монитора дрожания изображений; 2 – гамма-распределение; формула (1):  $\theta = 0,25$ ,  $K = 4$ ,  $A_1 = 0,7$

Предполагая, что функция вероятности повторяемости и появление экстремумов радиуса Фрида определяются средним значением радиуса  $\langle r_0 \rangle$ , можно обобщить данные измерений представить функцию вероятности повторяемости радиуса Фрида для БАО:

$$f(r_0) = A_1 \left( \frac{r_0}{\langle r_0 \rangle} \right)^{K-1} \frac{\exp\left(-\frac{1}{\theta} \left( \frac{r_0}{\langle r_0 \rangle} \right)\right)}{\theta^K \Gamma(K)}, \quad (1)$$

где  $K = 4$  и  $\theta = 0,25$  – параметры гамма-распределения;  $A_1 = 0,18$  – нормирующий коэффициент амплитуды;  $r_0$  – значение, которое может принимать радиус Фрида;  $\langle r_0 \rangle$  – среднее значение радиуса Фрида;  $\Gamma(K)$  – гамма-функция. Предположение о сохранении формы распределений радиуса Фрида подтверждается данными измерений дрожания изображений волнового фронта [4–8].

Принимая во внимание обобщенную формулу (1), по полученным средним значениям  $\langle r_0 \rangle$  были оценены вероятности повторяемости наибольших и наименьших значений радиуса Фрида. Задавая повторяемость значений  $r_0 = 0,2$ , можно определить среднюю максимальную дисперсию углов прихода света при разных значениях  $\langle r_0 \rangle$ :

$$\sigma_{\alpha^*}^2 = \frac{6,74 D_a^{-1/3}}{k^2 r_0^{5/3}}. \quad (2)$$

Здесь  $D_a$  – диаметр апертуры телескопа;  $r_0^*$  – значение радиуса Фрида при  $f(r_0) = 0,2$ .

На рис. 5 показаны расчетные функции распределения повторяемости радиуса Фрида для БАО при его разных средних значениях.

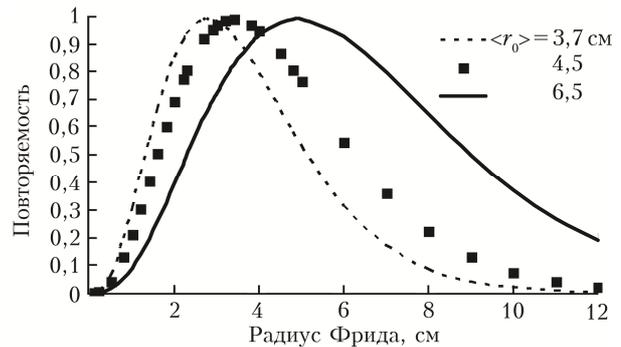


Рис. 5. Расчетные функции распределения повторяемости радиуса Фрида для БАО при его разных средних значениях

Анализ рис. 5 показывает, что с уменьшением среднего значения радиуса Фрида вероятности повторения малых значений  $r_0$  и максимальных амплитуд дрожания возрастают. Основываясь на этом предположении, можно оценить высоту атмосферы, где величины среднего дрожания изображений в фокальной плоскости телескопа наземного базирования и максимального дрожания от высотного слоя с повышенной интенсивностью турбулентности сопоставимы по величине:

$$\sigma_{\alpha}^2(0, H) = \sigma_{\alpha \max}^2(H, z_S), \quad (3)$$

где  $\sigma_{\alpha}^2(0, H)$  – дисперсия дрожания изображения, определенная по вертикальному профилю величины  $C_n^2(z)$  в слое от 0 до верхней границы «оптически» активной атмосферы, составляющей  $\sim 20$  км;  $\sigma_{\alpha \max}^2(H, z_S)$  – максимальная дисперсия дрожания изображений, определенная по вертикальному профилю  $C_n^2(z)$  от верхней границы «оптически» активной атмосферы  $H$  до задаваемого положения нижней границы верхних слоев атмосферы  $z_S$ , суммарный вклад которых соответствует среднему дрожанию изображений от всей атмосферы.

## Результаты измерений характеристик оптической турбулентности датчиком Шака-Гартмана на БСВТ в летний период 2018 г.

В целях расширения архива информации об оптической турбулентности и набора статистики изменений радиуса Фрида в месте расположения БСВТ использован архив данных измерений наклонов волнового фронта.

Как правило, изменения радиуса Фрида для БАО оцениваются по данным измерений дрожания субизображений датчиком волнового фронта Шака-Гартмана, установленным в оптической схеме БСВТ. Среднее значение  $\langle r_0 \rangle$ , рассчитанное по данным измерений за июль 2018 г., составило 4 см.

Известно, что размер поля зрения, в котором эффективна коррекция искажений волнового фронта, ограничен углом изопланатизма. Каждый волновой фронт подвержен аберрациям от суперпозиции турбулентных неоднородностей атмосферы по лучу зрения. При этом волновые фронты, падающие на апертуру телескопа от разнесенных светящихся объектов, сдвинуты в плоскости апертуры на величину, пропорциональную высоте атмосферного турбулентного слоя. С этой точки зрения степень анизопланатизма зависит от формы вертикального профиля оптической турбулентности, характеризуемого  $C_n^2(z)$ .

На рис. 6 показаны зависимости положения высоты атмосферного уровня, на котором максимальное дрожание от верхних слоев атмосферы достигает величины суммарного среднего дрожания фрагментов солнечных изображений при разной интенсивности оптической турбулентности в верхнем слое в месте расположения БСВТ.

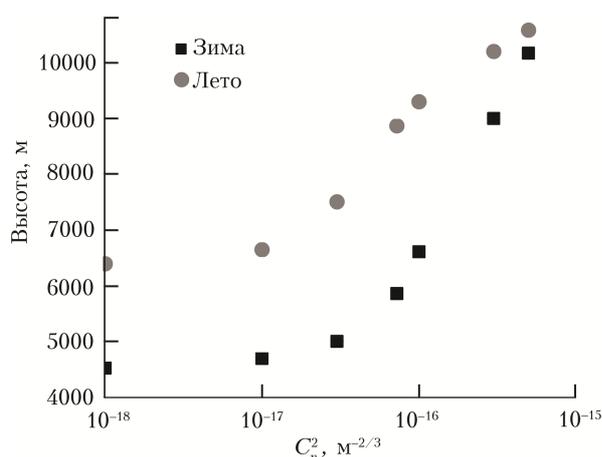


Рис. 6. Зависимость положения высоты атмосферного уровня, на котором максимальное дрожание, вызываемое верхними слоями атмосферы, достигает величины суммарного среднего дрожания фрагментов солнечных изображений, при разной интенсивности оптической турбулентности в верхнем слое в месте расположения БСВТ

Если брать среднее значение  $\langle r_0 \rangle = 4$  см, рассчитанное по данным измерений за 19 июля 2018 г., то максимальные углы прихода оцениваются вели-

чиной 2,5 угл. с. С учетом характерных амплитуд изменений  $C_n^2(z)$  в верхних слоях «оптически» активной атмосферы типичные значения максимальной высоты восстановления профилей  $z^* = z_S$  методом Slodag должны находиться в пределах от 5,5 до 8 км (рис. 6). При этом атмосферный слой на высоте 11,5 км с достаточно высокой интенсивностью турбулентности может быть выявлен методом Slodag только в случае больших значений  $C_n^2 > 10^{-16} \text{m}^{-2/3}$  в нем.

Анализ искажений волнового фронта, формируемых отдельными пространственно разнесенными световыми пучками, на апертуре телескопа позволяет судить о различном влиянии неоднородностей показателя преломления воздуха, находящихся на разных высотных уровнях, на структуру солнечного изображения.

### Заключение

Разработанный ранее спектральный метод [3] позволил впервые определить характерные амплитуды изменений структурной характеристики показателя преломления воздуха в атмосферном турбулентном слое на высоте 11,5 км.

Анализ данных измерений локальных наклонов волнового фронта и полученные оценки радиуса Фрида позволили определить типичные значения максимальной высоты восстановления профилей атмосферной турбулентности методом Slodag. Анализ изменений средних значений структурной характеристики показателя преломления с высотой позволяет говорить о том, что высота  $z_S$  должна изменяться в пределах от 5,5 до 8 км. В атмосферном турбулентном слое на высоте 11,5 км величина структурной характеристики показателя преломления воздуха может быть оценена лишь в отдельных случаях, когда турбулентность достаточно развита ( $C_n^2 > 10^{-16} \text{m}^{-2/3}$ ).

Полученные данные могут быть использованы как основа для развития методов восстановления вертикальных профилей турбулентности и волнового фронта на разных высотах в скрещенных оптических пучках по наблюдениям на астрономических телескопах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-79-00061). Анализ формы распределения вероятности повторяемости радиуса Фрида выполнен при финансовой поддержке соглашения № 075-15-2019-628. Данные измерений получены с использованием уникальной научной установки — Большой солнечный вакуумный телескоп, ФНИ И.16.

1. Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Туев М.В., Шиховцев А.Ю. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947; Botygina N.N., Kovadlo P.G., Kopylov E.A., Lukin V.P., Tudev M.V., Shikhovtsev A.Yu. Estimation of the astronomical seeing at the Large Solar Vacuum Telescope site from optical and meteorological measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 2. P. 142–146.

2. *Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Развитие фазового метода измерений высотного профиля атмосферной турбулентности по наблюдениям опорных звезд // XXX Всерос. симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред». 2017. С. 6.
3. *Шиховцев А.Ю.* Исследование оптической неустойчивости земной атмосферы и условий коррекции солнечных изображений: дис. канд. физ.-мат. наук. Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2016. 171 с.
4. *Artamonov B.P., Bruevich V.V., Gusev A.S., Ezhkova O.V., Ibrahimov M.A., Ilyasov S.P., Potanin S.A., Tillaev Yu.A., Ehgamberdiev Sh.A.* Seeing and atmospheric extinction at Mt. Maidanak observatory from observations with the 1.5-m AZT-22 Telescope // *Astron. Rep.* 2010. V. 54, N 11. P. 1106–1119.
5. *Bolbasova L.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu.* First study of solar seeing and wind speed vertical distribution at Baykal astrophysical observatory // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10703. P. 107036V-1–6.
6. *Butterley T., Wilson R.W., Sarazin M.* Determination of the profile of atmospheric optical turbulence strength from Slodar data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2006. V. 369. P. 835–845.
7. *Munoz-Tunon C., Vernin J., Varela A.M.* Night-time image quality at Roque de los Muchachos Observatory // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1997. V. 125. P. 183–193.
8. *Zhang J., Ge L., Lu X., Cao Z., Chen X., Mao Y., Jiang X.* Astronomical observing conditions at Xinglong observatory from 2007 to 2014 // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2015. V. 127. P. 1292–1306.
9. *Özişik T., Ak T.* First day-time seeing observations at the TÜB İTAK National Observatory in Turkey // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 422. P. 1129–1133.

*A.Yu. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo, L.A. Bolbasova, V.P. Lukin.* **Features of formation of wave front slopes on the telescope aperture at different vertical profiles of optical atmospheric turbulence.**

Possibilities of retrieving the vertical profiles of atmospheric turbulence from measurements of local wavefront slopes are discussed. The estimates of characteristics of amplitudes of the wavefront distortions for different atmospheric altitudes are given. The height of atmospheric layer when maximum angles of light arrival correspond to mean image jitter from total atmosphere is found.