

## Интенсивность колмогоровской и когерентной турбулентности по данным атмосферных высокогорных наблюдений

В.В. Носов<sup>1</sup>, В. М. Григорьев<sup>2</sup>, П.Г. Ковадло<sup>2</sup>, В.П. Лукин<sup>1</sup>, Е.В. Носов<sup>1</sup>,  
А.В. Торгаев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

[nosov@iao.ru](mailto:nosov@iao.ru)

*На высокогорном солнечном телескопе выполнен оптический эксперимент по восстановлению интегральной интенсивности атмосферной турбулентности по данным измерений дрожания изображения края солнечного диска (Саянская солнечная обсерватория Института солнечно-земной физики СО РАН). Результаты измерений показывают, что в присутствии в атмосфере вблизи телескопа крупных когерентных структур (когерентная турбулентность) интегральная интенсивность оказывается почти вдвое меньше, чем для случая некогерентной колмогоровской турбулентности (крупные когерентные структуры отсутствуют).*

*On the high-mountain solar telescope the optical experiment on restoration of the integrated intensity of the atmospheric turbulence on measurement data of the image jitter of the solar disk edge was made (Sayan Solar Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS). The measurement results show that the integrated intensity is almost twice less by the presence in atmosphere the large coherent structures (coherent turbulence) near the telescope than in the case of incoherent Kolmogorov turbulence (the large-scale coherent structures are absent).*

При дистанционном зондировании атмосферы часто используется коротковолновое излучение: микроволновое (с длиной волны 30 см – 1 мм) и оптическое, включающее в себя инфракрасный (1 мм – 0.8 мкм), видимый (0.8 мкм - 0.4 мкм) и ультрафиолетовый (0.4 мкм - 0.1 мкм) диапазоны. На распространение коротковолнового излучения оказывает заметное влияние земная атмосфера.

Известно, что в окнах прозрачности в условиях незамутненной атмосферы качество сигнала, принятого коротковолновым приемником, определяется, в основном, атмосферной турбулентностью, которая вносит случайные искажения в фазовый фронт волны, ухудшает качество изображений. В большей степени влияние турбулентности сказывается на длинных трассах, в том числе в спутниковой связи и при наблюдении внеатмосферных оптических и микроволновых объектов.

В работе приведены результаты оптических измерений интегральной интенсивности атмосферной турбулентности по данным высокогорных оптических измерений. Полученные экспериментальные данные представляют интерес для прогноза работы оптических и коротковолновых орбитальных систем, включая адаптивные системы, а также для прогноза качества изображений в астрономических наблюдениях.

Измерения проводились в Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (п. Монды, Бурятия, вблизи границы с Монголией) 19 июня 2010 г. на автоматизированном горизонтальном солнечном телескопе (АСТ), время наблюдений (летнее иркутское) 15 ч 50 мин – 18 ч 15 мин. Телескоп содержит целостатную установку, представляющую собой систему из двух плоских зеркал диаметром 800 мм, которая обеспечивает непрерывное слежение за Солнцем. Целостат

направляет солнечный свет на главное сферическое зеркало диаметром 800 мм и фокусным расстоянием 20 м. Зеркало строит изображение Солнца на фотоприемнике. Измерялась дисперсия дрожания изображения края солнечного диска  $\sigma_\alpha^2$  в зависимости от размера  $D$  приемного зеркала. Источником в эксперименте служил край солнечного диска. В качестве фотоприемника использовался датчик Брандта, являющийся фотоэлектрический регистратором дрожания. Датчик Брандта прошел успешную апробацию в течение нескольких десятков лет и ранее применялся в аналогичных исследованиях рядом отечественных и зарубежных исследователей. Измерения были выполнены для пяти различных диаметров приемного зеркала (апертуры) телескопа: 5 см, 10 см, 30 см, 50 см, 80 см и для двух различных угловых размеров приемной щели регистратора датчика: 25" и 10". Осуществлялся контроль зенитного угла положения Солнца. Параллельно оптическим измерениям метеосистемой «Метео-3М» производился непрерывный контроль метеоситуации с определением типа турбулентности (когерентная или некогерентная колмогоровская турбулентность) вблизи приемного телескопа АСТ.

В результате экспедиционных работ 2000-х гг., проведенных в горных и равнинных условиях, авторами настоящей работы накоплена обширная экспериментальная база данных приземных измерений основных параметров турбулентности в различных географических районах и метеоситуациях [2-4]. Из этих данных следует, что в открытой атмосфере часто наблюдаются протяженные области, в которых определяющее влияние имеет одна когерентная структура (области когерентной турбулентности). Более того, характерные признаки когерентных структур, в той или иной степени, присутствуют в большинстве накопленных данных. Некогерентная колмогоровская турбулентность обнаруживается, как правило, только над обширными участками с ровной и однородной подстилающей поверхностью.

В [2] установлено, что когерентными структурами можно считать, например, процесс возникновения и распада ячейки Бенара в воздухе, процессы возникновения и распада вихрей, возникающих в результате обтекания жидкостью различных препятствий [4]. Понятие когерентной структуры включает в свой состав не только (традиционно) крупные, но и мелкомасштабные компоненты. Гидродинамической когерентной структурой называется [4] компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную структуру (возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов) и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. Как показано в [4], распад когерентной структуры непрерывно продолжается до самых мелкомасштабных вихрей, которые еще могут существовать в воздухе.

Для случая некогерентной колмогоровской турбулентности дисперсия дрожания изображений  $\sigma_\alpha^2$  выражается через интегральное значение  $I_{\text{нк}}$  структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$  (интегральную интенсивность некогерентной турбулентности) известным образом [5]:

$$\sigma_\alpha^2 = 4.51 a_t^{-1/3} \sec\theta \cdot I_{\text{нк}}, \quad I_{\text{нк}} = \int_0^\infty dh C_n^2(h), \quad (1)$$

где  $a_t$  – радиус входной апертуры телескопа,  $\theta$  – зенитный угол наблюдаемого объекта (отсчитываемый в месте расположения приемника от направления в зенит),  $C_n^2(h)$  – структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха, зависящая от высоты  $h$  над подстилающей поверхностью (высотный профиль  $C_n^2$ ). Для каждого значения угла  $\theta$  величина  $I_{\text{нк}}$  в (1) определяет интегральную интенсивность атмосферной колмогоровской турбулентности на оптических трассах заданного

наклона. Формула (1) позволяет по измеренным значениям дисперсии дрожания  $\sigma_\alpha^2$  восстанавливать интегральную интенсивность турбулентности  $I_{нк}$ .

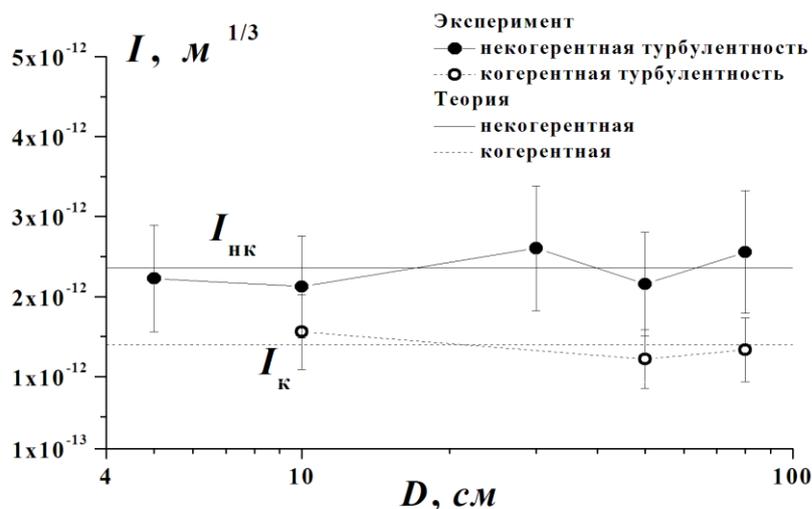
В когерентной турбулентности спектр атмосферной турбулентности отличается от случая некогерентной колмогоровской турбулентности [2 - 4]. Поэтому выражение для дисперсии  $\sigma_\alpha^2$  изменится. После вычисления соответствующих интегралов (по формулам [5] с учетом спектра [2 - 4]) получаем приближенное представление для дисперсии  $\sigma_\alpha^2$  в когерентной турбулентности:

$$\sigma_\alpha^2 = 8.06 L_0^{-1/3} \sec\theta \cdot I_k, \quad I_k = \int_{h_0}^{\infty} dh C_n^2(h), \quad (2)$$

где  $L_0 = L_0(h_0)$  – внешний (экспоненциальный) масштаб турбулентности на высоте центра приемного зеркала над подстилающей поверхностью  $h_0$ ,  $I_k$  в (2) является интегральной интенсивностью когерентной турбулентности на оптических трассах заданного наклона. Из формулы (2) видно, что в когерентной турбулентности дисперсия дрожания  $\sigma_\alpha^2$  не зависит от радиуса приемника  $a_t$ , как для случая колмогоровской некогерентной турбулентности (1). Вместо радиуса приемника  $a_t$  в (2) появляется внешний масштаб турбулентности  $L_0$ .

На рис. 1 приведены результаты оптических измерений интегральной интенсивности атмосферной колмогоровской некогерентной турбулентности  $I_{нк}$ , осредненные по четырем сеансам измерений (темные кружки). Сплошной линией на рис. 1 показана соответствующая теоретическая зависимость величины  $I_{нк}$  от диаметра приемного зеркала телескопа  $D$ .

Полученные нами за многолетний период наблюдений экспериментальные данные показывают [1 - 4], что над территорией Саянской солнечной обсерватории часто наблюдаются крупные когерентные структуры. Наблюдавшийся во время наших оптических измерений ветер имел два основных противоположных друг другу направления. Первое направление - с юго-запада, со стороны относительно плоских окрестностей оз. Хубсугул (Монголия). Второе, противоположное, - с северо-востока, со стороны Саянских гор, которые являются препятствием для северных воздушных потоков. Движущийся с севера воздух стекает со склонов Саянского горного массива в долину р. Иркут и закручивается вверх склонами горы «Часовые Сопки», на которой расположена Саянская солнечная обсерватория. В результате над вершиной этой горы образуется долгоживущая крупная когерентная структура.



**Рис. 1.** Интегральная интенсивность атмосферной когерентной турбулентности  $I_k$  и колмогоровской некогерентной турбулентности  $I_{нк}$  над территорией Саянской солнечной обсерватории в зависимости от диаметра приемной апертуры  $D$

На рис. 1 приведены результаты оптических измерений интегральной интенсивности атмосферной когерентной турбулентности  $I_k$ , осредненные по четырем сеансам измерений (светлые кружки). Прямой штриховой линией на рис. 1 показана соответствующая теоретическая зависимость величины  $I_k$  от диаметра приемного зеркала телескопа  $D$ .

Результаты измерений (рис. 1, 2) показывают, что присутствие в атмосфере крупных когерентных структур (спектр флуктуаций температуры  $W_T \sim f^{-8/3}$ , когерентная турбулентность [1 - 4]), слабо влияет на значения интегральной интенсивности турбулентности ( $I_{HK} \approx 2.4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{1/3}$ ,  $I_k \approx 1.4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{1/3}$ ). Этого следовало ожидать, так как интегральная интенсивность накапливается вдоль всей оптической трассы. При этом вариации высотного профиля структурной характеристики показателя преломления, возникающие за счет отклонения турбулентности от колмогоровской, сглаживаются. В то же время когерентная турбулентность обычно обеднена мелкомасштабными неоднородностями, которые увеличивают  $C_n^2$ . Поэтому в среднем интегральная интенсивность когерентной турбулентности оказывается почти вдвое меньше, чем интенсивность некогерентной колмогоровской турбулентности.

Отметим, что интегральная интенсивность турбулентности  $I$  исследовалась на крупных телескопах в обсерваториях Чили: Very Large Telescope (VLT, Cerro Paranal), Gemini-South и SOAR (Cerro Pachon), и др. [6]. В ночных измерениях зарегистрированы значения  $I = 0.4 \cdot 10^{-13} - 3.4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{1/3}$ . Это в несколько раз меньше, чем значения наших дневных данных, приведенных на рис. 1, 2. Отличие наших результатов от данных [6] легко объясняется разницей в учитываемой толщине атмосферного слоя. Так, если в наших измерениях применялись наклонные трассы ( $\theta \approx 50^\circ$ ) через всю толщу атмосферы (начиная с высоты 2010 м от уровня моря), то в [6] учитывался только тонкий приземный поверхностный слой (начиная с высот 2635 м, 2715 м и 4200 м) на вертикальных трассах, специально (инструментально) ограниченных длиной до 500 м.

### Литература

1. Носов В.В., Григорьев В. М., Коваadlo П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099-1110.
2. Носов В.В., Григорьев В. М., Коваadlo П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа. Ч.1, Ч.2 // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1013-1021; 2008. Т. 21, № 3. С. 207-217.
3. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Grigoriev V.M., Kovadlo P.G. Coherent structures in the turbulent atmosphere // Mathematical models of nonlinear phenomena. – N.Y.: Nova Science Publishers. 2009. ch. 20; // Солнечно-земная физика. 2009. Вып.10. С. 134-143.
4. Носов В.В., Григорьев В. М., Коваadlo П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Когерентные структуры в турбулентной атмосфере. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физика, 2009. Вып.10. С.134-143.
5. Миронов В.Л., Носов В.В., Чен Б.Н. Дрожание оптических изображений лазерных источников в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Радиофизика, 1980. Т. 23. № 4. С. 461-470.
6. Tokovinin A. Where is the surface-layer turbulence? // Proc. SPIE, 2010. V. 7733. P. 77331N.