

**ФОРМИРОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА
НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ В АТМОСФЕРЕ.
ИЗМЕРЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ШЭКА—ГАРТМАНА
TURBULENT PARAMETERS AT DIFFERENT HEIGHTS IN THE ATMOSPHERE.
SHACK—HARTMANN WAVEFRONT SENSOR DATA**

А.Ю. Шиховцев *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artempochta2009@rambler.ru***А.В. Киселев** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kiselev@iszf.irk.ru***П.Г. Ковadlo** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kovadlo2006@rambler.ru***Д.Ю. Колобов** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kolobov@iszf.irk.ru***И.В. Русских** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vanekrus@iszf.irk.ru***В.Е. Томин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, tomin@iszf.irk.ru***A.Yu. Shikhovtsev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artempochta2009@rambler.ru***A.V. Kiselev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kiselev@iszf.irk.ru***P.G. Kovadlo***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kovadlo2006@rambler.ru***D.Yu. Kolobov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kolobov@iszf.irk.ru***I.V. Russkikh***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vanekrus@iszf.irk.ru***V.E. Tomin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, tomin@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе приведены результаты исследований искажений волнового фронта на разных высотах в атмосфере. Для определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) использовались данные измерений, выполненных с помощью датчика волнового фронта. Путем применения кросс-корреляционного анализа дифференциальных смещений солнечных пятен на разнесенных субапертурах датчика определены характеристики турбулентности на разных высотах в месте расположения БСВТ. Дифференциальные смещения солнечных пятен характеризуют мелкомасштабную структуру турбулентных фазовых искажений в атмосфере, а синхронные изменения во времени амплитуды этих искажений на определенных участках апертуры телескопа определяются действием турбулентных слоев на разных высотах. Получены оценки вклада оптической турбулентности в суммарные искажения на апертуре телескопа в слоях 0–0.6, 0.6–1.1, 1.1–1.7 км. Показано, что в атмосферном слое толщиной порядка 1.7 км вклад оптической турбулентности в амплитуду искажений волнового фронта на апертуре телескопа составляет около 43 %.

Ключевые слова: телескоп, волновой фронт, профили турбулентности, адаптивная оптика.

Abstract. The paper presents the results of studies of wavefront distortions at different heights in the atmosphere. We have used measurement wavefront data to determine optical turbulence parameters along the line of sight of the Large Solar Vacuum Telescope. Through cross-correlation analysis of differential motions of sunspots at spaced wavefront sensor subapertures, we determined turbulent parameters at different heights at the Large Solar Vacuum Telescope site. The differential motions of sunspots characterize the small-scale structure of turbulent phase distortions in the atmosphere. Synchronous temporal changes in the amplitude of these distortions at certain regions of the telescope aperture are conditioned by turbulent layers at different heights. We have estimated the contribution of optical turbulence to integral distortions at the telescope aperture for layers 0–0.6, 0.6–1.1, 1.1–1.7 km. The contribution of optical turbulence concentrated in a 1.7 km atmospheric layer to the wavefront distortions at the aperture telescope is shown to be ~43 %.

Keywords: telescope, wavefront, turbulence profiles, adaptive optics.

ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования и уточнения технических характеристик как классической системы адаптивной оптики (АО), так и мультисистемы АО необходима информация о структуре турбулентности в

атмосферном пограничном слое и свободной атмосфере [Большасова и др., 2021; Клейменов и др., 2021; Rasouli et al., 2009; Rasouli, Rajabi, 2016]. В частности, необходимо знать вертикальные профили структурной характеристики турбулентных флукту-

аций показателя преломления воздуха C_n^2 и скорости ветра V . С одной стороны, вертикальные профили C_n^2 и V определяют динамический диапазон системы АО. С другой стороны, выбор параметров деформируемых зеркал и датчиков Шэка—Гартмана классической системы АО связан с параметром Фрида, который определяется развитостью оптической турбулентности по лучу зрения телескопа. Классические адаптивные системы основаны на раздельной коррекции наклонов волнового фронта (tip/tilt аберраций) и аберраций более высоких порядков. Поле зрения, в котором коррекция приводит к значимому возрастанию числа Штреля, невелико и ограничено так называемым изопланатическим углом атмосферы. Для Саянской солнечной обсерватории характерные значения изопланатического угла в оптическом диапазоне электромагнитного спектра составляют достаточно малую величину, от 1 до 3 угл. сек. Поскольку изопланатический угол изменяется преимущественно под воздействием верхних атмосферных слоев, его статистически усредненная величина для Саянской солнечной обсерватории близка к статистически усредненному значению в месте расположения Байкальской астрофизической обсерватории [Kovadlo et al., 2019].

Размер поля зрения, в пределах которого наблюдаются высокие значения числа Штреля, зависит от характера распределения оптической турбулентности по лучу зрения телескопа и существенно изменяется во времени. При этом наибольший вклад в уменьшение размера поля зрения дает турбулентность верхних атмосферных слоев, интенсивность которой может быть значительна. Современные средства систем АО, определяющие и корректирующие искажения волнового фронта в широком поле зрения, включают в себя несколько датчиков волнового фронта, применяемых при восстановлении вертикальных профилей оптической турбулентности.

Решение задачи по определению вертикальных профилей оптической турбулентности в дневное время необходимо для обеспечения работы систем АО широкого поля зрения произвольного крупноапертурного солнечного телескопа. В частности, существенное внимание уделяется измерениям вертикальных профилей оптической турбулентности для системы АО Европейского солнечного телескопа EST. В работе [Marco de la Rosa et al., 2016] рассмотрены изменения числа Штреля по полю зрения телескопа в зависимости от зенитного угла Солнца, параметра Фрида и доли энергии оптической турбулентности в нижнем слое атмосферы. Изменения оценены для поля зрения размером ~ 1 угл. мин. Показано, что при параметре Фрида 10 см, зенитном угле 70° и 80 % энергии оптической турбулентности в нижнем слое атмосферы использование дополнительного деформируемого зеркала приводит к существенному росту числа Штреля по полю зрения (примерно в 1.7 раза). И, наоборот, при зенитном угле 10° использование дополнительного деформируемого зеркала ведет к уменьшению значений числа Штреля по полю зрения. В работе [Marco de la Rosa

et al., 2016] авторы приводят пространственные распределения числа Штреля для разных атмосферных условий и конструкций систем АО. Для корректного сравнения эффективности конструкций систем АО мы представили расчетные данные в измененной системе координат усредненное число Штреля — номер области отдельно для для центральной области поля зрения и его периферии в системах с тремя и четырьмя деформируемыми зеркалами. Раздельное представление зависимости усредненное число Штреля — номер области для периферии и центральной области поля зрения позволило оценить амплитуды изменений числа Штреля. Изменения числа Штреля по полю зрения крупноапертурного телескопа в адаптивной системе с тремя и четырьмя деформируемыми зеркалами показаны на рис. 1. По оси ординат приведены значения числа Штреля, по оси абсцисс — номер области. Расстояния между областями, положения которых соответствуют определенным участкам на апертуре телескопа, составляет ~ 7 угл. сек.

Анализ рис. 1 показывает, что амплитуда изменений числа Штреля в центральной области (линии 3 и 4) существенно меньше, чем на периферии поля зрения. Подобный характер изменений характеристика качества изображения согласуется с нашими расчетами [Шиховцев и др., 2021; Shikhovtsev et al., 2019, 2021]. Значения числа Штреля на периферии и в центре поля зрения после коррекции волнового фронта зависят не только от количества деформируемых зеркал, но и от вертикального профиля структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха. Наибольшие значения числа Штреля достигаются при слабой турбулентности в верхних слоях оптически активной атмосферы, когда эффективная высота турбулентной атмосферы мала. Таким образом, оптимизация технических характеристик систем АО требует наличия

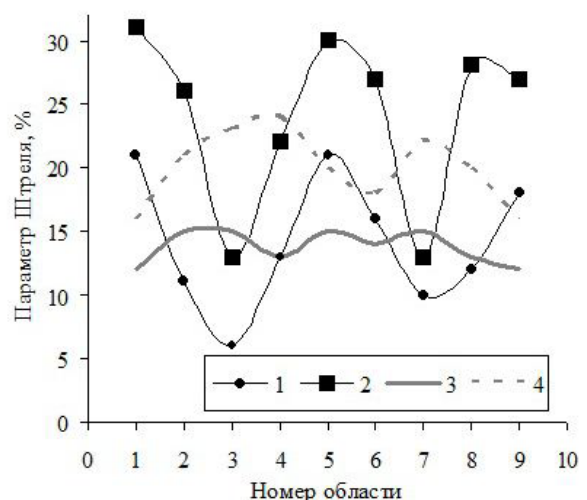


Рис. 1. Изменения числа Штреля по полю зрения телескопа. В системе с тремя и четырьмя деформируемыми зеркалами линиями 1 и 2 показаны изменения параметра Штреля на периферии поля зрения, линиями 3 и 4 — изменения числа Штреля в центральной области поля зрения. Зависимости получены на основе данных, приведенных в работе [Marco de la Rosa et al., 2016]

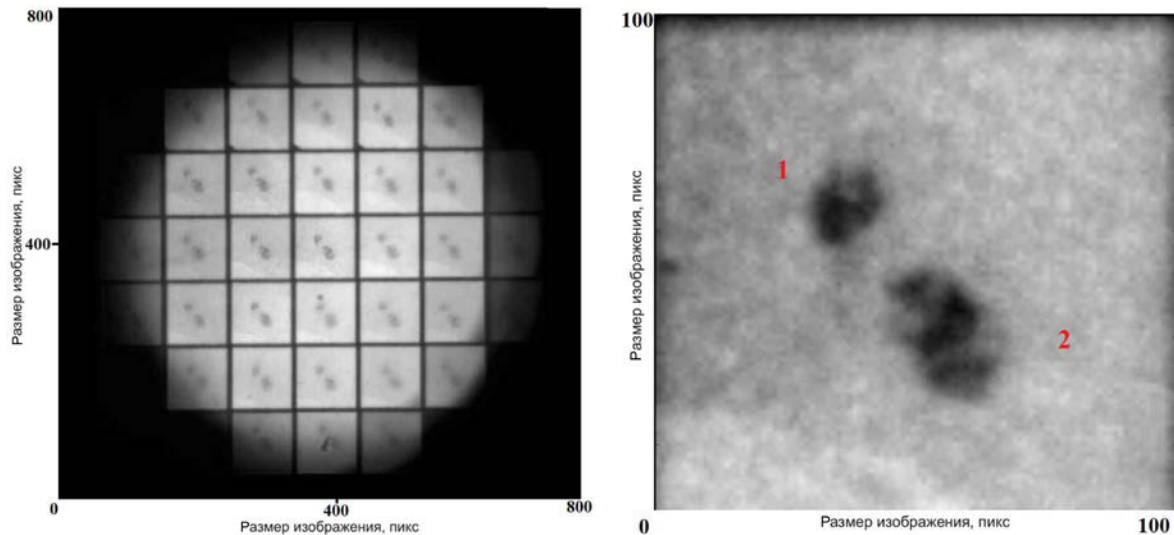


Рис. 2. Гартманогрaмма солнечных пятен, полученная в системе АО Большого солнечного вакуумного телескопа 11.08.2020 г. в 09:43:47 LT (а); пример субизображения солнечных пятен в фокальной плоскости датчика Шэка—Гартмана (б)

информации о вертикальных профилях оптической турбулентности.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА, ФОРМИРУЕМЫХ В ТУРБУЛЕНТНЫХ СЛОЯХ НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ

Измерениям турбулентных характеристик в атмосферном пограничном слое и вышележащей атмосфере уделяется существенное внимание с точки зрения определения структуры атмосферных течений и развития мелкомасштабной турбулентности [Корнилов и др., 2009; Nosov et al., 2017; Banakh et al., 2021; Odintsov et al., 2019; Kamardin, Odintsov, 2017; Potekaev et al., 2021; Song et al., 2020].

Мы использовали данные наблюдений, выполненных на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории с питающим зеркалом диаметром 1 м. Телескоп находится в поселке Листвянка вблизи береговой линии оз. Байкал на одной из изолированных вершин высотой 210 м над зеркалом озера. БСВТ оснащен макетом системы АО. С использованием экспериментальной базы БСВТ развиты методы и подходы восстановления искажений волнового фронта [Botygina et al., 2018; Lavrinov, Lavrinova, 2019].

Для определения микроструктурных характеристик турбулентных слоев мы использовали метод S-DIMM+ [Wang et al., 2018], основанный на обработке данных измерений, выполненных с помощью датчика Шэка—Гартмана. В летних экспериментах 2020 г. на БСВТ проводились наблюдения смещений центров тяжести солнечных пятен в фокальных плоскостях датчика Шэка—Гартмана, установленного в многокаскадной системе АО БСВТ [Lukin et al., 2019]. В измерениях использовался датчик Шэка—Гартмана с количеством субапертур 6×6

при 60-сантиметровой апертуре телескопа с диафрагмой. Частота работы датчика составляла 100 Гц, длина временных реализаций ~30 тыс. кадров. В результате наблюдений 11.08.2020 получены временные серии гартманогрaмм двух солнечных пятен (рис. 2).

Для каждой субапертуры датчика волнового фронта оценены смещения x , y центров тяжести субизображений каждого солнечного пятна. Для оценки положений пиков мы использовали метод взвешенных центров тяжести [Kazakov et al., 2018; Lavrinov, Lavrinova, 2019]. Фрагменты временных реализаций смещений центров тяжести субизображений солнечных пятен в фокальной плоскости датчика Шэка—Гартмана БСВТ показаны на рис. 3.

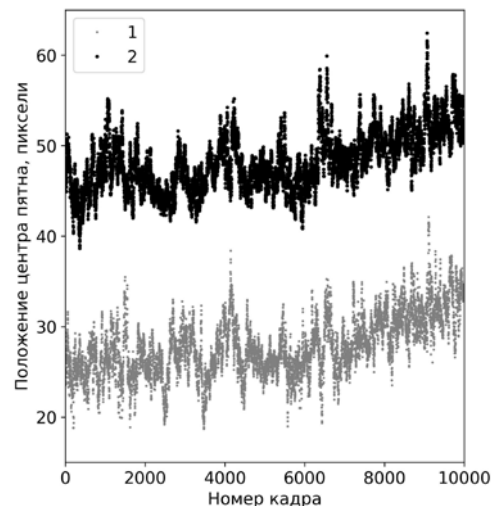


Рис. 3. Фрагменты временных реализаций смещений центров тяжести субизображений солнечных пятен в фокальной плоскости датчика Шэка—Гартмана. Линией 1 показаны смещения центров тяжести субизображения первого солнечного пятна в опорной субапертуре датчика, линией 2 показаны смещения центров тяжести субизображения второго солнечного пятна в субапертуре датчика, смещенной на расстояние 6 см

Линейный коэффициент корреляции Пирсона между смещениями центров тяжести субизображений двух солнечных пятен на разнесенных субапертурах высок и составляет 0.93. Временные реализации смещений центров тяжести субизображений двух солнечных пятен используются нами для определения характеристик турбулентности на разных высотах в атмосфере.

В работе для выявления турбулентных слоев мы использовали связь между пространственной кросс-корреляционной функцией дифференциальных смещений центров тяжести субизображений и вертикальным распределением структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха.

В рамках метода S-DIMM+ смещения центров тяжести субизображений вдоль взаимноперпендикулярных осей координат пропорциональны суммарному вкладу разных атмосферных слоев:

$$C_{sx} = \langle \delta x_1(s, 0) \delta x_2(s, \alpha) \rangle = \sum_{n=1}^N c_n(h_n) F_x(s, \alpha, h_n), \quad (1)$$

$$C_{sy} = \langle \delta y_1(s, 0) \delta y_2(s, \alpha) \rangle = \sum_{n=1}^N c_n(h_n) F_y(s, \alpha, h_n), \quad (2)$$

где s — расстояние от опорной субапертуры, кратное b см; α — угол между центрами солнечных пятен; h_n — высота турбулентного слоя n ; δx_1 и δy_1 — дифференциальные смещения центров тяжести первого солнечного пятна по условно выбираемому осям абсцисс и ординат; δx_2 и δy_2 — то же для второго солнечного пятна; $F_x(s, \alpha, h_n)$ и $F_y(s, \alpha, h_n)$ — функции разложения, зависящие от количества субапертур в датчике волнового фронта, углового расстояния между центрами солнечных пятен и высоты. Выражения (1) и (2) представляют собой линейные разложения кросс-корреляционных функций C_{sx} и C_{sy} по безразмерным структурным характеристикам турбулентности c_n , взятыми с весами $F_x(s, \alpha, h_n)$ или $F_y(s, \alpha, h_n)$ для x - и y -компонент дифференциальных смещений субизображений.

Используя выражения (1) и (2), можно определить вертикальные профили структурных параметров атмосферной турбулентности и искажений волнового фронта по данным анализа кросс-корреляционных функций C_{sx} и C_{sy} , рассчитываемых по данным измерений, выполненных с помощью датчика Шэка—Гартмана. Дифференциальные смещения центров солнечных пятен по оси абсцисс определяются следующим образом:

$$\delta x_1(s, 0) = \sum_{n=1}^N \{x_n(s) - x_n(0)\}, \quad (3)$$

$$\delta x_2(s, \alpha) = \sum_{n=1}^N \{x_n(s + \alpha h_n) - x_n(\alpha h_n)\}. \quad (4)$$

где h_n — положение центра тяжести солнечного пятна.

Коэффициенты c_n пропорциональны интенсивности оптической турбулентности в атмосферном слое толщиной dh_n :

$$c_n = 5.98 D_{\text{eff}}^{-1/3} (h_n) C_n^2(h_n) dh_n / \cos \gamma, \quad (5)$$

где D_{eff} — эффективный диаметр телескопа, γ — зенитный угол.

ОПТИЧЕСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ В АТМОСФЕРЕ В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ БОЛЬШОГО СОЛНЕЧНОГО ВАКУУМНОГО ТЕЛЕСКОПА

Для определения характеристик оптической турбулентности на разных высотах в атмосфере мы выполнили расчет пространственных кросс-корреляционных функций дифференциальных смещений центров тяжести двух солнечных пятен на разнесенных субапертурах датчика Шэка—Гартмана. На рис. 4 показаны временные реализации безразмерной энергии турбулентности в разных атмосферных слоях, оцененной по данным наблюдений на БСВТ. По оси абсцисс приведено одиннадцать временных интервалов N_i , продолжительность каждого интервала составляет 26 с. По оси ординат показаны значения безразмерной энергии турбулентности I_f . При определении I_f мы полагали, что средняя максимальная дисперсия, рассчитанная по интегральным дифференциальным смещениям центров тяжести субизображений первого солнечного пятна, равна 1 (линия 4). Энергия турбулентности в каждом слое нормировалась на полную энергию с учетом того, что сумма энергий по слоям должна быть равна энергии, рассчитанной по интегральным дифференциальным смещениям центров тяжести субизображений первого солнечного пятна (энергии оптически активного слоя атмосферы от апертуры телескопа до высоты 20 км). Другими словами, мы считали, что сумма структурных постоянных флуктуаций показателя преломления воздуха равна сумме величин c_n по слоям толщиной dh_n :

$$\sum_{n=1}^N C_n^2(h_n) dh_n = a_i \sum_{n=1}^N D_{\text{eff}}^{1/3}(h_n) c_n(h_n) dh_n, \quad (6)$$

где a_i — коэффициент пропорциональности.

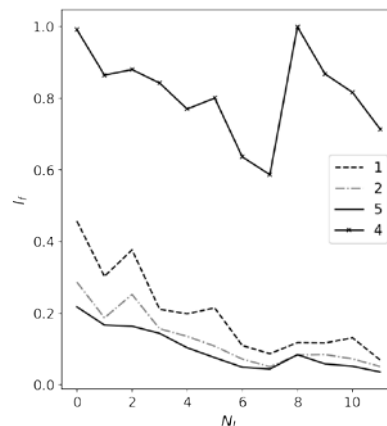


Рис. 4. Временные реализации безразмерной энергии турбулентности, оцененной по данным наблюдений на БСВТ: 1 — слой на высоте 564 м, 2 — 1129 м, 3 — 1693 м, 4 — вариации безразмерной энергии турбулентности, интегральной по лучу зрения

Вклад в суммарную интенсивность турбулентности различных слоев атмосферы

Дистанция, км	Толщина слоя, км	Вклад в суммарную интенсивность турбулентности, %
0–1.1	0–0.6	19.9
1.1–2.2	0.6–1.1	12.8
2.2–3.2	1.1–1.7	9.9
0–3.2	0–1.7	42.6

Анализ рис. 4 показывает, что в рассматриваемый период времени амплитуда дифференциального дрожания субизображений (интегрального по лучу зрения телескопа) в среднем уменьшалась, а качество изображений улучшалось. В таблице приведены средние оценки вклада в суммарную интенсивность турбулентности атмосферных слоев для серии измерений на БСВТ.

С высотой вклад турбулентных слоев в энергию турбулентности, оцененную по интегральному дрожанию, уменьшается. Можно считать, что оптическая турбулентность, сосредоточенная в атмосферном слое толщиной порядка 1.7 км, составляет ~43 % от интегральной интенсивности оптической турбулентности. Практически это означает, что наблюдаемое невысокое качество изображений в основном связано с оптической турбулентностью в нижних слоях атмосферы (по оценкам турбулентности, формируемой в слое до 3.5 км).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представлены результаты исследований искажений волнового фронта, формируемых по лучу зрения БСВТ на разных высотах в атмосфере. Определение характеристик оптической турбулентности на разных высотах выполнялось путем анализа пространственных кросс-корреляционных функций дифференциальных смещений центров тяжести субизображений солнечных пятен на разнесенных субапертурах датчика волнового фронта Шэка—Гартмана.

Использование в расчетах дифференциальных смещений центров тяжести субизображений позволило избежать влияния механических вибраций БСВТ. В статье получены следующие выводы.

1. По данным измерений, выполненных с помощью датчика Шэка—Гартмана на БСВТ определены характеристики оптической турбулентности для атмосферных слоев 0–0.6, 0.6–1.1, 1.1–1.7 и 0–1.7 км. Показано, что вклад оптической турбулентности в атмосферном слое толщиной порядка 1.7 км в амплитуду искажений волнового фронта на апертуре телескопа составляет около 43 %.

2. Высокий процент вклада нижних слоев атмосферы в месте расположения БСВТ свидетельствует о наличии временных интервалов с низкой энергией оптической турбулентности в верхних атмосферных слоях. Для достижения приемлемых значений числа Штреля предполагаем, что в условиях такого распределения энергии оптической турбулентности с высотой эффективным может быть использование многокаскадной системы АО с оптическим сопряжением деформируемых зеркал с турбулентными слоями. Высоты сопряжения и параметры деформируемых

зеркал должны быть уточнены с учетом расчета баланса дисперсий фазы.

В статье применен метод S-DIMM+, адаптированный для работы по двум солнечным пятнам. Необходимым условием работы этого метода является наличие двух солнечных пятен в пределах поля зрения, ограниченного несколькими угловыми минутами. Солнечные пятна связаны с выходом сильных магнитных полей из конвективной зоны Солнца. Вследствие вспышки магнитных трубок солнечные пятна обычно образуются группами и часто располагаются относительно недалеко друг от друга. Современные представления о вспышке магнитных полей хорошо объясняют наблюдаемые свойства солнечных пятен, такие как биполярность, их ориентацию, инверсию полярности со временем и широтой, угол наклона группы солнечных пятен и их положение в низких широтах.

Характерные размеры солнечных пятен изменяются от 5 до 50 Мм, а время жизни составляет от нескольких часов до нескольких месяцев. Пространственное распределение солнечных пятен по Солнцу и их количество, прежде всего, зависит от фазы солнечного цикла. Цикличность пятнообразования на Солнце принято представлять в виде диаграммы бабочки Маундера [Arlt et al., 2020]. Анализ диаграммы бабочки Маундера дает возможность судить о пространственной локализации и числе солнечных пятен. При этом отдельные солнечные пятна и группы пятен наблюдаются даже в минимумах солнечной активности. Мониторинг турбулентности по двум солнечным пятнам может выполняться в системе АО рутинно, исключая периоды минимума солнечной активности, когда возможны только отдельные наблюдения. В дальнейшем метод может быть адаптирован для большого количества солнечных пятен, обеспечивающих дополнительные узлы при восстановлении вертикальных профилей оптической турбулентности. Развитие и применение методов профилирования оптической турбулентности, получение статистически обеспеченных профилей характеристик оптической турбулентности для разного качества солнечных изображений — это шаги, необходимые для разработки системы АО для солнечного телескопа, корректирующей изображения в поле зрения выше 1–3 угл. сек. Вероятно, разработка системы АО для систематических наблюдений в условиях средней интенсивности турбулентности должна быть основана на каскадном принципе и включать в себя tip/tilt-корректор и несколько деформируемых зеркал, в том числе сопряженных с апертурой телескопа и обеспечивающих коррекцию значимых амплитуд аберраций высоких порядков. Такой подход подтверждается результатами испытаний адаптив-

ной системы БСВТ с одним деформируемым зеркалом, обеспечивающим неполную (частичную) коррекцию аббераций волнового фронта [Lukin et al., 2020]. Полученные результаты могут быть полезны при вводе в эксплуатацию системы адаптивной оптики Крупного солнечного телескопа КСТ-3 [Grigoryev et al., 2020].

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Большой солнечный вакуумный телескоп» [<http://ckp-rf.ru/usu/200615>]. Измерения и анализ формирования искажений волнового фронта выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России. Развитие метода измерений искажений волнового фронта, формируемых в турбулентных слоях на разных высотах, осуществлялось при поддержке гранта Президента МК-444.2021.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большасова Л.А., Лукин В.П. Исследование атмосферы для задач адаптивной оптики. *Оптика атмосферы и океана*. 2021. Т. 34, № 4. С. 254–271. DOI: [10.15372/AOO20210403](https://doi.org/10.15372/AOO20210403).
- Клейменов В.В., Возмищев И.Ю., Новикова Е.В. Ограничения применения лазерной опорной звезды в адаптивных оптико-электронных системах, обусловленные ее дрожанием в атмосфере. *Оптический журнал*. 2021. Т. 88, № 10. С. 26–32. DOI: [10.17586/2226-1494-2021-21-1-24-30](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-1-24-30).
- Корнилов В., Ильясов С., Возякова О. и др. Измерения оптической турбулентности в свободной атмосфере над горой Майданак в 2005–2007 гг. *Письма в астрономический журнал*. 2009. Т. 35, № 8. С. 606–614.
- Шиховцев А.Ю., Лукин В.П., Ковадло П.Г. Пути развития систем адаптивной оптики для солнечных телескопов наземного базирования. *Оптика атмосферы и океана*. 2021. Т. 34, № 05. С. 385–392. DOI: [10.15372/AOO20210512](https://doi.org/10.15372/AOO20210512).
- Arlt R., Vaquero J.M. Historical sunspot records. *Living Rev. Solar Phys.* 2020. Vol. 17, iss. 1, article id. 1. DOI: [10.1007/s41116-020-0023-y](https://doi.org/10.1007/s41116-020-0023-y).
- Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V. Estimation of the height of the turbulent mixing layer from data of Doppler lidar measurements using conical scanning by a probe beam. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14, iss. 2. P. 1511–1524. DOI: [10.5194/amt-14-1511-2021](https://doi.org/10.5194/amt-14-1511-2021).
- Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., et al. Development of components for adaptive optics systems for solar telescopes. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018. Vol. 31. P. 216–223. DOI: [10.1134/S1024856018020057](https://doi.org/10.1134/S1024856018020057).
- Grigoryev V.M., Demidov M.L., Kolobov D.Yu., et al. AMOS team Project of the Large Solar Telescope with mirror 3 m in diameter. *J. Solar-Terr. Phys.* 2020. Vol. 6, iss. 2. P. 14–29. DOI: [10.12737/stp-62202002](https://doi.org/10.12737/stp-62202002).
- Kamardin A.P., Odintsov S.L. Height profiles of the structure characteristic of air temperature in the atmospheric boundary layer from sodar measurements. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2017. Vol. 30, iss. 1. P. 33–38. DOI: [10.1134/S1024856017010079](https://doi.org/10.1134/S1024856017010079).
- Kazakov D.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N. Results of numerical testing of algorithms for centering of focal spots in a Shack-Hartmann wavefront sensor. *Proc.SPIE. 24th International Symposium on Atmospheric and Oceanic Optics: Atmospheric Physics*; Tomsk. 2018. Vol. 10833. 108332D. DOI: [10.1117/12.2504557](https://doi.org/10.1117/12.2504557).
- Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu. Development of the Model of Turbulent Atmosphere at the Large Solar Vacuum Telescope Site as Applied to Image Adaptation. *Atmospheric and oceanic optics*. 2019. Vol. 32. P. 202–206. DOI: [10.1134/S1024856019020076](https://doi.org/10.1134/S1024856019020076).
- Lavrinov V.V., Lavrinova L.N. Reconstruction of wavefront distorted by atmospheric turbulence using a Shack-Hartmann sensor. *Computer Optics*. 2019. Vol. 43, iss. 4. P. 586–595. DOI: [10.18287/2412-6179-2019-43-4-586-595](https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-4-586-595).
- Lukin V.P., Botygina N.N., Antoshkin L.V., et al. Multi-Cascade Image Correction System for the Large Solar Vacuum Telescope. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. Vol. 32, iss. 5. P. 597–606. DOI: [10.1134/S1024856019050117](https://doi.org/10.1134/S1024856019050117).
- Lukin V.P., Antoshkin L.V., Bol'basova L.A., et al. The history of the development and genesis of works on adaptive optics in the Institute of atmospheric optics. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020, Vol. 33, iss. 1. P. 85–103. DOI: [10.1134/S1024856020010078](https://doi.org/10.1134/S1024856020010078).
- Marco de la Rosa J., Montoya L., Collados M., et al. Day-time turbulence profiling for EST and its impact in the solar MCAO system design. *Proc. SPIE. Adaptive optics systems V*; Edinburgh, United Kingdom. 2016. Vol. 9909. 99096X. DOI: [10.1117/12.2229471](https://doi.org/10.1117/12.2229471).
- Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.A., Torgaev A.V. Method for atmospheric turbulence profile measurement from observation of laser guide stars. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2017. Vol. 30, iss. 2. P. 176–183. DOI: [10.1134/S1024856017020099](https://doi.org/10.1134/S1024856017020099).
- Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzorova I.V. Determination of the structural characteristic of the refractive index of optical waves in the atmospheric boundary layer with remote acoustic sounding facilities. *Atmosphere*. 2019. Vol. 10, iss. 11. 711. DOI: [10.3390/atmos10110711](https://doi.org/10.3390/atmos10110711).
- Rasouli S., Rajabi Y. Investigation of the inhomogeneity of atmospheric turbulence at day and night times. *Optics and Laser Technology*. 2016. Vol. 77. P. 40–50. DOI: [10.1016/j.optlastec.2015.08.017](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.08.017).
- Rasouli S., Ramaprakash A.N., Das H.K., et al. Two channel wavefront sensor arrangement employing Moiré deflectometry. *Proc.SPIE. Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XII*; Berlin, Germany, 2009. Vol. 7476, 74760K. DOI: [10.1117/12.829962](https://doi.org/10.1117/12.829962).
- Potekaev A., Shamanaeva L., Kulagina V. Spatiotemporal dynamics of the kinetic energy in the Atmospheric Boundary layer from minisodar measurements. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, iss. 4. P. 421. DOI: [10.3390/atmos12040421](https://doi.org/10.3390/atmos12040421).
- Shikhovtsev A.Y., Chuprakov S.A., Kovadlo P.G. Sensor to register the optical distortions in the wide field of view of solar telescope. *Proc. SPIE. XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*; Tomsk, Russia. 2019. Vol. 11322. Id. 113220B. DOI: [10.1117/12.2553045](https://doi.org/10.1117/12.2553045).
- Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Kiselev A.V., et al. Modified Method to Detect the Turbulent Layers in the Atmospheric Boundary Layer for the Large Solar Vacuum Telescope. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. P. 159. DOI: [10.3390/atmos12020159](https://doi.org/10.3390/atmos12020159).
- Song T., Cai Z., Liu Y., et al. Daytime optical turbulence profiling with a profiler of the differential solar limb. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. Vol. 499, iss. 2. P. 1909–1917. DOI: [10.1093/mnras/staa2729](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2729).
- Wang Z., Zhang L., Kong L., et al. A modified S-DIMM+: Applying additional height grids for characterizing daytime seeing profiles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. Vol. 478, iss. 2. P. 1459–1467. DOI: [10.1093/mnras/sty1097](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1097).

Как цитировать эту статью:

Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Русских И.В., Томин В.Е. Формирование искажений волнового фронта на разных высотах в атмосфере. Измерения, выполненные с помощью датчика Шэка—Гартмана. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 23–28. DOI: [10.12737/szf-82202203](https://doi.org/10.12737/szf-82202203).