

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 520.16, 551.55

Вертикальные профили оптической турбулентности и оценка внешнего масштаба турбулентности над Байкальской астрофизической обсерваторией

А.Ю. Шиховцев^{✉ 1}, П.Г. Ковадло^{1, 2*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зueva, 1

Поступила в редакцию 15.01.2024;
после доработки 21.05.2024;
принята к печати 24.06.2024

Изучение пространственно-временной структуры оптической турбулентности и развитие методов определения ее характеристик на разных высотах в атмосфере имеют большое значение для астрономической адаптивной оптики. Схема системы адаптивной оптики и технические характеристики ее компонент в значительной степени определяются оптической турбулентностью по лучу зрения телескопа. В настоящей работе модифицирован метод определения вертикальных профилей структурной характеристики турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха. На основе данных реанализа атмосферы ERA5 с помощью данного метода получены статистически репрезентативные вертикальные профили структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха и внешнего масштаба турбулентности для места расположения Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ). Обсуждается проблема определения профилей внешних масштабов турбулентности с учетом данных приземных мачтовых микрометеорологических и оптических измерений на БСВТ. Полученные результаты являются основой для построения многозеркальной системы адаптивной оптики на БСВТ, в частности профили важны для дальнейшего уточнения высот оптического сопряжения. Предлагаемые подходы могут быть использованы при описании оптической турбулентности и над другими солнечными телескопами наземного базирования.

Ключевые слова: астроклимат, атмосфера, турбулентность, внешний масштаб турбулентности; astroclimate, atmosphere, turbulence, outer scale of turbulence.

Введение

В различных слоях земной атмосферы формируются турбулентные неоднородности показателя преломления воздуха различных пространственных масштабов, которые приводят к значимому уменьшению разрешающей способности телескопов [1, 2]. В сравнении с дифракционным пределом разрешающая способность крупноапертурного телескопа как правило уменьшается на порядок и более в реальных условиях турбулентной атмосферы. Современные крупноапертурные телескопы наземного базирования оснащаются специальными системами адаптивной оптики, которые предназначены для коррекции изображений. Наиболее передовые из них разрабатываются с учетом коррекции искажений волнового фронта в широком поле зрения, размер которого составляет ~120'' [3–6]. Технические

параметры и производительность таких систем зависят от вертикального распределения интенсивности оптической турбулентности и скорости ветра.

Вертикальные профили оптической турбулентности, с одной стороны, могут быть определены с использованием атмосферных моделей [1]. В этих моделях характеристики мелкомасштабной турбулентности чаще всего параметризуются через вертикальные профили метеорологических характеристик или с привлечением, например, теории подобия Монина–Обухова, наиболее полно описывающей турбулентные флуктуации над ровными площадками в приземном слое атмосферы. С другой стороны, вертикальные профили могут быть измерены с помощью стационарных или мобильных телескопов путем анализа светового поля в скрещенных оптических пучках. Наиболее известные методы измерений основаны на триангуляции локальных наклонных волнового фронта (SLODAR) [6–9], флуктуаций амплитуды световой волны (SCIDAR) [10, 11] и дифференциальных смещений центров тяжести солнечных субизображений (S-DIMM+) [12]. Для

* Артем Юрьевич Шиховцев (Ashikhovtsev@iszf.irk.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru).

выявления интенсивных турбулентных слоев и определения вертикальных профилей оптической турбулентности могут быть использованы методы, основанные на учете углового смещения Солнца по небосводу и анализе низкочастотных фазовых искажений в скрещенных оптических пучках [13, 14].

Цель настоящей работы — получение статистически репрезентативных вертикальных профилей оптической турбулентности и выявление особенностей ее вертикального распределения над Большим солнечным вакуумным телескопом (БСВТ) Байкальской астрофизической обсерватории (БАО).

Для оценки интенсивности оптической турбулентности на разных высотах в атмосфере использована структурная постоянная турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 . Отличием полученных ниже вертикальных профилей оптической турбулентности от высотных зависимостей этой величины, рассчитанных по теории, изложенной Татарским [15], является то, что C_n^2 определена с учетом параметра Фрида — одной из основных характеристик качества астрономических изображений.

Материалы и методы

Метод оценки вертикальных профилей оптической турбулентности

Для определения вертикальных профилей оптической турбулентности были использованы данные реанализа ERA5. Он содержит ассимилированные данные о температуре воздуха, трех компонентах скорости ветра и других метеорологических переменных с горизонтальным разрешением около 30 км. В расчетах мы использовали данные, представленные для изобарических поверхностей в тропосфере и нижней стратосфере.

Для оценки характеристик турбулентности в свободной атмосфере и атмосферном пограничном слое был использован подход, предложенный В.И. Татарским. В рамках представлений Татарского структурная постоянная турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха может быть параметризована следующим образом:

$$C_n^2(z) = \alpha L_0^{4/3}(z) M^2(z), \quad (1)$$

где α — численная постоянная; L_0 — внешний масштаб турбулентности; z — высота над подстилающей поверхностью

$$M(z) = \left(\frac{-AP}{T} \right) \frac{\partial \ln \theta}{\partial z}, \quad (2)$$

где M — вертикальный градиент показателя преломления воздуха, численная константа $A = 79 \cdot 10^{-6}$ К/гПа, P — атмосферное давление, θ — потенциальная температура воздуха, T — температура воздуха.

Согласно формулам (1) и (2) вертикальный профиль оптической турбулентности и конкретно C_n^2

определяется вертикальным профилем L_0 , который представляет собой противоречивую величину (в литературе она меняется от нескольких метров до километра и более). Что не вызывает сомнений, так это тот факт, что турбулентность и ее оптические характеристики существенно отклоняются от классического поведения, предсказываемого моделью Колмогорова, если диаметр телескопа сопоставим или превышает L_0 .

Необходимо подчеркнуть, что в наших расчетах используется L_0 , который ограничивает инерционный интервал со стороны низких частот в энергетическом спектре. Характерные значения L_0 изменяются от нескольких до ~ 10 м, что меньше корреляционного внешнего масштаба турбулентности Λ_0 . Масштаб Λ_0 определяется линейной корреляцией между фазовыми искажениями, формируемыми в турбулентной атмосфере. Характерный диапазон его изменений от 10 до 40 м [16].

Внешний масштаб турбулентности может быть определен через вертикальные сдвиги горизонтальных составляющих скорости ветра с постоянными коэффициентами параметризации a , b и c , d для тропосферы и стратосферы соответственно [17]:

$$\begin{cases} L_0^{4/3}(z) = 0,1^{4/3} \cdot 10^{a+bS} & (\text{тропосфера}); \\ L_0^{4/3}(z) = 0,1^{4/3} \cdot 10^{c+dS} & (\text{стратосфера}), \end{cases} \quad (3)$$

где S — вертикальный сдвиг скорости ветра; $a = 1,64$; $b = 42,0$; $c = 506$ и $d = 50$. Они изменяются в пространстве и времени и для конкретного аэропункта, как мы предполагаем, зависят от крупномасштабной структуры атмосферных движений и вклада вертикальных сдвигов скорости ветра в формирование мелкомасштабных турбулентных флуктуаций температуры и показателя преломления воздуха. При расчете L_0 в месте расположения БСВТ мы не учитывали вертикальные градиенты температуры воздуха. Это связано с тем, что данные градиентных калиброванных измерений в приземном слое атмосферы за длительные временные интервалы накоплены преимущественно по скорости ветра. В частности, для выбранного места большую роль в возбуждение крупномасштабных турбулентных флуктуаций играют скорости воздушного потока, пространственное распределение вертикальных сдвигов в условиях неоднородной орографии, в том числе, в областях над и под низкоуровневыми мезомасштабными струйными течениями.

Применение схем параметризации C_n^2 осложняется высокой изменчивостью этой характеристики. Согласно результатам, полученным при исследовании вертикальных профилей турбулентности в оптическом и миллиметровом диапазонах длин волн [18], к ключевым параметрам, влияющим на амплитуду C_n^2 , относят не только турбулентные флуктуации температуры воздуха, но и дефицит влажности воздуха, альбедо подстилающей поверхности, характеристики растительного покрова, облачность и суммарную солнечную радиацию. В условиях

ясной антициклональной погоды, когда проводятся солнечные наблюдения, C_n^2 для оптического диапазона длин волн слабо зависит от влажности воздуха. Учет влияния влажности воздуха на оптические флуктуации проявляется в основном в виде расчетных вертикальных профилей виртуальной температуры воздуха и фактически в оценке влажно-неустойчивых вертикальных градиентов температуры воздуха. Более того, вертикальные профили дисперсий турбулентных флуктуаций температуры θ' и влажности воздуха q' , а также корреляционного члена $\theta'q'$ подобны по форме друг другу [19]. Учитывая близкий характер изменений этих величин с высотой, особенно выраженный в условиях ясного неба, параметризацию C_n^2 для оптического диапазона длин волн можно выполнить по упрощенной схеме. Усредненный вертикальный профиль $C_n^2(z)$ мы предлагаем оценивать с помощью модифицированного выражения

$$C_n^2(z) = \alpha \alpha_{\text{mes}} L_0^{4/3}(z) M^2(z), \quad (4)$$

где α_{mes} — численная константа, подбираемая путем минимизации разности между оцененными (модельными) и измеренными медианными значениями параметра Фрида. Внешний масштаб турбулентности определяется путем минимизации дисперсии между значениями C_n^2 , оцененными по формуле (1), и значениями C_n^2 , определенными по данным мачтовых измерений с помощью ультразвукового анемометра (размещенного близки зеркала-сидеростата БСВТ). Важно также отметить, что период усреднения C_n^2 не должен быть слишком коротким в связи с необходимостью получения устойчивых значений коэффициентов параметризации.

С учетом данных приземных измерений L_0 может быть определен для трех атмосферных слоев:

$$L_0^{4/3}(z) = \begin{cases} 0,1^{4/3} \cdot 10^{a_t + b_t S}, & z < 1 \text{ км}; \\ 0,1^{4/3} \cdot 10^{a + b S}, & z \geq 1 \text{ км, тропосфера}; \\ 0,1^{4/3} \cdot 10^{c + d S}, & \text{стратосфера,} \end{cases} \quad (5)$$

где a_t и b_t зависят от времени. В таблице представлены коэффициенты a_t и b_t для астроплощадки БСВТ, которые по существу определяют разброс между измеренными и модельными значениями C_n^2 .

Коэффициенты параметризации a_t и b_t для астроплощадки БСВТ

Условия	a_t	b_t
Зима	3,0	1,0
Весна	1,6	4,0
Лето	1,9	8,0
Осень	1,5	2,5
Параметр Фрида > 6 см на длине волны 0,5 мкм	2,0	20
Параметр Фрида > 10 см на длине волны 0,5 мкм	1,8	40

Анализ изменений a_t и b_t для различных атмосферных условий позволяет выявить важную закономерность. С увеличением параметра Фрида

и улучшением качества солнечных изображений b_t возрастает и по величине становится ближе к коэффициенту b в формуле (3).

Результаты и обсуждение

Вертикальное распределение оптической турбулентности над БСВТ

На основе данных реанализа ERA5 модифицированным методом оценки C_n^2 для условий ясного неба был получен статистически репрезентативный вертикальный профиль оптической турбулентности над БСВТ, усредненный за период с 2012 по 2023 г. (рис. 1). Он соответствует наилучшим астрооптическим атмосферным условиям в месте расположения обсерватории. Значение C_n^2 в приземном слое атмосферы определено по данным измерений ультразвукового анемометра Метео-2, размещенного на мачте вблизи зеркала-сидеростата БСВТ. При обработке использовались ультразвуковые данные за период с 03.10.2018 г. по 20.07.2022 г. Медианное значение параметра Фрида соответствует 6,8 см для длины световой волны 0,5 мкм.

Анализ рис. 1 показывает, что оптическая турбулентность распределена с высотой неравномерно. Наибольшая ее интенсивность соответствует нижнему, более плотному слою атмосферы. До высоты примерно 800 м $C_n^2 > 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$. Второй слой с интенсивной оптической турбулентностью формируется в области крупномасштабного струйного течения на высотах 10–12 км. Стоит отметить, что в этом высотном слое наблюдаются интенсивные турбулентные флуктуации показателя преломления воздуха даже при указанном выше медианном значении параметра Фрида.

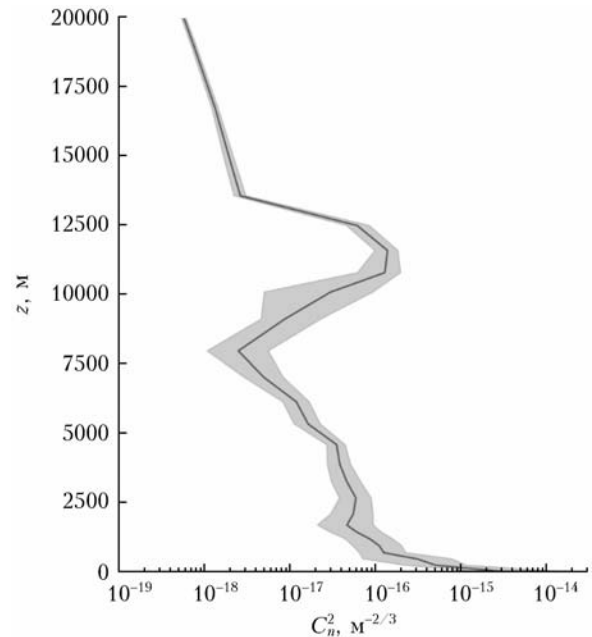


Рис. 1. Вертикальный профиль оптической турбулентности в дневное время над БСВТ (12:00 по местному времени). Здесь и далее заливкой показана область между 20-м и 80-м перцентилями

В сравнении с ранее полученными профилями [20] профиль на рис. 1 характеризуется более быстрым уменьшением интенсивности турбулентности с высотой над подстилающей поверхностью. Как следствие, уточняются расчетные значения изопланатического угла над БСВТ, которые приближаются к оценкам, полученным по данным измерений датчика волнового фронта Шека—Гартманна — одного из основных элементов макета системы адаптивной оптики БСВТ [21, 22]. Для полученного распределения оптической турбулентности с высотой, когда ожидается высокое качество солнечных изображений (при параметре Фрида более 5 см), медианное значение изопланатического угла близко к $2,0''$.

Еще один интересный результат связан с вертикальным профилем L_0 . Для БСВТ он определен с учетом:

- минимизации дисперсии между значениями C_n^2 , оцененными через вертикальные градиенты метеорологических характеристик и измеренными с помощью ультразвукового анемометра Метео-2, который установлен вблизи зеркала-сидеростата БСВТ. Варьируя коэффициенты параметризации, удается существенно уменьшить дисперсию между измеренными и модельными значениями C_n^2 ;

- согласования модельных и измеренных интегральных значений параметра Фрида (для зенита).

Рис. 2 демонстрирует сложный характер изменений L_0 с высотой над обсерваторией. Наибольшие значения масштаба соответствуют нижним слоям атмосферы. Выше уровня 400–800 м L_0 уменьшается. В окрестностях струйного течения наблюдается второй максимум. В стратосфере внешний масштаб турбулентности по амплитуде мал и практически не меняется с высотой за счет действия слабой термической устойчивости. Такой характер изменений мы связываем как с воздействием сдвиговой неустойчивости в пограничном слое атмосферы и на высоте формирования струйного течения, так и с устойчивой термической стратификацией разных слоев атмосферы, которая приводит к подавлению вертикального перемешивания воздуха и сужению инерционного интервала турбулентности. В результате происходят деформации энергетического спектра турбулентности и уменьшается ее внешний масштаб, ассоциируемый с инерционным интервалом. Анализ наших ранних микроструктурных и оптических измерений показывает, что для турбулентных флуктуаций углов прихода света интервал $-5/3$ в коротковолновом спектральном диапазоне при сильной устойчивой термической стратификации наблюдается в весьма узком спектральном диапазоне — менее 30–50 см.

С целью выявления особенностей динамики турбулентности на рис. 3 показаны вариации L_0 в приземном слое атмосферы. По оси абсцисс приведен порядковый номер дня с долей общей облачности менее 0,7. Анализ рис. 3 показывает, что в атмосфере наблюдаются разные режимы эволюции турбулентности. В холодное время года $L_0 \approx 10$ –30 м, летом он существенно уменьшается (1–4 м).

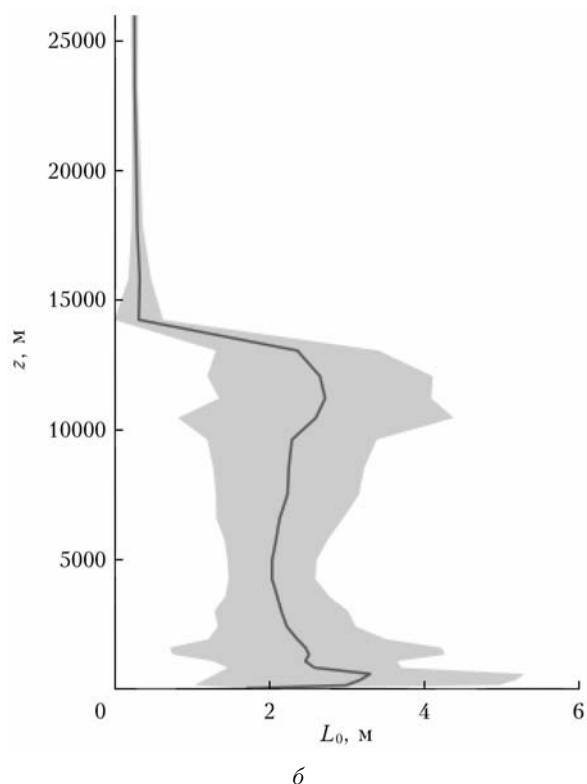
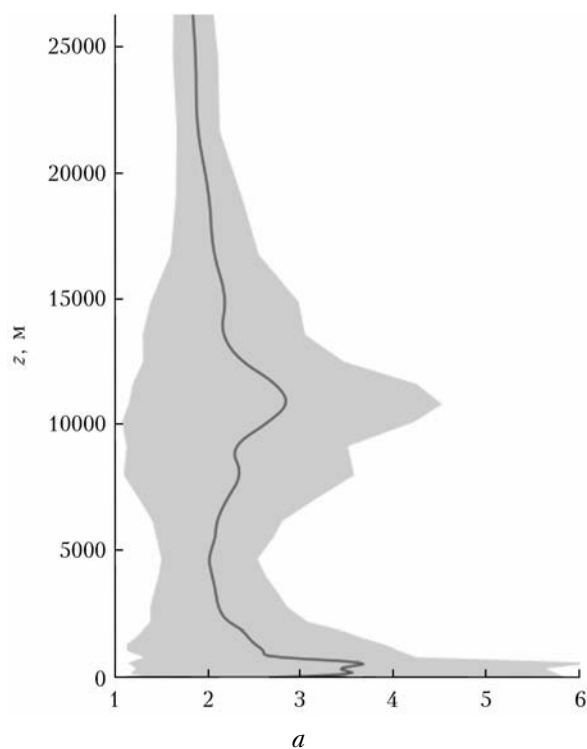


Рис. 2. Вертикальные профили внешнего масштаба турбулентности в дневное время над БСВТ (12:00 по местному времени): без учета формы профиля C_n^2 в стратосфере (а) и с учетом (б)

На рис. 4 показан характерный вертикальный профиль L_0 над БСВТ, ассоциирующийся с вертикальными сдвигами горизонтальной скорости

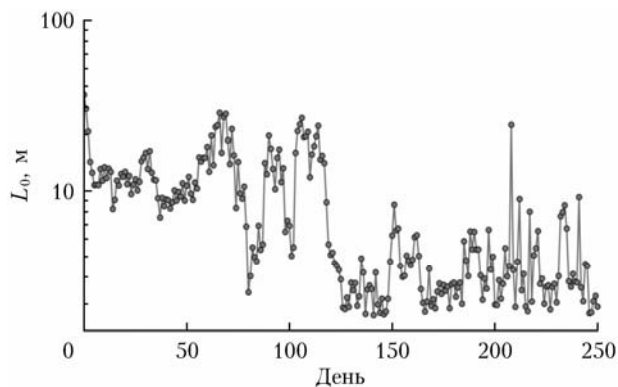


Рис. 3. Вариации внешнего масштаба турбулентности в приземном слое атмосферы над БСВТ

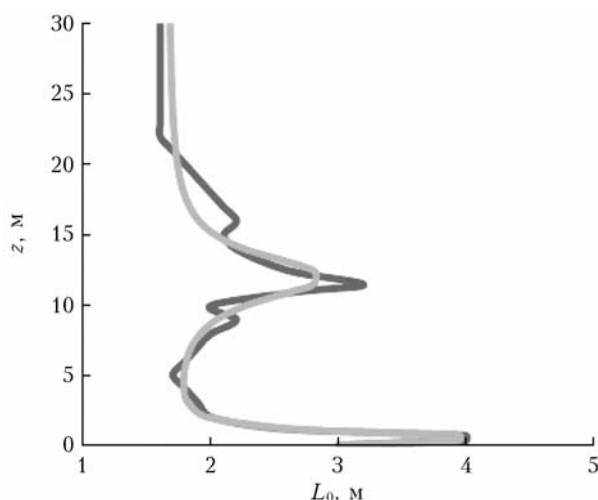


Рис. 4. Вертикальный профиль медианных значений внешнего масштаба турбулентности над БСВТ (черная кривая) и результат аппроксимации (формула (6)) (серая кривая)

ветра. Используя степенные функции, мы можем аппроксимировать вертикальный профиль внешнего масштаба для места расположения БСВТ следующим выражением:

$$L_0(z) = 1,67 + \frac{1,2}{\left(1 + \frac{z - 11500}{2000}\right)^2} + \frac{2,6}{\left(1 + \frac{z - 500}{500}\right)^2}. \quad (6)$$

На основании этого выражения вертикальный профиль $L_0(z)$ может быть определен для условий средней и слабой интегральной интенсивности турбулентности (для значений параметра Фрида большие ~ 5 см).

Рис. 4 позволяет сделать важный вывод о том, что L_0 , связанный с вертикальными сдвигами скорости ветра, меняется в очень узких пределах: от долей метра до 4–6 м. Оценки L_0 хорошо согласуются по характерному диапазону амплитудных изменений с результатами, обсуждаемыми ранее в работах [23, 24].

Полученные профили L_0 и C_n^2 могут быть использованы при моделировании влияния различных

турбулентных слоев на изопланатизм наземных оптических систем [25]. Также данные о высотных изменениях анализируемых характеристик могут быть полезны для описания развитой турбулентной диффузии примесей в атмосфере над южной частью оз. Байкал [26].

Заключение

В рамках настоящей работы усовершенствован метод оценки C_n^2 , первоначально предложенный Татарским, и получены статистически репрезентативные профили оптической турбулентности над БСВТ БАО. Для разных условий формирования турбулентности уточнены коэффициенты параметризации, которые подобраны с учетом минимизации дисперсии между измеренными и определенными через вертикальные градиенты метеорологических характеристик значениями C_n^2 . Найденные коэффициенты параметризации позволили оценить внешний масштаб L_0 , значения которого изменяются в узком физически обоснованном диапазоне линейных размеров.

Несмотря на широкое разнообразие моделей L_0 , конкретное использование этой величины при расчетах характеристик оптической турбулентности затруднительно. Трудности связаны прежде всего с широким диапазоном изменений внешнего масштаба турбулентности: от субметровых атмосферных возмущений при устойчивой термической стратификации до сотен метров и более при моделировании атмосферных флуктуаций. В практике наиболее употребительным является корреляционный внешний масштаб L_0 , обусловленный уменьшением уровня линейной корреляции между искажениями волнового фронта, его характерные значения составляют от 10 до 40 м. В то же время L_0 может использоваться как параметр, ограничивающий инерционный интервал турбулентности со стороны низких частот в энергетическом спектре. Значения L_0 изменяются от нескольких до ~ 10 м и могут быть определены путем минимизации дисперсии между измеренными и оцененными через вертикальные сдвиги скорости ветра значениями C_n^2 . Минимальному значению этой дисперсии соответствуют определенные коэффициенты параметризации, которые должны быть оценены с учетом микрометеорологических измерений, по крайней мере, для наиболее турбулизированных нижних слоев атмосферы. Уточненная модель L_0 была положена в основу методики расчета вертикальных профилей оптической турбулентности для БСВТ, с высокой точностью описывающей вариации статистик параметра Фрида.

Финансирование. Измерения и анализ приземных характеристик турбулентности выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Исследования спектрального состава турбулентности по высотам,

а также оптических искажений выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-42-00043). Результаты измерений характеристик оптических искажений получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп (<http://ckp-rf.ru/usu/200615/>).

Список литературы

1. Bi C., Qing C., Qian X., Zhu W., Luo T., Li X., Cui S., Weng N. Astroclimatic parameters characterization at lenghu site with ERA5 products // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2024. V. 527. P. 4616–4631. DOI: 10.1093/mnras/stad3414.
2. Большасова Л.А., Лукин В.П. Аналитические модели высотной зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы для задач адаптивной оптики // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 11. С. 918–925. DOI: 10.15372/AOO20161104.
3. Langlois M., Moretto G., Richards K., Hegwer S., Rimmele T. Solar multi-conjugate adaptive optics at the Dunn Solar Telescope: Preliminary results // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5490. DOI: 10.1051/ao4elt/201008002.
4. Schmidt D., Gorceix N., Goode P.R., Marino J., Rimmele T., Wöger F., Zhang X., Rigaut F., von der Lühе O. Clear widens the field for observations of the Sun with multi-conjugate adaptive optics // *Astron. Astrophys.* 2017. V. 597. L8. DOI: 10.1051/0004-6361/201629970.
5. Zhong L., Zhang L., Shi Z., Tian Y., Guo Y., Kong L., Rao X., Bao H., Zhu L., Rao C. Wide field-of-view, high-resolution solar observation in combination with ground layer adaptive optics and speckle imaging // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 637. A99. DOI: 10.1051/0004-6361/201935109.
6. Schmidt D., Berkefeld T., Heidecke F., von der Lühе O., Soltau D. Testbed for the multi-conjugate adaptive optics system of the Solar Telescope GREGOR // *Proc. SPIE*. 2009. V. 74390X. DOI: 10.1117/12.829886.
7. Butterley T., Wilson R., Sarazin M. Determination of the profile of atmospheric optical turbulence strength from SLODAR data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2006. V. 369, N 2. P. 835–845. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.10337.x.
8. Goodwin M., Jenkins C., Lambert A. Improved detection of atmospheric turbulence with SLODAR // *Opt. Express*. 2007. V. 15, N 22. P. 14844–14860. DOI: 10.1364/OE.15.014844.
9. Wilson R.W. SLODAR: Measuring optical turbulence altitude with a Shack–Hartmann wavefront sensor // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2002. V. 337, N 1. P. 103–108. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2002.05847.x.
10. Osborn J., Butterley T., Föhring D., Wilson R. Characterising atmospheric optical turbulence using stereo-SCIDAR // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 595. DOI: 10.1088/1742-6596/595/1/012022.
11. Potanin S.A., Kornilov M.V., Savvin A.D., Safonov B.S., Ibragimov M.A., Kopylov E.A., Nalivkin M.A., Shmagin V.E., Huy L.X., Thao N.T. A Facility for the study of atmospheric parameters based on the Shack–Hartmann Sensor // *Astrophys. Bull.* 2022. V. 77, N 2. P. 214–221. DOI: 10.1134/S1990341322020067.
12. Wang Z., Zhang L., Kong L., Bao H., Guo Y., Rao X., Zhong L., Zhu L., Rao C. A modified S-DIMM+: Applying additional height grids for characterizing daytime seeing profiles // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. V. 478, N 2. P. 1459–1467.
13. Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Лукин В.П., Томин В.Е. Метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 12. С. 994–1000. DOI: 10.15372/AOO20191208; Shikhovtsev A.Y., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Tomlin V.E., Lukin V.P. Method for estimating the altitudes of atmospheric layers with strong turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 3. P. 295–301.
14. Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Kiselev A.V., Kolobov D.Yu., Lukin V.P., Russkikh I.V., Shikhovtsev M.Y. Modified method to detect the turbulent layers in the atmospheric boundary layer for the Large Solar Vacuum Telescope // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 159. DOI: 10.3390/atmos12020159.
15. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
16. Maire J., Ziad A., Borgnino J., Martin F. Measurements of profiles of the wavefront outer scale using observations of the limb of the Moon // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. V. 377. P. 1236–1244. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.11681.x.
17. Dewan E., Good R., Beland R., Brown J. A Model C_n^2 (Optical Turbulence) Profiles Using Radiosonde Data MA: Phillips Laboratory, 1993. N 1121.
18. van de Boer A., Moene A.F., Graf A., Simmer C., Holtslag A.A.M. Estimation of the refractive index structure parameter from single-level daytime routine weather data // *Appl. Opt.* 2014. V. 53. P. 5944–5960. DOI: 10.1364/AO.53.005944.
19. Wang S., Wang Q., Wauer B.J., Jiang Q. Computing refractive index structure parameter C_n^2 in a numerical weather prediction model // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47, N 17. DOI: 10.1029/2020GL089168.
20. Shikhovtsev A., Kovadlo P., Lukin V. Temporal variations of the turbulence profiles at the sayan solar observatory site // *Atmosphere*. 2019. V. 10, N 9. P. 499. DOI: 10.3390/atmos10090499.
21. Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyayev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P. Development of elements for an adaptive optics system for solar telescope // *J. Appl. Remote Sens.* 2018. V. 12, N 4. P. 042403. DOI: 10.1117/1.JRS.12.042403.
22. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Большасова Л.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Чупраков С.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю. Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 11. С. 895–904. DOI: 10.15372/AOO20161101; Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bolbasova L.A., Emaleev O.N., Konyayev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Kudryashov A.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu. Adaptive optics system for solar telescope operating under strong atmospheric turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 291–299.
23. Abahamid A., Vernin J., Benkhaldoun Z., Jabiri A., Azouit M., Agabi A. Seeing, outer scale of optical turbulence, and coherence outer scale at different

- astronomical sites using instruments on meteorological balloons // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 422. P. 1123–1127. DOI: 10.1051/0004-6361:20040215.
24. *Лукин В.П.* Внешний масштаб турбулентности и его влияние на флуктуации оптических волн // *Успехи физ. наук.* 2021. Т. 191, № 3. С. 292–317. DOI: 10.3367/UFNr.2020.10.038849.
 25. *Кошкарров А.С., Мальцев Г.Н.* Исследование условий анизопланатизма наземных оптических систем с использованием моделей атмосферы // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского.* 2023. Т. 689. С. 52–59.
 26. *Molozhnikova Y.V., Shikhovtsev M.Y., Netsvetaeva O.G., Khodzher T.V.* Ecological zoning of the Baikal basin based on the results of chemical analysis of the composition of atmospheric precipitation accumulated in the snow cover // *Appl. Sci.* 2023, V. 13. DOI: 10.3390/app13148171.

A.Yu. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo. Optical turbulence vertical profiles and estimates of the turbulence outer scale above the Baykal Astrophysical Observatory.

The study of the spatiotemporal structure of optical turbulence and the development of methods for determining its characteristics at different altitudes in the atmosphere are of great importance for astronomical adaptive optics. Design of an adaptive optics system and technical characteristics of its components largely depend on optical turbulence along the line of sight a telescope. In this paper, the method for estimation of vertical profiles of the air refractive index structure characteristic is modified. Based on the ERA5 reanalysis data, this method was used to derive statistically representative vertical profiles of the air refractive index structure characteristic and the outer scale of turbulence at the Large Solar Vacuum Telescope (LSVT) site. The problem of estimating the turbulence outer scale is discussed taking into account surface mast micrometeorological measurements and optical measurements at the LSVT. The results are the basis for constructing a multi-mirror adaptive optics system for the LSVT. In particular, these profiles are important for further refinement of the optical conjugation heights. The suggested method can also be used to describe optical turbulence over other ground-based solar telescopes.