

УДК [551.551.2+520.16]:52.08

W-DIMM: ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА КРЫМСКОЙ СТАНЦИИ ГАИШ

© 2025 С. А. Потанин^{1,2,3*}, А. Ю. Шиховцев⁴, М. В. Корнилов², Е. А. Копылов³, И. А. Горбунов², А. В. Лютый², А. Д. Саввин², М. Е. Сачков³, М. В. Потанина⁵

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

³Институт астрономии Российской академии наук, 119017 Россия

⁴Институт солнечно-земной физики сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, 664033 Россия

⁵Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, Жуковский, 140180 Россия

Поступила в редакцию 21 сентября 2024 года; после доработки 11 декабря 2024 года; принята к публикации 13 декабря 2024 года

С помощью мобильного прибора W-DIMM на Крымской станции ГАИШ МГУ в течение семи ночей, с 23 по 30 июня 2024 года, определялись размеры атмосферных изображений. По мерцаниям в апертурах датчика, отдельно от полной мощности оптической турбулентности, получены оценки этой величины для высот более 500 м. Приведенные к зениту значения размеров атмосферных изображений составили $\beta_{\text{med}} \approx 1''.15$, для верхних слоев атмосферы — около $0''.28$. Сравнение размеров изображений, полученных в эти ночи на телескопах с длительными экспозициями, находится в хорошем соответствии с показаниями мобильного датчика дифференциальных дрожаний. Также получены некоторые климатические параметры как со стационарной метеостанции недалеко от точки наблюдений, так и по спутниковым данным.

Ключевые слова: атмосферные эффекты — методы: наблюдательные — методы: статистические — тестирование местоположения — качество астрономических изображений

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время сильно возрос интерес к исследованиям астроклимата в России. В основном это связано с поиском мест под новые оптические и миллиметровые телескопы (Balega et al., 2022; Shikhovtsev et al., 2020), а также с тем, что была введена в эксплуатацию новая Кавказская горная обсерватория МГУ (КГО) на Северном Кавказе (Shatsky et al., 2020). Еще до строительства обсерватории недалеко от ее предполагаемого расположения был создан астроклиматический пост, успешно работающий по сей день (Kornilov et al., 2014). Оптический телескоп диаметром 2.5 м, установленный в этой обсерватории, благодаря превосходному качеству оптики и оптомеханики (Potanin et al., 2017) позволил в полной мере реализовать

прекрасные атмосферные изображения¹, которые иногда имеют место на КГО (Antipin et al., 2015). Кроме того, активно ведутся работы по строительству нового трехметрового солнечного телескопа в обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН близ пос. Монды в Республике Бурятия (Grigoryev et al., 2020). А также планируется установка ряда радиотелескопов диаметром более 20 м, работающих в субмиллиметровом радиодиапазоне. Для последней задачи необходим особенно тщательный подбор мест с учетом количества осаждаемого водяного пара в атмосфере (Khaikin et al., 2022).

Вместе с тем поднимается вопрос о систематических измерениях астроклиматических параметров на уже работающих много лет обсерваториях, где такие измерения были сделаны довольно

¹Атмосферные изображения — степень размытия и ухудшения качества изображения астрономических объектов, вызванная турбулентностью в атмосфере Земли.

*E-mail: sr.potanin@gmail.com

давно либо вообще никогда не делались. Однако такие станции имеют развитую инфраструктуру и позволяют ввести в строй новые астрономические инструменты за гораздо более короткие сроки и с меньшими расходами, чем при строительстве новой обсерватории. Доказано, что вследствие глобальных изменений климата астроклимат в конкретной точке планеты также может изменяться (Artamonov et al., 2010; van Kooten and Izett, 2022; Volbasova and Kopylov, 2023).

Совершенствуются и методики оценки астроклимата (Копуаев et al., 2022). Если еще недавно для самых перспективных методик оценки высотного профиля турбулентности в качестве точных приемников излучения применялись фотоэлектронные умножители (Kornilov et al., 2007), то позже для этого стали использоваться ПЗС-детекторы (Guesalaga et al., 2015; Potanin et al., 2022), а сейчас внедряются более прогрессивные и скоростные CMOS-матрицы (Potanin et al., 2024). Кроме того, появилась возможность делать оценки и даже прогнозы астроклиматических параметров по спутниковым данным (Shikhovtsev et al., 2024). Иногда применение новых методик в астроклиматических измерениях приводит к переосмыслению полученных ранее результатов (Seidel et al., 2023).

В данной работе мы применили новый мобильный датчик дифференциальных дрожаний (W-DIMM), описанный нами в Potanin et al. (2024). Это модификация классического датчика дифференциальных дрожаний (Sarazin and Roddier, 1990), без телескопа. Вместо телескопа применяются две одинаковые ахроматические линзы и система небольших зеркал, которая складывает оптические пути. Оптическая схема похожа на латинскую букву «W» — отсюда и название. Только за 2024 год с W-DIMM проводились выездные работы еще как минимум в трех кампаниях по изучению астроклимата. Одна из серий измерений размеров атмосферных изображений была выполнена на Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ, поселок Научный, Бахчисарайский район, Крым, Россия. О результатах данного исследования и пойдет речь далее.

В программное обеспечение прибора было внесено существенное усовершенствование, позволяющее по мерцаниям в апертурах отдельно оценивать вклад турбулентных слоев атмосферы, находящихся выше 500 м над точкой наблюдения. Таким образом, стало возможным отделить приземный слой (0–500 м).

2. ОЦЕНКА ВКЛАДА СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЫ

Для оценки мощности оптической турбулентности (ОТ) в верхних слоях атмосферы применялась

классическая методика, построенная на колмогоровской модели ОТ и френелевской теории распространения волн в атмосфере (Tokovinin and Kornilov, 2002). В приборе W-DIMM мы имеем две круглые апертуры диаметром D , центры которых разнесены на расстояние d . В конкретной реализации прибора, с которым проводились измерения, максимальный диаметр субапертур $D_{\max} = 68$ мм (его можно уменьшать), а фиксированное расстояние (база) $d = 300$ мм. Индекс мерцания s в одной апертуре определяется формулой

$$s = \int_0^{H_{\max}} W(D, h) C_n^2(h) dh, \quad (1)$$

где $C_n^2(h)$ — высотный профиль мощности ОТ, $W(D, h)$ — весовая функция для круглого отверстия диаметром D , H_{\max} — верхняя граница турбулентной атмосферы. В то же время данный индекс является наблюдаемой величиной:

$$s = \text{var} \left[\frac{I_i}{\langle I \rangle} \right], \quad (2)$$

здесь I_i — непрерывный ряд фотоотчетов в субапертуре диаметром D , а $\langle I \rangle$ — среднее значение этого же ряда. В приборе W-DIMM значения I_i получаются путем апертурной фотометрии изображений звезды вместе с определением ее фотоцентра. Стоит помнить о том, что значения индекса мерцаний s должны быть скорректированы на дисперсию шумов (фотонного и других), а также приведены к нулевой экспозиции (Tokovinin, 2021).

Таким образом, зная весовую функцию $W(D, h)$ и толщину атмосферы H_{\max} , мы (в теории) можем получить среднюю по высоте мощность оптической турбулентности $\langle C_n^2 \rangle$. Весовая функция для круглого отверстия с известной спектральной кривой пропускания может быть вычислена аналитически (Kornilov et al., 2021) (фактически, конечно, вычисляется численно). График весовой функции для круглого отверстия диаметром 50 мм показан на рис. 1.

В приборе W-DIMM мы имеем оценку полной мощности ОТ на вертикальной трассе по дифференциальным дрожаниям. Если условно разделить атмосферу на два слоя — приземный (высоты $0-h_0$) и свободный (высоты h_0-H_{\max}) — и ввести две величины удельной мощности (на единицу длины) ОТ на этих высотах (C_{ng}^2 и C_{nf}^2), то можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} s = C_{ng}^2 \int_0^{h_0} W(D, h) dh + C_{nf}^2 \int_{h_0}^{H_{\max}} W(D, h) dh \\ \int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) dh = C_{ng}^2 h_0 + C_{nf}^2 (H_{\max} - h_0), \end{cases} \quad (3)$$

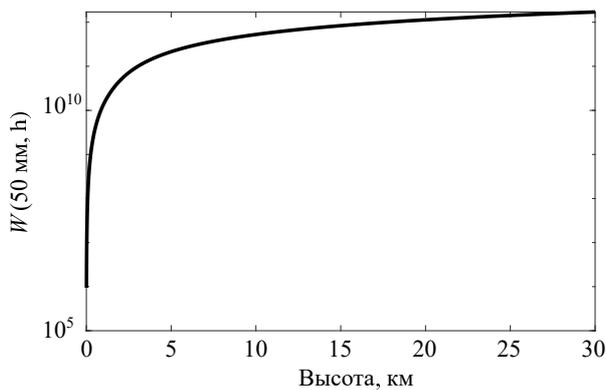


Рис. 1. Весовая функция индекса мерцаний для круглого отверстия $D = 50$ мм.

Таблица 1. Значения размеров атмосферных изображений за весь период наблюдений

Ночь, июнь 2024	Медианные значения β , угл. сек	
	Полное	Верхнее
22–23	1.04	0.25
23–24	0.99	0.28
24–25	1.20	0.30
25–26	1.20	0.50
26–27	1.08	0.26
27–28	1.09	0.41
28–29	1.29	0.39
Все ночи	1.15	0.28

где h_0 — условная граница разделения приземного слоя и свободной атмосферы. Для общности мы выбрали величину $h_0 = 0.5$ км, так же, как это сделано в приборе MASS-DIMM (Kornilov et al., 2007), поскольку дисперсия дифференциальных дрожаний дает оценку интегральной мощности турбулентности на вертикальной трассе (связь с параметром Фрида r_0 формула (4)). Мы предполагаем, что чувствительность нашего прибора слабо зависит от высоты турбулентных слоев ввиду своих геометрических параметров (см. Kornilov and Safonov, 2019). Диаметр субапертур W-DIMM ограничен до $D = 50$ мм, база составляет $d = 300$ мм:

$$r_0 = \left[0.423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}. \quad (4)$$

Система линейных уравнений с двумя неизвестными (3) может быть легко решена аналитически, однако стоит заметить, что весовая функция $W(50 \text{ мм}, h)$ очень быстро меняется в пределах

высот 0–0.5 км (см. рис. 1), поэтому в первом уравнении коэффициент при C_{ng}^2 сильно отличается от коэффициента при C_{nf}^2 . Действительно,

$$\frac{\int_0^{0.5} W(50 \text{ мм}, h) dh}{\int_{0.5}^{H_{\max}} W(50 \text{ мм}, h) dh} < 3 \times 10^{-5}, \quad (5)$$

в то время как удельные мощности ОТ имеют гораздо меньшее различие (максимум три порядка). Поэтому в первом приближении можно оценить удельную мощность ОТ в свободной атмосфере прямо по индексу мерцаний:

$$C_{nf}^2 \approx s \times \left[\int_{0.5}^{H_{\max}} W(50 \text{ мм}, h) dh \right]^{-1}. \quad (6)$$

Далее остается рассчитать соответствующее значение параметра Фрида для свободной атмосферы r_{0f} и значение размера атмосферных изображений β_f . Мы опустили тут аспект приведения конечного результата к зениту, однако заметим, что для оценки вклада свободной атмосферы эта операция не сводится к простому домножению результатов на функцию зенитного расстояния. Надо учитывать, что при наблюдениях на значительных зенитных расстояниях вклад в мерцания начинают вносить слои, которые фактически находятся на высотах менее h_0 от поверхности, поэтому в коррекции нуждаются также пределы интегрирования весовой функции.

3. НАБЛЮДЕНИЯ

Тестовые наблюдения с мобильным W-DIMM проводились на Крымской астрономической станции ГАИШ (КАС ГАИШ), поселок Научный Бахчисарайского района Крыма, в период 22–29 июня 2024 года. Все семь ночей наблюдений были ясными и почти безветренными. Прибор находился на высоте около 1.5 м от поверхности Земли, на траве, вдали от асфальтовых покрытий. Географические координаты места наблюдения: $44^\circ 43' 47.8''$ с. ш. $34^\circ 00' 56''$ в. д. Высота над уровнем моря: 590 м. Специально написанная программа реализовывала изложенное ранее определение размеров изображений в свободной атмосфере (выше 0.5 км) в режиме реального времени. Записи для ночей с самыми лучшими и самыми худшими атмосферными изображениями показаны на рис. 2. Медианные за ночь и итоговые значения размеров атмосферных изображений показаны в таблице 1. В КАС ГАИШ все эти ночи проводились

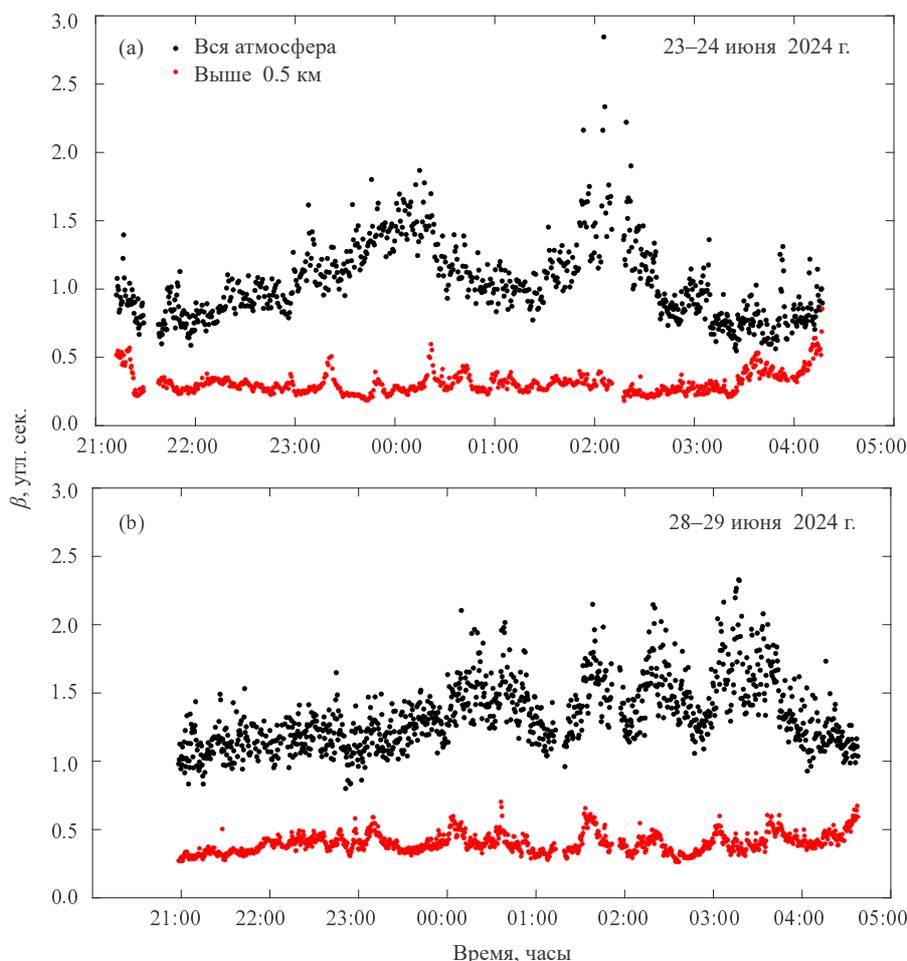


Рис. 2. Измерения для двух ночей с самыми лучшими медианными изображениями (а) и самыми худшими (б). Время местное.

астрономические наблюдения. На ближайшем телескопе к месту расположения W-DIMM (Zeiss-600 N2), при фотометрических ПЗС-наблюдениях звезд, размеры атмосферных изображений звезд на длительных экспозициях в спектральной полосе V находились в хорошем согласии с нашими измерениями. Стоит заметить, что указанный телескоп расположен в низком куполе, без заметного подъема над поверхностью Земли, так что разность высот между ним и W-DIMM составляла не более 2 м.

4. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ МЕТЕОДААННЫЕ

На территории Крымской астрофизической обсерватории имеется метеостанция, расположенная на расстоянии 200 м от точки наших наблюдений. Метеостанция находилась выше места расположения W-DIMM приблизительно на 20 м. Мы приводим некоторые данные, касающиеся температуры, атмосферного давления, влажности, скорости и направления ветра, для указанных выше дат наблюдений (см. таблицу 2). Кроме одного обстоятельства — резкого ухудшения качества атмосферных

изображений ночью 28–29 июня, которое может быть связано с изменением направления ветра с ЮЮЗ на ССВ, — других корреляций с метеопараметрами не просматривается. Пример зависимости размеров атмосферных изображений от скорости ветра показан на рис. 3. Вычисленный коэффициент корреляции по этим данным не превышает 0.1.

5. СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ РЕАНАЛИЗА

С использованием свободно распространяемых данных реанализа ERA-5 и подхода, описанного в работе Shikhovtsev et al. (2024), для места расположения п. Научный были восстановлены вертикальные профили ОТ с 00^h по 06^h местного времени за ночи с 23 по 29 июня 2024 г. В рамках этого подхода структурная постоянная турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 оценивалась для доступных уровней высот с использованием внешнего масштаба атмосферной турбулентности L_0 и вертикального градиента показателя преломления воздуха M :

$$C_n^2(z) = \alpha L_0(z)^{4/3} M^2(z), \quad (7)$$

Таблица 2. Средние за ночь значения некоторых метеорологических параметров

Ночь, июнь 2024 г.	Средние значения параметров с 21:00 по 5:00			
	Температура, °С	Давление, мм рт. ст.	Влажность, %	Скорость ветра, м с ⁻¹ , направление
22–23	19.3	708.9	63.2	1.4, Ю
23–24	20.8	708.3	59.4	1.2, Ю
24–25	20.6	708.5	66.9	3.4, ЮЗ
25–26	17.4	709.6	80.8	2.3, ЮЗ
26–27	16.5	710.9	79.8	1.9, ЮЮЗ
27–28	19.6	709.6	54.0	1.5, Ю
28–29	19.0	709.4	54.8	2.3, ССВ

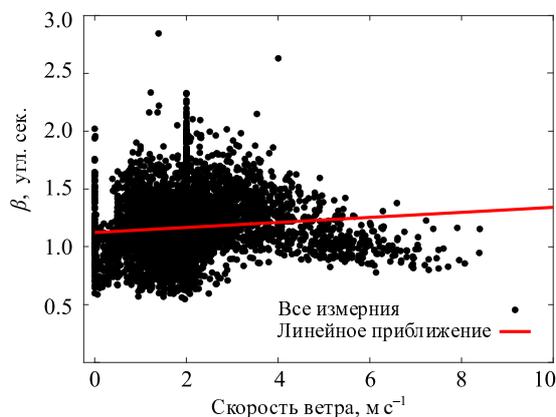


Рис. 3. Зависимость размеров атмосферных изображений от скорости ветра.

где α представляет собой численную константу, равную 2.8.

Вертикальный градиент $M(z)$ связан с градиентом натурального логарифма потенциальной температуры воздуха $\frac{\partial \ln \theta}{\partial z(z)}$:

$$M = \left(\frac{-79 \times 10^{-6} P}{T} \right) \frac{\partial \ln \theta}{\partial z}. \quad (8)$$

В вышеприведенном выражении используются следующие обозначения: P — атмосферное давление, T — температура воздуха на некоторой высоте. Значения потенциальной температуры определялись согласно выражению

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286}. \quad (9)$$

Использование подхода для оценки ОТ на основе метеорологической информации сопряжено с определенными трудностями. Прежде всего, профиль ОТ в сильной степени зависит от высотной

модели изменений внешнего масштаба атмосферной турбулентности. В настоящем исследовании мы аппроксимировали внешний масштаб турбулентности через вертикальные градиенты горизонтальных составляющих скорости ветра u и v :

$$L_0^{4/3} = \begin{cases} 0.1^{4/3} \times 10^{a+bS} & (\text{тропосфера}) \\ 0.1^{4/3} \times 10^{c+dS} & (\text{стратосфера}) \end{cases}, \quad (10)$$

где вертикальные градиенты горизонтальных составляющих скорости ветра определяются для каждой пары двух смежных высотных уровней, доступных из реанализа ERA-5, по соотношению:

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{0.5}. \quad (11)$$

Для некоторых благоприятных атмосферных условий обычно принимают некоторые стандартные значения коэффициентов параметризации. В частности, коэффициенты для тропосферы $a = 1.64$ и $b = 42$, для стратосферы $c = 0.506$ и $d = 50$. На практике использование таких значений коэффициентов параметризации дает смещенные по амплитуде оценки C_n^2 для разных высотных уровней. Изопланатический угол на длине волны 500 нм, соответствующий расчетному профилю ОТ, часто уменьшается до значений 0''8 и менее. Такие величины, особенно для набора вертикальных профилей ОТ за некоторый продолжительный временной период, не являются физическими, тем более на фоне низких измеряемых значений β . С целью уточнения характеристик C_n^2 коэффициенты параметризации, с одной стороны, выбирались путем приближения расчетного среднего размера атмосферных изображений (β) к измеренному. С другой стороны, коэффициенты параметризации корректировались с учетом диапазона изменений внешнего масштаба турбулентности в приземном слое атмосферы за весь рассматриваемый период. В частности,

предполагалось, что с вероятностью 95% расчетные значения внешнего масштаба турбулентности в приземном слое атмосферы должны находиться в пределах от 1 до 5 м. При больших значениях внешнего масштаба турбулентности значения C_n^2 , как и их разброс по амплитуде, существенно завышаются, во временном ряду появляются флуктуации с значениями C_n^2 , превышающими средние максимальные значения этой величины. Повторяемость ситуаций со значениями внешнего масштаба турбулентности менее 1 м также низка. Помимо ограничения, связанного с диапазоном изменений значений внешнего масштаба турбулентности, мы использовали оценки коэффициентов параметризации, найденные ранее путем сопоставления приземных измеренных и модельных значений C_n^2 в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа. По результатам измерений показано, что коэффициенты параметризации изменяются в зависимости от усредненных во времени значений параметра Фрида (связанного с β). Так, для условий, когда наблюдается высокое и среднее качество изображений, а параметр β составляет менее $1''5$, значение коэффициента a , определяющее некоторое «граничное» значение внешнего масштаба интенсивной турбулентности, не должно превышать 1.7.

Таким образом, были подобраны оптимизированные значения коэффициентов параметризации a и b для расчета внешнего масштаба турбулентности, их значения составили 1.41 и 30 соответственно. Вертикальный профиль ночных значений структурной характеристики турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха над поселком Научный, усредненный за период с 23 по 29 июня 2024 г., показан на рис. 4. Анализ вертикального распределения оптической турбулентности позволяет выделить несколько турбулентных слоев. Наиболее интенсивный турбулентный слой формируется вблизи земной поверхности, значения C_n^2 в этом слое быстро уменьшаются с высотой. Второй турбулентный слой формируется на высотах 11 000–12 000 м над подстилающей поверхностью, в окрестностях крупномасштабного струйного течения. Знание C_n^2 на этих высотах необходимо при расчетах изопланатического угла атмосферы. Локальный максимум в профиле соответствует турбулентному слою на высоте около 1500 м; развитость турбулентности в этом слое, вероятно, определяется действием локальных факторов динамической природы. В целом вертикальный профиль демонстрирует типичные особенности изменений C_n^2 с высотой. Однако диапазон вариаций C_n^2 достаточно узок, особенно выше 8000 м, в пределах верхней тропосферы — стратосферы. Расчетные медианные значения β во всем слое

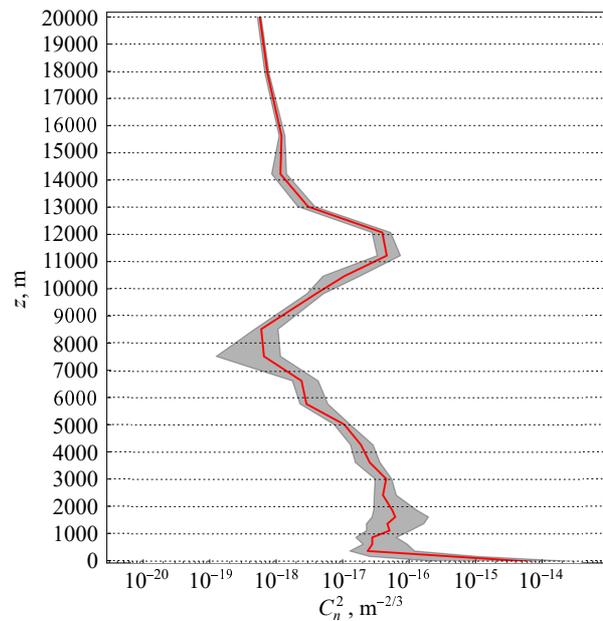


Рис. 4. Вертикальный профиль ночных значений структурной характеристики турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха над поселком Научный, усредненный за период с 23 по 29 июня 2024 г. Границы серой заливки соответствуют 25 (слева) и 75 (справа) перцентильям.

атмосферы и внешнего масштаба турбулентности в приземном слое атмосферы были оценены $1''33$ и 3.7 м соответственно. Измеренное медианное значение β ниже расчетной величины. Предположительно, этот факт связан с ограничением вертикального разрешения реанализа Era-5, особенно в нижней части атмосферного пограничного слоя. В частности, используя более тонкий пограничный слой атмосферы в ночное время, возможно приблизить расчетное значение β к измеренному.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе демонстрируется возможность получения данных о мощности оптической турбулентности в слоях атмосферы, находящихся выше 500 м от точки наблюдения, вопреки распространенному мнению, что прибор W-DIMM позволяет оценивать только размеры атмосферных изображений (Griffiths et al., 2024). Более точно это можно сделать с учетом модельного вертикального профиля оптической турбулентности. Полученные данные на Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ удовлетворительно совпадают с высотными профилями ОТ реанализа ERA-5. При этом измерения атмосферного размера изображений позволили нам уточнить коэффициенты, используемые при моделировании оптической турбулентности по метеорологическим данным. Кроме того, получены первые оценки астроклимата в этой

обсерватории современными методами. Хотя кампания продолжалась недолго, измерения показали неплохое качество изображений, которое подтверждалось непосредственными наблюдениями звезд на 600-мм телескопе. В дальнейшем планируется установка на КАС ГАИШ МГУ стационарного астроклиматического поста с возможностью восстановления высотного профиля оптической турбулентности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам КАС ГАИШ МГУ Т. Р. Ирсамбетовой и В. Г. Метлову. Раздел 5 выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Методика определения оптической турбулентности апробирована с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп (<http://ckp-rf.ru/usu/200615/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Раздел 3 выполнен за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00041.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Antipin, A. Belinski, A. Cherepashchuk, et al., *Information Bulletin on Variable Stars* **6126**, 1 (2015). DOI:10.48550/arXiv.1412.7661
2. B. P. Artamonov, V. V. Bruevich, A. S. Gusev, et al., *Astronomy Reports* **54** (11), 1019 (2010). DOI:10.1134/S1063772910110077
3. Y. Y. Balega, D. K.-S. Bataev, G. M. Bubnov, et al., *Doklady Physics* **67**, 1 (2022). DOI:10.1134/S1028335822010013
4. L. A. Bolbasova and E. A. Kopylov, *Atmosphere* **14** (8), id. 1264 (2023). DOI:10.3390/atmos14081264
5. R. Griffiths, L. Bardou, T. Butterley, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **529** (1), 320 (2024). DOI:10.1093/mnras/stae434
6. V. Grigoryev, M. Demidov, D. Kolobov, et al., *Solar-Terrestrial Physics* **6** (2), 14 (2020). DOI:10.12737/stp-62202002
7. A. Guesalaga, J. Osborn, M. Sarazin, et al., in *Proc. Fourth AO4ELT Conf. on Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes IV (AO4ELT4), UCLA Conference Center, 2015*, p. E5 (online at <https://escholarship.org/uc/item/8w80k9sp>) DOI:10.20353/K3T4CP1131545
8. V. B. Khaikin, A. Y. Shikhovtsev, A. P. Mironov, and X. Qian, in *Proc. All-Russian Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations-2022 (MUTO2022)*, Nizhny Arkhyz, Russia, 2022 (online at <https://pos.sissa.it/425/072/pdf>).
9. V. Kornilov and B. Safonov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (1), 1273 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1783
10. V. Kornilov, B. Safonov, and M. Kornilov, *J. Optical Society of America A* **38** (9), 1284 (2021). DOI:10.1364/JOSAA.420572
11. V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126** (939), 482 (2014). DOI:10.1086/676648
12. V. Kornilov, A. Tokovinin, N. Shatsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382** (343), 1268 (2007). DOI:10.1111/j.1365-2966.2007.12467.x
13. S. A. Potanin, I. A. Gorbunov, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Reports* **61** (8), 715 (2017). DOI:10.1134/S106377291707006X
14. S. A. Potanin, E. A. Kopylov, and A. D. Savvin, *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 350 (2024). DOI:10.1134/S1990341323600424
15. S. A. Potanin, M. V. Kornilov, A. D. Savvin, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (2), 214 (2022). DOI:10.1134/S1990341322020067
16. M. Sarazin and F. Roddier, *Astron. and Astrophys.* **227** (1), 294 (1990).
17. J. V. Seidel, A. Otarola, and V. Théron, *Atmosphere* **14** (10), 1511 (2023). DOI:10.3390/atmos14101511
18. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 127–132 (IP Reshenilenko P. A., Pyatigorsk, 2020).
19. A. Y. Shikhovtsev, P. G. Kovadlo, and A. V. Kiselev, *Solar-Terrestrial Physics* **6**, 102 (2020). DOI:10.12737/stp-61202012
20. A. Y. Shikhovtsev, C. Qing, E. A. Kopylov, et al., *Remote Sensing* **16** (12), id. 2102 (2024). DOI:10.3390/rs16122102
21. A. Tokovinin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **502** (1), 794 (2021). DOI:10.1093/mnras/staa4049
22. A. Tokovinin and V. Kornilov, *ASP Conf. Ser.* **266**, 104 (2002).
23. M. A. M. van Kooten and J. G. Izett, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **134** (1039), id. 095001 (2022). DOI:10.1088/1538-3873/ac81ec
24. P. A. Konyaev, V. P. Lukin, V. V. Nosov, et al., *Atmospheric and Oceanic Optics* **35** (3), 311 (2022). DOI:10.15372/AOO20211111

W-DIMM: Test Measurements of Optical Turbulence Parameters at the Crimean Station of Sternberg Astronomical Institute

S. A. Potanin^{1,2,3}, A. Yu. Shikhovtsev⁴, M. V. Kornilov², E. A. Kopylov³, I. A. Gorbunov², A. V. Lyuty²,
A. D. Savvin², M. E. Sachkov³, and M. V. Potanina⁵

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

³Institute of Astronomy, Russian Academy of the Sciences, Moscow, 119017 Russia

⁴Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

⁵N. E. Zhukovskii Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskii, 140180 Russia

A mobile W-DIMM device was used to measure seeing at the Crimean station of Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University over seven nights, from June 23 to 30, 2024. Seeing estimates for altitudes greater than 500 m were inferred from scintillations in the sensor apertures separate from the total optical turbulence power. The zenith-adjusted seeing values were $\beta_{\text{med}} \approx 1''15$, the corresponding seeing for the upper atmosphere was found to be of about $0''28$. A comparison of the seeing estimates obtained on these nights at telescopes with long exposures agrees well with the readings of the mobile differential image motion monitor. Some climatic parameters were also obtained both from a stationary weather station near the observation point and from satellite data.

Keywords: *atmospheric effects—methods: observational—methods: statistical—site testing—astronomical seeing*