

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 535.36

Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. II. Оптические измерения уровня турбулентности

А.Г. Борзилов, П.А. Коняев, В.П. Лукин[✉], Е.Л. Соин*

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

Поступила в редакцию 1.03.2023 г.;
после доработки 14.04.2023 г.;
принята к печати 15.05.2023 г.

Настоящая публикация является продолжением статьи «Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. I. Акустические измерения уровня турбулентности и средней скорости ветра». Она посвящена результатам оптических измерений турбулентности атмосферы на протяженных атмосферных трассах и их сравнению с данными одновременных акустических измерений с помощью метеостанции АМК-03. Определены эффективные средние по трассе распространения оптического излучения значения параметров турбулентности и связанные с ними радиусы когерентности оптических волн, распространяющихся через атмосферу.

Ключевые слова: турбулентность, акустические и оптические волны, распространение, горизонтальные трассы; turbulence, acoustic and optical waves, propagation, horizontal path.

Введение

Как известно, атмосфера существенно влияет на распространение оптического излучения. Турбулентные флуктуации воздуха приводят к значительным случайным искажениям поля оптической волны. Прогноз влияния турбулентной атмосферы на характеристики излучения необходим при решении многих задач атмосферной оптики. Например, качество оптических изображений в наземных астрономических неадаптивных телескопах определяется в основном атмосферной турбулентностью. Турбулентность вносит искажения в фазовый фронт световой волны, распространяющейся от внеатмосферного источника. Случайные искажения фронта, поперечные масштабы которых превышают диаметр приемника, вызывают смещение (дрожание) изображения как целого [1, 2]. Искажения меньших масштабов приводят к разрушению внутренней структуры изображения. В астрономической практике фактором, вносящим наибольшую погрешность в результаты наблюдений, является дрожание изображений.

Цель настоящей работы – оценка уровня турбулентности на неоднородных атмосферных трассах различной протяженности с использованием нескольких измерителей уровня турбулентности, разработанных в Институте оптики атмосферы СО РАН.

Приборы и методы

Оптические измерители уровня турбулентности

Для оценки атмосферной турбулентности на горизонтальных трассах различной протяженности были использованы три различных измерителя [2–5] и сертифицированная акустическая метеостанция АМК-03. Кратко опишем эти оптические приборы.

В качестве *первого прибора* мы использовали макет [5] фотоэлектрического дифференциального измерителя дрожания изображения оптического источника излучения ДИТ-М, который построен на базе малого астрономического телескопа Celestron. Фотоприемником в ДИТ-М служит видеокамера МАКО, обработка данных выполняется с помощью программы, установленной на ноутбуке. На входной апертуре телескопа Celestron устанавливается маска с двумя разнесенными отверстиями, тем самым в измерителе ДИТ-М формируются две субапертуры. Разделение формируемых этими субапертурами изображений возможно только вне фокальной плоскости: за или перед фокусом. Измеритель фиксирует значение интегрального уровня турбулентности из данных дисперсии разности положения центров тяжести двух отдельных изображений входных субапертур [2]. В этой разработке используется корреляционный алгоритм определения центра тяжести изображения, который позволяет измерить уровень турбулентности на более протяженных трассах по сравнению с уже существующими приборами, например измерителем ДИТ-2010 [4].

* Александр Григорьевич Борзилов (alex.borzilov@mail.ru); Петр Алексеевич Коняев (petrkonyaev@gmail.com); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Егор Леонидович Соин (sel@iao.ru).

Предварительно ДИТ-М был испытан [5] в измерениях параметров открытой атмосферы на горизонтальной трассе протяженностью 110 м в г. Томске. Результаты доказали правильность работы измерителя. Внешний вид прибора показан на рис. 1.



Рис. 1. Измеритель ДИТ-М

Второй оптический прибор – дифференциальный измеритель турбулентности ДИТ-2010, который реализован на базе зеркально-линзового телескопа ТАЛ-200К [3, 4, 6]. В этом высокоточном активном оптическом измерителе турбулентности применяется лазерная подсветка. Он может быть использован как для контроля текущих значений структурного параметра турбулентности атмосферы, так и для оценки влияния турбулентности на работу различных оптических устройств. Прибор позволяет определять уровень турбулентности на различных атмосферных трассах, в том числе с целью оценки пригодности атмосферной трассы для проведения оптических наблюдений. Физические основы оптического метода, применяемого для измерения параметров атмосферной турбулентности, подробно изложены в [3–6]. ДИТ-2010 состоит из источника лазерного излучения, который устанавливается в начале атмосферной трассы, и приемного устройства – в конце. Перед объективом телескопа ТАЛ-200К симметрично относительно центра расположена маска с двумя входными субапертурами, в которых установлены оптические клинья с углом порядка 80 угл. с. В итоге практически в фокальной

плоскости телескопа формируются два разнесенных изображения источника. Дополнительная оптическая система переносит эти дифракционные изображения лазерного источника из плоскости изображения объектива телескопа в плоскость матрицы видеокамеры. Цифровая видеокамера Prosilica GE680 регистрирует распределение освещенности в плоскости изображения в режиме до 200 кадров/с. Оперативные вычисления параметра атмосферной турбулентности производятся на основе измерения угловых смещений центров тяжести и расчета дисперсии разности угловых смещений этих двух изображений. Определение параметра атмосферной турбулентности из дисперсии разностного сигнала позволяет исключить влияние инструментальных дрожаний изображения. Основной метрологической характеристикой дифференциального измерителя турбулентности является угловой масштаб элемента ПЗС-матрицы видеокамеры, с помощью которой регистрируются угловые смещения изображений. На рис. 2 показана приемная часть измерителя ДИТ-2010 с вычислителем на основе ноутбука.

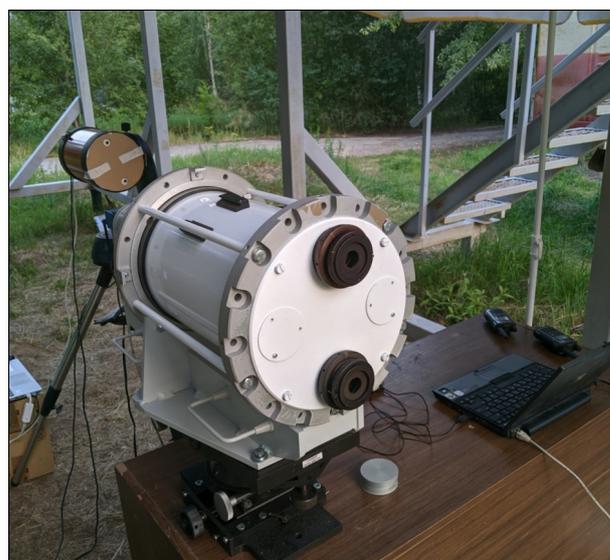


Рис. 2. Приемное устройство дифференциального измерителя турбулентности ДИТ-2010

Для расчетов структурной характеристики показателя преломления атмосферы C_n^2 использовалась зависимость, связывающая дисперсию разности дрожания двух изображений, формируемых вблизи фокуса телескопа ТАЛ-200К, и параметры оптического инструмента: размер субапертур, расстояние между субапертурами, фокусное расстояние, размер пикселя видеокамеры.

Среднее по трассе значение структурной постоянной показателя преломления ($m^{-2/3}$) рассчитывается по формуле [3, 4]:

$$C_n^2 = 0,0463 \frac{\sigma_l^2 S^2}{D^{-1/3} \left[1 - 0,564 \left(\frac{d}{D} \right)^{-1/3} \right] L}, \quad (1)$$

где σ_l^2 — дисперсии разности измеряемых угловых смещений двух изображений в направлении разности входных субапертур, пиксель в квадрате; S — угловой масштаб пикселя, рад/пиксель; D — диаметр входных субапертур, мм; d — расстояние между центрами входных субапертур, мм; L — длина трассы, м.

Диапазон измеряемых значений структурной постоянной показателя преломления рассчитывался на основе выводов теории распространения волн в атмосфере [1, 6, 7]. Как показали многочисленные лабораторные и натурные испытания, рабочий диапазон измеряемых значений равен $6,8 \cdot 10^{-16} \div 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$. Наиболее точные измерения турбулентности с помощью ДИТ-2010 можно обеспечить на трассах протяженностью 100–200 м при работе в условиях приземного слоя атмосферы. Использование в ДИТ-2010 алгоритма скользящего интервала усреднения длительностью 60 с позволяет измерять C_n^2 с шагом в 1 с в течение заданного пользователем цикла измерения.

Третий оптический измеритель турбулентности атмосферы — это датчик волнового фронта (ДВФ) Шэка–Гартмана [2, 7, 8], работающий на базе телескопа Ньютона. Он входит в состав макета фазовой системы адаптивной оптики и работает на длинах волн 1,064 и 0,532 мкм. Оптическая часть датчика Шэка–Гартмана состоит из оптического растра, представляющего собой матрицу дифракционных микролинз, и высокоразрешающей видеокамеры, установленной в плоскости регистрации изображения этого растра. Оптический растр, устанавливаемый на входной апертуре видеокамеры, делит ее апертуры на матрицу (размерности 20×20) субапертур [9]. С помощью видеосигнала с камеры для каждой субапертуры определяются смещения энергетических центров тяжести фокальных пятен в плоскости регистрации, которые выражаются через разности их координат. Программное обеспечение ДВФ было дополнено функцией измерения уровня турбулентности [8–10]. ДВФ обеспечивает быстрое действие выше 200 Гц при числе субапертур в микрорастре 20×20 , минимальное измеряемое значение параметра Фрида 1 см.

Все используемые в экспериментах оптические измерители работают по технике «на просвет», оборудованы лазерами на длинах волн 0,532 и 0,630 мкм и предназначены для трассовых высокоточных измерений уровня турбулентности. Лазеры были установлены на штативах и формировали пучки оптического излучения на атмосферных горизонтальных трассах различной протяженности — от 100 до 600 м.

Таким образом, в трех различных оптических измерителях оперативные вычисления уровня атмосферной турбулентности производятся на основе измерений смещений изображений, сформированных с использованием нескольких входных субапертур. В измерителях ДИТ-2010 и ДИТ-М используются две субапертуры, а в ДВФ — матрица субапертур размерностью 20×20 .

Кроме оптических измерителей в экспериментах участвовала ультразвуковая автономная метеорологическая станция АМК-03, которая определяла статистические характеристики атмосферной турбулентности и метеорологических условий [11]. Данные, полученные с ее помощью, представлены в [12]. Станция АМК-03 состоит из акустического ультразвукового термоанемометра ДСВ-16, датчика давления влажности ДДВ-12, блока питания БПН-52, комплекта соединительных информационных кабелей, метеорологической мачты (секционная, разборная) высотой до 4 м с комплектом крепежной арматуры, переносного компьютера (ноутбук), аккумуляторного источника питания.

Результаты и обсуждение

Структурная характеристика показателя преломления атмосферы определяет уровень оптической турбулентности атмосферы в инерционном интервале пространственных масштабов неоднородностей показателя преломления воздуха и практически все статистические характеристики оптического излучения в атмосфере [1]. На рис. 3 и 4 изображены гистограммы, показывающие наиболее вероятное значение C_n^2 на атмосферной трассе 100 и 200 м по данным измерений ДИТ-2010. Кривые на рисунках соответствуют поведению накопленной вероятности.

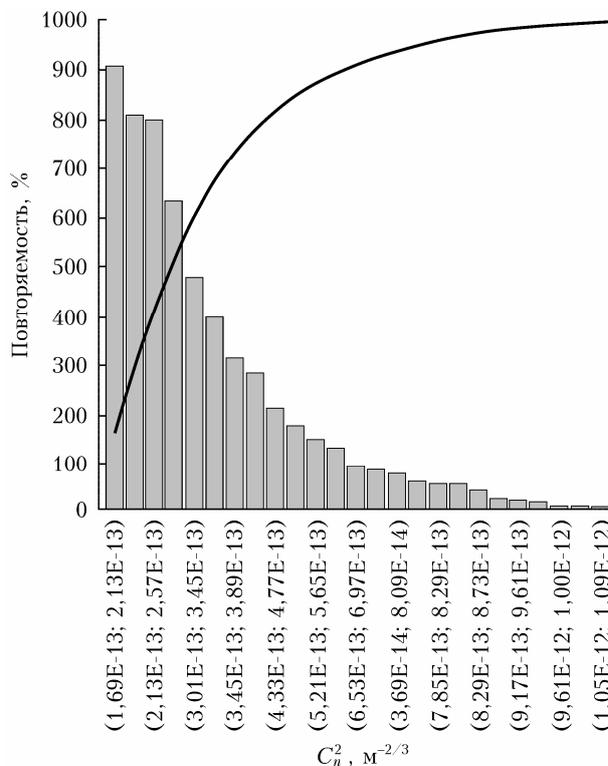


Рис. 3. Гистограмма структурной характеристики показателя преломления на атмосферной трассе 100 м по данным ДИТ-2010

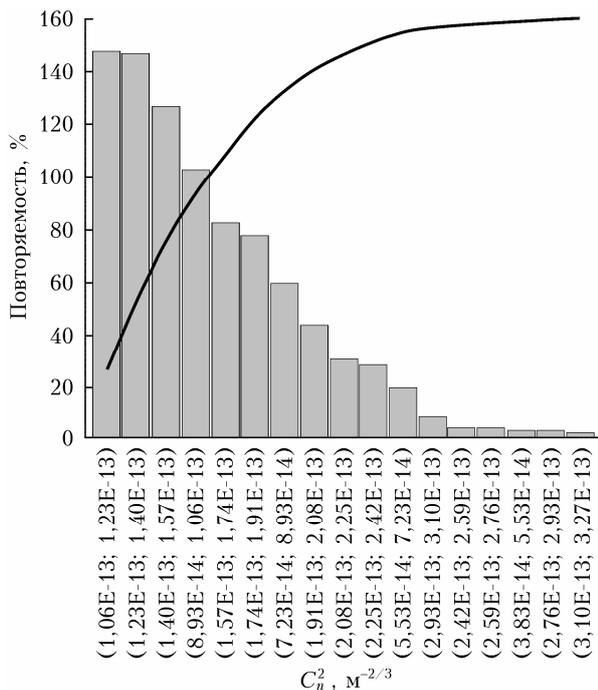


Рис. 4. То же, что на рис. 3, только для трассы 200 м

Спектральная зависимость структурной постоянной показателя преломления воздуха от длины волны

Поскольку оптические измерители уровня турбулентности используют различные длины волн подсветки, необходимо спектральное масштабирование получаемых ими данных. Для корректного сравнения данных различных оптических измерителей необходимо учесть спектральную зависимость параметров атмосферной турбулентности от длины волны.

Известно, что для оптического диапазона длин волн от 0,2 до 20 мкм верна [1] следующая формула, описывающая зависимость показателя преломления воздуха (индекса рефракции N_λ) от метеопараметров и длины волны излучения:

$$N_\lambda = (n_\lambda - 1) \cdot 10^6 = \frac{77,6P}{T} + \frac{0,584P}{T\lambda^2} - 0,06P_{w.v.}, \quad (2)$$

где P — это давление, мбар; T — температура, К; λ — длина волны, мкм; $P_{w.v.}$ — давление паров воды.

В итоге для структурного показателя преломления оказывается верна следующая зависимость:

$$C_n^2(\lambda) = C_n^2(\lambda \rightarrow \infty) \left(1 + \frac{0,584}{77,6\lambda^2}\right)^2. \quad (3)$$

При одинаковой турбулентности флуктуации $C_n^2(\lambda)$ на λ_1 будут больше, чем на λ_2 в $\left(1 + \frac{0,584}{77,6\lambda_1^2}\right)^2 / \left(1 + \frac{0,584}{77,6\lambda_2^2}\right)^2$ раз. Так, для $\lambda_1 = 0,532$ мкм и $\lambda_2 = 0,630$ мкм это отношение составляет 1,0145. Флуктуации из-за турбулентности в оптическом диапазоне тем больше, чем короче длины волны излучения.

Сравнение результатов измерения уровня турбулентности ДИТ-2010 и ДИТ-М

Сравнительные измерения уровня турбулентности с помощью ДИТ-2010 и ДИТ-М выполнялись в августе 2022 г. на горизонтальных трассах протяженностью от 100 до 600 м. Оба прибора работали по точечным оптическим источникам, фактически в приближении сферических волн. На рис. 5 приведены результаты синхронных измерений уровня турбулентности на трассе 350 м, при этом

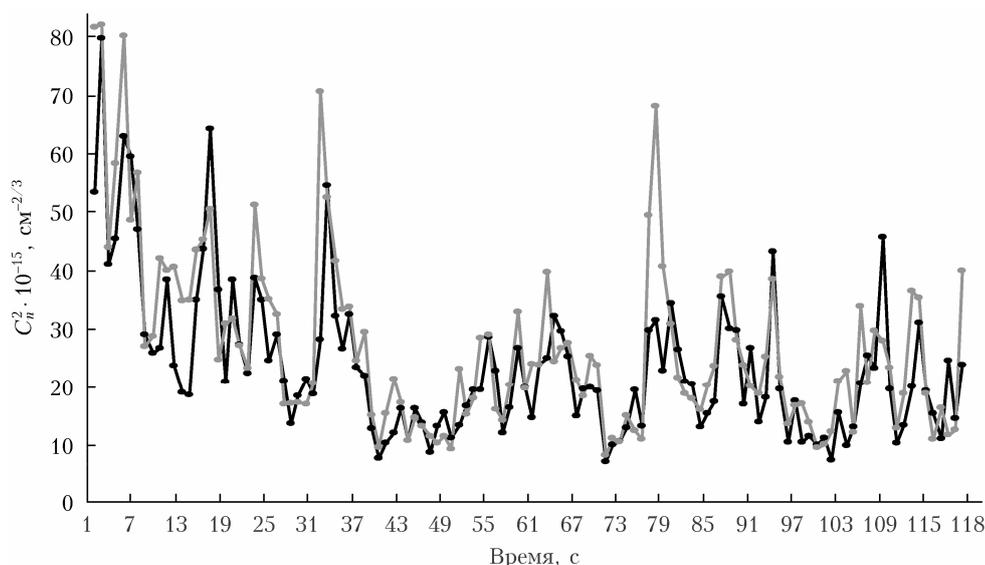


Рис. 5. Синхронные измерения уровня турбулентности дифференциальными измерителями ДИТ-2010 (серая кривая) и ДИТ-М (черная кривая) на трассе 350 м

измерители работали вдоль параллельных оптических трасс с относительным разнесением осей на расстояние примерно 1 м.

Результаты обрабатывались в реальном времени с помощью специально разработанного программного обеспечения. Также фиксировались все данные эксперимента: время, длина трассы, длина волны излучения, время накопления сигнала. Полученные значения C_n^2 выводились на экран компьютера и архивировались в накопителе. Корреляционное сравнение показывает, что результаты измерений приборов хорошо согласуются между собой (погрешность не выше 7%).

Сравнение измеренных значений параметра Фрида по данным ДИТ-М и ДВФ

Подобным же образом были организованы синхронные измерения уровня турбулентности уже другой парой измерителей: ДИТ-М и ДВФ. Они проводились на трассе длиной 360 м на длине волны 0,532 мкм. В случае ДИТ-М параметр Фрида вычислялся с использованием дифференциальной методики по данным измерения структурной функции флуктуаций углов прихода для сферической волны (формула (1)), а для ДВФ – по величине дисперсии [2, 7, 8] одной из модовых составляющих разложения фазовых флуктуаций, рассчитанных для сферических волн по формуле

$$\sigma_i^2 = A_i \left(\frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (4)$$

где A_i – коэффициент при дисперсии i -й модовой компоненты в разложении фазовых флуктуаций; r_0 – радиус когерентности сферической волны на длине волны измерения.

Рассчитанные значения параметра Фрида составили 4,39 см (по данным ДИТ-М) и 4,94 см (по данным ДВФ), а в другой реализации – 4,08 см (ДИТ-М) и 4,058 см (ДВФ). Многочисленные данные, получаемые ДИТ-М и ДВФ, дают среднее различие в оценках параметра Фрида не более 6,5%.

Сопоставление значений радиуса когерентности (параметра Фрида) показывает высокую согласованность с уровнем турбулентности. С одной стороны, это говорит о том, что ДИТ-2010 и ДИТ-М дают практически одинаковые значения уровня турбулентности, а с другой стороны, это указывает на правильность работы ДВФ Шэка–Гартмана. Это означает, что адаптивные системы, имеющие в своем составе ДВФ Шэка–Гартмана [5, 7, 12–16], могут проводить оценку уровня турбулентности по данным своих текущих фазовых измерений.

Параметр Фрида, рассчитанный из оптических измерений

Очевидно, что результаты оптических измерений характеризуют уже не локальный, а интегральный уровень турбулентности вдоль протяженных атмосферных трасс. Эти данные были обработаны для получения усредненных значений не только уровня турбулентности, но и параметра Фрида. На рис. 6 приведены значения параметра Фрида, полученные с помощью ДИТ-2010 при работе на трассе 100 м на длине волны 0,532 мкм. Кривая дает величину накопленной вероятности значений параметра Фрида, характеризующую уровень интегральной турбулентности вдоль горизонтальной трассы. Данные результаты можно сравнивать с результатами исследований, выполненных с помощью акустической метеостанции, которые были описаны в первой части статьи [12].

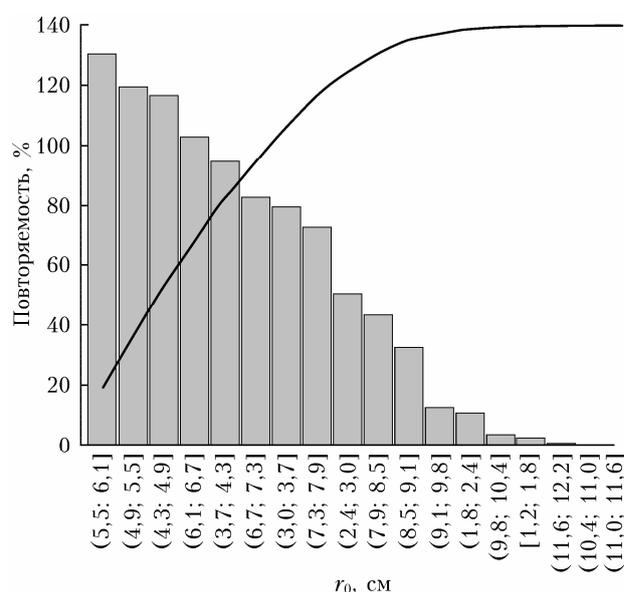


Рис. 6. Накопленная вероятность (повторяемость) значений параметра Фрида

Результаты измерений на атмосферных трассах с неоднородной подстилающей поверхностью показали, что оптические измерители ДИТ-М, ДИТ-2010 и ДВФ дают правильные и взаимно хорошо согласующиеся интегральные значения уровня турбулентности, которые сопоставимы с данными акустических измерений [12]. Авторы предполагают посвятить третью часть статьи корректному сравнению данных оптических и акустических наблюдений турбулентности на протяженных трассах в атмосфере.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы. Данные синхронных измерений на горизонтальных трассах различной

протяженности, выполненные с помощью двух трассовых дифференциальных оптических измерителей уровня турбулентности ДИТ-М и ДИТ-2010, практически совпадают (различие не более 7%) и хорошо согласуются с данными акустической метеостанции АМК-03. Доказана правильность измерений модовых составляющих искажений волнового фронта ДВФ Шэка–Гартмана. Получаемые значения параметра Фрида совпадают с точностью 6,5% с данными ДИТ-2010. Результаты настоящей статьи могут быть полезны при разработке систем адаптивной фокусировки лазерных пучков [4, 8, 10] на протяженных трассах в атмосфере.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников фирмы «Визионика» (г. Москва) А.В. Ларичева и Н.Г. Ирошникову за помощь в работе с программой для ДВФ Шэка–Гартмана.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания.

Список литературы

1. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. *Лукин В.П., Чарноцкий М.И.* Об использовании метода Гартмана для определения характеристик волнового фронта излучения // Опт. и спектроскоп. 1989. Т. 66, вып. 5. С. 1131–1133.
3. *Sarazin M., Roddier F.* The ESO differential image motion monitor // Astron. Astrophys. 1990. P. 294–300.
4. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Дифференциальный измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
5. *Borzilov A.G., Gritsuta A.N., Konyaev P.A., Lukin V.P., Nosov V.V., Soin E.L., Torgaev A.V.* Image jitter meter for low intensity radiation // Proc. SPIE. 2022. V. 12341. P. 123410F.
6. *LeMaster D.A., Hardie R.C., Gladysz S., Howard M.D., Rucci M.A., Trippel M.E., Power J.D., Karch B.K.* Differential tilt variance effects of turbulence in imagery: Comparing simulation with theory // Proc. SPIE. 2016. V. 9846.
7. *Noll R.J.* Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66, N 3. P. 207–211.
8. *Андреева М.С., Ирошников Н.Г., Корябин А.В., Ларичев А.В., Шмальгаузен В.И.* Использование датчика волнового фронта для оценки параметров атмосферной турбулентности // Автометрия. 2012. Т. 48, № 2. С. 103–111.
9. *Vdovin G., Soloviev O., Loktev M., Patlan V.* OKO Guide to Adaptive Optics. Delft.: OKO Technologies, 2013. 147 p.
10. *Kopylov E.A., Lukin V.P., Lavrinov V.V., Selin A.A.* Methods of image correction formed on horizontal long paths // Proc. SPIE. 2018. V. 10677. DOI: 10.1117/12.2309327.
11. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г.* Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099–1100.
12. *Торгаев А.В., Казаков Д.В., Лукин В.П.* Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. I. Акустические измерения уровня турбулентности и средней скорости ветра // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 5. С. 371–376.
13. *Gladysz S., Segel M., Eisele C., Barros R., Sucher E.* Estimation of turbulence strength, anisotropy, outer scale and spectral slope from an LED array // Proc. SPIE. 2015. V. 9614.
14. *Gladysz S.* Absolute and differential G-tilt in turbulence: Theory and applications // Proc. SPIE. 2016. V. 10002.
15. *Gladysz S., Filimonov G., Kolosov V.* Validation of tilt anisoplanatism models through simulation // Imag. Appl. Opt. 2018.
16. *Tokovinin A.* From differential image motion to seeing // PASP. 2002. V. 114. P. 1156–1166.

A.G. Borzilov, P.A. Konyaev, V.P. Lukin, E.L. Soin. Measurements of atmospheric parameters along an extended path. II. Optical measurements of turbulence.

This work is a continuation of the paper “Measurements of atmospheric parameters along an extended paths. I. Acoustic measurements of turbulence and average wind speed” and is devoted to the results of optical measurements of atmospheric turbulence along horizontal atmospheric paths. These measurements were carried out to determine the effective mean values of atmospheric turbulence parameters along an optical radiation propagation path and the associated coherence length of optical waves propagating through the atmosphere. The path optical measurements were supported by АМК-03 acoustic weather station measurements. That made it possible to compare the local acoustic and optical measurements of turbulence with different optical meters.