

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 534.6, 535.3, 535.36, 551.55

Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. I. Акустические измерения уровня турбулентности и средней скорости ветра

А.В. Торгаев, Д.В. Казаков, В.П. Лукин✉*

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

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.;
после доработки 16.03.2023 г.;
принята к печати 20.03.2023 г.

В августе 2022 г. с помощью акустической метеостанции АМК-03 были проведены измерения уровня турбулентности и средней скорости ветра на протяженной атмосферной трассе. Показано, что метеостанция АМК-03 обеспечивает достоверные данные по уровню турбулентности и скорости ветра. Результаты измерений уровня турбулентности в различных точках вдоль неоднородной атмосферной трассы корректно пересчитываются в значения радиуса когерентности (параметр Фрида) для оптической волны произвольной длины и расходимости по формулам теории распространения волн. Это позволяет сравнивать данные локальных акустических и оптических трассовых измерений уровня турбулентности.

Ключевые слова: турбулентность, скорость ветра, акустические волны, распространение, горизонтальные трассы; turbulence, wind speed, acoustic waves, propagation, horizontal paths.

Введение

Исследований, посвященных изучению параметров атмосферы, в частности оценке уровня турбулентности и средней скорости ветра на протяженных трассах, достаточно много [1–12]. Однако чаще всего измерения проводились либо на однородных трассах, либо в отдельных точках трассы. При этом использовалась разнообразная измерительная техника, но исследовались либо горизонтальные приземные трассы, либо вертикальные – астрономические. Можно выделить, например, публикации [9, 10], где по данным акустических измерений оценивались параметры флуктуаций оптических волн. Однако с практической точки зрения большой интерес представляют протяженные приземные атмосферные трассы, на которых турбулентность существенно изменяется в различных точках.

Для корректного сравнения экспериментов и теоретического прогноза влияния турбулентной атмосферы на флуктуации оптического излучения обычно требуется информация о параметрах атмосферной турбулентности вдоль всей трассы. В связи с этим в данной работе выполнено измерение достоверных эффективных средних значений параметров атмосферной турбулентности по трассе рас-

пространения оптического излучения с помощью сертифицированного акустического прибора. Одновременно проведены измерения уровня турбулентности оптическими измерителями, что позволило сравнить локальные акустические и оптические трассовые измерения. Такие экспериментальные данные получены с целью корректного их пересчета в значения радиуса когерентности (параметр Фрида) для произвольной длины волны оптического излучения вдоль неоднородной атмосферной трассы. К основным измерявшимся параметрам относятся: интенсивность турбулентности, характеризующаяся структурной характеристикой показателя преломления воздуха C_n^2 , горизонтальная скорость ветра V , структурные постоянные флуктуаций температуры C_T^2 и ветра C_V^2 , внешний масштаб турбулентности L_0 . Параметры C_n^2 и V зависят от места измерения и изменяются во времени. Их необходимо измерять в заданном географическом пункте во время работы оптической приемо-передающей аппаратуры. Для существующих и разрабатываемых (стационарных и передвижных) измерителей, регистрирующих интегральное значение интенсивности турбулентности (интеграл от C_n^2), также необходима информация о приземных значениях C_n^2 и V вдоль оптической трассы. Поэтому качественный прогноз влияния турбулентной атмосферы невозможно осуществить, не располагая средствами оперативного измерения как локальных параметров турбулентности вблизи подстилающей поверхности, так и интегральных оптических параметров.

* Андрей Витальевич Торгаев (torgaev@iao.ru); Денис Вадимович Казаков (kdv@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

Характеристика атмосферной трассы

В рамках исследования характеристик атмосферной турбулентности вдоль протяженной атмосферной трассы Институтом оптики атмосферы СО РАН был проведен цикл работ в г. Кстово Нижегородской обл. Выбранная атмосферная трасса проходит вдоль р. Волги на удалении 550–600 м от берега. Предварительно был сделан визуальный осмотр трассы для определения точных ее параметров, типа подстилающей поверхности, профиля трассы. Трасса длиной до 1100 м направлена с востока на запад с отклонением к северу около 15°. Прилегающие к ней пространства соответствуют открытой и достаточно ровной местности. При этом сама атмосферная трасса довольно неоднородна: рельеф (рис. 1) повышается от начала трассы и имеет максимум высоты на расстоянии приблизительно 170 м с превышением относительно начальной точки трассы примерно на 4 м.

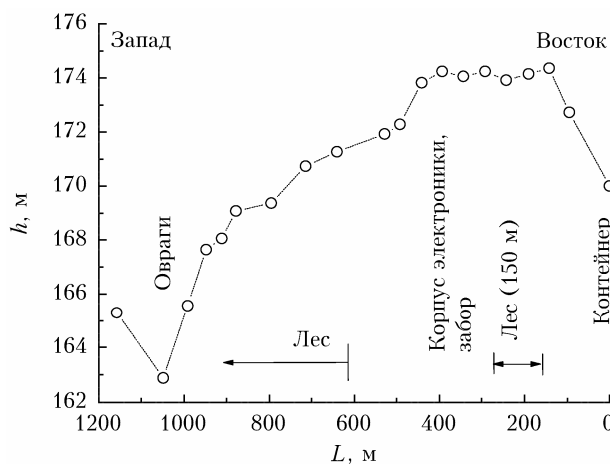


Рис. 1. Профиль высот по трассе распространения излучения, L — длина трассы

Трасса состоит из нескольких участков с различными типами подстилающей поверхности. Начальный участок трассы длиной приблизительно 150 м от контейнера для оборудования проходит над открытым местом, поросшим травой высотой в среднем около 0,5 м. Следующие 150 м поросли мелким лесом, это просека, заканчивающаяся небольшим открытым участком. Затем следует участок длиной около 300 м, который проходит над асфальтированной дорогой, окруженной хозяйственными постройками. Последние 500 м (от 615 до 1150 м) трассы проходят через большой массив леса по просеке, пересекая два оврага на удалении примерно 960 и 1060 м от начала трассы.

Все оптическое оборудование размещалось в контейнере, который был установлен на платформе на высоте примерно 2,5 м над уровнем земли. Общее понижение высот вдоль трассы от первой к последней точке составляет около 2,2 м.

Всего для измерений было выбрано семь точек на характерных участках трассы с различными типами подстилающей поверхности. Номер, наимено-

вание и удаление от платформы точек измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика точек наблюдения		
Точка	Участок трассы, тип подстилающей поверхности	Расстояние от контейнера, м
1	Комплекс АМК-03	3
2	Открытая поверхность	100
3	Мелкий лес	200
4	Корпус электроники, забор	310
5	Корпус электроники (лазерный источник)	355
6	Асфальт	400
7	Лесной массив	620

Измерения в точке 1, в которой была установлена платформа с контейнером с источниками и приемниками лазерного излучения, наиболее важны, так как влияние атмосферной турбулентности на распространение излучения здесь наиболее существенно.

Измерительное оборудование

В задачи исследования входило определение основных статистических характеристик атмосферной турбулентности и метеорологических условий в приземном слое вдоль трассы распространения излучения: средние значения C_n^2 , а также средние горизонтальная скорость ветра, температура и влажность воздуха.

В измерениях использовалась ультразвуковая автономная метеорологическая станция АМК-03 [13]. Принцип действия прибора при измерении параметров воздушных потоков и температуры воздуха заключается в определении групповых скоростей ультразвука между парами акустических пьезоэлектрических преобразователей ультразвуковых сигналов в четырех различных направлениях. По полученным значениям модуля и направления вектора скорости воздушного потока, протекающего между преобразователями ультразвуковых сигналов, значения температуры воздуха, а также временной задержки прохождения сигнала вычисляются статистические параметры турбулентной атмосферы [13–16]. Измерительный датчик устанавливается на металлической мачте из шести штанг для измерения высоты. В комплексе АМК-03 задействовано четыре измерительных канала «источник — приемник». Частота измерений определяется скоростью распространения звука в воздухе и надежностью аппаратуры. Для каждого канала частота выдачи результатов (снятия отсчетов) составляет 10–160 Гц. Верхняя граница полосы пропускания определяется частотой выдачи результатов.

Комплекс АМК-03 регистрирует (на высоте центра измерительной головки) мгновенные значения шести метеорологических параметров (три компоненты скорости ветра, температура, давление, влажность), а программное обеспечение комплекса

«Метео 3.0» рассчитывает более 100 статистических параметров турбулентной атмосферы, фиксирует результаты измерений одновременно в виде бинарного массива и текстовых отчетов. К основным регистрируемым и рассчитываемым комплексом характеристикам относятся: средняя температура воздуха $\langle T \rangle$ (°C), компоненты вектора скорости ветра V (м/с) и направление горизонтального вектора скорости D (град), относительная влажность воздуха r (%); атмосферное давление P (мм рт. ст.); структурные характеристики флуктуаций температуры C_T^2 (град²·см^{-2/3}) и оптического показателя преломления C_n^2 (см^{-2/3}), продольной составляющей скорости ветра C_V^2 ((м/с)²·см^{-2/3}), акустического показателя преломления C_{na}^2 (м^{-2/3}). Структурные характеристики C_n^2 и C_T^2 определяют интенсивность атмосферной турбулентности, поэтому являются одними из наиболее важных параметров [17, 18]. При измерениях турбулентных параметров время осреднения выбирается так, чтобы масштаб длины осредненного турбулентного течения (средняя скорость ветра V , умноженная на время осреднения) существенно превышал внешний масштаб турбулентности по направлению среднего течения (время осреднения должно существенно превышать характерный временной масштаб корреляции изучаемого поля). Тогда временные средние значения будут статистически устойчивыми. Интервал зарегистрированных в измерениях частот флуктуаций должен перекрывать большую часть так называемого микрометеорологического максимума спектра атмосферной турбулентности. Именно в этом микрометеорологическом интервале сосредоточена основная энергия турбулентных флуктуаций. Нижняя граница микрометеорологического максимума обычно находится вблизи частоты 0,01 Гц, что соответствует времени осреднения 100 с. Поэтому при измерениях в приземном слое над ровной поверхностью время осреднения обычно не менее 100 с. Соответствующее этому времени расстояние, на которое переносится неоднородность потока, для скорости ветра от 1 до 10 м/с составляет от 0,1 до 1 км и превышает внешний масштаб турбулентности.

Во всех точках трассы измерения с помощью АМК-03 проводились с осреднением 2 мин (120 с) при частоте снятия отсчетов измерений $f = 10$ Гц. Систематические погрешности измерений определяются калибровкой прибора и для основных усредненных параметров составляют: 0,3 °C для температуры и 0,15 м/с для компонент вектора скорости ветра. Относительная погрешность измерений C_T^2 , C_n^2 , C_V^2 зависит в первую очередь от чувствительности прибора и уменьшается с увеличением средней скорости ветра, времени осреднения и значений самих структурных характеристик. Так, например, в условиях относительно слабой турбулентности ($C_n^2 = 5 \cdot 10^{-16}$ см^{-2/3}) при времени осреднения 2 мин и средней скорости ветра 0,5–10 м/с относительная погрешность измерений величины C_n^2 находится в диапазоне 0,4–14% (0,4; 7; 14% соответственно для скоростей ветра 10; 1; 0,5 м/с).

Результаты измерений характеристик турбулентной атмосферы

Метеорологические параметры и статистические характеристики атмосферной турбулентности были измерены с 11 по 19 августа 2022 г. в условиях ясного неба и стабильной метеорологической ситуации.

Трассовые измерения

Измерения проводились в семи точках на выбранных характерных участках трассы. Высота измерения метеопараметров в каждой из точек трассы была выбрана равной высоте распространения излучения над землей, чтобы измерительный датчик комплекса АМК-03 находился вблизи оси лазерного излучения на трассе распространения (табл. 2). В точке 1 измерения повторялись, в итоге было проведено три и более сеанса измерений в каждой точке с интервалом в одну минуту между двухминутными сеансами. В табл. 2 и на приведенных ниже рисунках все данные для каждой отдельной точки трассы усреднены по сеансам измерений в этой точке.

Таблица 2
Результаты трассовых измерений в августе 2022 г.

Точка	Высота измерения, м	$\langle C_n^2 \rangle$, м ^{-2/3}	V , м
1	3,15	$1,14 \cdot 10^{-13}$	0,72
2	2,5	$1,03 \cdot 10^{-13}$	0,68
3	2,5	$7,13 \cdot 10^{-15}$	0,56
4	2,5	$4,64 \cdot 10^{-14}$	0,65
5	2,5	$6,29 \cdot 10^{-14}$	0,70
6	2,5	$7,35 \cdot 10^{-14}$	1,28
7	2,5	$1,01 \cdot 10^{-14}$	0,40

Средняя температура воздуха за весь период дневных измерений составила $\langle T \rangle = 26$ °C, максимальная $T = 27,7$ °C. Скорость ветра была невысокой (средняя за время измерений $\langle V \rangle = 0,55$ м/с) (рис. 2, табл. 2), кроме измерений 19 августа, когда она увеличилась и достигала средних значений $\langle V \rangle = 2,6$ м/с. Средняя относительная влажность $\langle r \rangle$ составляла 42,2 % и менялась незначительно. Атмосферное давление P за период измерений незначительно снизилось с 753,6 до 751,7 мм рт. ст.

Согласно местной розе ветров среднее доминирующее направление ветра, в том числе в летние месяцы и сентябре, юго-западное. На открытых участках трассы подстилающая поверхность была относительно равномерно нагрета, в длительных измерениях регистрировалась умеренная турбулентность (табл. 2, рис. 3), в отдельных точках трассы (1, 2, 4–6) интенсивность турбулентности превысила обычные средние значения. Превышение средних значений C_n^2 при стабильно ясном небе объясняется высокой температурой во время измерений и тем, что трассовые измерения проводились в наиболее жаркое время суток с 11:40 до 15:40. В то же время

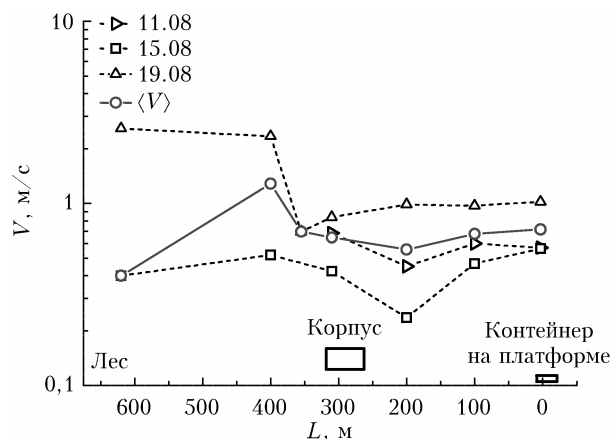


Рис. 2. Изменение по трассе среднего значения горизонтальной скорости ветра в августе 2022 г.

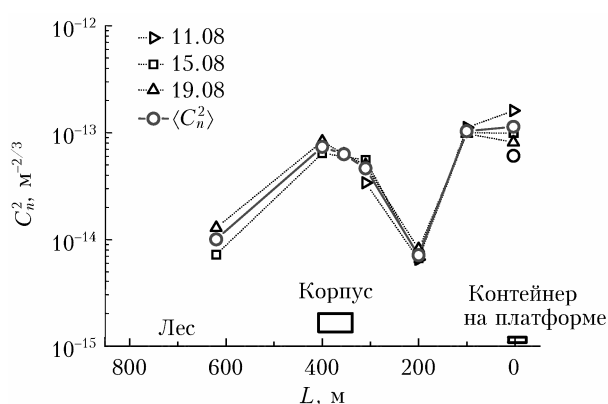


Рис. 3. Изменение по трассе среднего значения структурной характеристики флуктуаций показателя преломления. В точке 1 средняя по серии продолжительных измерений $\langle C_n^2 \rangle = 6,07 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$

$\langle C_n^2 \rangle = 6,07 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ находится в пределах известных средних значений для интенсивности атмосферной турбулентности в условиях равнинной местности.

Из рис. 3 видно, что графики изменения C_n^2 за разные дни измерений хорошо согласуются между собой. Наибольших значений C_n^2 достигала на открытых участках трассы. Максимальное значение $C_n^2 = 1,61 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ зарегистрировано в точке 1. Однако при продолжительных серийных измерениях в этой точке оно уже меньше: $\langle C_n^2 \rangle = 6,07 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Значительная интенсивность турбулентности зарегистрирован также в точках 2, 4–6. Интенсивность турбулентности ожидаемо снижалась на участках трассы, проходящих через лесные массивы. Так, на последних 500 м трассы в лесу (точка 7) интенсивность турбулентности упала до среднего уровня $\langle C_n^2 \rangle = 1,01 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$, а в точке 3 зарегистрировано еще меньшее среднее значение $\langle C_n^2 \rangle = 7,13 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$.

Как показывают трассовые измерения АМК-03 (рис. 3), изменение значений C_n^2 от максимальных к минимальным по трассе составляет 10 и более раз. Неоднородность трассы обусловлена изменением высоты луча над землей вдоль трассы, а также типа

подстилающей поверхности и зависящей от рельефа средней скорости ветра. Поэтому интегральное (суммарное) трассовое значение C_n^2 , полученное из оптических измерений, близко к максимальному значению C_n^2 по трассе вследствие уменьшения значений C_n^2 на остальных участках трассы на порядок. В то же время измерения с помощью АМК-03 в характерных точках трассы более показательны для определения динамики интенсивности турбулентности вдоль трассы и средних значений C_n^2 .

Продолжительные измерения

Кроме трассовых измерений были проведены также продолжительные измерения в наиболее важной для последующих расчетов точке 1. Длительные измерения проводились с 15 по 18 августа с интервалом между двухминутными сеансами в 10 и 15 мин; 15 августа проведены непрерывные измерения без паузы между двухминутными сеансами осреднения. Ультразвуковая станция АМК-03 была переведена в автоматически повторяющийся режим серийных измерений для набора статистики.

Результаты измерений C_n^2 приведены на рис. 4. Видно, что в стабильных метеорологических условиях графики суточного хода (дневные изменения) C_n^2 за разные дни измерений хорошо согласуются между собой. При этом для C_n^2 наблюдается выраженный суточный ход: с 12:00 до 16:00 уровни турбулентности наибольшие, в утренние и вечерние часы средние значения C_n^2 меньше.

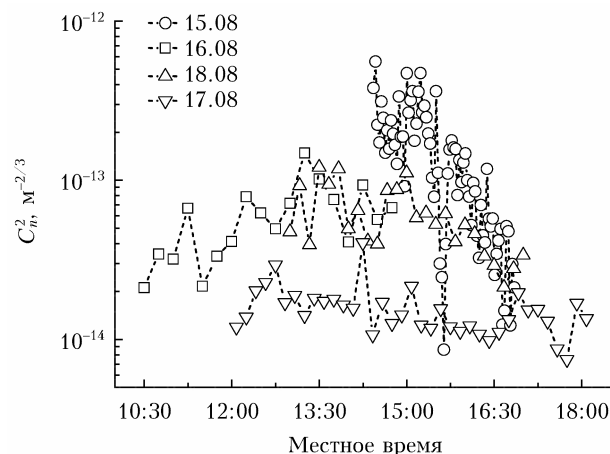


Рис. 4. Дневные изменения среднего значения структурной характеристики флуктуаций показателя преломления в точке 1

В продолжительных серийных измерениях в точке 1 зарегистрирован умеренный для плоской подстилающей поверхности (в рамках стандартных средних значений) уровень интенсивности атмосферной турбулентности (рис. 4). В измерениях с 16 по 18 августа значения C_n^2 находились в интервале от $2,11 \cdot 10^{-14}$ до $1,48 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$. В измерениях 15 августа средние значения C_n^2 — наибольшие по сравнению с другими днями, с максимумом на уровне $5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ с 14:20 до 16:10 и вдвое меньшим

средним значением при максимальных полуденных температурах; такой уровень интенсивности является стандартным для условий открытой ровной местности.

На рис. 5 приведена гистограмма всех зарегистрированных в продолжительных дневных измерениях значений C_n^2 . На гистограмме высота столбцов показывает процент попадания значений C_n^2 в заданный интервал (ширина столбца).

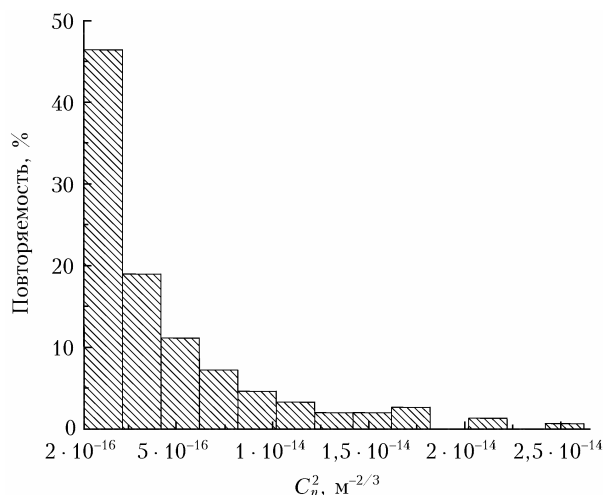


Рис. 5. Гистограмма структурной характеристики флуктуаций показателя преломления. Высота над подстилающей поверхностью 3,15 м

Как видно из рис. 5, большинство измеренных значений C_n^2 находятся в интервале $2 \cdot 10^{-16} - 4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$, что соответствует средней интенсивности турбулентности для условий открытой ровной местности в летние месяцы в средних широтах.

Средние значения скорости горизонтального ветра V в различные дни при длительных измерениях, так же как и при трассовых, были невелики и с каждым днем увеличивались от 0,3 м/с (15 августа) до 0,8 м/с (18 августа). Максимальные средние значения V также увеличились с 0,6 до 1,4 м/с.

Результаты расчетов параметра Фрида

Данные точечных акустических измерений уровня турбулентности требуются для расчета параметров оптической волны, в частности параметра Фрида, и для сопоставления с трассовыми оптическими измерениями [19–22]. Были выполнены численные расчеты радиусов когерентности для плоской и сферической волн по следующим формулам [18]:

$$r_0^{\text{сф}} = \left(0,423k^2 \left(1 + \frac{0,584}{77,6\lambda^2} \right)^2 \int_0^L d\xi C_n^2(\xi) \left(\frac{\xi}{L} \right)^{5/3} \right)^{-3/5}, \quad (1)$$

$$r_0^{\text{пл}} = \left(0,423k^2 \left(1 + \frac{0,584}{77,6\lambda^2} \right)^2 \int_0^L d\xi C_n^2(\xi) \right)^{-3/5}, \quad (2)$$

где $C_n^2(\xi)$ — значение структурного параметра показателя преломления в точке ξ на трассе распространения волны; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число излучения.

Для вычисления интегралов (1), (2) по трассе распространения излучения использовались значения C_n^2 , измеренные в отдельных точках трассы (рис. 3, 4) метеостанцией АМК-03. Значения C_n^2 , полученные с акустической метеостанции, в формулах (1), (2) нужно [18] умножать на коэффициент, зависящий от длины волны. Заметим, что ввиду неоднородностей профилей атмосферных трасс требуется поточечное вычисление интеграла в (2). Для сопоставления данных акустических и оптических измерений расчеты радиусов когерентности были проведены для $\lambda = 0,532$ мкм. Таким образом, вышеупомянутый коэффициент в выражениях (1) и (2) оказался равен $\left(1 + \frac{0,584}{77,6\lambda^2} \right)^2 = 1,053$.

Радиусы когерентности оптических волн были получены по формулам (1) и (2) на основе данных акустических локальных измерений в нескольких точках трассы для трех дней наблюдения и двух трасс (11 августа (300 м), 15 и 19 августа (600 м)): для сферической волны (1) $r_0 = 4,0; 2,3; 2,5$ см; для плоской волны (2) $r_0 = 1,5; 1,3; 1,1$ см.

Используя данные акустических измерений, подобным же образом можно рассчитать радиусы когерентности для трасс от 100 до 600 м. В итоге эти данные, полученные на основе расчетов по акустическим точечным измерениям, оказалось возможным корректно сравнить с данными оптических приборов, работающих на горизонтальных трассах различной протяженности. Например, радиус когерентности, рассчитанный на основе данных метеорологических измерений за 11 августа 2022 г. для трассы длиной 300 м (4,0 см), полностью соответствует данным, полученным от двух созданных в ИОА СО РАН оптических измерителей ДИТ-2010 и ДВФ [17, 20].

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Метеостанция АМК-03 обеспечивает достоверные данные об уровне турбулентности и скорости ветра.

2. Данные измерений уровня турбулентности в различных точках вдоль горизонтальной неоднородной атмосферной трассы корректно пересчитываются в значения радиуса когерентности (параметр Фрида) для оптической волны произвольной длины и различной расходимости по формулам теории распространения волн. Это позволяет сравнивать данные локальных акустических и оптических трассовых измерений уровня турбулентности.

Благодарности. Авторы благодарят научных сотрудников О.В. Кулагина, И.А. Горбунова и сотрудников базы ИПФ РАН, а также научных сотрудников ИОА СО РАН Л.А. Большасову, А.Г. Борзилова

и Е.Л. Соина за оказание помощи при проведении измерений и обработке полученных данных.

Финансирование. Работы выполнялись в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Kaimal J.C. Sonic anemometer measurement of atmospheric turbulence // Proc. of the Dynamic Flow Conference 1978 on Dynamic Measurements in Unsteady Flows. Dordrecht: Springer, 1978.
2. Brennan T.J., Mann D.C. Estimation of optical turbulence characteristics from Shack–Hartmann wavefront sensor measurements // Proc. SPIE. 2010. V. 7816. P. 781602.
3. Andrews L.C., Phillips R.L., Crabbs R., Wayne D., Lerc T., Sauer P. Creating a C_n^2 profile as a function of altitude using scintillation measurements along a slant path // Proc. SPIE. 2012. V. 8238. P. 8238DF-1–8238DF-12.
4. Burchett L., Fiorino S. Measurement of C_n^2 profiles from weather radar data and other microwave signals and conversion to visible and NIR C_n^2 profiles // Imaging Appl. Opt., OSA Technical Digest (online). 2013. Paper PTu1F.1. DOI: 10.1364/PCDVT.2013.PTu1F.1.
5. Carmen U., Sprung D., M.J. van Eijk A., Gunter W., Stein K. Inhomogeneity of optical turbulence over False Bay (South Africa) // Proc. SPIE. 2017. V. 10425. P. 1042509.
6. Sprung D., Sucher E., Ramilkowan A., Griffith D. Investigation of optical turbulence in the atmospheric surface layer using scintillometer measurements along a slant path and comparison to ultrasonic anemometer measurements // Proc. SPIE. 2014. V. 9242. P. 9242–9261.
7. Gladysz S., Sege 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. P. 961402.
8. Gladysz S. Nearly complete characterization of optical turbulence with an LED array // Imaging Appl. Opt. OSA Technical Digest (online). 2017. Paper PW1D.1.
9. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Использование результатов акустической диагностики пограничного слоя атмосферы для оценки влияния турбулентности на характеристики лазерного пучка // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1008–1016; Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V. Results of acoustic diagnostics of atmospheric boundary layer in estimation of the turbulence effect on laser beam parameters // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 6. P. 553–563.
10. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В. Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Показатель преломления // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 821–828; Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V. Estimates of the refractive index and regular refraction of optical waves in the atmospheric boundary layer: Part 1. Refractive index // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 437–444.
11. McCrae J.A., Bose-Pillai S.R., Fiorino S.T., Archibald A.J., Meoak Jo., Elmore B.J., Kesler T., Rice Ch. Measurements of optical turbulence over 149-km path // Opt. Engin. 2020. V. 59, N 8. P. 081806-1.
12. Shikhovtsev A.Yu., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Russkikh I.V., Tomin V.E. Turbulent parameters at different heights in the atmospheric Shack–Hartmann wave-front sensor data // Sol.-Terr. Phys. 2022. V. 8, N 2. P. 20–25.
13. Государственный реестр средств измерений под регистрационным номером № 36115-07 с наименованием «Автономная метеорологическая станция АМК-03».
14. Богусевич А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–174.
15. Богусевич А.Я. Программное обеспечение ультразвуковых метеостанций для целей исследования атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 175–180.
16. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7. С. 21–25.
17. Коняев П.А., Ботыгина Н.Н., Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П. Об измерении структурной характеристики показателя преломления атмосферы пассивными оптическими методами // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 738–741; Konyaev P.A., Botygina N.N., Antoshkin L.V., Emaleev O.N., Lukin V.P. Passive optical methods in measurement of the structure parameter of the air refractive index // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 522–525.
18. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
19. Sarazin M., Roddier F. The ESO differential image motion monitor // Astron. and Astrophys. 1990. P. 294–300.
20. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Дифференциальный измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
21. Андреева М.С., Ирошников Н.Г., Корябин А.В., Ларищев А.В., Шмальгаузен В.И. Использование датчика волнового фронта для оценки параметров атмосферной турбулентности // Автометрия. 2012. Т. 48, № 2. С. 103–111.
22. Borzilov A.G., Gritsuta A.N., Konyaev P.A., Lukin V.P., Nosov V.V., Sozin E.L., Torgaev A.V. Image jitter meter for low intensity radiation // Proc. SPIE. 2022. V. 12341. P. 12341.

A.V. Torgaev, D.V. Kazakov, V.P. Lukin. Measurements of atmospheric parameters along an extended path. I. Acoustic measurements of turbulence and average wind speed.

The results of measurements of atmospheric parameters (level of turbulence and average wind speed) along an extended path are discussed. These measurements were carried out to determine the effective average values of atmospheric turbulence parameters along the path of optical radiation propagation. The measurements were carried out in August 2022 using an АМК-03 acoustic weather station. It is shown that the АМК-03 weather station, with a certified measurement technique, provides reliable information on the level of turbulence and on the wind speed. The measurement data of the turbulence level at different points along the atmospheric path are correctly recalculated into the values of the coherence length (the Fried parameter) for an optical wave of an arbitrary length and different divergence by the formulas of the wave propagation theory. This makes it possible to compare local acoustic and optical path measurements of the turbulence level.