

Д.В. Паненко

# Интерферометрическое исследование турбулентности атмосферы с использованием солнечного света

Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь

Поступила в редакцию 14.06.2002 г.

Разработана методика дистанционного измерения некоторых параметров оптической неустойчивости и турбулентности атмосферы в дневное время, основанная на применении интерферометра когерентности с малой угловой апертурой. Проведены измерения степени пространственной когерентности при наблюдениях прямого солнечного света и света солнечного ореола, дана интерпретация интерферограмм. Экспериментально показано, что свет, рассеянный солнечным ореолом, обладает частичной пространственной когерентностью. Проведены измерения диаметра атмосферной когерентности по Фриду. Предложен критерий оптической неустойчивости, основанный на измерении когерентности света, рассеянного солнечным ореолом. Интерферометр может найти применение для исследования явления рассеяния света в турбулентной атмосфере.

## Введение

Турбулентность атмосферы в дневное время обычно изучается солнечными фотометрами [1, 2] или специализированными приборами [3, 4]. Большие возможности в этих задачах имеют интерферометры когерентности, однако они используются, в основном, в ночное время [5, 6]. В дневное время интерферометры почти не применялись. Известно применение интерферометра Фабри–Перо в задачах повышения контраста спектральных линий [7]. Это предопределило ряд задач данной работы, свойственных интерферометрам когерентности, поскольку данные о турбулентности атмосферы в дневное время представляют интерес для оптики атмосферы, адаптивной оптики и астрономии. Не ослабевает интерес к солнечному ореолу [1].

Актуальным в изучении взаимодействия света и атмосферы является вопрос о когерентности рассеянного света. Получила развитие теория когерентности многократного рассеяния волн в случайно-неоднородной среде [8]. В многочисленных теориях рассеяния света [9, 10], по крайней мере, предполагается наличие частично-когерентного рассеянного света, хотя условия наблюдения такого света в атмосфере не даются. В данной работе предложена методика, которая позволяет измерять степень коге-

рентности при дистанционном зондировании атмосферы с использованием как прямого солнечного света, так и рассеянного света солнечного ореола. Методика основана на применении солнечного интерферометра когерентности с малой угловой апертурой. Показано, что свет солнечного ореола является частично когерентным.

## 1. Аппаратура и техника наблюдений

Для изменения степени пространственной когерентности применена оптическая схема Юнга, показанная на рис. 1. Свет от источника размером  $2r$  через сменную входную диафрагму диаметром  $2b$  в экране  $\mathcal{E}_1$  попадает на экран  $\mathcal{E}_2$  с двумя малыми отверстиями  $P_1$  и  $P_2$  диаметром по  $0,12$  мм каждое при расстоянии  $d = 0,4$  мм между ними. Сменные диафрагмы в  $\mathcal{E}_1$  необходимы для получения малых углов поля зрения.

На рис. 1 показаны краевые лучи, проникающие в интерферометр, по которым определяется угол поля зрения  $\theta$ . Интерференционное поле в выходной плоскости  $\mathcal{E}_3$  сканируется круглым отверстием  $0,2$  мм и установленным за ним ФЭУ, которые при измерениях вместе перемещаются по оси  $x$  перпендикулярно полосам интерференционной картины.

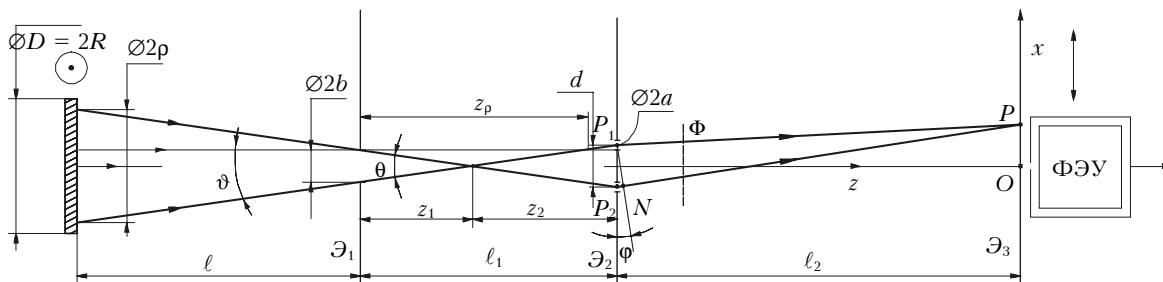


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра

Сигнал ФЭУ регистрировался графопостроителем Н-307. Время регистрации интерферограммы составляло 13 с. Система сканирования и регистрации описана в [11]. Сменным отверстиям в  $\mathcal{E}_1$  0,25; 1,62; 3,0 мм соответствуют углы поля зрения в секундах дуги: 220; 620; 1020". Угол поля зрения в приближении геометрической оптики рассчитывался по формуле

$$\theta = 2b/z_1, \quad (1)$$

где  $z_1 = 2b\ell_1/[(2a+d)+2b]$  ( $\ell_1$  – расстояние между  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ , равное 0,71 м). Расстояние  $\ell_2$  между экранами  $\mathcal{E}_2$  и  $\mathcal{E}_3$  равно 1 м. Первая часть интерферометра между  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  является изображающей. Входная диафрагма в  $\mathcal{E}_1$  строит изображение источника на плоскости  $\mathcal{E}_2$ . Для средней длины волны  $\lambda = 0,63$  мкм фильтра Ф, предназначенного для монохроматизации света, расчет волнового параметра  $D = \lambda\ell_1/[\pi(2b)]$  показывает, что при входной диафрагме 0,25 мм в плоскости  $\mathcal{E}_2$  наблюдается дифракция Фраунгофера. При этом для средней длины волны 0,63 мкм расчет дает для первого темного кольца круга Эйри значение диаметра 4,4 мм. Это говорит о том, что оба отверстия ( $P_1$  и  $P_2$ ) находятся практически в центре пятна круга Эйри, поскольку  $d = 0,4$  мм. Изображения на  $\mathcal{E}_2$  от входных диафрагм 3,0 и 1,62 мм соответствуют приближению тени. Отверстия  $P_1$  и  $P_2$  расположены симметрично относительно оптической оси интерферометра, они всегда ориентировались так, чтобы линия  $P_1P_2$ , соединяющая центры отверстий, совпадала с направлением движения Солнца.

Рассмотрим более подробно угловые характеристики интерферометра, поскольку это важно для интерпретации измерений когерентности рассеянного света. Входная диафрагма в  $\mathcal{E}_1$  попарно с каждым из отверстий  $P_1$  и  $P_2$  образует два меньших поля зрения. Угол поля зрения  $\vartheta$  для каждого из этих каналов в геометрическом приближении можно подсчитать по формуле

$$\vartheta = 2b/z_p, \quad (2)$$

где  $z_p = b\ell_1/(a+b)$ . Для входных диафрагм с диаметрами 0,25; 1,62; 3,0 мм углы соответственно равны 107; 505; 906". Из этого следует, что для входной диафрагмы 0,25 мм световые трубки в пространстве перед интерферометром располагаются, соприкасаясь одна с другой, тогда как для входных диафрагм 1,62 и 3,0 мм поля зрения в пространстве перекрываются соответственно на 77 и 90%.

Интерферометр, как автономный прибор, был установлен на монтажке касегреновского телескопа с диаметром зеркала 0,5 м в обсерватории университета в г. Симферополе. Сам телескоп не использовался, использовались лишь его системы управления и ведения. Ось интерферометра была установлена параллельно оси гида, что позволяло визуально контролировать положение Солнца. Исходной для измерений была установка оси интерферометра на центр Солнца. С этой позиции интерферометр по

секундомеру выводился в ореол либо справа (ускоренным ведением), либо слева от Солнца (выключением ведения).

Оценим погрешности оптических измерений. Погрешность  $\delta_1$  от шумов ФЭУ в пределах рабочего диапазона не превышала 0,5%. Отклонения от линейности световой характеристики не превышали  $\delta_2 = 1\%$ . Графопостроитель Н-307 по паспорту характеризуется погрешностью  $\delta_3$ , равной 0,5%. По закону сложения случайных относительных отклонений при косвенных измерениях общая относительная погрешность регистрации оптического сигнала

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \sim 1,3\% .$$

## 2. Расчетные формулы

Интерференционная формула по [12] имеет вид

$$I(P) = I(P_1) + I(P_2) + 2\sqrt{I(P_1)I(P_2)}\gamma_{12}\cos(\delta - \beta_{12}), \quad (3)$$

где  $\beta_{12}$  – аргумент  $\gamma_{12}$ ;  $I(P_1)$ ,  $I(P_2)$  – интенсивности, создаваемые отверстиями;  $\gamma_{12}$  – модуль функции степени когерентности;  $\delta$  – оптическая разность хода, равная

$$\delta = \frac{2\pi P_2 N}{\lambda} = \frac{2\pi d \sin\varphi}{\lambda} .$$

Формула (3) показывает, что третий член представляет собой функцию когерентности интерферирующих колебаний. Степень когерентности  $\gamma_{12}$  определяется по контрасту интерференционной полосы:

$$\gamma_{12} = (I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min}). \quad (4)$$

Степень когерентности может быть также рассчитана по теореме когерентности [9]:

$$\gamma = 2J_1(v)/v, \quad (5)$$

где  $v = 2\pi RD/(\bar{\lambda}\ell)$ ;  $R$  – радиус источника света;  $\ell$  – расстояние до него. Применительно к задачам турбулентности атмосферы [13] модуляционная передаточная функция (МПФ) атмосферы  $M$  в модели «атмосфера – изображающий прибор» может быть найдена из соотношения

$$\langle T(f_x, f_y) \rangle = M(\bar{\lambda}, \ell_1, f_x; \bar{\lambda}, \ell_1, f_y; L) T_1(f_x, f_y), \quad (6)$$

где  $T$  – оптическая передаточная функция всей системы,  $T_1$  – оптическая передаточная функция изображающего прибора;  $\ell_1$  – фокусное расстояние;  $L$  – толщина турбулентного слоя,  $f_x = x/(\bar{\lambda}\ell_1)$ ;  $f_y = y/(\bar{\lambda}\ell_1)$  – пространственные частоты. Для интерферометра по данным наших измерений в пространственно-когерентном лазерном свете в рабочей области выходной плоскости  $T_1(f_x, f_y) \sim 1$ . Следовательно, согласно (6)

$$\langle T(f_x, f_y) \rangle = M(\bar{\lambda}, \ell_1, f_x; \bar{\lambda}, \ell_1, f_y; L),$$

т.е. измеряемой интерферометром функции когерентности [5]. Для анализа экспериментальных результатов по МПФ также важны полученные теоретически формулы МПФ. D. Fried [14], используя однопараметрическую модель, получил формулу МПФ атмосферы, выраженную через диаметр  $r_0$  атмосферной турбулентности:

$$\gamma = e^{-3,44(r/r_0)^{5/3}}, \quad (7)$$

где  $r$  — координата входной плоскости. Формулу (7) легко использовать для аппроксимации экспериментальных МПФ с получением значения  $r_0$ .

### 3. Результаты наблюдений

Наблюдения проводились в течение всего 2001 г. в разную погоду. Наиболее благоприятными были зима, лето и ранняя осень, наблюдения проводились в 12–14 ч местного времени. Для физического анализа представляют интерес данные, полученные в период антициклонов.

Интерферограммы с нечетным числом полос получаются при значении аргумента  $v$ , удовлетворяющем условию  $0 \leq v \leq 3,83$ . С четным числом полос интерферограммы получаются при условии  $3,83 < v < 7,02$ . Это связано со знаком функции  $J_1(v)$  в формуле (5).

Вид интерферограмм зависит от диаметра входной диафрагмы в  $\mathcal{E}_1$ . Рассмотрим результаты наблюдений при наведении оси интерферометра на центр Солнца. Интерферограммы таких наблюдений показаны на рис. 2. Измерения были сделаны 8–11 октября в период антициклона, ветер 7–12 м/с; давление 752 мм рт.ст., 22 °С, небо синее, безоблачное.

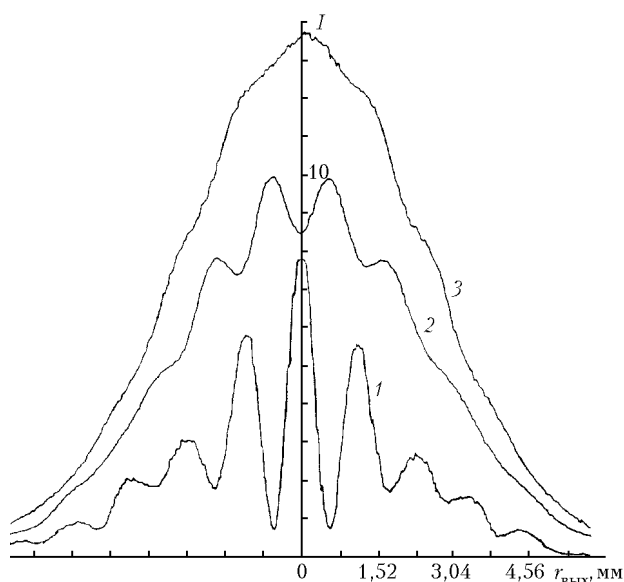


Рис. 2. Интерферограммы при наведении оси интерферометра на центр Солнца. Для кривых 1, 2 и 3 входные апертуры равны соответственно 0,25; 1,62 и 3,0 мм. Цены делений вертикальной оси для кривых 1, 2 и 3 соответственно равны 0,25; 1 и 2,13 В/дел

Как видно из рис. 2, вид интерферограмм зависит от диаметра входной диафрагмы. Кривая 1 получена с диафрагмой 0,25 мм, она содержит нечетное число полос. Измеренная по центральной полосе степень когерентности кривой 1 равна  $\gamma_{12} = 0,82$ , рассчитанная по формуле (5)  $\gamma = 0,9$ , что согласуется с экспериментальным значением. Заметим, что высокая степень пространственной когерентности получается за счет малого угла поля зрения интерферометра.

Кривая 2 (рис. 2) получена с диафрагмой 1,62 мм. Как видно из рисунка, она имеет минимум в центре и четное число полос. Измеренная в центре степень когерентности равна 0,1. Рассчитанные аргумент  $v = 5,82$  и степень когерентности 0,11 подтверждают вид интерферограммы. Кривая 3 (рис. 2) получена с входной диафрагмой 3,0 мм, она показывает нижний уровень пространственной когерентности солнечного света. Это объясняется большим размером области наблюдения на Солнце — около  $1000''$ . Рассчитанные аргумент  $v = 10,8$  и степень когерентности  $\gamma = 0,02$  подтверждают сделанные выводы.

МПФ атмосферы может быть получена для кривой 1 (рис. 2). Среднее значение  $r_{0,вых}$ , найденное по МПФ атмосферы с применением (7),  $r_{0,вых,ср}$ , равно 11 мм. Результат пересчета во входную плоскость по формуле  $r_0 = mMr_{0,вых,ср}$  дает значение для  $r_0 = 10$  см. В формуле пересчета  $m = 0,343$  — масштабный коэффициент преобразования координат при переходе от плоскости  $\mathcal{E}_3$  к плоскости  $\mathcal{E}_2$ , полученный по теореме масштабов Фурье-преобразования, а  $M = \ell_1 R / \ell b = 26,4$  — масштабный коэффициент преобразования координат при переходе от  $\mathcal{E}_2$  к  $\mathcal{E}_1$ . Для апертуры 0,25 мм находится с использованием формулы диаметра круга когерентности [12]  $\delta = 0,16\lambda\ell/R$ , где  $\lambda = 0,63$  мкм;  $\ell$  — расстояние до Солнца;  $R$  — радиус Солнца;  $b$  — радиус входного отверстия. Полученное для  $r_0$  значение согласуется с результатами дневных наблюдений Солнца с помощью астрономической трубы [4]. В другую погоду (сильный ветер, низкое давление) найденные  $r_0$  меньше 10 см.

### 4. Пространственная когерентность в области солнечного ореола

Как отмечалось выше, входные диафрагмы придают солнечному интерферометру свойства направленного приема света. В данном интерферометре максимальный угол поля зрения будет для входной диафрагмы 3 мм. Он равен  $1020''$ , что близко к угловому радиусу Солнца. Следовательно, если установить ось интерферометра слева или справа от центра Солнца на расстоянии его углового диаметра (это положение назовем ближним ореолом), то интерферометр будет принимать только рассеянный свет солнечного ореола, направленный к интерферометру в пределах телесного угла поля зрения. При расстоянии между осью интерферометра и центром Солнца, равным двойному угловому диаметру Солнца, ореол будем называть дальним.

Как видно из рис. 3, все кривые дают наличие частичной пространственной когерентности со степенью когерентности для кривой 3 в центре 0,22 и в области первой полосы 0,29. Интерферограммы были получены 08.10.2001 г. при хорошей погоде, они содержат нечетное число полос и отличаются от интерферограммы в прямых солнечных лучах (см. рис. 2, кривая 2), во-первых, формой (поскольку ореол — это другой источник света), во-вторых, большим значением степени когерентности (0,29 против 0,1). Это означает, что пространственная когерентность создается при рассеянии света в солнечном ореоле.

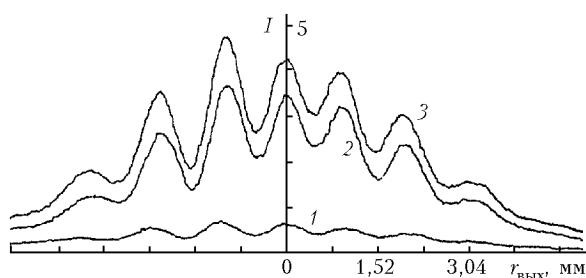


Рис. 3. Интерферограммы для солнечного ореола в атмосфере Земли при входной апертуре 1,62 мм: 1 — дальний ореол; 3 — ближний ореол; 2 — в промежуточном положении оси интерферометра. Цена деления вертикальной оси 0,05 В/дел

На рис. 4 для диаметра входной диафрагмы 3,0 мм показаны результаты наблюдений, сделанные 03.04.2001 г., при погоде: переменная облачность, ветер со скоростью 9–14 м/с, давление 749 мм рт.ст., температура 12 °С. Кривая 1 соответствует дальнему ореолу, кривая 2 — ближнему, степени когерентности в центре кривых соответственно равны 0,18 и 0,26. Интерферограммы имеют четное число полос. Кривая 3 (см. рис. 2), как отмечалось выше, для такой же диафрагмы не показывает когерентности в прямых солнечных лучах.

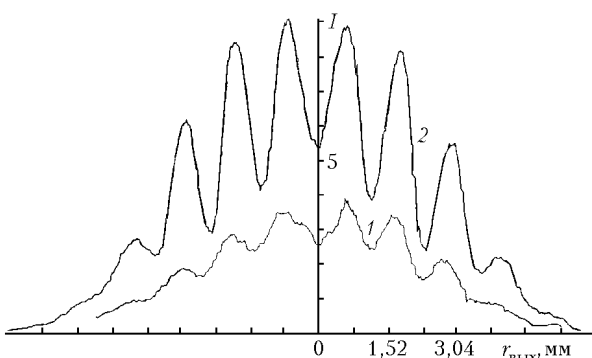


Рис. 4. Интерферограммы для солнечного ореола в атмосфере Земли при входной апертуре 3,0 мм: 1 — дальний ореол; 2 — ближний ореол. Цена деления вертикальной оси 0,05 В/дел

Таким образом, и в этом эксперименте также подтверждается частичная пространственная когерентность света, рассеянного солнечным ореолом. Такой

результат согласуется с косвенным заключением по лабораторному эксперименту с рассеянием света о возможности когерентного рассеяния под небольшими углами к первоначальному направлению [15]. Отметим, что степень пространственной когерентности от света солнечного ореола заметно зависит от погодных условий. Например, 23.04.2001 г. накануне циклона даже при ясной, солнечной погоде степень когерентности света ореола упала практически до нуля. Такая кривая, как кривая 2 (рис. 4) за день до циклона потеряет свою интерференционную структуру и превратится в одногорбую кривую со слегка заметными следами полос. Этот эффект можно объяснить динамикой возрастания содержания форм водного аэрозоля накануне циклона, поскольку давление в этот день составляло 731 мм рт.ст.

Для входной диафрагмы 0,25 мм при наблюдении света солнечного ореола также измеряется частичная пространственная когерентность. Интерферограмма содержит нечетное число полос, она подобна кривой 1 на рис. 2. Приведем данные таких измерений, полученные 30.03.2001 г. в период холодного антициклона при следующих погодных данных: давление 752 мм рт.ст., ночью температура минус 10 °С, днем +10 °С, ветер 9 м/с, небо синее безоблачное, ореол слабый. По результатам измерений степень когерентности в центре интерференционной картины равна 0,87 (для ореола) и 0,82 (в прямом солнечном свете). Найденные по МПФ значения  $r_0$  равны 12 см (для ореола) и 10 см (для прямого солнечного света).

Рассмотрим вопрос о возможности использования степени когерентности для характеристики оптической нестабильности атмосферы в дневное время. Известно, что явления когерентности [9], рассеяния света и поляризации рассеянного света связаны сложным образом с молекулярным движением, аэрозолями и турбулентностью атмосферы. Когерентность света интегрированно характеризует коррелированность процессов, которые связаны с прохождением света через турбулентную атмосферу. Опыт показал, что когерентность света солнечного ореола тонко реагирует на оптическое состояние атмосферы. Измеряемая величина — степень когерентности  $\gamma_{12}$ , которая характеризует качество изображения, получаемого через турбулентную атмосферу, поскольку сама зависит от качества интерференционной картины. Поэтому критерием оптической нестабильности атмосферы в дневное время может служить экспериментально измеряемая величина  $\gamma_{12}$  — степень когерентности света солнечного ореола, если измерения проводить в одном и том же месте ореола.

## Выводы

1. Разработана методика дистанционного зондирования турбулентной атмосферы с использованием солнечного интерферометра когерентности с малой угловой апертурой.

2. Исследована пространственная когерентность солнечного света, рассчитаны по МПФ диаметры атмосферной когерентности по Фриду.

3. Экспериментально обнаружена пространственная когерентность света солнечного ореола. Предложен критерий оптической нестабильности атмосферы в виде величины степени когерентности света солнечного ореола.

4. Показана возможность использования солнечного ореола для исследования явления рассеяния света.

Автор выражает признательность научному руководителю профессору Э.И. Терезу за полезные обсуждения.

1. *Ситник Г.Ф.* Исследование земной атмосферы по ореолам Солнца и Луны. М.: Изд-ие МГУ, 1985. 117 с.
2. *Милютин Е.Р., Яременко Ю.И.* Статистические характеристики рассеянного солнечного излучения в атмосфере // *Оптика атмосф.* 1992. Т. 5. № 1. С. 15–18.
3. *Геонджян Л.А.* Измерение атмосферной нестабильности с использованием двухлучевого регистратора качества солнечного изображения // *Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп.* 1988. Т. 51. Вып. 4. С. 110–118.
4. *Троян В.И.* Некоторые характеристики дневного астроклимата пика Терскол // *Астроклимат и эффективность телескопов: Тр. Всесоюз. конф. рабочей группы «Астроклимат» Астросовета АН СССР.* Л.: Наука, 1984. С. 151.
5. *Токовинин А.А.* Звездные интерферометры. М.: Наука, 1988. 160 с.

6. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Пространственные интерферометры наземного базирования и атмосферная турбулентность // *Астрон. ж.* 1996. Т. 73. № 3. С. 419–425.

7. *Jarret A.H., Lategan A.H.* Optical interferometry of Solar Phenomena // *Mon. Not. Astron. Soc. Southern Africa.* 1978. V. 37. № 7–8. P. 67–69.

8. *Барабаненков Ю.Н.* Энергетический критерий когерентности и некогерентности многократного рассеяния волн в случайно-неоднородной среде // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1985. Т. 28. № 9. С. 1136–1143.

9. *Барабаненков Ю.Н.* Многократное рассеяние волн на ансамбле частиц и теория переноса излучения // *Успехи физ. наук.* 1975. Т. 117. Вып. 1. С. 49–78.

10. *Кросиньяни Б., Ди Порто П., Бертолотти М.* Статистические свойства рассеянного света. М.: Наука, 1980. 206 с.

11. *Паненко В.В., Булатова О.В., Опришко В.В.* Многофункциональное сканирующее устройство для оптических измерений // *Оптико-механическая промышленность.* 1988. № 4. С. 30–32.

12. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.

13. *Hafnagel R.E., Stanley N.R.* Modulation Transfer Function Associated with Image Transmission through Turbulent Media // *J. Opt. Soc. Amer.* 1964. V. 54. № 1. P. 52–64.

14. *Fried D.L.* Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures // *J. Opt. Soc. Amer.* 1966. V. 56. № 10. P. 1372–1379.

15. *Иванов А.П., Хайруллина А.Я.* О когерентном рассеянии света // *Оптика и спектроскопия.* 1967. Т. 23. Вып. 1. С. 158–165.

***D.V. Panenko. Interferometric study of atmospheric turbulence using sunlight.***

A method for remotely measuring some optical instability and atmospheric turbulence parameters in daytime has been developed. The method is based on application of a coherence interferometer with a small angular aperture. The degree of spatial coherence was measured during observations of direct sunlight and sun halo with the following interpretation of interferograms. Measurements of the atmospheric coherence length by Fried have been conducted. It is shown experimentally that light diffusion due to the sun halo has partial coherence. A criterion of optical instability based on coherence measurements of light diffused by sun halo is proposed. The interferometer can be applied to investigations of light diffusion in the turbulent atmosphere.