

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА

Папенко Д.В.

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентность атмосферы в дневное время обычно изучается солнечными фотометрами [1,2] или специализированными приборами [3 – 7]. Актуальным в изучении взаимодействия света и атмосферы является вопрос о когерентности рассеянного света [8, 9]. В данной работе предложена методика, которая позволяет измерять степень когерентности 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.

АППАРАТУРА И ТЕХНИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Для измерения степени пространственной когерентности применена оптическая схема Юнга, описанная в работе [10]. В приборе (Рис.1.) по ходу солнечного света, последовательно расположены: входная диафрагма диаметром $2b$ в экране \mathcal{E}_1 ; экран \mathcal{E}_2 с

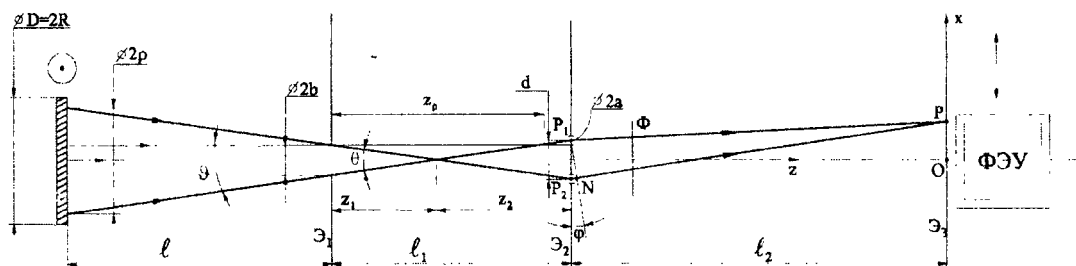


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра.

двумя малыми отверстиями P_1 и P_2 диаметром по $0,12$ мм каждое при расстоянии $d=0,4$ мм между ними; выходная плоскость \mathcal{E}_3 . Расстояние z_1 между \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 равно $0,71$ м, расстояние z_2 между \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_3 равно 1 м. В выходной плоскости в зависимости от вида работ устанавливались либо цифровой фотоаппарат для фотографирования всей интерференционной картины, либо сканирующее устройство [11] для получения одномерных сечений интерференционной картины в направлении перпендикулярном полосам. Свет регистрировался в этом случае сканированием ФЭУ, перед которым устанавливалась отверстие диаметром $0,4-0,2$ мм. Сигнал ФЭУ записывался

графопостроителем Н-307. Отверстия P1 и P2 располагались симметрично относительно оптической оси интерферометра, они всегда ориентировались так, чтобы линия, соединяющая центры отверстий совпадала с направлением движения Солнца. Для монохроматизации света использовались интерференционные фильтры. Входная диафрагма в Э1 попарно с каждым из отверстий P1 и P2 образуют два поля зрения в каждом канале интерферометра. Сменным диафрагмам в Э1 с диаметрами 0,25мм, 1,62мм, 3,0мм соответствовали поля зрения каналов 107", 500", 906" секунд дуги. Эти поля зрения частично перекрываются в пространстве перед интерферометром, образуя общее поле зрения интерферометра. Для каждой из указанных диафрагм общие поля зрения соответственно равны 220", 620" и 1020". Из этого следует, что для входной диафрагмы 0,25мм световые трубки в пространстве перед интерферометром располагаются, соприкасаясь одна с другой, тогда как для входных диафрагм 1,62мм и 3,0мм поля зрения в пространстве перекрываются соответственно на 77% и 90%. Измерения проводились в г. Симферополе. Для наводки и ведения интерферометра за Солнцем использовались два технических варианта: монтировка телескопа и двухзеркальный горизонтальный целостат.

Оценим погрешности оптических измерений. Погрешность от шумов ФЭУ в пределах рабочего диапазона не превышала $\delta_1=0,5\%$. Отклонение от линейности световой характеристики не превышало $\delta_2=1\%$. Графопостроитель Н-307 по паспорту характеризуется погрешностью $\delta_3=0,5\%$. По закону сложения случайных относительных отклонений при косвенных изменениях общая относительная погрешность регистрации оптического сигнала получается равной $\delta = 1,3\%$. Испытания интерферометра в лазерном свете показали, что контраст всех полос выходной плоскости равен 1, что соответствует ожидаемому результату.

ФЛУКТУАЦИЯ СИГНАЛА

По каждому из полей зрения интерферометра вследствие случайных изменений оптических неоднородностей атмосферы происходит флуктуация фаз световых пучков интерферометра. Это проявляется соответствующими флуктуациями выходного сигнала. Для измерения флуктуаций сигнала сканирующую систему интерферометра следует установить на максимум полосы и оставить неподвижной.

Интерферометр при этом будет регистрировать во времени флуктуации светового потока, проходящего к ФЭУ через его входную диафрагму с диаметром 0,3мм. Реализации осциллограмм таких сигналов при наблюдении света солнечного ореола показаны на Рис.1. Нулевая линия всех кривых совпадает с осью x, по этой же оси откладывается время, длительность регистрации кривых Рис.1 составила 9с. По вертикали отложена интенсивность в произвольных, но одинаковых для всех кривых единицах. Большая средняя интенсивность сигнала соответствует более близкому положению оси интерферометра к диску Солнца. Корреляционный анализ дает диапазон времен флуктуаций от 0,001с до 1с, что по порядку величины сопоставимо с временными характеристиками некоторых движений в турбулентной атмосфере [5] при оптических измерениях. Из Рис.2. видно, что амплитуда флуктуаций по мере приближения оси

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА

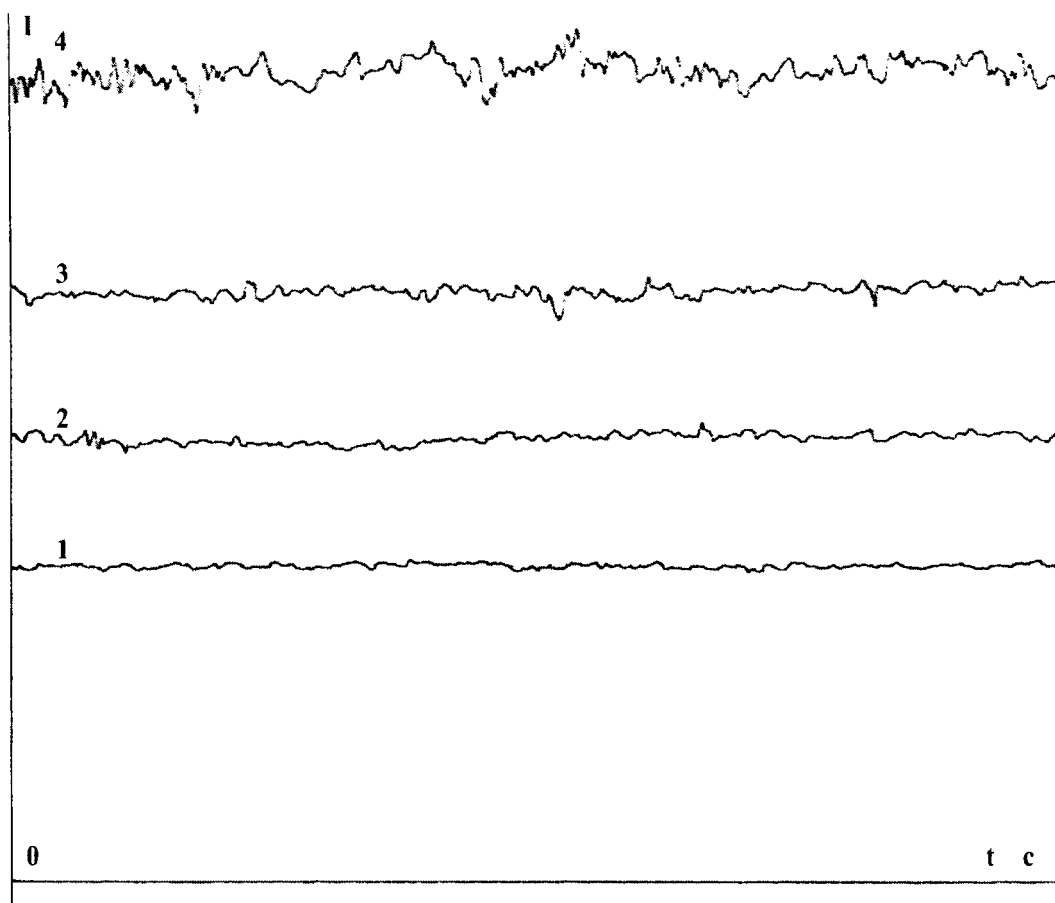


Рис.2. Флуктуации света солнечного ореола при различном удалении от диска.

интерферометра к солнечному диску, возрастает быстрее, чем средняя интенсивность света. Это может быть связано с природой рассеяния света вперед в солнечном ореоле, поскольку угол рассеяния по мере приближения оси прибора к солнечному диску уменьшается.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ПО СОЛНЦУ

Впервые интерферометр был применен 11 августа 1999г. при наблюдении частного солнечного затмения в Симферополе. При этом был обнаружен эффект возрастания степени пространственной когерентности света при подходе к максимальной фазе затмения.

Систематические наблюдения атмосферной турбулентности проводились в течение всего 2001 года в разную погоду. Наиболее благоприятными были зима, лето и ранняя осень, наблюдения проводились в 12-14 часов местного времени. Для физического анализа представляют интерес данные, полученные в период антициклонов.

При анализе наблюдений использовался, прежде всего, вид интерферограммы. В зависимости от значений аргумента V функции когерентности интерферограммы могут быть с нечетным и четным числом полос [12]. Интерферограммы с нечетным числом полос получаются при значении аргумента V , удовлетворяющему условию $0 < V < 3,83$. С четным числом полос интерферограммы получаются при условии $3,83 < V < 7,02$. Далее, измерялось значение степени когерентности в центре интерферограммы. Для построения модуляционной передаточной функции (МПФ) [13] измерялся контраст всех полос и координаты их центров.

Рассмотрим результаты наблюдений при наведении оси интерферометра на центр Солнца. Интерферограммы таких наблюдений показаны на Рис. 2. Цена деления оси $x_{\text{вых}}$ равна 0,76 мм при измерениях в масштабе выходной плоскости. Для кривых 1,2,3, входные апертуры равны 0,25 мм, 1,62 мм и 3,0 мм. Цена деления вертикальной оси I для кривых 1,2,3 соответственно равна: 0,25 В/дел., 1В/дел и 2,13 В/дел. Измерения были

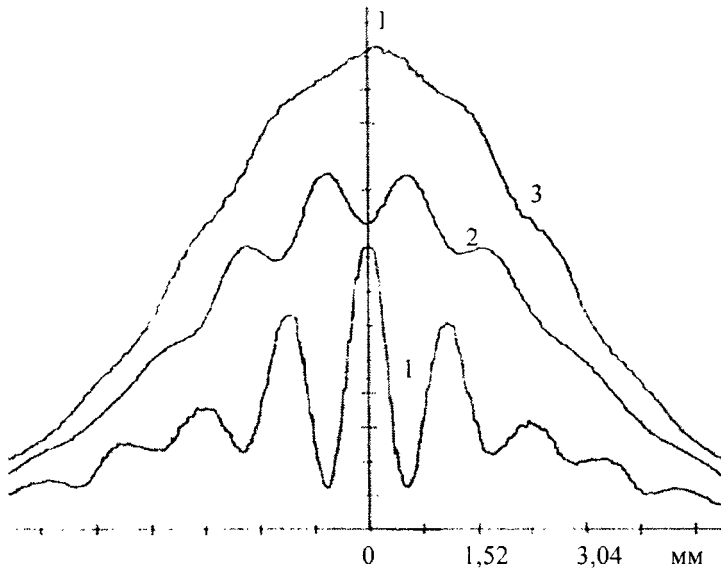


Рис.3. Интерферограммы солнечного света.

сделаны 8-11 октября в период антициклона: ветер 7-12 м/с; давление 752 мм рт. ст., 22°C, небо синее, безоблачное. Как видно из Рис.3. вид интерферограмм зависит от диаметра входной диафрагмы. Кривая 1 получена с диафрагмой 0,25 мм. Кривая содержит нечетное число полос. Этому соответствует расположение полосы максимальной освещенности в начале координат, что согласуется со значением аргумента функции когерентности, равным 0,88. Измеренная по центральной полосе степень

когерентности кривой 1 равна $\gamma_{12} = 0,82$, рассчитанная по теореме когерентности [12] $\gamma = 0,9$, что согласуется экспериментальным значением. Заметим, что для света высокая степень пространственной когерентности получается за счет малого угла поля зрения интерферометра. Кривая 2 Рис.3. получена с диафрагмой 1,62 мм. Как видно из рисунка, она имеет минимум в центре и четное число полос, степень когерентности 0,1.

Рассчитанные аргументы $V=5,82$ и $\gamma=0,11$ дают соответствие с опытом. Кривая 3 на Рис.2 получена с входным окном 3,0 мм, она имеет вид одnogорбой кривой. Она не показывает 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.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА

МПФ атмосферы [13] и диаметр атмосферной когерентности Γ_0 [14] могут быть получены по кривой 1 Рис.2. Среднее значение $\Gamma_{0, \text{вых.}}$, найденное по первым трем точкам МПФ по формуле Фрида [14] равно $\Gamma_{0, \text{ср. вых.}} = 4$ мм. Пересчет во входную плоскость по формуле $\Gamma_0 = m \Gamma_{0, \text{вых. ср.}} = 10$ см, где $m = 0,343$ – масштабный коэффициент преобразования координаты при переходе от плоскости Э3 к плоскости Э2, полученный по теореме масштабов Фурье преобразования, а $M = \Delta_1 R / \Delta_2 b = 26,4$ – масштабный коэффициент преобразования координат при переходе от Э2 к Э1. M для апертуры 0,25 мм находится с использованием формулы диаметра круга когерентности $\sigma = 0,16 \sqrt{\lambda R} / b$ [12], где $\lambda = 0,63$ мкм, Δ_1 – расстояние до Солнца, R – радиус Солнца, b радиус входного отверстия. Полученное для Γ_0 значение 10 см согласуется с результатами дневных наблюдений Солнца с помощью астрономической трубы [4].

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ОРЕОЛА

В данном интерферометре максимальный угол поля зрения будет для входной диафрагмы 3 мм. Он равен $920''$, 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 не будет принимать прямые солнечные лучи, а 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. При анализе следует также иметь в виду, что излучение солнечного ореола отличается от излучения Солнца тем, что оно имеет механизм излучения в виде рассеяния света.

На Рис.3 для диаметра входной диафрагмы 3,0 мм показаны результаты наблюдений, сделанные 3.04.2001 при погоде: переменная облачность, ветер 9 – 14 м/с, давление 749 мм рт. ст., 12°C. Нижняя кривая соответствует дальнему ореолу, верхняя кривая – ближнему, степени когерентности в центре кривых соответственно равны 0,18 и 0,26. Интерферограммы имеют четное число полос. Цена деления вертикальной оси 0,05 в/дел., r – в мм. Кривая 3 на Рис.2, как отмечалось выше, для такой же диафрагмы не показывает когерентности в прямых солнечных лучах. Таким образом, в этом эксперименте подтверждается частичная пространственная когерентность света, рассеянного солнечным ореолом. При диаметре входной диафрагмы 1,62 мм измерения показывают наличие частичной пространственной когерентности со степенью когерентности в центре 0,22 и в области первой полосы 0,29.

Интерферограммы были получены 8.10.2001 года при хорошей погоде, они содержат нечетное число полос и отличаются от интерферограммы в прямых солнечных лучах (Рис. 2, кривая 2), во-первых формой (ореол другой источник света), во-вторых большим значением степени когерентности (0,29 против 0,1).

Это также означает, что пространственная когерентность создается при рассеянии света в солнечном ореоле. Такой результат согласуется с косвенным заключением в

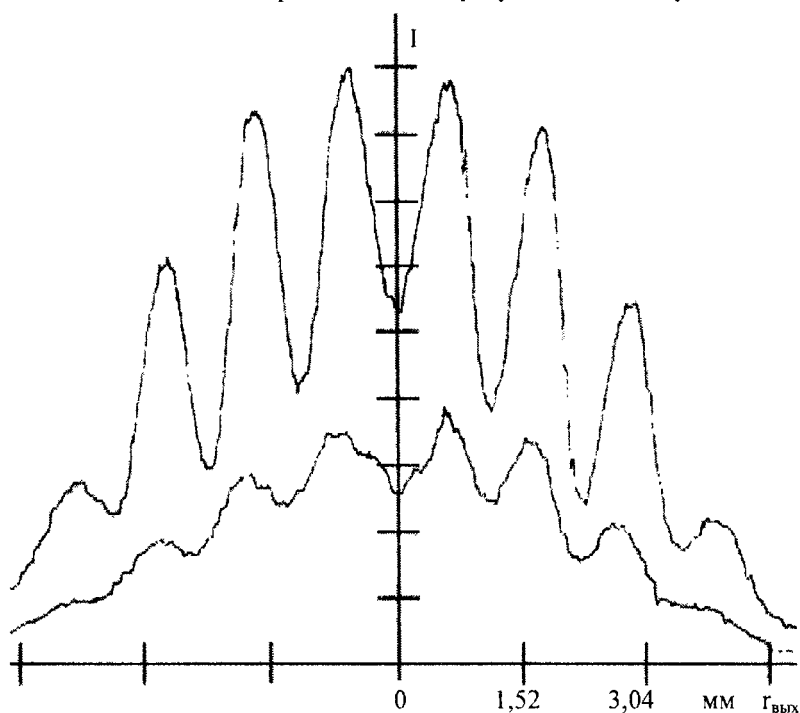


Рис.4. Интерферограммы солнечного ореола.

циклона потеряет свою интерференционную структуру, и превратится в одностороннюю кривую со слегка заметными следами полос. Этот эффект можно объяснить динамикой возрастания содержания форм водного аэрозоля накануне циклона, давление в этот день составляло 731 мм рт. ст.

Измерения при входной диафрагме 0,25 мм при наблюдении света солнечного ореола также показывают частичную пространственную когерентность. Интерферограмма содержит нечетное число полос, она подобна кривой 1 Рис.3. Измеряемая степень когерентности равна 0,4 - 0,5.

Когерентность света интегрированно характеризует коррелированность процессов, которые связаны с прохождением света через атмосферу. Турбулентность воздушной среды нарушает коррелированность таких процессов. Измеряемая величина – степень когерентности γ_{12} прямо характеризует качество изображения, получаемого через турбулентную атмосферу, поскольку сама зависит от качества интерференционной картины. Поэтому в виде критерия оптической нестабильности атмосферы в дневное время можно использовать экспериментально измеряемую величину γ_{12} – степень когерентности света солнечного ореола, если измерения проводить в одном и том же месте ореола.

лабораторном эксперименте по рассеянию света о возможности когерентного рассеяния света под небольшими углами к первоначальному направлению [15].

Отметим, что γ заметно зависит от погодных условий. Например, 23.04.02 накануне циклона даже при ясной, солнечной погоде степень когерентности света ореола упала практически до нуля. Такая кривая, как верхняя кривая на Рис.4, за день до

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА

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.

Список литературы

1. Ситник Г.Ф., Исследование земной атмосферы по ореолам Солнца и Луны: Издание МГУ, 1985.- 117 с.
2. Милютин Е.Р., Яременко Ю.И. Статистические характеристики рассеянного солнечного излучения в атмосфере // Оптика атмосферы. 1992. 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. 51. вып.4. с. 110-118.
4. Троян В.И. Некоторые характеристики дневного астроклимата пика Терскол // Астроклимат и эффективность телескопов. – Труды Всесоюзной конференции 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 // Астрономический журнал. 1996. 73. №3. с. 419-425.
7. Jarret A.H., Latagan A.H. Optical interferometry of Solar Phenomena // Mon. Not. Astron. Soc. Southern Africa. 1978. vol. 37. №7-8. p. 67-69.
8. Барабаненков Ю.Н. Энергетический критерий когерентности и некогерентности многократного рассеяния волн в случайно неоднородной среде // Известия вузов. Радиофизика. 1985. 28. №9. с. 1136-1143.
9. Барабаненков Ю.Н. Многократное рассеяние волн на ансамбле частиц и теория переноса излучения // Успехи физических наук. 1975. 117. вып. 1. с.49-78.
10. Паненко Д.В., Романов Ю. С. Солнечный интерферометр когерентности // Перспективные направления развития экологии, экономики, энергетики. Сборник научных статей, Одесса ОЦНТЭИ, с.146-152. -ISBN 966-95342-7-5. 11.
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 // Journ. Opt. Soc. Am. 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 // Journ. 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. 23. вып. 1. с.158-165.

Поступила в редакцию 20.11.2002 г.