

УДК 523.9

Влияние турбулентного следа разрушившегося облака на качество изображения Солнца

Л. А. Акимов, А. Л. Акимов, Н. П. Дятел

Астрономическая обсерватория
Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина
61022, Харьков, ул. Сумская, 35

Исследуется влияние фантома (турбулентного следа разрушившегося облака) на качество изображения Солнца. Параметры атмосферного замытия определяются по наблюдениям распределения яркости на краю солнечного диска. Получено, что замытие изображения при прохождении фантома может увеличиться в три раза.

ВПЛИВ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛІДУ ЗРУЙНОВАНОЇ ХМАРИ НА ЯКІСТЬ ЗОБРАЖЕННЯ СОНЦЯ, Акімов Л. А., Акімов А. Л., Дятел Н. П. — Досліджується вплив фантома (турбулентного сліду зруйнованої хмари) на якість зображення Сонця. Параметри атмосферного замивання визначаються за спостереженнями розподілу яскравості на краю сонячного диску. Отримано, що замивання зображення при проходженні фантома може збільшитися у три рази.

THE EFFECT OF THE TURBULENT TRACK OF A DESTROYED CLOUD ON SOLAR SEEING, by Akimov L. A., Akimov A. L., Dyatel N. P. — The effect of the phantom (the turbulent track of a destroyed cloud) on solar seeing was studied. Parameters of atmospheric blurring were determined from the observations of the solar limb-darkening function. Blurring of the solar image may increase by a factor of three due to the phantom.

ВВЕДЕНИЕ

Природа искажения изображений небесных тел, наблюдаемых через земную атмосферу, состоит в случайных флуктуациях фазы и амплитуды световой волны. Эти изменения вызваны флуктуациями показателя преломления воздуха на пути луча и зависят от функций пространственного распределения плотности, давления, температуры, влажности, скорости ветра. Так возникают замытие изображений, их дрожание и мерцание.

Возмущающее действие земной атмосферы можно изучать по изображениям звезд, края Солнца или Луны. Такие наблюдения преследуют несколько целей: а) изучение качества изображений на действующих обсерваториях, что необходимо для распределения наблюдательного времени по различным программам; б) изучение астроклиматических условий при выборе места для новой обсерватории; в) восстановление истинного изображения при известных параметрах атмосферного замытия; г) исследование

турбулентных свойств различных слоев земной атмосферы; д) построение теоретических моделей атмосферных процессов. Теоретическое рассмотрение влияния турбулентности атмосферы на качество астрономических изображений и интерпретация данных достаточно полно изложены в фундаментальной монографии В. И. Татарского [6]. Новые теоретические разработки [5] коснулись в большей степени интерпретации наблюдений при больших величинах дрожаний и мерцаний в приземных трассах.

Исследование качества получаемых изображений ведется давно. В 1970—1980-х гг. оно проводилось особенно интенсивно в связи с выбором мест для установки новых телескопов большого диаметра. Были установлены многие факторы, влияющие на качество изображений, предложены модели с несколькими турбулентными слоями. Однако часто такие модели не в состоянии объяснить весьма нестационарный характер процессов замытия, особенно в дневные часы при наблюдениях Солнца или других объектов.

Обычным летним днем, когда на небе есть конвективные облака, при наблюдениях Солнца периоды хорошего качества изображений перемежаются с периодами очень плохого. Явление, увеличивающее атмосферное замытие, обычно длится от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Оно, по-видимому, связано или с восходящими невидимыми конвективными ячейками (термиками), где для конденсации облака еще нет достаточных условий, или с исчезнувшим облаком, разрушенным более горячими потоками воздуха.

На загородной наблюдательной станции Астрономической обсерватории ХГУ на телескопе АЗТ-8 уже более 10 лет производится фотографирование фотосферы Солнца. Для съемки обычно выбирались моменты с лучшим качеством изображения. Было замечено, что наихудшее качество наблюдается в разрывах тающих облаков или на месте только что растаявшего облака. Нам представляется, что это явление заслуживает самостоятельного изучения.

В настоящей работе представлены первые результаты наблюдений края солнечного диска на месте исчезнувших конвективных облаков (турбулентного следа разрушенного облака). Эти неродившиеся или исчезнувшие облака мы будем в дальнейшем называть фантомами. Они невидимы, но проявляют себя сильными возмущениями волнового фронта света, проходящего через объем, занятый ими.

НАБЛЮДЕНИЯ

Генетическую связь замытия изображения края солнечного диска с исчезнувшими облаками нам удалось проследить летом 1997 г. по наблюдениям на Чугуевской наблюдательной станции ХГУ. Эта станция находится в степи, в междуречьи Донца и Оскола. При ветрах от южного (через запад) до северного направлений, облака, возникающие над поймой Донца, (расположенной на расстоянии 20—30 км от места наблюдений) нередко испаряются, приближаясь к району наблюдательной станции. Этот процесс наиболее интенсивен в мае—июне, когда вокруг распаханная черноземная степь почти не покрыта растительностью. Чернозем почти полностью поглощает излучение, приходящее от Солнца, поверхностный слой почвы раскаляется и нагревает воздух до значительных высот. Обычно процесс зарождения конвективных облаков начинается с 8—10 ч утра и завершается после 16 ч по местному времени. Если влаги в атмосфере достаточно, то в послепопуденные часы наблюдаются грозы. Грозовые дожди в настоящее время в условиях тотальной распашки земель довольно редко проникают

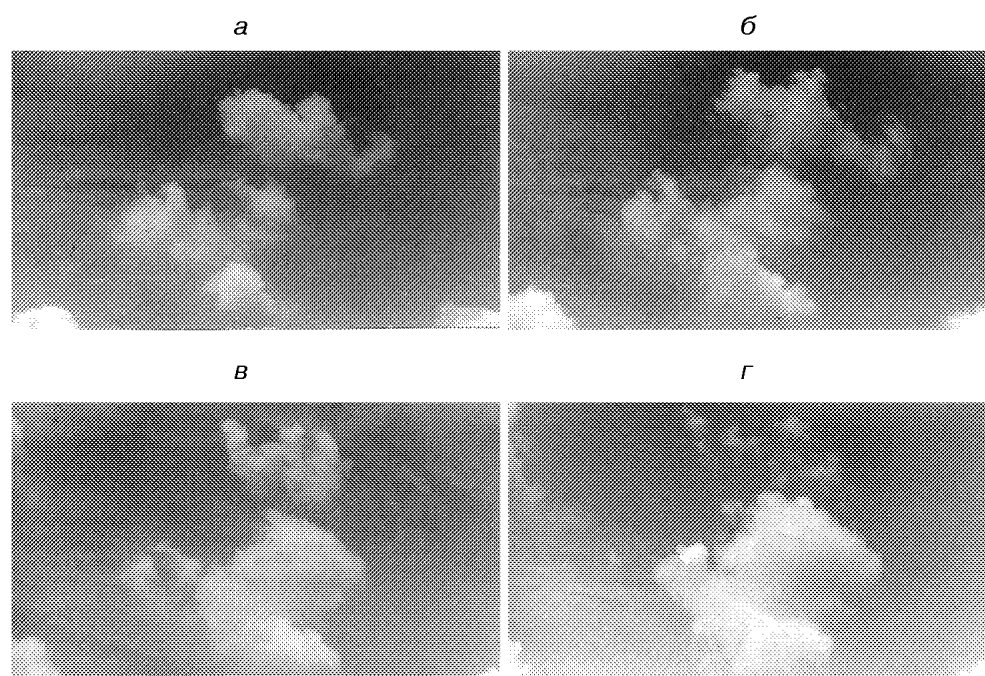


Рис. 1. Иллюстрация процесса разрушения конвективных облаков. Снимки получены 17 июня 1997 г. в последовательные моменты времени: $08^{\text{h}}23^{\text{m}}$, $08^{\text{h}}24^{\text{m}}$, $08^{\text{h}}25^{\text{m}}$, $08^{\text{h}}26^{\text{m}}$ UT. Разрушению подверглось верхнее облако

вглубь степи, поскольку поднимающийся перед фронтом грозового облака раскаленный воздух достаточно быстро разрушает и испаряет облако. Рассмотрим влияние на качество изображения того объема атмосферы, где недавно располагалось конвективное облако.

Рис. 1 иллюстрирует процесс разрушения конвективного облака по наблюдениям 17 июня 1997 г. Снимки получены с интервалом в одну минуту. Видно, как за три минуты произошло разрушение верхнего облака.

Для оценки атмосферного замытия фотографировался край Солнца на телескопе АЗТ-8 в 11-м фокусе. Зеркало телескопа диафрагмировалось до 8 см. Съемка осуществлялась через зеленый фильтр на пленку «Микрат-300» с экспозицией 0.1 с. Для калибровки снимков на эту же пленку снимался центр солнечного диска через стандартный 9-ступенчатый ослабитель.

Всего 16 и 17 июня 1997 г. получено 53 снимка края Солнца: 42 — при прохождении фантома или в разрывах тающих облаков; 11 — при условно ясном небе. Качество снимков визуально было оценено по пятибалльной шкале. Среди 11 снимков при ясном небе шесть соответствуют баллу 5 (радиус кружка рассеяния меньше $1.5''$ — видна грануляция), четыре — баллу 4 ($1.5''$ — $2''$), один — баллу 3 ($2''$ — $3''$). Среди 42 снимков, полученных на месте только что растаявших облаков, четыре соответствуют баллу 1 ($> 4''$), 10 — баллу 2 ($3''$ — $4''$), 21 — баллу 3, 7 — баллу 4. По этим оценкам можно заключить, что при прохождении фантома замытие увеличивается в полтора-два раза.

Для количественной оценки максимального замытия фантомом из этой серии наблюдений были выбраны два снимка: балла 1 с фантомом и балла 5 при ясном небе. Эти снимки были профотометрированы на автоматиче-

ском микрофотометре АО ХГУ, сопряженном с ЭВМ «Искра-1030», в память которой записывались изображения. Фотометрирование края солнечного диска осуществлялось с шагом сканирования 10 мкм по обеим координатам на снимке, что соответствовало 0.184" на диске Солнца. Для уменьшения влияния зернистости эмульсии и грануляции данные были усреднены по 64 строкам, параллельным радиусу Солнца.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЗАМЫТИЯ

Распределение интенсивности по диску спокойного Солнца зависит только от расстояния до центра диска. Задача становится одномерной, поскольку радиус Солнца достаточно велик. Пусть оси x , p , t , r направлены вдоль радиуса Солнца. Тогда наблюдаемое распределение $F(x)$ представляется сверткой

$$F(x) = f \otimes G \otimes g, \quad (1)$$

где $G(p)$ — результат интегрирования дифракционного изображения точки по одной из координат — описывает дифракционное замытие линии, перпендикулярной к радиусу Солнца; $g(t)$ — замытие линии атмосферной турбуленцией, $f(r)$ — распределение яркости вдоль радиуса Солнца.

Зная функции $F(x)$, $f(r)$, $G(p)$, мы можем определить из наблюдений функцию $g(t)$.

Дифракционное замытие линии описывается с помощью функций Струве $H(q)$.

$$G(q) = \frac{3\pi}{8} \frac{H(2q)}{q^2}, \quad (2)$$

где q — расстояние точки в фокальной плоскости от линии в относительных единицах:

$$q = \frac{\pi D p}{\lambda f}. \quad (3)$$

Здесь D — диаметр объектива, f — фокусное расстояние телескопа, p — расстояние в метрической системе от линии. Радиус первого минимума в дифракционном изображении звезды находится на расстоянии $q = 1.22\pi = 3.832$ и называется радиусом дифракционного кружка. В оптике принимают это расстояние за единицу, и таблицы функций составляются в зависимости от таких единиц. Ему соответствует некоторое расстояние ρ в фокусе телескопа. В нашем случае для длины волны $\lambda = 0.56$ мкм, $\rho = 1.8''$.

В табл. 1 приведено значение функции $G(p)$ в зависимости от расстояния до линии. Значение в начале координат принято за 1000. Данные взяты из работы [4]. Шаг таблицы составляет 0.18".

Таблица 1. Распределение освещенности в изображении линии

p/ρ	G	p/ρ	G	p/ρ	G	p/ρ	G	p/ρ	G
0.0	1000	0.5	348	1.0	34	1.5	25	2.0	14
0.1	961	0.6	209	1.1	40	1.6	17	2.1	15
0.2	852	0.7	111	1.2	44	1.7	12	2.2	14
0.3	696	0.8	56	1.3	42	1.8	11	2.3	11
0.4	519	0.9	34	1.4	35	1.9	13	2.4	8

Таблица 2. Яркость солнечного края

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	3	6	12	34
1	114	232	277	295	303	308	313	318	322	326
2	329	332	336	339	342	345	348	351	354	357
3	359	362	364	366	368	370	371	373	374	376
4	377	379	380	381	382	384	385	386	387	389
5	390	391	392	393	395	396	397	398	399	400
6	402	403	404	405	407	408	409	410	412	413
7	414	415	416	418	419	420	421	422	423	424
8	426	427	428	429	430	432	433	434	435	437
9	438	439	440	442	443	444	445	446	447	449
10	450	451	452	453	455	456	457	458	459	460

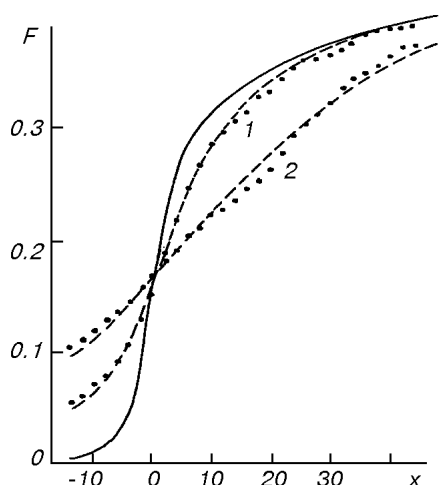


Рис. 2. Распределение яркости вдоль радиуса Солнца. Сплошная кривая — распределение, замкнутое только дифракцией, штриховые — распределения, замкнутые атмосферой, рассчитанные по формуле (5) при $\sigma = 1.4''$ (кривая 1) и $\sigma = 4.5''$ (кривая 2). Точки — наблюдаемое распределение

Распределение яркости по диску Солнца $f(r)$ в настоящее время известно с точностью, приемлемой для решения нашей задачи. В табл. 2 приведено его значение. Данные для расстояний от края больше $1''$ взяты из справочника [1], а для меньших расстояний и за краем, рассчитанные согласно HSRA-модели фотосферы, взяты из [7]. Яркость центра Солнца принята за 1000. Шаг таблицы составляет 0.1 радиуса дифракционного кольца, или 10 мкм на пленке, или $0.18''$ на диске Солнца. Таблица построена так, что в верхней строке приведены единицы шага, а в левом столбце — десятки. На пересечении строки и столбца записана относительная яркость. Начало координат произвольное.

Ядро атмосферного замытия линии, являющееся результатом интегрирования ядра замытия точки по одной из координат, при длительных экспозициях достаточно хорошо описывается нормальным законом:

$$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4)$$

Здесь σ — средний квадратичный радиус атмосферного замытия. При экспозициях в сотые доли секунды ядро может быть несимметричным. Для нашей экспозиции можно принять ядро (4), тогда наблюдаемое распределение яркости вдоль радиуса на краю солнечного диска будет равно

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x+t) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt, \quad (5)$$

где $\varphi(x)$ — распределение яркости вдоль радиуса, замытое дифракцией. Это свертка функций $G(p)$ и $f(r)$, представленных в табл. 1 и 2, полученная численным интегрированием.

На рис. 2 $\varphi(x)$ нанесена сплошной кривой. Такое распределение яркости мы имели бы в фокусе телескопа при отсутствии атмосферы. Пунктиром нанесены распределения яркости по снимкам на телескопе АЗТ-8. Штриховой кривой нанесены распределения, замытые атмосферной турбуленцией (формула (5)). При этом значение σ для чистого неба равно $1.4''$, а для фантома — $4.5''$. Единице на оси абсцисс соответствует один шаг измерения на пленке. Он равен 10 мкм, или $0.18''$ на небесной сфере. Начало оси помещено в точку с максимальной производной функции $f(r)$, которая обычно принимается за нуль-пункт шкалы высот в распределении поверхностной яркости по диску Солнца. Наблюдаемые точки совмещались с расчетными общим сдвигом по оси абсцисс.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, замытие изображений заметно увеличивается при прохождении следа растаявшего облака через луч зрения телескопа. По существующим представлениям радиус кружка атмосферного замытия пропорционален флуктуации температуры в объеме атмосферных неоднородностей и квадратному корню из числа неоднородностей на пути луча. В данном случае, по-видимому, увеличиваются оба фактора.

В работах, посвященных экспериментальному исследованию атмосферной турбулентности по дрожанию солнечного края [2, 3], неоднократно отмечался нестационарный характер дрожаний. Отдельные реализации величины смещения края давали на протяжении нескольких минут различный набор автокорреляционных функций: от характерных для белого шума до характерных для многопериодических и нестационарных процессов. Такое поведение можно объяснить влиянием фантомов, которое не может быть описано в рамках многослойных стационарных моделей. Здесь мы имеем дело с прохождением через луч зрения объемного образования с температурой и турбулентными свойствами, значительно отличающимися от средней атмосферы.

Исследование влияния фантомов на качество изображений необходимо для планирования наблюдения небесных тел. Применение ПЗС-приемников излучения позволяет наблюдать днем многие тела Солнечной системы и искусственные спутники, особенно в ИК-области спектра, где рассеяние света газовой атмосферой мало. Для этого важно знать условия и моменты, при которых замытие изображений минимально.

Исследование фантомов интересно и для физики земной атмосферы. Обычно турбулентные свойства атмосферы в облаках изучают самолетными методами, что дает информацию о размерах, сравнимых с размерами самолета. Измеряя временной и пространственный спектр величины дрожания изображения при прохождении фантома, мы можем изучать неоднородности в облаке, сравнимые по размерам с диаметром телескопа (сантиметры) для временных частот до килогерца. Нами разработана и изготовлена аппаратура для быстрой фотоэлектрической регистрации дрожаний края диска (Солнца или Луны) с записью информации на ЭВМ, которая будет описана в следующих работах.

Авторы признательны Л. Ф. Черногору за активное обсуждение работы и конструктивные замечания.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. Мир. Москва.—1974.—446 с.
2. Васильев О. Б., Ильясов У. И. Частотный спектр дрожаний края диска Солнца // Солнечные данные.—1971.—№ 9.—С. 93—101.
3. Васильев О. Б., Ильясов У. И. Частотно-временной спектр дрожаний края диска Солнца // Солнечные данные.—1972.—№ 12.—С. 82—90.
4. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика. — М., Л.: ОГИЗ., 1946.—368 с.
5. Распространение лазерного пучка в атмосфере / Под ред. Д. Стробена. — М.: Мир, 1981.—414 с.
6. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1967.—548 с.
7. Kurokawa H., Nakayama K., Tsubaki T., Kanno M. The continuum of the extreme limb and the chromosphere at the 1970 eclipse // Solar Phys.—1974.—36, N 1.—P. 69—79.

Поступила в редакцию 10.03.99