

УДК 523.942—14

Учет влияния атмосферного и инструментального рассеянного света на кривые потемнения к краю солнечного диска

С. Н. Осипов

Анализируется метод учета инструментального и атмосферного рассеянного света. На основе сравнения вычисленных и наблюдаемых распределений интенсивности в ореоле и на лимбе солнечного диска даются конкретные рекомендации к применению данной методики. Показано, что неопределенность коррекций центр — край значительно меньше точности наблюдений.

THE CORRECTION OF OBSERVED LIMB DARKENING FOR INSTRUMENTAL AND ATMOSPHERIC STRAY LIGHT, by Osipov S. N.— The method of accounting for instrumental and atmospheric stray light is analysed. The concrete recommendations to the application of the method are given on the basis of comparison of computed and observed intensity distribution in halo and solar limb. Miscalculation of limb darkening corrections is shown to be significantly less than the accuracy of observations.

Для определения интенсивности света в солнечных пятнах, изучения профилей фраунгоферовых линий, сильно изменяющих свою интенсивность к краю диска, при исследовании кривых центр — край необходим учет влияния атмосферного и инструментального рассеянного света.

Если $I(\rho, \alpha)$ — истинная интенсивность излучения некоторой точки на диске Солнца, то ее связь с наблюдаемой интенсивностью $I'(d, \alpha')$ запишется следующим образом:

$$I'(d, \alpha') = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{\odot}} I(\rho, \alpha) \psi(r) \rho d\rho d\alpha + \xi(d, \alpha'), \quad (1)$$

где r — расстояние между наблюдаемой точкой с координатами d, α' и произвольной точкой с координатами (ρ, α) на диске Солнца; $\psi(r)$ — инструментальная функция, которая выражает собой наблюдаемое распределение интенсивности точечного источника света, обусловленное процессами в атмосфере и телескопе (в дальнейшем она предполагается симметричной); $\xi(d, \alpha')$ — случайная функция, определяемая всеми теми причинами, которые ведут к появлению случайных ошибок. В случае, когда интенсивности $I'(d, \alpha')$ являются свободными от них, функцией $\xi(d, \alpha')$ можно пренебречь.

Все причины, из-за которых происходит рассеяние света на малые углы (до $20''$), принято называть замыванием. Оно обуславливается главным образом оптическими неоднородностями в атмосфере и рассеянием на мелких частицах непосредственно перед телескопом и в самом телескопе. Вклад в наблюдаемое замывание вносят также расфокусировка изображения, дифракция на диафрагмах, aberrации оптической системы, турбулентность воздуха, недостаточная разрешающая способность оптики и другие возможные причины.

Процессы, вследствие которых свет рассеивается на углы больше $20''$, мы будем называть рассеянием (в более узком смысле). Рассеяние происходит в основном на аэрозолях и пыли в атмосфере, царапинах на зеркалах телескопа, а также на самих оправках зеркал.

Оба эти процесса удобно рассматривать отдельно:

$$\psi(r) = (1 - \varepsilon) \psi_b(r) + \varepsilon \psi_s(r), \quad (2)$$

где $\psi_b(r)$ — инструментальная функция замыывания, она описывает ядро функции $\psi(r)$; $\psi_s(r)$ — инструментальная функция рассеяния; ε — параметр, определяющий их составные части.

Так как функция $\psi(r)$ имеет узкое ядро, то для центра диска или для области вне лимба, где наблюдаемая интенсивность изменяется слабо, на основе формул (1) и (2) можно записать:

$$I'(d) = (1 - \varepsilon)I(d) + \varepsilon I(0)S(d), \quad (3)$$

$$S(d) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_\odot} \frac{I(\rho)}{I(0)} \psi_s(r) \rho d\rho d\alpha, \quad (4)$$

где d — расстояние от центра диска. Таким образом, от формулы (1) мы перешли к формулам (3) и (4), которые уже не зависят от процессов замыывания.

Интеграл рассеянного света $S(d)$ не зависит ни от наличия пятен, ни от грануляции, а зависит от сглаженного потемнения к краю диска спокойной фотосферы $I(\rho)/I(0)$, которое можно представить по модели атмосферы.

На основе формулы (3) нетрудно найти связь между наблюдаемыми кривыми потемнения к краю $I'(d)$ и исправленными за рассеянный свет (но не за замыывание) $J_s(d)$:

$$J'(d) = \frac{I'(d)}{I'(0)} = \frac{(1 - \varepsilon)J_s(d) + \varepsilon \cdot S(d)}{1 - \varepsilon + \varepsilon \cdot S(0)}. \quad (5)$$

Для определения функции $\psi_s(r)$ и параметра ε воспользуемся распределением интенсивности в ореоле, где, согласно формуле (5):

$$J'(d) = \varepsilon S(d) / [1 - \varepsilon + \varepsilon \cdot S(0)]. \quad (6)$$

Очевидно, что необходимо измерить точные значения ореола в $n+1$ точках, где n — количество неизвестных параметров функции $\psi_s(r)$. Функция $\psi_b(r)$ определяется на основе уже найденной функции $\psi_s(r)$ по высокоточным наблюдениям профиля края диска в k точках, где k — количество неизвестных параметров функции $\psi_b(r)$. Для повышения точности желательно увеличить число замеров яркости как в ореоле, так и на лимбе. После нахождения функций $\psi_b(r)$ и $\psi_s(r)$ можно найти истинные кривые потемнения к краю $J(d)$ из следующего уравнения:

$$J_s(d) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_\odot} J(d) \psi_b(r) \rho d\rho d\alpha, \quad (7)$$

причем, кривая $J_s(d)$ должна быть предварительно сглажена.

Осталось выяснить, в каком виде искать функции $\psi_s(r)$ и $\psi_b(r)$. Инструментальная функция замыывания, согласно [5], хорошо описывается суммой двух гауссиан:

$$\psi_b(r) = \frac{m}{\pi b_1^2} \exp\left[-\left(\frac{r}{b_1}\right)^2\right] + \frac{1-m}{\pi b_2^2} \exp\left[-\left(\frac{r}{b_2}\right)^2\right]. \quad (8)$$

Значительно сложнее выбрать представление для функции $\psi_s(r)$. В настоящее время в литературе предпочтение отдается следующим формулам:

дисперсионная формула [1]:

$$\psi_b(r) = A/(B^2 + r^2), \quad (9)$$

двойная дисперсионная формула [3]:

$$\psi_b(r) = A[(B^2 + r^2)^{-1} + Q(C^2 + r^2)^{-1}], \quad (10)$$

представление, предложенное в [2]:

$$\psi_s(r) = A(B^q + r^q)^{-1}. \quad (11)$$

Постоянная A в формулах (9)—(11) находится из условий нормирования функции $\psi_s(r)$. Она влияет на величину параметра ϵ , но никак не влияет на определение параметров функции $\psi_s(r)$. Поэтому при нахождении $\psi_s(r)$ целесообразно принимать ее произвольной величиной.

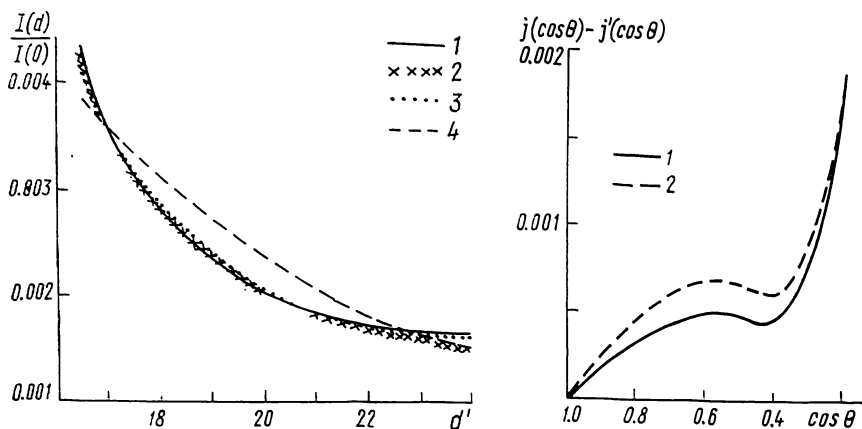


Рис. 1. Сравнение наблюдаемого и вычисленных по различным представлениям $\psi_s(r)$ ореолов. 1 — наблюдения, 2 — по формуле (10), 3 — по формуле (11), 4 — по формуле (9)

Рис. 2. Величина коррекций кривых центр — край к истинным, вычисленная на основе различных представлений $\psi_s(r)$. 1 — на основе формулы (9), 2 — на основе формул (10) и (11)

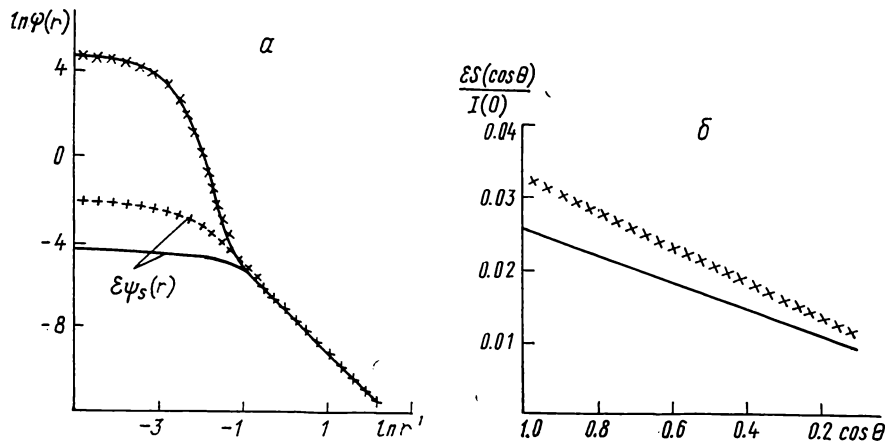


Рис. 3. а) инструментальная функция $\psi(r)$ и возможные варианты ее составляющей $\epsilon\psi_s(r)$; б) величина рассеянного света на диске Солнца при двух возможных вариантах функции $\psi_s(r)$

Если потемнение к краю спокойной фотосферы представить в виде полинома на основе данных одной из атмосферных моделей, то при использовании формулы (9) можно найти аналитическое решение интеграла (4) (например, [4]). Несложно в этом случае найти и константу A (например, [5]). Интеграл (4) поддается аналитическому решению и при использовании формулы (10). Представление (11) требует численных методов решения интеграла (4) и определения постоянной A .

Мы провели расчеты на основе формул (4)—(11) для восьми отдельных кривых центр — край и ореолов в области 440—540 нм, полу-

ченных методом фотоэлектрического сканирования на телескопе АЦУ-5 ГАО АН УССР в июне 1984 г. Результаты для характерного наблюдения в длине волны 445 нм приводятся на рис. 1—3. При расчетах предполагалось, что функция $\psi(r)$ сохраняется неизменной в течение всего сканирования.

Очевидно, что критерием применимости того или иного представления $\psi_s(r)$ должна служить степень совпадения вычисленных на основе этих формул и наблюдаемых ореолов.

Дисперсионная формула из восьми сравнений лишь однажды показала удовлетворительное совпадение, тогда как формулы (10) и (11) представляют ореол значительно лучше. Причем, на расстояниях менее 200" за лимбом несколько лучшее совпадение достигается при использовании формулы (10), а на расстояниях более 200" — формулы (11) (рис. 1). Тем не менее коррекции кривых центр — край, полученные на основе формул (10) и (11), практически совпадают (рис. 2). Неопределенность этих коррекций, определяемая возможным отклонением реальной функции $\psi(r)$ от найденной нами при расчетах по формулам (10) и (11), значительно меньше точности наблюдений, равной ≈ 0.002 . Поэтому представления (10) и (11) с успехом могут применяться на практике. Коррекции на основе формулы (9) менее точны, но при умеренной величине ореола дисперсионная формула в первом приближении также может быть пригодной для коррекций кривых центр — край.

В заключение следует подчеркнуть, что деление на рассеяние и замыкание является условным и зависит от найденных функций $\psi_s(r)$ и $\psi_b(r)$. На рис. 3а приводятся два варианта возможных составляющих $\epsilon\psi_s(r)$, при которых пространственная функция $\psi(r)$ практически остается неизменной (изменяется лишь соотношение вклада функций $\psi_s(r)$ и $\psi_b(r)$ в $\psi(r)$). Величина же рассеянного света по диску $\epsilon S(d)$ изменяется существенно (рис. 3б). Об этой упомянутой выше условности следует помнить при работе с функциями $\psi_s(r)$ и $\psi_b(r)$ раздельно. Для учета влияния рассеянного света корректно пользоваться только итоговой функцией $\psi(r)$, которая описывает процессы рассеяния как на малые, так и на большие углы. При нахождении параметров функции $\psi(r)$ необходимо основываться на высокоточных наблюдениях профиля края диска и ореола на расстояниях до 10' — 20' за лимбом.

1. Фесенков В., Штауде Н., Виноградова Е., Баранцева М. Редукция фотометрических наблюдений над Луной за эффект ореола // Астрон. журн.—1926.—3, № 1.— С. 75—91.
2. Brahe R. Stray light in solar observations. A method of numerical integration.— Blindern-Oslo, 1974.— 49 p.— (Report/Institute Theor. Astrophys.; N 41).
3. David K.-H., Elste G. Der Einfluß von Streulicht auf die Photometrie der Sonnenoberfläche // Z. Astrophys.—1962.—54, N 1.— S. 12—24.
4. Maltby P., Staveland L. On the correction of observed penumbral intensities for scattered light.— Blindern-Oslo, 1972.—12 p.— (Report/Institute Theor. Astrophys.; N 33).
5. Zwaan C. Sunspot model. A study of sunspot spectra // Rech. Astron. Obs. Utrecht.—1965.—17(4).—182 p.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию 31.05.85,
после доработки 12.07.85