

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ЯРКОСТИ ДИСКА СОЛНЦА ОТ ЦЕНТРА К КРАЮ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

В.В. Катюшина, Ю.В. Писанко, П.М. Свидский, К.В. Куимов

В модельном рассмотрении связи изменения нормированного потока солнечного излучения ($I_{\text{норм}}$) при затмении с долей (X) незатененной Луной части солнечного диска показано, что зависимость $I_{\text{норм}}(X)$ позволяет определить характер изменения яркости диска Солнца от центра к краю. Проведено сравнение модельных расчетов с результатами наблюдений затмения 31 мая 2003 с борта ИСЗ КОРОНАС-Ф в ряде длин волн. Для видимой области спектра, где имеются табличные данные о потемнении диска Солнца от центра к краю, получено хорошее согласие расчетных и измеренных значений функции $I_{\text{норм}}(X)$. Предлагаемым методом можно получить данные об изменении яркости диска Солнца от центра к краю для тех длин волн, где такие данные в настоящее время отсутствуют.

Ключевые слова: Солнце, затмение, потемнение от центра к краю, измерения со спутника, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Данные наблюдений об изменении яркости диска Солнца от центра к краю лежат в основе современных эмпирических моделей строения солнечной атмосферы. Эти модели нужны для решения ряда прикладных задач. При этом для видимой и ближней ультрафиолетовой областей спектра ($\lambda \geq 146$ нм) такие измерения достаточно известны: сведены в справочные таблицы, см., например, [1,2], и обсуждаются в учебниках по астрономии, см., например, [3]. Несмотря на это, данные в указанной области продолжают пополняться.

В далекой ультрафиолетовой области, где значительно труднее проводить измерения, имеются пока отдельные разрозненные работы, см., например, [4-7]. Поэтому представляется полезным для получения данных о характере изменения яркости диска Солнца от центра к краю использовать естественное сканирование солнечного диска диском Луны. В работе были [8] представлены потоки солнечного излучения в ряде длин волн, измеренные во время кольцеобразного солнечного затмения 31 мая 2003г. с борта ИСЗ КОРОНАС-Ф приборами ВУСС и ДИФОС. Там же проведено сравнение нормированных сигналов (отношения сигналов приборов при регистрации затмения

I к максимальным значениям, т.е. значениям вне затмения I_0 , $I_{\text{норм}} = I/I_0$ с величиной параметра X (долей площади солнечного диска, незатененной Луной при наблюдениях со спутника). Спутник трижды пересек полосу затмения. Расчеты показывают, что со спутника затмение было видно как частное с различными траекториями движения центра диска Луны по солнечному диску, и соответственно различными максимальными фазами затмения при каждом из пролетов полосы затмения. Траектории получены с использованием программы ASTROPUZ [9], предоставленной В.В. Чазовым. Во время 1 и 2 пролетов Луна прошла с востока на запад несколько южнее во время 1 пролета и несколько севернее видимого со спутника солнечного экватора во время 2 пролета. Третий раз Луна только слегка затенила северо-восточную часть солнечного диска.

Прибор ВУСС имел максимальную чувствительность вблизи самой яркой линии коротковолновой области спектра Солнца, линии водорода $H\text{L}\alpha$. Он опрашивался телеметрической системой каждые 130 мсек, точность относительных измерений составляла доли процента [10]. Прибор ДИФОС [11] измерял солнечное излучение в узких полосах длин волн, центрированных на 350, 500, 650,

850, 1100 и 1500 нм. Точность относительных измерений 0,2%. Частота измерений - 33,55 сек. В расчетах, приведенных ниже, использованы данные по каналу 500 нм.

Во время первых двух пролетов полосы затмения зарегистрированы минимальные значения нормированных сигналов обоих приборов меньше минимального значения параметра X . При этом кривые зависимостей от времени нормированных сигналов прибора и параметра X на обеих ветвях (убывания и возрастания сигнала) пересекаются [8]. Точка пересечения находится вблизи $X \approx 0.6$: при $X > 0.6$ нормированные сигналы приборов превышают значения параметра X , соответственно, при $X < 0.6$ имеет место обратное соотношение. Во время третьего пролета пересечения нет. В этом пролете все значения $I_{норм} \geq 0.74$, а значения $I_{норм} > X$. Поэтому противоречия с первыми двумя пролетами нет. (Естественно, вне полосы затмения $I_{норм} = X = 1$).

Если бы свечение солнечного диска было однородным, обе кривые совпали бы. Таким образом, пересечение кривых обусловлено известным явлением - изменением яркости диска Солнца от центра к краю. Очевидно, что при разных распределениях яркости взаимные расположения указанных кривых будут различны.

Целью настоящей работы является рассмотрение задачи об использовании данных измерения потока излучения при затмении для получения количественных оценок изменения яркости от центра к краю.

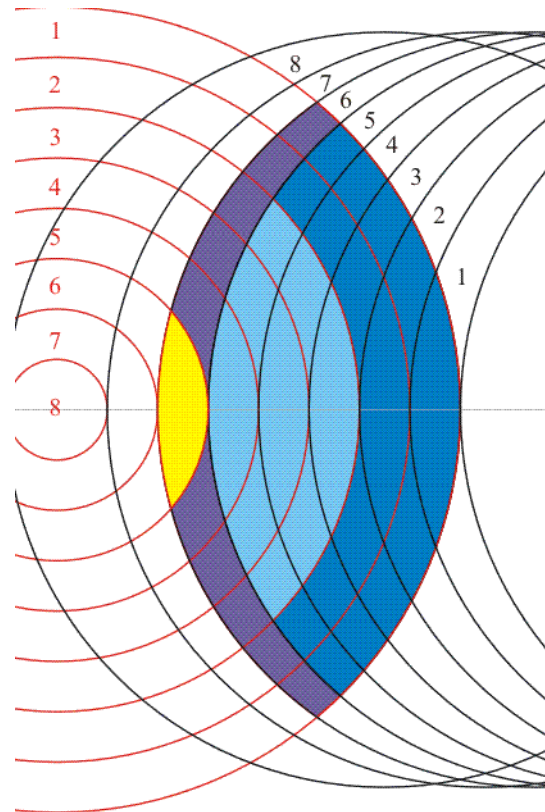
МЕТОД

Для удобства дальнейшего изложения результатов анализа распределения яркости b по диску Солнца будем рассматривать изменение потока излучения в зависимости от площади s затененной Луной части солнечного диска (см. рис.).

Она складывается из двух круговых сегментов с радиусами Солнца r_s и Луны r_m , стянутых единой хордой. На рисунке показано несколько последовательных положений i Луны, надвигающейся справа, а также, сопряженных с ними касанием, последовательно уменьшающихся круговых частей k солнечного диска. В целом это образует сетку координатных ячеек q_{ik} .

Рассмотрение этого рисунка подсказывает

целесообразность выбора для дальнейшего анализа соответствующей системы координат (ξ, σ) . В качестве координатных линий ξ (синие линии) используются окружности с радиусом Луны μ , центр которых отстоит на $\xi + \mu$ от центра Солнца. Вторые координатные линии образуются концентрическими окружностями радиусом σ около центра Солнца (красные линии). Заметим, что величина ξ связана с фазой затмения Φ : $\xi = 2r_s - \Phi$.



Примем, что яркость зависит только от расстояния до центра солнечного диска, т.е. от σ , а её изменением за время наблюдения затмения можно пренебречь. Возможность и следствия такого допущения обсудим позднее.

В новых координатах поток затененного излучения при разных значениях ξ запишется в виде интеграла, приравняв который соответствующей величине $F(\xi)$, полученной по данным измерений потока, приходим к интегральному уравнению Вольтерра:

$$F(\xi) = \int_{\xi}^{r_s} b(\sigma) \cdot \int_{\xi}^{\sigma} D(\xi, \sigma) \cdot d\xi \cdot d\sigma, \quad (1)$$

где $D(\xi, \sigma)$ – якобиан преобразования координат.

Решение этого уравнения дает, в принципе, искомую зависимость $b(\sigma)$.

Для получения решения в данном

конкретном случае учтём два обстоятельства. Во-первых, эмпирическая функция $F(\xi)$ получается путем измерений в конечном числе интервалов изменения ξ , что подсказывает целесообразность использования конечно-разностной схемы. Во-вторых, правая часть в интеграле формулы (1) представляет площадь $s(\xi, \sigma)$ части тени, ограниченной конкретными значениями этих координат (см. рис.), которая может быть вычислена элементарно, как сумма площадей двух составляющих её сегментов [8].

В связи с этим, заменим (1) конечной суммой, разбив интервалы изменения координат на части точками ξ_i и σ_k ($i, k = 1, \dots, n$). При этом мы получим, как можно видеть на рис., частичные площадки тени $s_{i,k}$. Далее, выделим полосы $p_{i,k} = s_{i,k} - s_{i,k+1}$ и, наконец, $q_{i,k} = p_{i,k} - p_{i-1,k}$, соответствующие элементарным координатным ячейкам.

Введем также обозначение $\delta F_i = F(\xi_i) - F(\xi_{i-1})$, тогда из суммы, соответствующей (1), получим рекуррентную формулу для определения b_i :

$$b_i \cdot q_{i,i} = \delta F_i - \sum_{k=1}^{i-1} b_k \cdot q_{i,k} \quad (2)$$

Таблица 1.

I	1	2	3	4	5	6	7	8
μ	0.94369	0.94365	0.94348	0.94336	0.94324	0.94312	0.94298	0.94285
ξ	1.0	0.875	0.750	0.625	0.500	0.375	0.250	0.125
F_m	2.52565	2.47009	2.37516	2.26064	2.13419	2.00004	1.86095	1.71832
b_m	0.95869	0.87927	0.80647	0.73976	0.67869	0.62288	0.57229	0.52983
b_r	0.96615	0.87487	0.80613	0.73801	0.67734	0.62115	0.56997	0.52367

Таблица 2.

I	1	2	3	4	5	6	7	8
μ	0.94369	0.94365	0.94348	0.94336	0.94324	0.94312	0.94298	0.94285
ξ	1.0	0.875	0.750	0.625	0.500	0.375	0.250	0.125
F_B	2.84363	2.80293	2.72679	2.61650	2.47350	2.30133	2.10347	1.88474
F_D	1.00029	0.98709	0.95942	0.91966	0.86970	0.81154	0.74660	0.67623
b_B	0.70786	0.75951	0.98244	1.11473	1.21918	1.30350	1.34155	1.31991
b_D	0.22953	0.29995	0.34642	0.37434	0.38442	0.39396	0.39528	0.39510

В обоих случаях имеет место потемнение солнечного диска от центра к краю в длинах волн, регистрировавшихся приборами ВУСС и ДИФОС. При этом яркость в более коротковолновой области спектра, формирующегося в более высоких слоях хромосферы, убывает от центра к краю медленнее, чем в видимой области.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения задачи об относительном изменении яркости от центра солнечного диска к краю единицы, в которых выражены измеренные при затмении потоки, несущественны, поэтому мы не останавливаемся на этом вопросе, а используем просто измеренный сигнал F , пропорциональный потоку, и относительные величины ξ , σ , μ ($r_s = 1$). При выполнении конкретных расчетов ограничимся значением $n=8$.

Для оценки точности расчетов сопоставим модельную зависимость b_m и рассчитанный по (1) модельный сигнал F_m , а затем снова рассчитаем b_r по F_m с помощью рекуррентной формулы (2) (см. табл. 1). (Радиус Луны (μ) принят таким, каким он был на 2-ом пролете полосы затмения).

Хорошее согласие заданных и рассчитанных значений свидетельствует о том, что принятое разбиение обеспечивает достаточную точность.

Результаты расчета зависимости b от расстояния от центра солнечного диска представлены в таблице 2 для данных наблюдений приборами ВУСС (F_B , b_B) и ДИФОС по каналу 500 нм (F_D , b_D) с борта ИСЗ КОРОНАС-Ф 31 мая 2003 г. в 4:20 UT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По изменению потоков солнечного излучения во время солнечного затмения можно судить о характере изменения яркости солнечного диска от центра к краю в соответствующей длине волны.

Все измерения солнечного излучения,

проведенные с борта КОРОНАС-Ф 31 мая 2003 г. приборами ВУСС и ДИФОС, свидетельствуют о том, что в диапазонах длин волн, регистрировавшихся указанной аппаратурой имеет место потемнение солнечного диска от центра к краю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. – М.: «Наука», Главная редакция Физико-математической литературы, 1991.
2. Ален К.У. Астрофизические величины. – М.: ИИЛ, 1960.
3. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии. – М.: Изд-во УРСС, 2004.
4. Worden J.R., Woods T.N., Dowman K.W. Far-ultraviolet intensities and center-to-limb variations of active regions and quiet sun using UARS solstice irradiance measurements and ground-based spectroheliograms// *Ap. J* 560:1020-1034, 2001.
5. Withbroe G.L. Solar XUV Limb Brightening Observations// *Solar Physics*, 1970, № 1.
6. Prinz D.K. Spatial distribution of Lyman- α on the Sun// *Ap J*. 1974, pp. 369-375.
7. Mango S.A., Bohlin J.D., Glackin D.L., Linsky J.L. The solar XUV HeI and HeII emission lines. I. Intensities and cross center-to-limb behavior. *Ap J* 220, 683-691, 1978.
8. Нусинов А.А., Катюшина В.В., Казачевская Т.В., Куимов К.В., Бугаенко О.И., Слемзин В.А., Лебедев Н.И. Наблюдения солнечных затмений в коротковолновой области спектра с ИСЗ КОРОНАС-Ф// *Астрономический вестник*, 2006, № 4.
9. Бахтигараев Н.С., Чазов В.В. Информационное обеспечение космических экспериментов на основе численно-аналитической теории движения искусственных спутников Земли. *Космические исследования*. 2005, №5.
10. Казачевская Т.В., Нусинов А.А., Катюшина В.В., Гонюх Д.А. Вариации потока солнечного коротковолнового излучения в цикле солнечной активности: (по измерениям на спутниках «КОРОНАС» и по модельным расчетам)// *Астрономический вестник*, 2008, № 3.
11. Лебедев Н.И., Кузнецов В.Д., Ораевский В.Н., Штауде Й., Костык Р.И. Гелиосейсмологический эксперимент ДИФОС на спутнике КОРОНАС-Ф// *АЖ* 2004, №10.
12. Жугжда Ю.Д., Кузнецов В.Д., Лебедев Н.И. Флуктуации яркости Солнца и его собственные колебания (эксперимент ДИФОС). Гл.2 в кн. *Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф*. – М.: Физматлит, 2009.

Благодарности

Авторы выражают свою искреннюю благодарность А.А. Нусинову, Т.В. Казачевской, А.Б. Делоне за интерес к работе и доброжелательную критику, а также д.т.н. Тertyшникову А.В. за подготовку статьи к публикации.