

УДК 523.98

Расчет и анализ энергии излучения оптических солнечных вспышек, наблюдавшихся в 1978 г.

Л. Н. Курочка, В. Г. Лозпцкий, П. Палуш

Расчитаны энергии излучения низкотемпературных частей 5508 вспышек, наблюдавшихся в 1978 г. Учитывалось излучение во всех линиях и континуумах водородных серий (начиная с серии Лаймана) при типичных параметрах вспышек разной интенсивности. Из наблюдений взяты данные об интенсивности в линии H_{α} , площади и времени существования каждой вспышки. Для вспышек всех баллов получены средние значения энергий, которые с увеличением балла увеличиваются, а количество наблюдаемых вспышек уменьшается. Суммарная энергия, излучаемая вспышками каждого балла, несколько увеличивается с повышением балла. С уменьшением энергии вспышек до $5 \cdot 10^{20}$ Дж их количество увеличивается, а затем быстро уменьшается. Это послужило аргументом для предположения о том, что вспышки на Солнце представляют собой независимый класс событий среди других нестационарных процессов.

RADIATION ENERGY ESTIMATION AND ANALYSIS OF OPTICAL SOLAR FLARES OBSERVED IN 1978, by Kurochka L. N., Lozitskij V. G., Paluš P.— Radiation energies of 5508 flares observed in 1978 are estimated. The radiation in all lines and in continua of hydrogen series (beginning with Lyman) with typical parameters of the flares of different intensities is taken into consideration. The data on H_{α} intensity, flares area and life-time are taken from observations. Mean energy values are obtained for flares of every importance which increase with importance, whereas the number of the flares observed decreases. The total energy of flares of every importance somewhat increases with the importance. With the flare energy decrease their number increases at first up to $5 \cdot 10^{20}$ J and then fastly decreases. This suggests that the flares on the Sun are independent events among other non-stationary processes.

Солнечные вспышки существенно отличаются по энерговыделению и соответственно по геофизическим проявлениям. Из всех видов энергии, излучаемой вспышками, рассмотрим энергию, излучаемую той частью (низкотемпературной) вспышки, которая в первую очередь ответственна за излучение в оптическом диапазоне водородного спектра, т. е. в линии H_{α} , других бальмеровских линиях и континууме. Поскольку эта область вспышки излучает также в ультрафиолетовом (серия Лаймана) и инфракрасном (серия Пашена, Бреккета и др.) диапазонах спектра, то при расчетах энергии вспышек это излучение учитывалось. При этом использовались населенности уровней атомов водорода, полученные по типичным бальмеровским декрементам вспышек [2].

Для каждой вспышки, наблюдавшейся в 1978 г., вычислялась энергия излучения E_H по данным о наблюдаемой продолжительности существования вспышки T (в мин) в линии H_{α} , о ее площади S_p в момент максимума (в миллионных долях полусферы — м. д. п.; 1 м. д. п. = $3.04 \cdot 10^{12}$ м²) и о балле вспышки i (для каждого балла задавалась определенная величина центральной интенсивности $I_{3,2}$ в линии H_{α}). Принималось, что в относительных единицах $I_{3,2}/I_{\lambda}^C$ изменяется от 0.5 для нормальных по яркости субвспышек до 2.1 для вспышек балла $4N$ [3]. Для вспышек других баллов она аппроксимируется следующим соотношением:

$$I_{3,2}(i)/I_{\lambda}^C = 0.5 + 0.2i^{3/2}. \quad (1)$$

Здесь i для субвспышек равно нулю, а для вспышек других баллов принимает значения 1, 2, 3 и 4 соответственно. Внутри каждого балла интенсивность слабых вспышек iF принималась примерно в 1.4 раза ниже, а ярких iB — в 1.4 раза выше интенсивности нормальных iN

вспышек. Суммарная энергия, излучаемая вспышкой данного балла в водородных сериях, вычислялась по формуле [4]:

$$E_H(i) = \epsilon_H(i) S_p T. \quad (2)$$

Значения S_p и T брались из «Solar geophysical data», а $\epsilon_H(i)$ для вспышек всех баллов получены на основании расчетов, выполненных в работе [2]. Для нормальных по яркости вспышек (от SN до $4N$) значения $\epsilon_H(i)$ соответственно равны, Дж/(мин·м. д. п.): $7.8 \cdot 10^{17}$, 1.8×10^{18} , $5.5 \cdot 10^{19}$, $5.0 \cdot 10^{19}$.

В тех случаях, когда из наблюдений известна центральная интенсивность вспышки в линии H_α в момент максимума или есть желание при расчетах принять значения $I_{3,2}(i)$, отличающиеся от (1), результаты расчетов ϵ_H можно представить аппроксимационным выражением

$$\epsilon_H = 5.5 \cdot 10^{18} (I_{3,2}/I_\lambda^\odot)^{2.8}. \quad (3)$$

Значение I_λ^\odot , согласно [1], принято равным $2.8 \cdot 10^{11}$ Дж/(м²·с·ср). Численный коэффициент в (3) принят таким, чтобы величина ϵ_H была выражена в Дж/(мин·м. д. п.).

Как видно из формулы (2), величина $\epsilon_H(i)$ представляет собой усредненную по площади и времени энергию, излучаемую низкотемпературными частями вспышек каждого балла в водородных сериях. При расчетах $\epsilon_H(i)$ принимались характерные законы изменения интенсивности вспышек со временем и по площади, типичное для вспышек каждого балла значение доплеровской ширины и ее изменение со временем, типичные бальмеровские декременты для вспышек разной интенсивности [2] и др. Величина $\epsilon_H(i)$ включает в себя излучение вспышек как в бальмеровской серии водорода, так и во всех линиях и континуумах водородных серий. Отметим, что каждой интенсивности $I_{3,2}$ соответствует характерный бальмеровский декремент, а значение $I_{3,2}$ изменяется по площади вспышки и со временем. При этом для вспышек всех баллов использовалась одна и та же связь между бальмеровским декрементом и центральной интенсивностью линии H_α . Вычисленные таким образом значения E_H могут отличаться от реальных в несколько раз. Так как при расчетах $\epsilon_H(i)$ приняты типичные для вспышек параметры, а их фактические значения распределены относительно принятых по определенному закону, то, следовательно, реальное распределение вспышек каждого балла по энергиям будет несколько шире полученного.

Распределение оптических вспышек разных баллов по энергиям приведено в таблице. Из-за существенного различия (внутри одного балла) трех использованных наблюдательных параметров энергии субвспышек составляли от 10^{19} до 10^{23} Дж (среднее значение энергии 10^{21} Дж); диапазон энергий вспышек балла 1 несколько меньше — от 10^{20} до $3 \cdot 10^{23}$ Дж ($2 \cdot 10^{22}$ Дж); энергии вспышек балла 2 — от $3 \cdot 10^{22}$ до $3 \cdot 10^{24}$ Дж ($5 \cdot 10^{23}$ Дж); энергии вспышек балла 3 различались не более, чем на порядок. Однако следует отметить, что в 1978 г. наблюдались только четыре вспышки балла 3, и все они относились к числу ярких. Среднее значение их энергии близко к 10^{25} Дж. Из расчетов видно, что область энергий, в которой наблюдаются вспышки одного балла, сужается с увеличением балла. Это обусловлено значительным различием числа возникающих вспышек разных баллов.

Количество вспышек с увеличением балла (на единицу) уменьшается примерно на порядок, а среднее значение их энергий увеличивается несколько больше, чем на порядок (от 10^{21} для субвспышек до 10^{25} Дж для вспышек балла 3). Таким образом, в 1978 г. суммарные энергии, излучаемые вспышками каждого балла, не одинаковы, а увеличиваются в среднем в два раза при переходе от слабых к более мощным вспышкам.

Из приведенных расчетов видно, что энергия излучения низко-температурных частей вспышек так велика (для самых мощных вспышек она достигает $3 \cdot 10^{25}$ Дж), что ее следует рассматривать как один из важных источников энергопотерь вспышек, т. е. оптическую вспышку нельзя считать только индикатором вспышечного процесса. Более того, энергия излучения вспышек в мягком рентгеновском диапазоне спектра, которая многими считалась основной в излучении, не является определяющей. Это убедительно следует из фундаментальных работ [9, 10], в которых для большого количества вспышек проводилось сравнение интенсивности излучения в различных диапазонах в области от 0.05 до 2 нм. Из анализа полученных в [9, 10] соотношений следует, что полная интенсивность излучения в мягком рентгеновском диапазоне спектра (*SXR*) примерно в четыре — пять раз превышает интенсивность излучения в диапазоне 0.8—1.2 нм. Поскольку (по определению авторов [9, 10]) интенсивность излучения вспышек в линии H_{α} примерно в шесть раз превышает интенсивность излучения в диапазоне 0.8—1.2 нм, то, как правило, во вспышках $E_{H_{\alpha}} \gtrsim E_{SXR}$.

Распределение вспышек 1978 г. по энергиям

$\lg E$	S			1			2			3			ΔN_E
	F	N	B	F	N	B	F	N	B	F	N	B	
19 —19.5	84	24	2										110
19.5—20	423	214	9										646
20 —20.5	810	518	64	2									1394
20.5—21	682	880	178	2	3	3							1748
21 —21.5	174	532	218	23	11	1							959
21.5—22	17	98	114	27	100	8							364
22 —22.5		9	22	8	80	38							157
22.5—23		2			6	53	3	11	1				76
23 —23.5				1		7		9	10				27
23.5—24								2	13				15
24 —24.5								1	7				8
24.5—35												3	3
35 —35.5												1	1
N_i	5074			373			57			4			5508
ΣE_i	$5 \cdot 10^{24}$			$8 \cdot 10^{24}$			$3 \cdot 10^{25}$			$4 \cdot 10^{25}$			$8 \cdot 10^{25}$
\bar{E}_i	$1 \cdot 10^{21}$			$2 \cdot 10^{22}$			$5 \cdot 10^{23}$			$1 \cdot 10^{25}$			

Сравнение интенсивности излучения вспышек в далекой УФ-области (*EUV*; от 10 до 130 нм) с интенсивностью излучения вспышек в мягком рентгеновском диапазоне спектра ($0.05 \text{ нм} \leq \lambda \leq 2 \text{ нм}$) [5—8] свидетельствует о том, что они равны для слабых [6] и мощных вспышек [8].

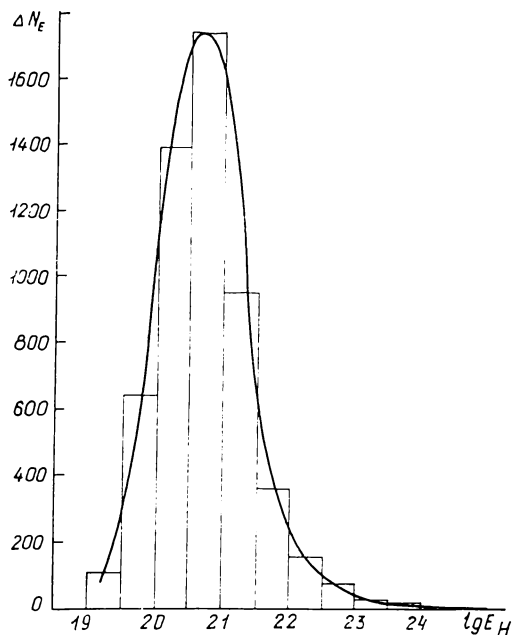
Принимая во внимание, что продолжительности эмиссии вспышек в диапазонах *EUV* и *SXR* мало различаются между собой [8, табл. 1], а регистрация этих интенсивностей проводится с точностью до множителя 2—4 [8, 9], можно считать, что энергии излучения $E_{EUV} \approx E_{SXR} \leq E_{H_{\alpha}}$. Поскольку, согласно [2], $E_{H_{\alpha}} \ll E_H$, то приведенные в настоящей работе значения E_H в целом довольно точно соответствуют энергии излучения солнечных вспышек, хотя и несколько занижены из-за неучета излучения в *EUV* и *SXR*. Расчет энергии излучения оптических вспышек (E_H) проводится с точностью до множителя 2—3 [3].

Известно, чем меньше балл вспышки, тем больше наблюдается таких вспышек (по данным за 1978 г. количество вспышек соседних баллов различается примерно на порядок). Из этого, однако, не следует, что с уменьшением энергии вспышек их количество увеличивается. На

рисунке видно, что увеличение числа вспышек происходит с уменьшением их энергий до значений порядка $5 \cdot 10^{20}$ Дж, с дальнейшим уменьшением энергии вспышек их количество быстро уменьшается. Из такого распределения вспышек по энергиям можно заключить (если базироваться на достоверности наблюдательного материала), что в атмосфере Солнца существуют оптимальные условия для возникновения вспышек энергией 10^{20} — 10^{21} Дж. Для понимания природы вспышек важно, что в этом узком интервале энергий наблюдается более 50 % всех вспышек.

Поскольку число вспышек малых энергий быстро уменьшается с уменьшением энергии, а количество энергетически слабых нестационарных объектов в атмосфере Солнца значительно превосходит количество солнечных вспышек, то можно заключить, что вспышки являются независимыми со-

Распределение по энергиям 5508 солнечных вспышек, наблюдавшихся в 1978 г. По оси ординат отложено количество вспышек ΔN_E в интервале энергий $\Delta \lg E_H = 0.5$, по оси абсцисс — полная энергия излучения вспышек E_H (в джоулях)



бытиями, и природа их, по-видимому, отличается от природы таких многочисленных и маломощных событий, как спиккулы, пульсации флоккулов или яркие точки (как в видимой, так и в УФ-области). Если бы кривая распределения энергий вспышек плавно переходила в кривую распределения энергий других образований, то можно было бы сделать вывод о том, что природа этих образований в атмосфере Солнца (от спиккул до мощных вспышек) одна и та же, а различаются они в основном масштабами процессов. Поскольку в области энергий 10^{17} — 10^{18} Дж, характерной для спиккул, наблюдается отдельный всплеск большего числа событий (на несколько порядков больше, чем вспышек), то есть основания считать, что природа этих явлений разная и вспышки представляют собой отдельный класс событий в атмосфере Солнца.

Авторы выражают благодарность Л. И. Кочкиной за выполнение большого объема технической работы.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины.— М.: Мир, 1977.— 245 с.
2. Курочка Л. Н., Стасюк Л. А. Энергия излучения оптических солнечных вспышек. I // Солнеч. данные.— 1981.— № 5.— С. 83—92.
3. Курочка Л. Н., Россада В. М. Энергия излучения оптических солнечных вспышек. II // Там же.— № 6.— С. 78—83.
4. Курочка Л. Н., Россада В. М. Энергия излучения оптических солнечных вспышек. III // Там же.— № 7.— С. 95—104.
5. Казачевская Т. В., Бруевич Е. А., Иванов-Холодный Г. С. Наблюдение хромосферных вспышек на Солнце в EUV-области спектра по данным ИСЗ // Там же.— 1986.— № 3.— С. 68—72.
6. Horan D. M., Kreplin R. W. Simultaneous measurements of EUV and soft X-ray solar flare emission // Solar Phys.— 1981.— 74, N 2.— P. 265—272.

7. *Horan D. M., Kreplin R. W., Fritz G. G.* Direct measurements of impulsive extreme ultraviolet and hard X-ray solar flare emission // *Astrophys. J.*— 1982.— 255, N 2.— P. 797—805.
8. *Horan D. M., Kreplin R. W., Dere K. P.* Direct measurements of the gradual extreme ultraviolet emission from large solar flares // *Solar. Phys.*— 1983.— 85, N 2.— P. 303—312.
9. *Thomas R. J.* Solar soft X-radiation.— NASA. Michigan Univ. Dep. Astron., 1970.— 193 p.
10. *Thomas R. J., Teske R. G.* Solar soft X-rays and solar activity. II. Soft X-ray emission during solar flares // *Solar Phys.*— 1971.— 16, N 2.— P. 431—453.

Астрон. обсерватория
Киев. ун-та им. Т. Г. Шевченко,
Братиславский ун-т им. Я. А. Коменского, ЧССР

Поступила в редакцию 10.09.86,
после доработки 04.03.87