

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК, СООТНОСЯЩИХСЯ С ГРУППАМИ ПЯТЕН РАЗНЫХ КЛАССОВ, В ТРЕХ ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Р.Т. Сотникова

### ENERGY SPECTRUM OF X-RAY FLARES ASSOCIATED WITH SPOT GROUPS OF DIFFERENT CLASSES IN THREE SOLAR CYCLES

R.T. Sotnikova

По данным прямых измерений потоков рентгеновского излучения от вспышек (1–8 Å, GOES) за три цикла солнечной активности (1977–2007 гг.) рассчитаны интегральные энергии вспышек, соотносящихся с активными областями групп пятен разных классов. Для вспышек активных областей каждого класса построены интегральные энергетические спектры и рассчитаны их показатели  $\beta$ . Установлено, что величина параметра  $\beta$  различна для активных областей разных классов. В каждом из классов обнаружена положительная корреляция этого параметра с 11-летним циклом (числами Вольфа). Присутствует связь  $\beta$  с 22-летним магнитным циклом. Полученные результаты могут быть использованы как для теории вспышек, так и для теории динамо.

Data from direct measurements of X-ray fluxes from flares (1–8 Å, GOES) for three solar cycles (1977–2007) were used to calculate integral energies of flares associated with active regions of spot groups of different class. For the flares in active regions of each class we constructed integral energy spectra and calculated their indices  $\beta$ . It was found that the  $\beta$  parameter value differed for active regions of different class. In each class, we revealed a positive correlation between this parameter and 11-year cycle (Wolf numbers). There is a relation between  $\beta$  and 22-year magnetic cycle. The findings can be used both for the flare theory and for the dynamo one.

#### Введение

Важнейшей количественной характеристикой вспышечной активности является энергетика вспышек. Анализ зависимости частоты вспышек от их полной энергии, т. е. энергетического спектра вспышек, является в настоящее время наиболее распространенным методом статистического рассмотрения энергетики вспышек. Оценки энергии звездных и солнечных вспышек в [1–3] показывают, что распределения их интегральных по времени значений энергий могут быть представлены степенной функцией:  $N \sim E^{-\beta}$ . Степенная зависимость часто используется для изучения общих законов возникновения и развития вспышек разного типа и в различных диапазонах спектра [4, 5]. Степенной энергетический спектр был найден для солнечных оптических вспышек [3]. Такой же характер энергетического спектра был доказан и для солнечных вспышек мягкого рентгеновского диапазона (1–8 Å) [6], и обнаружена уверенная корреляция спектрального индекса  $\beta$  с фазой 11-летнего солнечного цикла [7]. Совпадение энергетических спектров вспышек звезд и Солнца по степенной зависимости и по спектральному индексу свидетельствует об идентичности физической природы вспышечной активности этих объектов, а изменение спектрального индекса  $\beta$  с фазой 11-летнего цикла Солнца может являться фундаментальной зависимостью в теории вспышек.

#### Цель работы

В литературе по звездным вспышкам [1, 8] природа цикличности на звездах практически не объясняется, однако рассматривается общий аспект роли магнитных полей в образовании вспышек. Магнитная активность Солнца (звезды класса G2) носит циклический характер, что не вызывает никаких сомнений. Одиннадцатилетний цикл Солнца син-

хронизирует все проявления солнечной активности – от числа пятен и напряженности магнитных полей до потока излучения в микроволновом диапазоне. Поэтому возможно, что изменение энергетических параметров солнечных вспышек также является следствием 11-летнего цикла.

Возможно, что для всего Солнца  $\beta$  изменяется в цикле только за счет того, что с циклом активности изменяется процентное соотношение групп пятен (основных носителей магнитного поля) разных классов. И если  $\beta$  для вспышек от групп разных классов различно, то этот вариант может привести к изменению  $\beta$  в цикле для всего Солнца, даже если от групп пятен одного и того же класса  $\beta$  не изменяется на протяжении цикла. Для уточнения этого вопроса необходимо рассмотреть, как энергетический спектр вспышек связан с группами пятен разных классов.

Цель настоящей статьи – определить показатель спектра  $\beta$  для вспышек от активных областей разных классов и исследовать поведение  $\beta$  в цикле отдельно для вспышек от разных групп. В работе использовалась цюрихская модифицированная классификация групп пятен.

#### Анализ и обработка данных

Интегральные наблюдения Солнца в мягком рентгеновском диапазоне аналогичны наблюдениям звездных вспышек. Они являются удобным материалом для статистического анализа свойств вспышек.

Используемые в настоящей работе данные прямых измерений потоков мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек (1–8 Å) получены с комплекса спутников GOES в 1977–2007 гг. По длительности этот период соответствует трем циклам солнечной активности. В данных [9] указаны дата вспышки, время ее начала, максимальной стадии развития (максимальной интенсивности) и конца,

координаты положения вспышки на Солнце, ее рентгеновский класс и номер активной области, над которой или в окрестностях которой вспышка проявилась. Для каждой активной области указывается ее класс в каждый день наблюдений на протяжении всего периода ее существования.

В соответствии с этими данными было выполнено сопоставление каждой рентгеновской вспышки с соответствующей ей активной областью.

На первом этапе исследований задача состояла в том, чтобы выявить вспышки, расположенные над активными областями, и вспышки, не соотносящиеся с группами пятен, так называемые «беспятенные», и, в зависимости от этого, разделить все вспышки на две группы: активные (AO) и неактивные (NO). В дальнейшем для группы AO были выявлены вспышки, соответствующие активным областям класса A, B, C, D, E, F, H, и создана база данных по вспышкам для каждого из этих классов.

Первоначальная задача состояла в рассмотрении поведения  $\beta$  только в двух случаях: в мощных AO класса E–F, сгруппированных вместе, и более слабых AO A–B–C, также объединенных в общую базу данных. Число вспышек в этих группах разное, но как ведет себя в них  $\beta$ , будет ли различаться показатель спектра для этих групп и как он будет вести себя в цикле? Обработка данных проведена по методике [6, 10]. Для каждого года в течение трех циклов получены интегральные энергетические спектры вспышек и определены их показатели (рис. 1). Как видно из рисунка, изменение спектрального индекса в цикле присутствует как для мощных групп E–F, так и для групп A–B–C:  $\beta$  показывает положительную корреляцию с фазой цикла, т. е. с числами Вольфа. Также на графике заметно различие показателей спектра для этих двух типов активных областей.

Для уточнения последнего результата были получены значения  $\beta$ , рассчитанные по суммарному числу вспышек в каждом из трех циклов, для активных областей развивающихся групп A–B–C, распадающихся E–F и находящихся в максимуме эволюции групп D. Расчеты оформлены в виде таблицы и рис. 2

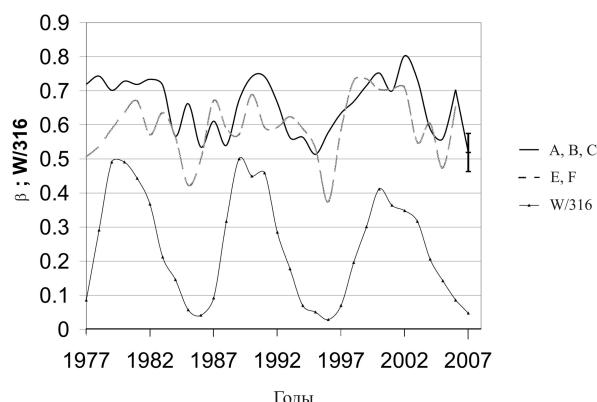


Рис. 1. Изменение показателя  $\beta$  энергетического спектра рентгеновских вспышек активных областей A–B–C и E–F в трех циклах солнечной активности ( $W$  – числа Вольфа). Вверху справа показан доверительный интервал на уровне значимости 0.95.

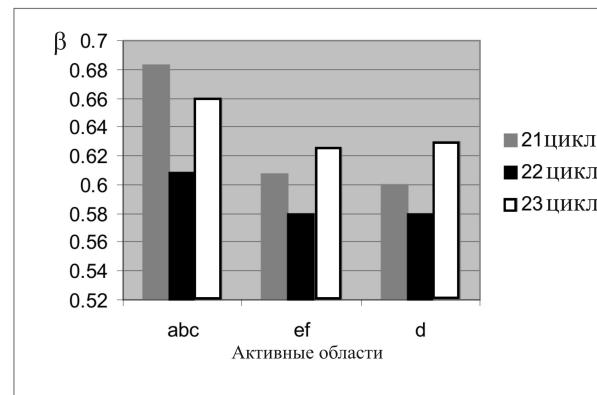


Рис. 2. Распределение показателя спектра в трех циклах солнечной активности для групп, находящихся в разной стадии эволюции. Присутствует 22-летняя модуляция  $\beta$ .

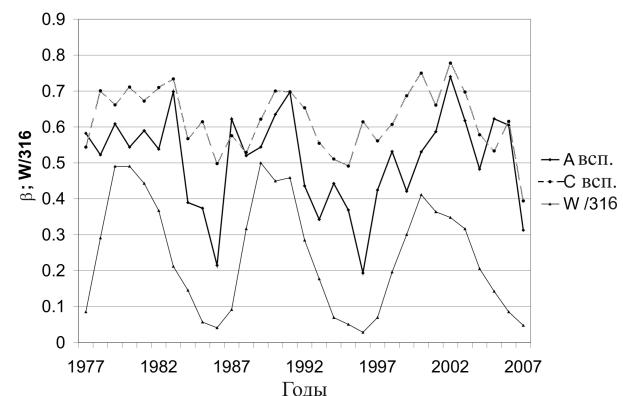


Рис. 3. Корреляция показателя спектра  $\beta$  с числом Вольфа ( $W$ ) для вспышек групп А и С. Заметно численное различие  $\beta$  для этих групп.

Численные значения спектрального индекса  $\beta$  в трех циклах.

	A–B–C	E–F	D
21 цикл	$0.683 \pm 0.039$	$0.607 \pm 0.023$	$0.60 \pm 0.030$
22 цикл	$0.608 \pm 0.040$	$0.580 \pm 0.026$	$0.58 \pm 0.032$
23 цикл	$0.660 \pm 0.040$	$0.625 \pm 0.023$	$0.63 \pm 0.027$

и подтверждают различие степенного индекса для рассматриваемых типов активных областей. Кроме того, присутствует различие между спектральными индексами четного 22-го и нечетных 21- и 23-го циклов, что характерно для 22-летнего магнитного цикла солнечной активности.

Для более достоверного анализа с учетом результатов, полученных на первом этапе, исследования были расширены и выполнены для групп пятен каждого класса отдельно. В пределах каждого отдельного класса, A, B, C, D, E–F, рассчитаны интегральные энергии вспышек от этих групп, построены интегральные энергетические спектры и определены среднегодовые спектральные индексы. Расчеты выполнены для каждого года за период с 1977 по 2007 г. и подтверждают результаты предыдущего анализа, т. е. показатель спектра для вспышек каждого класса уверенно варьирует с фазой цикла. Вариации  $\beta$  присутствуют и для самых слабых групп класса A (рис. 3).

## **Выводы**

- Величина спектрального индекса различна для активных областей разных классов.
- Для каждого класса обнаружена положительная корреляция этого параметра с фазой 11-летнего цикла.
- Спектральный индекс выявляет заметную 22-летнюю модуляцию.
- То обстоятельство, что показатель спектра всех вспышек коррелирует с циклом пятен и магнитным циклом, служит аргументом в пользу представления об их физической взаимосвязи и внутренних причинах цикличности в активности Солнца.
- Полученные выводы относятся к трем циклам солнечной активности и представляют интерес как для теории вспышек, так и для теории динамо.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гершберг Р.Е. Вспыхивающие красные карликовые звезды // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 8. С. 891–898.
2. Hudson H.S. Solar flares, microflares, nanoflares, and coronal heating // Solar Phys. 1991. V. 133. P. 357–369.
3. Курочка Л.Н. Распределение энергии 15 тысяч солнечных вспышек // Астрон. журн. 1987. Т. 64, № 2. С. 443–446.
4. Veronig A., Temmer M., Hanslmeier A., et al. Temporal aspects and frequency distributions of solar soft X-ray flares // Astron. Astrophys. 2002. V. 382. P. 1070–1080.
5. Yashiro S., Akiyama S., Gopalswamy N., et al. Different power-law indices in the frequency distributions of flares with and without coronal mass ejections // Astrophys. J. 2006. V. 650. P. L143–L146.
6. Kasinsky V.V., Sotnikova R.T. Variation of the solar flare energy spectrum over the 11-year activity cycle // Solar and Stellar Flares. I.A.U. Colloq. N 104. Poster Papers. Stanford, 1989. P. 255–258.
7. Sotnikova R.T. Solar flare energy spectrum over two activity cycles 1977–1995 and the similarity between solar and stellar flares // JOSO Ann. Rept. 1998. P. 158–159.
8. Гершберг Р.Е. Активность солнечного типа звезд главной последовательности. Одесса: Астропринт, 2002. 688 с.
9. PRAF of Solar Geophysical Data. 1972–2008. NOAA-USAF Space Environment Center, US Depart. of commerce. Boulder, Colorado.
10. Sotnikova R. X-ray solar flares in two cycles of solar activity // ASP Conference Series. V. 234. 2001. CD-ROM. (Proc. of Conference held in Mondello (Palermo), Italy, 4–9 September 2000).