

ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СПЕКТРОМЕТРОМ «ИРИС» НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «КОРОНАС-Ф»

**П.Б. Дмитриев, И.В. Кудрявцев, В.П. Лазутков, Г.А. Матвеев,
М.И. Савченко, Д.В. Скородумов**

**TIME STRUCTURE AND ENERGY SPECTRUM EVOLUTION OF THE SOLAR FLARE X-RAYS
MEASURED BY THE «IRIS» SPECTROMETER ON BOARD THE CORONAS-F SPACECRAFT**

**P.B. Dmitriev, I.V. Koudriavtsev, V.P. Lazutkov, G.A. Matveev,
M.I. Savchenko, D.V. Skorodumov**

Приведены результаты исследования временной структуры и динамики энергетических спектров рентгеновского излучения солнечных вспышек, зарегистрированных спектрометром «ИРИС» во время проведения космического эксперимента «Коронас-Ф». Обнаружено, что в мягком рентгеновском вспышечном излучении появляется один или два квазипериодических компонента с периодами от одного до двух десятков секунд, которые отсутствуют в фоновом излучении до вспышки. Показано, что изменение формы энергетических спектров жесткого рентгеновского излучения вспышек С-класса отражает эволюцию функции распределения ускоренных электронов.

The time structure and energy spectrum evolution of the X-ray emission of solar flares observed by spectrometer IRIS aboard the CORONAS-F spacecraft are investigated. It was found that the quasi-periodic oscillations from 10 to 30 s arise in the soft X-ray flare emission, while they are absent in the pre-flare one. The variation in the energetic spectrum of the hard X-ray emission of C-class flares was shown to depend on the distribution function of accelerated electrons.

Введение

Эксперимент ИРИС (исследование рентгеновского излучения Солнца) продолжил серию экспериментов по изучению рентгеновского излучения солнечных вспышек, проводившихся ранее на высокоапогейных спутниках серии Прогноз [1–5] и на орбитальной станции «Коронас-И» [6–8]. Рентгеновский спектрометр «ИРИС», обладающий высокой чувствительностью измерения рентгеновского излучения Солнца, позволяет досконально исследовать: спектрально-временные характеристики мягкого рентгеновского излучения (MRI) солнечных вспышек и излучения спокойного Солнца, когда интенсивность составляет не более $\sim 10^{-5}$ эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$; эволюцию энергетических спектров рентгеновского излучения с временным разрешением 1 с.

В патрульном режиме временное разрешение составляет 2.5 с, энергетический диапазон – 2.9–22 кэВ для MRI и 15–250 кэВ для жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ). В случае быстрого роста интенсивности излучения спектрометр переходит в режим «Всплеск» с временным разрешением 1 с и 0.01 с. Рентгеновское излучение с разрешением 1 с регистрируется в диапазонах 2.9–14 кэВ и 15–160 кэВ. Каждый из этих диапазонов разделен на 32 канала. В режиме «Всплеск» за все время функционирования спектрометра ИРИС зарегистрировано 187 вспышек.

Временная структура мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек

Квазипериодические осцилляции в интенсивности излучения от активных магнитных областей солнечной короны длительностью от единиц до десятков секунд систематически наблюдаются в радиодиапазоне [9, 10]. Считается, что причиной возникновения осцилляций такой величины в радиодиапазоне является «sausage-мода» ускоренной МГД-волны, которая вызывает модуляцию плотности и величины магнитного

поля активной корональной петли во время вспышки [11]. Так как радиопульсации, наблюдавшиеся во время вспышек, очень сильно коррелируют с временными профилями ЖРИ, то следует ожидать, что осцилляции такого же порядка должны наблюдаться и в рентгеновском диапазоне. В диапазоне MRI осцилляции такого порядка наблюдались во время космического эксперимента Yohkoh/SXT [12], правда, как довольно редкие события, – только для 16 из 544 построенных спектров мощности изображений солнечных вспышек были обнаружены квазипериодические колебания с периодами в пределах от 9.6 до 61.6 с. Эта статистика утверждает, что появление осцилляций такой величины во время вспышек довольно редкое явление, хотя и носит достаточно ясное объяснение [12] по аналогии с радиодиапазоном и, следовательно, должно сопутствовать чуть ли не каждой вспышке. Поэтому изучение данного вопроса на основе дополнительных экспериментальных данных имеет актуальное значение.

Для изучения существования квазипериодических осцилляций в MRI из зарегистрированных в период с декабря 2001 г. по декабрь 2002 г. вспышек были отобраны 10 событий, которые имели достаточно продолжительный предвспышечный «фон» (≈ 5 мин), непосредственно примыкающий к вспышке. Выявление квазипериодичностей осуществлялось методом построения комбинированной спектральной периодограммы (КСП), преимущества которого по сравнению с традиционным спектральным анализом приведены в [13].

Для предвспышечного и вспышечного излучения каждой отобранной вспышки была построена своя КСП, и по их значениям были отобраны компоненты на уровне значимости не менее 95 %, которые появились в КСП во время вспышки по сравнению с КСП предвспышечного излучения и значения которых приведены в таблице.

Начало вспышки		Выявленные квазипериоды, с	Рентгеновский класс
Дата	UT		
19.12.01	02:30:40	9.75	C4.9
10.08.02	09:43:48	23.75	C2.0
20.08.02	17:35:18	21.5; 33.0	C9.9
26.08.02	16:22:09	19.0	C7.6
03.09.02	07:44:06	9.0	C2.6
04.09.02	03:36:44	16.25	C1.7
26.09.02	02:06:21	21.25	C2.9
04.10.02	10:25:53	25.0	C6.2
15.10.02	09:14:31	27.0	C1.6
29.10.02	21:48:49	9.5; 27.0	C1.8

Пример отбора появившихся во время вспышек квазипериодических компонентов приведен на рис. 1, где изображены временной профиль (рис. 1, *a*), КСП предвспышечного (рис. 1, *б*) и вспышечного (рис. 1, *в*) излучения для вспышки, произошедшей 19 декабря 2001 г. в 02:30:40 UT. На рис. 1, *в* ясно виден появившийся во время вспышки квазипериодический компонент длительностью 9.75 с.

Следует отметить, что во всех отобранных событиях были обнаружены появившиеся во время вспышек квазипериодичности величиной от 9 до 33 секунд, причем в двух из них таких квазипериодов оказалось два, хотя отбор событий происходил только по признаку наличия в сеансе самой вспышки и достаточно большого участка предвспышечного фона, соизмеримого с ее длительностью, а не по наличию во вспышке появившегося квазипериодического компонента. Основываясь на этом факте, можно утверждать, что возникновение периодических осцилляций во временной структуре МРИ вспышек С-класса – не редкое, а частое явление и поэтому его можно считать характерным признаком вспышечного МРИ.

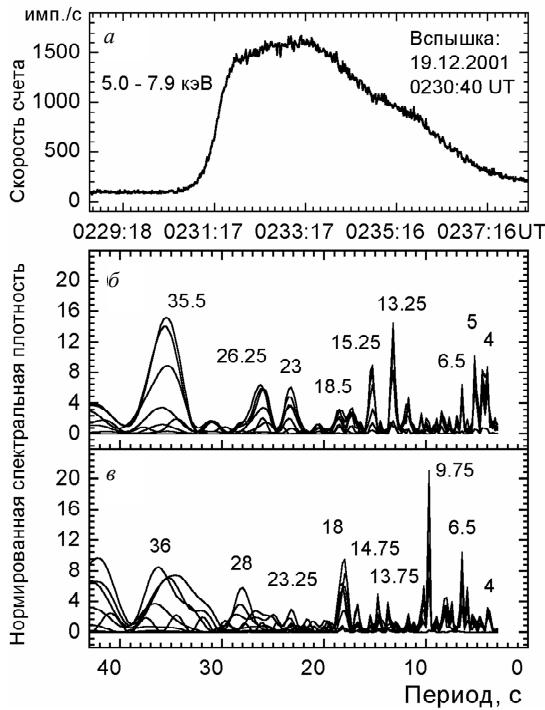


Рис. 1. Временной профиль (*а*) и КСП предвспышечного (*б*) и вспышечного (*в*) излучения вспышки 19.12.2001 02:30:40 UT.

Динамика спектров жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек

Рассмотрим временную эволюцию энергетических спектров четырех зарегистрированных спектрометром «ИРИС» вспышек. На рис. 2 приведены усредненные за 10 с спектры ЖРИ вспышки 29 октября 2002 г. на стадиях роста, максимума и спада интенсивности. Длительность всплеска ЖРИ составляет ~ 1.5 мин. Данная вспышка, относящаяся к рентгеновскому классу C1.8, была зарегистрирована в 21:47:02 UT в жестком рентгеновском диапазоне. Характерной особенностью этой вспышки является форма энергетического спектра ЖРИ. Как видно из рис. 2, на стадиях роста (кривые 1 и 2) и максимума (кривая 3) формируется энергетический спектр, имеющий сложную форму, который условно можно разделить на две составляющие с граничной энергией между ними ≈ 45 кэВ. Спектр в области малой энергии (до 45 кэВ), скорее всего, является тепловым излучением горячей плазмы, а в области более высокой энергии может быть интерпретирован тормозным излучением быстрых, ускоренных во время вспышки электронов. Такая форма спектра сохраняется и на стадии спада (кривая 4). Другой характерной особенностью энергетического спектра этой вспышки является то, что он становится «круче» с ростом энергии. Такое поведение спектра может быть объяснено, если распределение быстрых электронов, генерирующих тормозное рентгеновское излучение, имеет обрыв при некоторой максимальной энергии (для данной вспышки ≈ 160 кэВ). Таким образом, энергетический спектр ЖРИ показывает, что электроны во время данной вспышки ускоряются до некоторой максимальной энергии (≈ 160 кэВ). И, наконец, последней особенностью энергетического спектра рассматриваемой вспышки является то, что в начале стадии спада интенсивности количество квантов с энергией большей 112 кэВ превышает количество квантов в этом диапазоне на максимуме. Это говорит о трансформации энергетического распределения электронов при их распространении во вспышечной плазме.

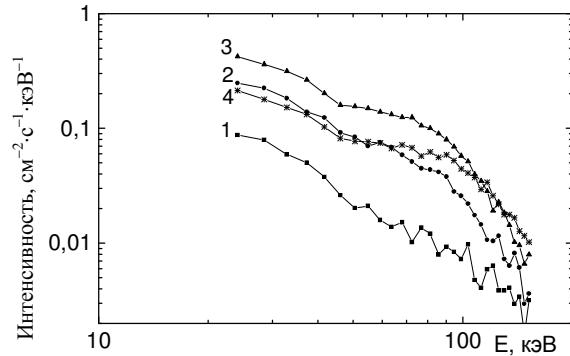


Рис. 2. Энергетические спектры ЖРИ вспышки 29 октября 2002 г. на фазах роста (1 и 2), максимума (3) и спада (4), усредненные за промежуток времени: 1 – от 21:46:59 до 21:47:09 UT; 2 – от 21:47:09 до 21:47:19 UT; 3 – от 21:47:20 до 21:47:30 UT; 4 – от 21:47:37 до 21:47:47 UT.

Проведенный спектральный анализ интенсивности ЖРИ вспышки в энергетических диапазонах 15–46 и 46–160 кэВ показывает, что структуры КСП этих двух составляющих вспышечного излучения подобны с точностью до полусекунды, а для предвспышечного излучения – различаются сильно. Из этого можно сделать вывод, что во время вспышки тепловое и нетепловое рентгеновское излучение приходит из одной и той же «вспышечной» области атмосферы Солнца, в то время как на предвспышечной фазе существенны вклады от разных активных образований солнечной атмосферы.

Вспышка 19 декабря 2001 г., относящаяся к рентгеновскому классу C4.9, началась в 02:30:40 UT, ее длительность в жестком рентгеновском диапазоне составляет ~ 1.5 мин. Энергетический спектр ЖРИ этой вспышки имеет нестепенной вид на фазах роста, максимума и спада излучения (рис. 3). Для данной вспышки скорость счета квантов с энергией более 110 кэВ не превышает значения фона. Данный спектр может быть описан как тепловой, так и нетепловой моделями, поэтому выбор между этими моделями затруднен [13]. В пользу нетепловой модели можно сказать только то, что для описания ЖРИ тепловой моделью потребуется нагрев плазмы до чрезвычайно высокой температуры, превышающей 10^8 К [13], что маловероятно для событий данного рентгеновского класса.

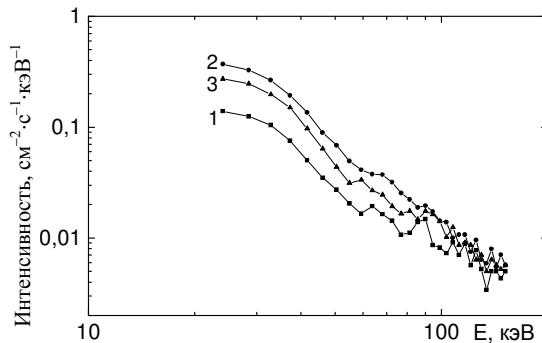


Рис. 3. Энергетические спектры ЖРИ вспышки 19 декабря 2001 г. на фазах роста (1), максимума (2) и спада (3), усредненные за промежуток времени: 1 – от 02:30:54 до 02:31:04 UT; 2 – от 02:31:14 до 02:31:24 UT; 3 – от 02:31:29 до 02:31:39 UT.

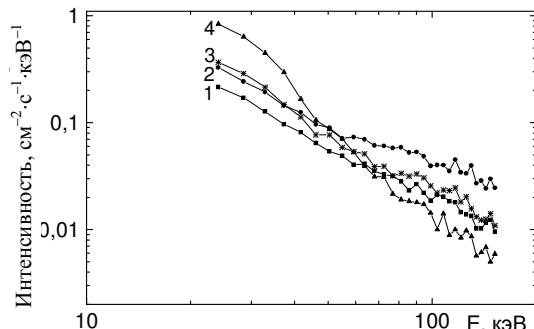


Рис. 4. Энергетические спектры ЖРИ вспышки 26 июля 2002 г. на фазах роста (1, 2 и 3) и максимума (4), усредненные за промежуток времени: 1 – от 09:18:09 до 09:18:19 UT; 2 – от 09:18:59 до 09:19:09 UT; 3 – от 09:19:25 до 09:19:35 UT; 4 – от 09:20:29 до 09:20:39 UT.

Солнечная вспышка 26 июля 2002 г., начавшаяся в 09:20:31 UT, также достаточно слабая (в рентгеновской классификации отсутствует, а в оптике ей соответствует вспышка класса SF). Спектр ЖРИ вспышки изменяется во время развития вспышки и имеет следующие интересные особенности. С 09:19:07 UT при росте интенсивности излучения с энергией меньшей $\sim(35\text{--}40)$ кэВ наблюдается уменьшение излучения более высоких энергий (кривые 2 и 3 на рис. 4). При этом в момент максимума излучения энергетический спектр имеет нестепенной вид. Такая динамика спектра обусловлена тем, что максимум интенсивности рентгеновского излучения с энергиями, превышающими ~ 40 кэВ, достигается на 90 с раньше максимума излучения на меньших энергиях. Длительность вспышки во всем жестком рентгеновском диапазоне по данным спектрометра «ИРИС» составляет около 5 мин. Временные задержки максимумов интенсивности более мягкого излучения, по сравнению с более жестким, наблюдались нами ранее для ряда вспышек, зарегистрированных на спутниках серии «Прогноз» [4]. Например [14], для вспышки 27 января 1979 г. (08:27:30 UT) максимум излучения в диапазоне 20–30 кэВ запаздывает на 10 с по отношению к максимуму излучения в диапазоне 30–40 кэВ, который, в свою очередь, запаздывает относительно максимума в диапазоне 40–60 кэВ.

Солнечная вспышка 15 апреля 2002 г., наиболее мощная из рассматриваемых (класс M1.2), началась в 23:05 UT (рис. 5). Как видно из рисунка, форма спектра этой вспышки, в отличие от форм спектров ЖРИ вспышек, рассмотренных выше, остается неизменной на протяжении всей вспышки.

В результате изучения энергетических спектров ЖРИ вспышек, зарегистрированных спектрометром «ИРИС», можно сделать вывод: для слабых рентгеновских вспышек характерно изменение формы энергетических спектров ЖРИ во время вспышки, которое отражает эволюцию функции распределения быстрых электронов, генерирующих ЖРИ.

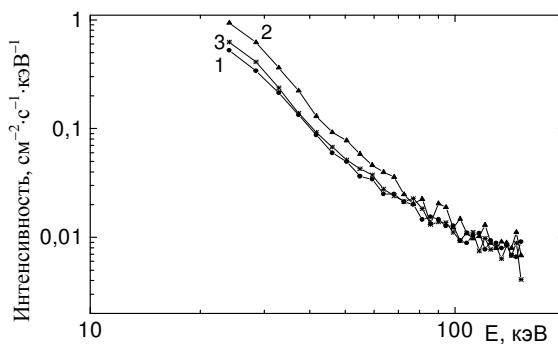


Рис. 5. Энергетические спектры ЖРИ вспышки 15 апреля 2002 г. на фазах роста (1), максимума (2) и спада (3), усредненные за промежуток времени: 1 – от 23:09:50 до 23:10:00 UT; 2 – от 23:11:21 до 23:11:31 UT; 3 – от 23:11:47 до 23:11:57 UT.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Archangelsky V.V., Baskakov A.V., Charikov Yu.E., et al. Observation of solar X-ray radiation on board «Prognоз-6» // Space Res. 1979. V. 19. P. 381–386.
2. Матвеев Г.А. Регистрация мягкого рентгеновского излучения Солнца на ИСЗ «Прогноз-6» и «Прогноз-7» с помощью пропорциональных счетчиков прибора РГС-1М // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44. С. 2610–2620.
3. Кочаров Г.Е., Дмитриев П.Б., Матвеев Г.А. и др. Наблюдения рентгеновского излучения Солнца в период с марта по май 1979 г. // Солнечные данные. 1983. № 7. С. 81–86.
4. Кочаров Г.Е., Деревицкий Ю.Г., Дмитриев П.Б. и др. Каталог всплесков рентгеновского излучения Солнца за период с марта по май 1979 г. / Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР № 800. Л.: ЛИЯФ, 1983. 34 с.
5. Савченко М.И. Характеристики ускоренных частиц и области их генерации для мощных вспышек // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. С. 2217–2220.
6. Ораевский В.Н., Кочаров Г.Е., Болдырев С.И. и др. Характеристики рентгеновского излучения Солнца в марте и апреле 1994 г. по данным эксперимента «ИРИС», выполненного на борту АУОС – СМ «Коронас – И» // Известия вузов. Серия «Радиофизика». 1996. Т. XXXIX. С. 1521–1526.
7. Charikov Yu.E., Dmitriev P.B., Kocharov G.E., et al. Storage, structure and processing solar data of X-Ray spectrometer "IRIS" of space experiment "CORONAS-I" // Baltic Astronomy. 1997. V. 6. P. 332–333.
8. Kocharov G.E., Charikov Yu.E., Lazutkov V.P., et al. Energy release in the 00:18 UT solar flare on April 22. 1994 // Adv. Space Res. 2000. V. 25. P. 1817–1820.
9. Janssens T. J., White K. P. Microwave Pulse Trains observed Before and during a Solar flare // Astrophys. J. 1969. V. 158. P. L127.
10. Klassen A., Aurass H., Mann G. Sawtooth oscillations in solar flare radio emission // Astron. Astrophys. 2001. V. 370. P. L41–L44.
11. Roberts B., Edwin P. M., Benz A.O. On coronal oscillations // Astrophys. J. 1984. V. 279. P. 857–865.
12. McKenzie D. E., Mullan D. J. Periodic modulation of X-ray intensity from coronal loops – heating by resonant absorption? // Solar Phys. 1997. V. 176. P. 127–145.
13. Дмитриев П.Б., Кудрявцев И.В., Лазутков В.П. и др. Особенности рентгеновского излучения солнечных вспышек, зарегистрированных спектрометром «ИРИС» во время полета станции «КОРОНАС-Ф»// Астрономический вестник. 2006. Т. 40. С. 160–170.
14. Кудрявцев И.В., Чариков Ю.Е. Временные задержки максимумов рентгеновского излучения солнечных вспышек разных энергий и стабилизация пучков быстрых электронов // Письма в Астрон. журнал. 1989. Т. 15. С. 353–357.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург