
СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ОПТИЧЕСКОМ И РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН В 21–24-м СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

LOW-POWER SOLAR FLARES OF OPTICAL AND X-RAY WAVELENGTHS FOR SOLAR CYCLES 21–24

А.В. Боровик

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, aborovik@iszf.irk.ru*

А.А. Жданов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kick.out@mail.ru*

A.V. Borovik

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, aborovik@iszf.irk.ru*

A.A. Zhdanov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kick.out@mail.ru*

Аннотация. По данным в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн проанализирована вспышечная активность Солнца за 21–24-й циклы. Показано, что на протяжении последних четырех циклов активность Солнца постепенно снижалась. По отношению к 21-му циклу (самому активному за последние 50 лет) в 24-м цикле произошло в 4.4 раза меньше оптических крупных вспышек классов площади 2–4, в 8.2 раза меньше вспышек класса 1 и в 4.1 раза меньше малых вспышек (МВ) оптического класса S. Число вспышек рентгеновского класса X уменьшилось в 3.7 раз, класса M — в 3.2 раза. Это подтверждает влияние вековых трендов активности Солнца на пиковые значения вспышечной активности в одиннадцатилетних циклах. Показано, что оптические вспышки малой мощности могут сопровождаться потоками протонов и всплесками рентгеновского излучения разной мощности, в том числе класса X. В мягком рентгене диапазоны излучения для оптических МВ и вспышек высоких классов в значительной степени перекрываются. Подтверждено, что рентгеновское излучение солнечных вспышек возникает в среднем на 2 мин раньше оптического. Для оптических МВ и вспышек класса 1 максимум излучения в рентгеновском диапазоне наступает позже максимума излучения в оптическом диапазоне примерно на 1 мин, для вспышек классов 2–4 — на 2 мин.

Ключевые слова: солнечная активность, солнечные вспышки.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки сопровождаются электромагнитным излучением в широком диапазоне длин волн (от радиоизлучения до гамма-излучения), потоками ускоренных частиц, выбросами корональных масс. Распространяясь в межпланетное пространство, поток ионизованного вещества генерирует мощную ударную волну, возмущает магнитное поле Земли, вызывает магнитные бури, оказывает влияние на состояние земной атмосферы.

Abstract. Using data obtained in optical and X-ray wavelengths, we have analyzed solar flare activity for cycles 21–24. Over the last three cycles, solar activity is shown to decrease significantly. As compared to solar cycle 21 (the most active over the last 50 years), in cycle 24 2–4-class large optical flares are 4.4 times rarer; 1-class flares, 8.2 times; and S-class small flares, 4.1 times. The number of X-class flares decreased 3.7 times; M-class flares, 3.2 times. This confirms that secular solar activity trends affect peak values of 11-year cycles. It is shown that optical low-power flares can be accompanied by proton fluxes and X-ray bursts of different intensity, including X-class ones. Ranges of small flare emission in soft X-rays largely overlap with emission ranges of flares of high optical classes. We have confirmed that X-ray emission from solar flares appears on average 2 min before the optical emission. The X-ray maximum for small optical flares and 1-class flares occurs approximately 1 min later; for 2–4-class flares, 2 min.

Keywords: solar activity, solar flares.

Существуют две основные классификации солнечных вспышек, которые дополняют друг друга: в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн.

По оптическим наблюдениям в линии H α , согласно Международной классификации [Смит, Смит, 1966; Алтынцев и др., 1982; Temmer et al., 2001], вспышки делятся в зависимости от площади на пять классов (S, 1, 2, 3, 4) и в зависимости от интенсивности излучения — на три: слабые (F), умеренные (N) и яркие (B). Сочетание этих параметров (площади и интенсивности) составляет оптический балл вспышки (табл. 1).

Таблица 1

Классификация солнечных вспышек по площади и интенсивности излучения в линии H α

Площадь		Относительная интенсивность		
кв. град.	м.д.п.	F	N	B
<2.0	<100	SF	SN	SB
2.1–5.1	100–250	1F	1N	1B
5.2–12.4	250–600	2F	2N	2B
12.5–24.7	600–1200	3F	3N	3B
>24.7	>1200	4F	4N	4B

Площадь вспышки выражается в квадратных градусах (кв. град.), миллионных долях площади солнечного диска (м.д.д.) или миллионных долях площади полусферы (м.д.п.). В центре диска 1 кв. град.=97 м.д.д.=48.5 м.д.п. Интенсивность вспышки обычно определяется в единицах интенсивности прилегающей к ней невозмущенной хромосферы. Вспышка с относительной интенсивностью 160–260 % считается слабой (F), 260–360 % — умеренной (N), свыше 360 % — яркой (B).

В рентгеновском диапазоне класс вспышки устанавливается в зависимости от максимальной амплитуды рентгеновского всплеска в диапазоне энергий 0.5–10 кэВ по данным измерений на спутниках GOES в диапазоне 1–8 Å (табл. 2).

Таблица 2

Классификация вспышек по амплитуде рентгеновского всплеска (классификация GOES)

Класс вспышки	A	B	C	M	X
Амплитуда рентгеновского всплеска, Вт/м ²	от 10 ⁻⁸ до 9.9·10 ⁻⁸	от 10 ⁻⁷ до 9.9·10 ⁻⁷	от 10 ⁻⁶ до 9.9·10 ⁻⁶	от 10 ⁻⁵ до 9.9·10 ⁻⁵	от 10 ⁻⁴ до 30·10 ⁻⁴
	A1–A9	B1–B9	C1–C9	M1–M9	X1–X30

Рентгеновские классы А–М разделены на девять подклассов (от 1 до 9). Каждый следующий класс обозначает возрастание мощности вспышки в 10 раз по сравнению с предыдущим, т. е. вспышка класса М1 в 10 раз мощнее С1, а Х1 в 10 раз мощнее М1. Поскольку амплитуда рентгеновского всплеска в самой мощной зарегистрированной на сегодня рентгеновской вспышке составляла 28×10⁻⁴ Вт/м² (вспышка 04.11.2003), класс Х включает тридцать подклассов (от 10⁻⁴ до 30·10⁻⁴ Вт/м²).

ОСОБЕННОСТИ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ 21–24

По данным Международного вспышечного патруля [<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/h-alpha/events/>], на Солнце в 21–24-м циклах произошло 122750 оптических вспышек, из которых 109687 относились к малым вспышкам (МВ) класса площади S, 11281 имели класс площади 1 и 1782 относились к крупным вспышкам классов 2–4 (табл. 3). Малые

вспышки составляли 90 % всех произошедших на Солнце вспышек, крупные — 1.5 %.

Таблица 3

Число вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах, произошедших на Солнце в циклах 21–24

№ цикла	Период	Рентгеновский класс				Оптический класс		
		B	C	M	X	S	1	2–4
21	06.1976–09.1986	2856	14561	2174	165	46694	5514	648
22	09.1986–05.1996	6086	12433	2020	152	31695	3430	584
23	05.1996–01.2009	7974	13073	1437	122	19974	1662	404
24	01.2009–06.2017	5388	7505	688	45	11324	675	146
21–24	06.1976–06.2017	22304	47572	6319	484	109687	11281	1782

По данным спутников GOES [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>], за четыре цикла в рентгеновском диапазоне было зарегистрировано 76679 вспышек, из них 22304 вспышки класса B, 47572 — класса C, 6319 — класса M и 484 — класса X.

Следует отметить, что, согласно методу обнаружения рентгеновских вспышек спутниками GOES [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/documentation/readme_solar-features_solar-flares.pdf], событие считается реальным, если в течение последовательных четырех одноминутных интервалов выполняются три условия [Veronig et al., 2002]:

- рентгеновский поток постоянно возрастает;
- рентгеновский поток выше уровня В1;
- последнее значение рентгеновского потока в 1.4 раза и более превышает значение, которое было на три минуты раньше.

Вероятно, по этой причине в каталогах GOES вспышки класса А составляют всего ~0.014 % от общего числа вспышек.

По значению потока в точке максимума определяется рентгеновский класс вспышки. Максимум рентгеновского потока устанавливается одноминутным усреднением.

Поскольку уровень фонового интегрального излучения Солнца во время вспышки может измениться и на фазу спада могут наложиться другие события, определить время возвращения рентгеновского потока в предвспышечное состояние довольно трудно. Поэтому время окончания рентгеновской вспышки определяется как момент возврата потока к половине своего пикового значения.

На протяжении четырех циклов вспышечная активность Солнца постепенно снижалась (табл. 3, рис. 1–3). По отношению к 21-му циклу (самому активному за последние 50 лет) в 24-м цикле в оптическом диапазоне зарегистрировано в 4.1 раза меньше МВ, в 8.2 раза меньше вспышек класса площади 1 и в 4.4 раза меньше вспышек классов площади 2–4. Число рентгеновских вспышек класса Х уменьшилось в 3.7 раза, класса М — в 3.2 раза, класса С — в 1.9 раза.

Снижение вспышечной активности Солнца на протяжении последних четырех одиннадцатилетних

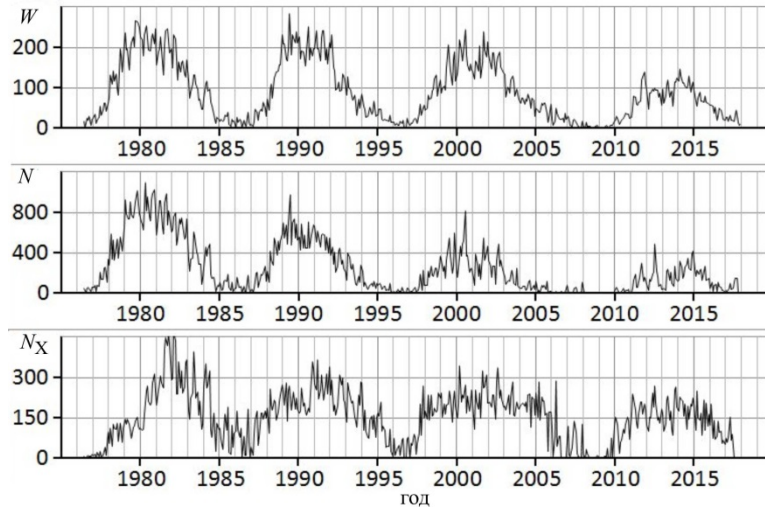


Рис. 1. Распределение числа оптических (N) и рентгеновских (N_X) вспышек по годам в 21–24-м циклах. W — числа Вольфа

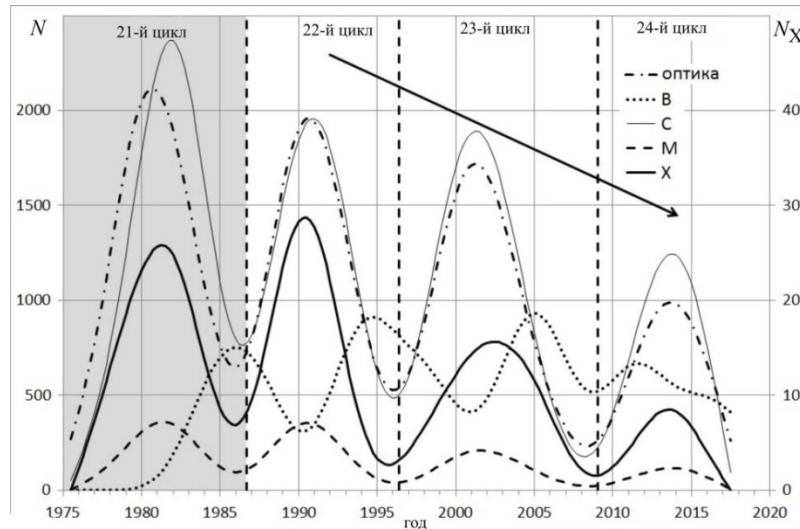


Рис. 2. Распределение числа оптических (N) и рентгеновских вспышек (N_X) разных классов в 21–24-м циклах по годам (сглаженные кривые)

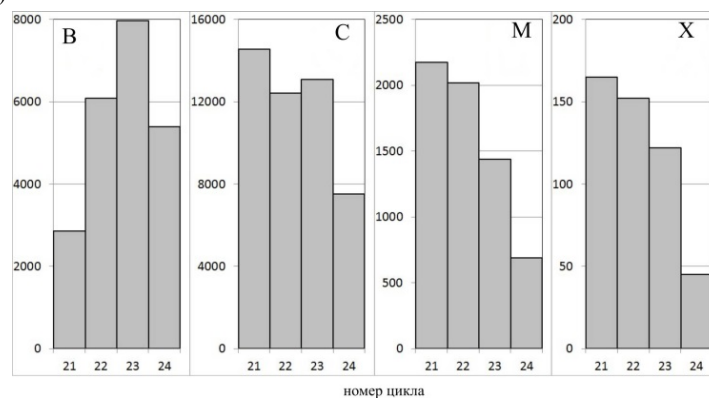


Рис. 3. Распределение числа рентгеновских вспышек разных классов по циклам

циклов приходилось на ветвь спада столетнего цикла и было, вероятно, связано с глобальными трендами солнечной активности.

На регистрацию рентгеновских вспышек, особенно класса В, существенное влияние оказывает фоновое излучение Солнца. Наблюдения показывают, что в минимуме солнечного цикла уровень фона находится в пределах $A < 1$, в максимуме возрастает

до $S < 5$ и в отдельные периоды может достигать уровня М (рис. 4).

На протяжении 21–24-го циклов из-за циклических колебаний уровня рентгеновского фона число зарегистрированных рентгеновских вспышек класса В менялось почти в противофазе со вспышками более высоких рентгеновских классов: сокращалось в максимуме активности Солнца и возрастало в минимуме (рис. 2).

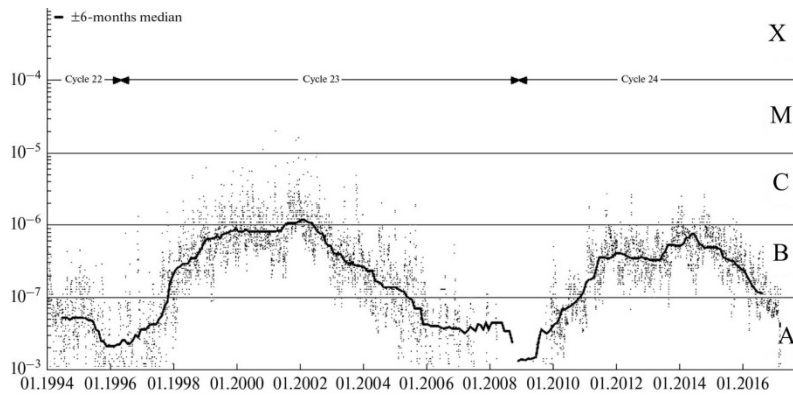


Рис. 4. Изменение фонового излучения Солнца в 23–24-м циклах [https://sidstation.loudet.org/solar-activity-en.xhtml]

Этот факт был также отмечен в работе [Сотникова, Москаленко, 1999]. Вместе с тем число В-вспышек с каждым циклом возрастало (рис. 3), что свидетельствовало, по-видимому, о постепенном ослаблении фонового излучения Солнца. В табл. 4 представлено число вспышек соответствующих рентгеновских и оптических классов за 21–24-й циклы, а также приведены сведения о протонных событиях на Солнце [https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP] за период с 1976 по 2017 г.

Таблица 4

Рентгеновские вспышки и протонные события в 21–24-м солнечных циклах

На	Рентгеновские вспышки				Протонные события $E > 10$ МэВ			
	В	С	М	Х	В	С	М	Х
SF	3231	13318	720	16		2	3	
SN	326	4309	477	6		1	2	
SB	36	1479	447	10			2	1
1F	25	947	268	8		3	6	3
1N	7	1217	764	17			12	5
1B	8	548	914	57			5	6
2F	1	38	49	1		2		
2N		75	191	16		1	14	9
2B		43	357	159			21	30
3F								
3N		2	6	6			2	
3B		2	26	67			9	33
4F								
4N								
4B			3	6			2	5
Всего:								
S	3593	19106	1644	32		3	7	1
1	40	2712	1946	82		3	23	14
2–4	1	160	632	255		3	48	77

Приведенные данные показывают (табл. 4), что все оптические вспышки, в том числе МВ, могут сопровождаться потоками протонов и всплесками рентгеновского излучения разной мощности. Из 179 зарегистрированных протонных событий к оптическим МВ класса S относились 6 % (11), к вспышкам класса 1 — 22 % (40), к крупным вспышкам классов 2–4 — 72 % (128). Из 369 вспышек рентгеновского класса X малые оптические вспышки (S) составляли 9 %, вспышки класса площади 1 — 22 %, крупные вспышки (2–4) — 69 %, тогда как из 4222 вспышек рентгеновского класса М — 39, 46 и 15 % соответственно.

С увеличением оптического класса вспышек наблюдается тенденция роста мощности сопутствующего рентгеновского всплеска. Вместе с тем распределения мощности рентгеновского потока во вспышках оптических классов S, 1 и 2–4 в значительной степени перекрываются, а их размах охватывает подавляющее большинство уровней рентгеновского излучения (рис. 5).

СВЯЗЬ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКИМИ И РЕНТГЕНОВСКИМИ КЛАССАМИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Исследования солнечных вспышек по данным измерений с помощью космических спутников в различных длинах волн мягкого рентгеновского излучения выполнялись многими авторами. Было установлено сходство временных профилей рентгеновского и оптического излучения вспышек, определены средние временные параметры излучения, для вспышек разных оптических классов установлены приближительные (типичные) значения энергий и амплитуды сопутствующих рентгеновских всплесков и др. [Culhane, Phillips, 1970; Drake, 1971; Thomas, Teske, 1971; Pearce, Harrison, 1988; Kurt, 1990; Veronig et al., 2002; Fletcher et al., 2011]. Однако при оценке, например, соответствия оптических и рентгеновских классов вспышек статистика не превышала нескольких сотен вспышек. Учитывая, что дополнительных исследований в этой области в последние десятилетия не проводилось, нами была поставлена цель — попытаться установить более надежное соответствие между оптическими и рентгеновскими классами солнечных вспышек, используя для этого большой объем наблюдательных данных, полученных на спутниках GOES.

Селекция данных. Анализ данных спутников GOES показывает, что они бывают часто неоднородными и неполными. Как следует из разных источников, измерения интегрального потока рентгеновского излучения Солнца проводились на спутниках GOES более или менее регулярно с 1975 г. До 1986 г. рентгенографические записи велись по меньшей мере одним спутником GOES. Были также технические проблемы, которые в 1994 г., с запуском спутника GOES-8, были устранены [Veronig et al., 2002].

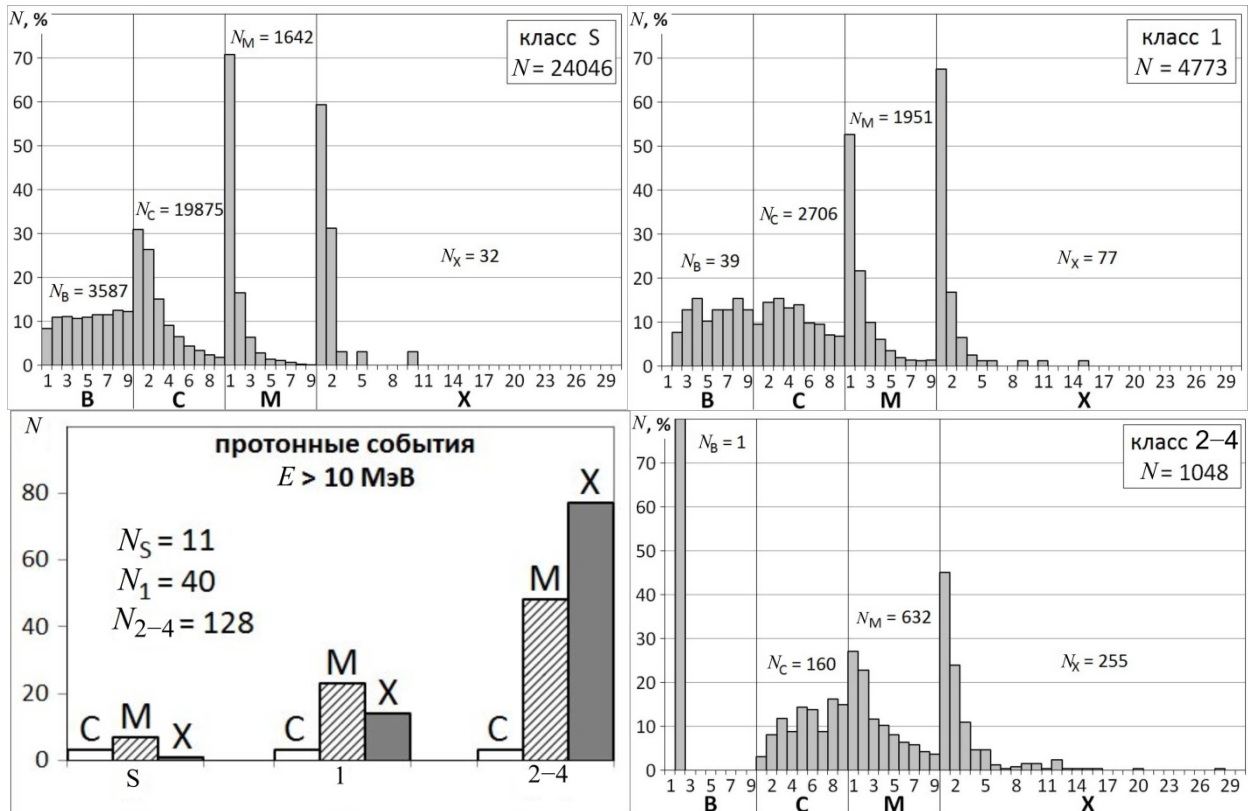


Рис. 5. Распределение числа событий в оптических вспышках классов S, 1 и 2–4 в 21–24-м солнечных циклах (данные GOES): две верхние и нижняя правая панели — рентгеновских (в %), распределения построены отдельно для каждого рентгеновского класса; нижняя левая панель — протонных

До 1997 г. в каталогах рентгеновских вспышек указывались временные параметры оптических вспышек и не приводились данные об интенсивности интегрального потока излучения. В период 01.2004–03.2007 и после 2010 г. не было данных о баллах оптических вспышек. Вызывает также сомнение однородность и полнота данных с начала и примерно до середины 21-го цикла. В этот период отмечается несвойственное поведение относительного числа вспышек рентгеновских классов В и С (рис. 6).

Вероятно, во время первых полетов спутников серии GOES измерения какое-то время носили экспериментальный характер и это сказалось на однородности данных и общей статистике рентгеновских вспышек. Поэтому для решения поставленной задачи статистический ряд был ограничен данными 22–24-го циклов (09.1986–06.2017).

Для этого временного интервала был проведен корреляционный анализ по месяцам общего числа оптических и рентгеновских вспышек каждого класса. Результаты показали высокую корреляционную связь между оптическими МВ, вспышками класса 1 и рентгеновскими вспышками классов С и М. Крупные оптические вспышки классов 2–4 имели высокие коэффициенты корреляции с рентгеновскими вспышками классов М и Х (табл. 5).

На рис. 7 представлены коэффициенты корреляции между оптическими вспышками классов S, 1, 2–4 и соответствующими им пиковыми значениями рентгеновских всплесков. Гистограммы показывают существенное перекрытие по мощности рентгеновских

всплесков, сопровождающих оптические вспышки. При этом наблюдаются максимумы: в классе С (сдвигающиеся с ростом оптического класса вспышки в сторону увеличения мощности рентгеновского излучения), в классе М (практически совпадающие для вспышек всех оптических классов) и в классе Х (для крупных оптических вспышек).

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕК

Для того чтобы установить, какому событию на Солнце принадлежит рентгеновский всплеск, сопоставляют времена начала всплеска рентгеновского излучения и оптической вспышки по данным в линии $H\alpha$.

Как было отмечено выше, временные параметры рентгеновских всплесков стали приводиться в базе данных GOES с 1997 г. Чтобы провести независимое сравнение временных характеристик оптических и рентгеновских вспышек, нами была разработана методика, позволяющая программными средствами сопоставлять рентгеновские и оптические события. Для этого из базы данных GOES предварительно были исключены вспышки, для которых не было установлено точное время начала рентгеновского всплеска. Из-за возможных ошибок в определении оптического балла вспышек вблизи лимба были также исключены из рассмотрения вспышки, долгота которых относительно центрального меридиана превышала 65° .

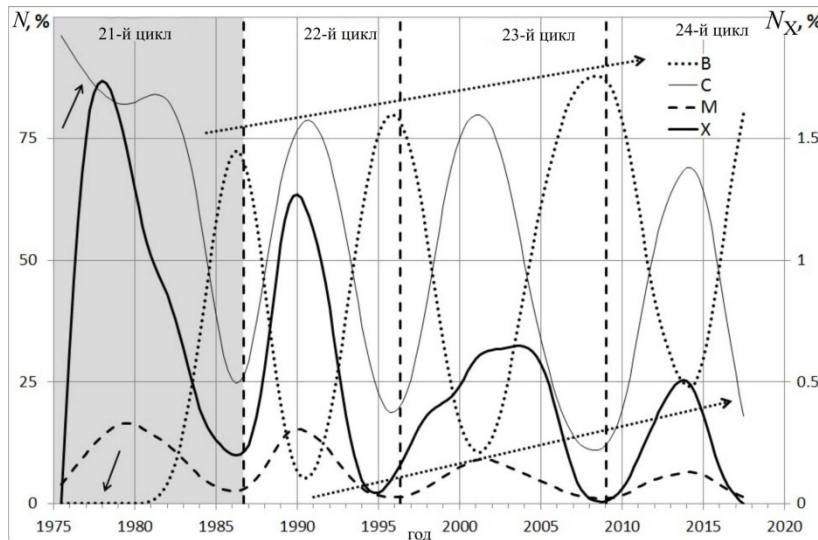


Рис. 6. Относительное распределение числа рентгеновских вспышек в 21–24-м циклах по годам (сглаженные кривые). Ось справа — относительное количество вспышек рентгеновского класса X ($N_X, \%$)

Таблица 5

Коэффициенты корреляция между классами солнечных вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах

Номер цикла	Период	S↔B	S↔C	S↔M	S↔X
22	09.1986–05.1996	-0.60	0.88	0.78	0.56
23	05.1996–01.2009	-0.31	0.87	0.77	0.32
24	01.2009–06.2017	-0.30	0.81	0.68	0.43
22–24	09.1986–06.2017	-0.39	0.83	0.77	0.48
Номер цикла	Период	1↔B	1↔C	1↔M	1↔X
22	09.1986–05.1996	-0.62	0.78	0.88	0.71
23	05.1996–01.2009	-0.30	0.82	0.87	0.45
24	01.2009–06.2017	-0.38	0.81	0.84	0.56
22–24	09.1986–06.2017	-0.40	0.72	0.86	0.62
Номер цикла	Период	2–4↔B	2–4↔C	2–4↔M	2–4↔X
22	09.1986–05.1996	-0.58	0.72	0.90	0.83
23	05.1996–01.2009	-0.25	0.63	0.81	0.62
24	01.2009–06.2017	-0.35	0.68	0.90	0.69
22–24	09.1986–06.2017	-0.39	0.66	0.89	0.76

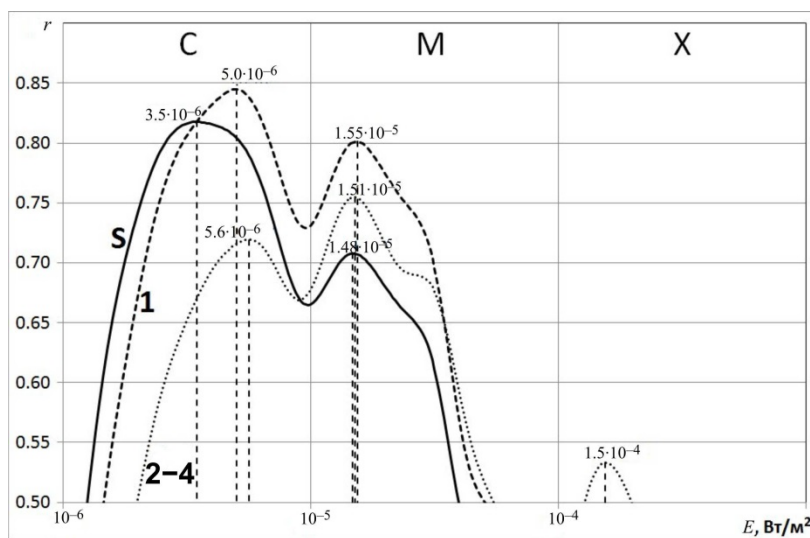


Рис. 7. Коэффициенты корреляции между классом оптических вспышек и максимальной амплитудой рентгеновского всплеска (по месяцам, 09.1986–06.2017)

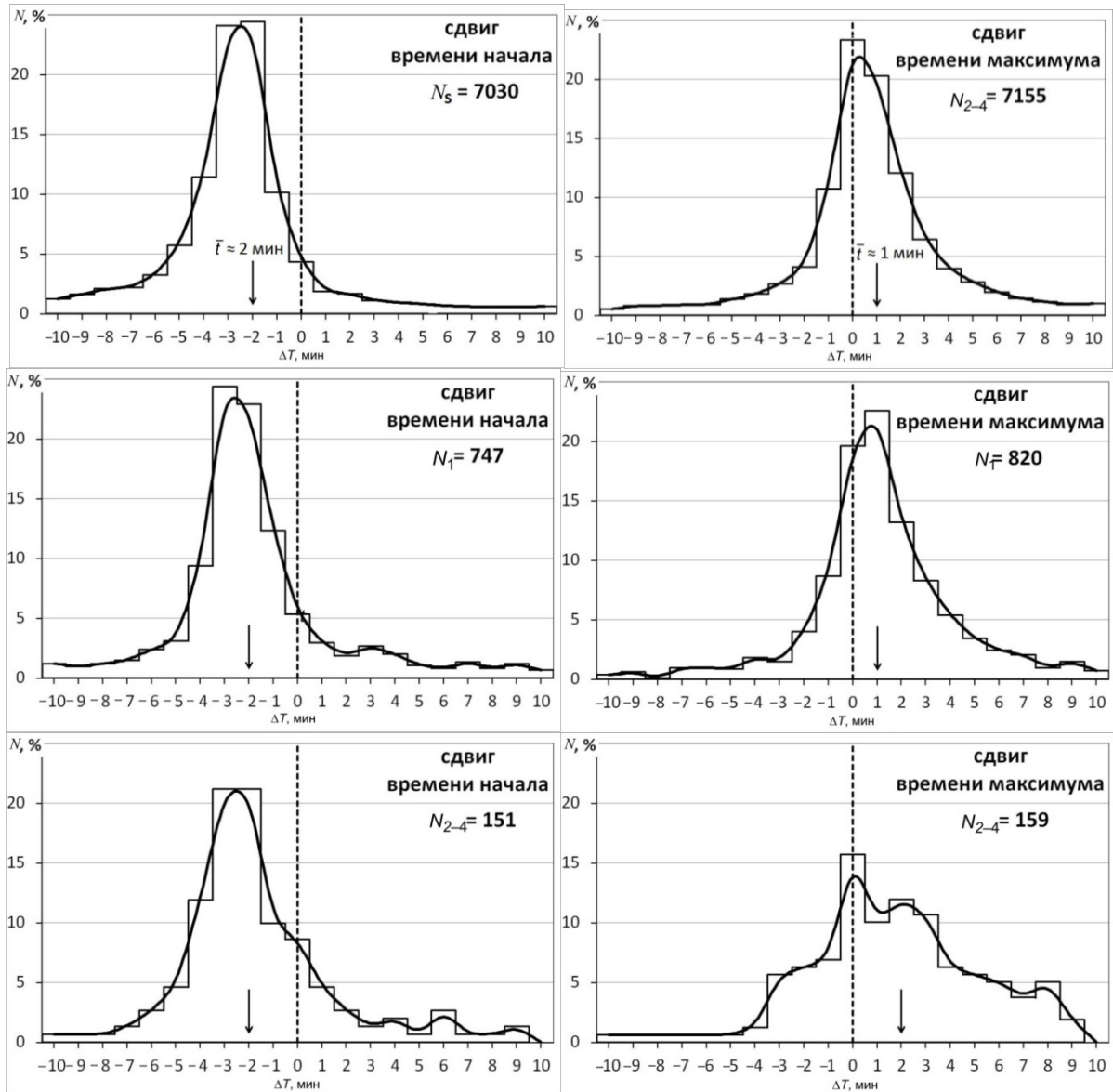


Рис. 8. Распределения временных интервалов между началами (максимумами) вспышки в оптическом и рентгеновском диапазонах. Штриховой вертикальной линией показано начало оптической вспышки, стрелкой — среднее значение гистограммы

Затем из базы данных [<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/h-alpha/events/>] выбирались оптические вспышки, произошедшие в интервале ± 10 мин от начала рентгеновского всплеска по данным GOES. Если в этом временном интервале встречалось более одной оптической вспышки, то такая рентгеновская вспышка не рассматривалась. Если была только одна оптическая вспышка, то сравнивались ее координаты и балл с приведенными в базе данных GOES. В случае несоответствия оптического балла и при разнице координат более чем на 5° рентгеновская вспышка исключалась из рассмотрения. Если все проверки проходили успешно, то считалось, что рентгеновский всплеск был вызван данной оптической вспышкой. Результаты отбора показывают, что примерно 25 % рентгеновских всплесков в каталогах GOES не отождествляются уверенно с оптическими вспышками.

По сформированной базе данных была определена разница во времени между началами (макси-

мумами) вспышки в оптическом и рентгеновском излучении (рис. 8). Временные параметры в каталогах оптических и рентгеновских вспышек приводятся с точностью до минуты.

Согласно полученным результатам, рентгеновское излучение возникает примерно на 2 мин раньше оптического излучения вне зависимости от оптического класса вспышки, что согласуется с результатами работы [Thomas, Teske, 1971]. Максимум излучения в рентгене для МВ и вспышек класса 1 наступает примерно на 1 мин позже максимума излучения в оптическом диапазоне, для вспышек классов 2–4 — на 2 мин позже.

ВЫВОДЫ

В работе выполнен анализ вспышечной активности в 21–24-м солнечных циклах. Показано, что на протяжении всего периода число солнечных вспышек, зарегистрированных в оптическом и рентгеновском диапазонах, постепенно снижалось, что могло быть обу-

словлено влиянием на одиннадцатилетние циклы глобального тренда солнечной активности (столетнего цикла). Вместе с тем по данным спутников GOES обнаружено возрастание от цикла к циклу числа вспышек рентгеновского класса В, что свидетельствует о постепенном снижении рентгеновского фона Солнца. Установлено, что солнечные вспышки малой мощности оптического класса S сопровождаются потоками протонов и рентгеновским излучением разной мощности, в том числе класса X. Показано, что для оптических вспышек разных классов диапазоны излучения в мягком рентгене в значительной степени перекрываются. Разработана методика, позволяющая соотнести оптическую и рентгеновскую вспышки, показавшая высокую степень надежности. По сформированной с ее помощью базе данных определены средние времена начала и максимума излучения вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах. Установлено, что вне зависимости от оптического класса вспышки рентгеновское излучение появляется в среднем на 2 мин раньше оптического. Максимум рентгеновского излучения для малых оптических вспышек класса S и вспышек класса 1 наступает примерно на 1 мин позже максимума оптического излучения, для вспышек классов 2–4 — на 2 мин позже.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и поддержана грантом РФФИ 19-52-45002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцева А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. М.: Наука, 1982. 246 с.
- Смит Г., Смит Э. Солнечные вспышки М.: Мир, 1966. 426 с.
- Сотникова Р.Т., Москаленко А.В. Солнце в рентгеновских лучах // Тр. VII симпози. по солнечно-земной физике России и стран СНГ. Троицк, 1999. С. 156–161.
- Culhane J.L., Phillips K.J.H. Solar X-ray bursts at energies less than 10 keV observed with OSO-4 // *Solar Phys.* 1970. V. 11, iss. 1. P. 117–144. DOI: [10.1007/BF00156556](https://doi.org/10.1007/BF00156556).
- Drake J.F. Characteristics of soft solar X-ray bursts // *Solar Phys.* 1971. V. 16, iss. 1. P. 152–185. DOI: [10.1007/BF00154510](https://doi.org/10.1007/BF00154510).
- Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., et al. An observational overview of solar flares // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 159, iss. 1–4. P. 19–106. DOI: [10.1007/s11214-010-9701-8](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8).
- Kurt V.G. Electrons and X-ray emission of solar flares // *Basic Plasma Processes on the Sun: Proc. 142th Symposium of the International Astronomical Union.* 1990. P. 409–413. DOI: [10.1017/S007418090008832X](https://doi.org/10.1017/S007418090008832X).
- Pearce G.A., Harrison R.A. Statistical analysis of the soft X-ray profiles of solar flares // *Astron. Astrophys.* 1988. V. 206, N 1. P. 121–128.
- Temmer M., Veronig A., Hanslmeier A., et al. Statistical analysis of solar H α flares // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 375, N 3. P. 1049–1061. DOI: [10.1051/0004-6361:20010908](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010908).
- Thomas R.J., Teske R.G. Solar soft X-rays and solar activity. II: Soft X-ray emission during solar flares // *Solar Phys.* 1971. V. 16, iss. 2. P. 431–453. DOI: [10.1007/BF00162486](https://doi.org/10.1007/BF00162486).
- Veronig A., Temmer M., Hanslmeier A., et al. Temporal aspects and frequency distributions of solar soft X-ray flares // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 382, N 3. P. 1070–1080. DOI: [10.1051/0004-6361:20011694](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011694).
- URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/h-alpha/events/> (дата обращения 19 сентября 2019 г.).
- URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar->

[data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/) (дата обращения 19 сентября 2019 г.).

URL: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/documentation/readme_solar-features_solar-flares.pdf (дата обращения 19 сентября 2019 г.).

URL: <https://sidstation.loudet.org/solar-activity-en.xhtml> (дата обращения 19 сентября 2019 г.).

URL: <https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/> (дата обращения 19 сентября 2019 г.).

REFERENCES

- Altynsev A.T., Banin V.G., Kuklin G.V., Tomozov V.M. *Solnechnye vspysyki* [Solar Flares]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 246 p. (In Russian).
- Culhane J.L., Phillips K.J.H. Solar X-ray bursts at energies less than 10 keV observed with OSO-4. *Solar Phys.* 1970, vol. 11, iss. 1, pp. 117–144. DOI: [10.1007/BF00156556](https://doi.org/10.1007/BF00156556).
- Drake J.F. Characteristics of soft solar X-ray bursts. *Solar Phys.* 1971, vol. 16, iss. 1, pp. 152–185. DOI: [10.1007/BF00154510](https://doi.org/10.1007/BF00154510).
- Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., Krucker S., Phillips K., Veronig A., Battaglia M., et al. An observational overview of solar flares. *Space Sci. Rev.* 2011, vol. 159, iss. 1–4, pp. 19–106. DOI: [10.1007/s11214-010-9701-8](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8).
- Kurt V.G. Electrons and X-ray emission of solar flares. *Basic Plasma Processes on the Sun: Proc. 142th Symposium of the International Astronomical Union.* 1990, pp. 409–413. DOI: [10.1017/S007418090008832X](https://doi.org/10.1017/S007418090008832X).
- Pearce G.A., Harrison R.A. Statistical analysis of the soft X-ray profiles of solar flares. *Astron. Astrophys.* 1988, vol. 206, no. 1, pp. 121–128.
- Smit G., Smit E. *Solnechnye vspysyki* [Solar Flares]. Moscow, Mir Publ., 1966, 426 p. (In Russian). English edition: Smith H.J., Smith E.P. *Solar Flares.* New York, Macmillan; London, Collier-Macmillan, 1963, 322 p.
- Sotnikova R.T., Moskalenko A.V. The Sun in X-rays. *Trudy VII simpoziuma po solnechno-zemnoi fizike Rossii i stran SNG* [Proc. VIIth Symposium on Solar-Terrestrial Physics for Russia and CIS Countries]. Troitsk, 1999, pp. 156–161. (In Russian).
- Temmer M., Veronig A., Hanslmeier A., Otruba W., Messerotti M. Statistical analysis of solar H α flares. *Astron. Astrophys.* 2001, vol. 375, no. 3, pp. 1049–1061. DOI: [10.1051/0004-6361:20010908](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010908).
- Thomas R.J., Teske R.G. Solar soft X-rays and solar activity. II: Soft X-ray emission during solar flares. *Solar Phys.* 1971, vol. 16, iss. 2, pp. 431–453. DOI: [10.1007/BF00162486](https://doi.org/10.1007/BF00162486).
- Veronig A., Temmer M., Hanslmeier A., Otruba W., Messerotti M. Temporal aspects and frequency distributions of solar soft X-ray flares. *Astron. Astrophys.* 2002, vol. 382, no. 3, pp. 1070–1080. DOI: [10.1051/0004-6361:20011694](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011694).
- URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/h-alpha/events/> (accessed September 19, 2019).
- URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/> (accessed September 19, 2019).
- URL: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/documentation/readme_solar-features_solar-flares.pdf (accessed September 19, 2019).
- URL: <https://sidstation.loudet.org/solar-activity-en.xhtml> (accessed September 19, 2019).
- URL: <https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/> (accessed September 19, 2019).

Как цитировать эту статью

Боровик А.В., Жданов А.А. Солнечные вспышки малой мощности в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн в 21–24 солнечных циклах. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 1. С. 18–25. DOI: [10.12737/szf-63202002](https://doi.org/10.12737/szf-63202002).