

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК МАЛОЙ МОЩНОСТИ. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ГЛАВНОЙ ФАЗЫ

STATISTICAL RESEARCH INTO LOW-POWER SOLAR FLARES. MAIN PHASE DURATION

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. Работа является продолжением серии работ, посвященных исследованию временных параметров солнечных вспышек в линии H α . По данным международного вспышечного патруля сформирована электронная база солнечных вспышек за период 1972–2010 гг. Статистический анализ времени спада яркости вспышек показал, что с ростом класса площади и яркости продолжительность главной фазы увеличивается. Определены средние продолжительности главных фаз вспышек классов площади S, 1, 2–4. Установлено, что время спада яркости зависит от типа и особенностей развития солнечных вспышек. Самую короткую главную фазу имеют вспышки с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области, самую продолжительную — вспышки, имеющие несколько максимумов интенсивности, и двухленточные вспышки. Выделено более 3000 вспышек со сверхпродолжительным временем спада (более 60 мин). Для 90 % таких вспышек время спада яркости составляет 2–3 ч, а в отдельных случаях достигает 12 ч.

Ключевые слова: солнечная активность, солнечные вспышки.

Abstract. This paper is a sequel to earlier papers on time parameters of solar flares in the H α line. Using data from the International Flare Patrol, an electronic database of solar flares for the period 1972–2010 has been created. The statistical analysis of the duration of the main phase has shown that it increases with increasing flare class and brightness. It has been found that the duration of the main phase depends on the type and features of development of solar flares. Flares with one brilliant point have the shortest main phase; flares with several intensity maxima and two-ribbon flares, the longest one. We have identified more than 3000 cases with an ultra-long duration of the main phase (more than 60 minutes). For 90 % of such flares the duration of the main phase is 2–3 hrs, but sometimes it reaches 12 hrs.

Keywords: solar activity, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, солнечные вспышки проходят две основные стадии развития: начальную (флэш-фазу) и главную (основную) фазу. За время флэш-фазы интенсивность вспышки возрастает до максимальных значений. В главной фазе она медленно снижается и примерно за час достигает уровня яркости флоккулов. В отдельных случаях спад интенсивности может продолжаться в течение суток [Смит, Смит, 1966; Svestka, 1976; Алтынцев и др., 1982; Прист, 1985].

Подробные статистические исследования флэш-фазы были выполнены в работе [Боровик, Жданов, 2018]. Настоящая работа посвящена исследованию времени спада яркости — продолжительности основной (главной) фазы вспышек. Особое внимание уделяется вспышкам малой мощности с площадью менее 2 кв. град., составляющим подавляющее большинство всех происходящих на Солнце вспышек (более 90 %). В последние десятилетия в этой области были проведены отдельные исследования

[Temmer et al., 2001; Giersch, 2013; Potzi et al., 2014]. Результаты более ранних работ получены по относительно небольшим выборкам данных по первой международной классификации солнечных вспышек 1956 г.

БАЗА ДАННЫХ И ЕЕ АНАЛИЗ

Электронная база солнечных вспышек была сформирована на основе каталогов Solar Geophysical Data (SGD) и Quarterly Bulletin on Solar Activity за период с 1972 по 2010 г. в соответствии с современной оптической классификацией вспышек. В нее вошли параметры 123 801 вспышки, из которых 110 778 составляли вспышки малой мощности, 11 280 — вспышки класса площади 1 и 1743 — вспышки класса 2 и выше. В исходных каталогах исправлены ошибки, опечатки, неточности. Исключено дублирование одних и тех же событий. Учтены случаи, когда станции не сообщали класс яркости или площади, время начала, максимума, окончания вспышки и др.

Как неоднократно отмечалось [Абраменко и др., 1960; Warwik, 1965; Смит, Смит, 1966; Копецкая, Копецкий, 1971; Ward et al., 1973; Россада, 1977; Боровик, Жданов, 2017], данные международного вспышечного патруля страдают определенной неоднородностью. В частности, по групповым сообщениям станций времена максимума и окончания вспышек могут не совпадать. Поэтому была проведена оценка дисперсии времени спада яркости для более чем 20 000 групповых сообщений патрульных станций. Предварительно из групп были исключены данные, полученные визуально, при плохих условиях наблюдения, и обобщенные данные, а также сообщения, отмеченные классификаторами неопределенности установленных моментов времени (D, E, U и *). В каждой группе определены среднеквадратичные отклонения времени спада (σ), которые затем были усреднены в соответствии с классом площади и баллом вспышек (табл. 1, рис. 1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Из полученных результатов следует, что с ростом класса площади и балла вспышек $\bar{\sigma}$ постепенно возрастает от 4.1 до 15.8 мин.

Чтобы снизить дисперсию, как правило, используют большие выборки данных или наблюдения отдельно взятой станции. В настоящей работе реализованы оба подхода.

Таблица 1

	N	$\bar{\sigma}$
SF	8433	4.1
SN	2991	5.4
SB	699	5.3
1F	161	6.0
1N	469	8.2
1B	395	8.6
(2-4)F	13	9.5
(2-4)N	65	9.3
(2-4)B	161	15.8
S	16 352	4.9
1	1697	8.7
2-4	359	14.3

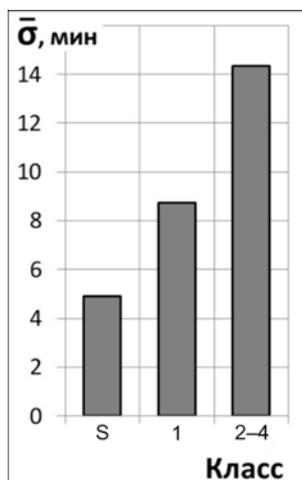


Рис. 1. Изменение $\bar{\sigma}$ в зависимости от класса площади вспышек

ВРЕМЯ СПАДА ЯРКОСТИ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ ВСЕХ СТАНЦИЙ

При проведении статистического анализа, как и в работе [Боровик, Жданов, 2018], на данные был наложен ряд ограничений.

- Не рассматривались вспышки, наблюдаемые при плохом качестве изображения, и вспышки, параметры которых оценивались визуально.

- Из-за возможных ошибок в определении площади и балла вспышек вблизи края солнечного диска из базы данных были исключены вспышки класса площади S и 1, произошедшие далее 65° от центрального меридиана. Для крупных вспышек (2-4) такое ограничение не вводилось.

- В групповых сообщениях мы отказались от обобщенных и отягощенных классификаторами неопределенности данных. После применения всех указанных выше критериев отбора предпочтение отдавалось наблюдениям той станции, которая в базе данных имела больше всего сообщений.

В результате проведенной селекции общее число вспышек составило 84 628. Распределение их по времени спада яркости (в процентах от общего числа вспышек с шагом 1 мин) приведено на рис. 2. Вертикальной штриховой линией отмечено положение медианы. В увеличенном масштабе показан хвост распределения (ось справа).

Полученное распределение довольно протяженное и асимметричное. Часть вспышек имела продолжительность главной фазы более 240 мин (на рисунке не показаны). Для того чтобы более точно определить основные статистические параметры распределения, его размах был ограничен 191 минутой — временем, когда непрерывность распределения нарушалась. Неучтенные вспышки (69) составили 0.08 %. В дальнейшем расчет статистических параметров проводился в границах только этого временного интервала.

На рис. 3-5 показаны распределения по времени спада яркости каждого класса площади и балла вспышек.

Статистические параметры распределений приведены в табл. 2. В таблице указано количество вспышек (N), среднее время спада яркости с доверительным интервалом ($\bar{t} \pm \alpha$), модальные (M_0) и медианные (M_e) параметры распределений, временные

Таблица 2

	N	$\bar{t} \pm \alpha$	M_0	M_e	Δt
SF	55 069	12.8±0.1	4	9	1-26
SN	18 098	16.6±0.2	8	12	1-34
SB	3 817	20.0±0.6	8	15	1-41
1F	1 919	29.7±1.0	12	24	1-59
1N	2 843	33.2±1.0	17	27	1-66
1B	1 563	40.1±1.4	21	33	1-76
(2-4)F	166	41.3±5.0	17	33	1-84
(2-4)N	446	52.0±3.3	16	44	1-105
(2-4)B	638	63.0±3.1	35	55	1-121
S	76 984	14.1±0.1	4	10	1-29
1	6 325	33.8±0.6	12	27	1-66
2-4	1 250	56.3±2.1	35	48	1-111
Σ	84 559	16.2±0.1	4	11	1-34

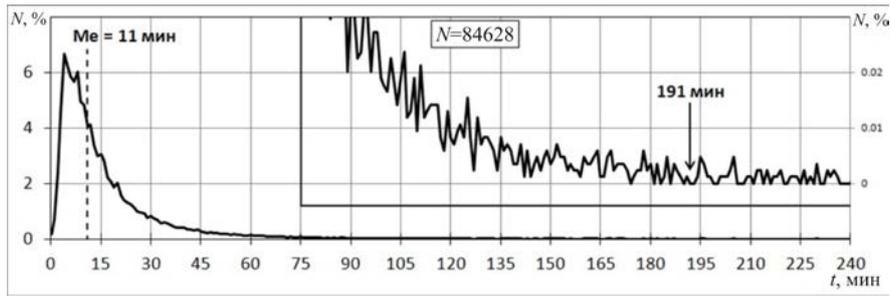


Рис. 2. Распределение солнечных вспышек по времени спада яркости

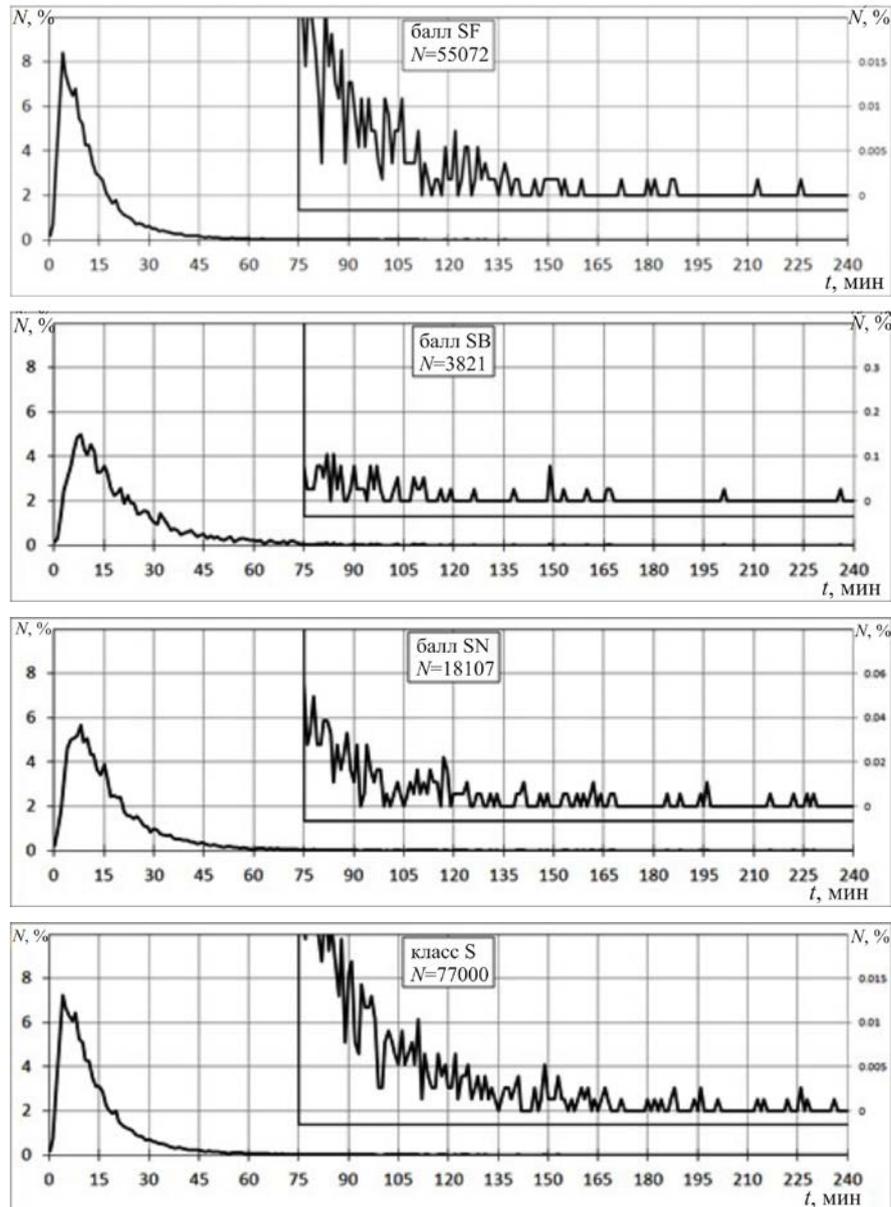


Рис. 3. Распределение вспышек класса площади S по времени спада яркости

интервалы для 90 % вспышек (Δt). Последние четыре строки отведены для классов вспышек и суммарных данных (Σ). Здесь и далее временные параметры указаны в минутах.

$$\bar{t} - \Omega(P, n-1) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \alpha \leq \bar{t} + \Omega(P, n-1) \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где \bar{t} — среднее время спада; n — число данных; P —

доверительная вероятность (95 %); Ω — коэффициент Стьюдента (1.96).

Изменение статистических параметров с ростом класса площади вспышек показано на рис. 6.

Из полученных результатов следует, что с ростом класса площади и балла вспышек средняя продолжительность главной фазы увеличивается: \bar{t} возрастает от 12.8 до 63 мин, мода смещается от 4 до 35 мин, медиана — от 9 до 55 мин. Увеличиваются

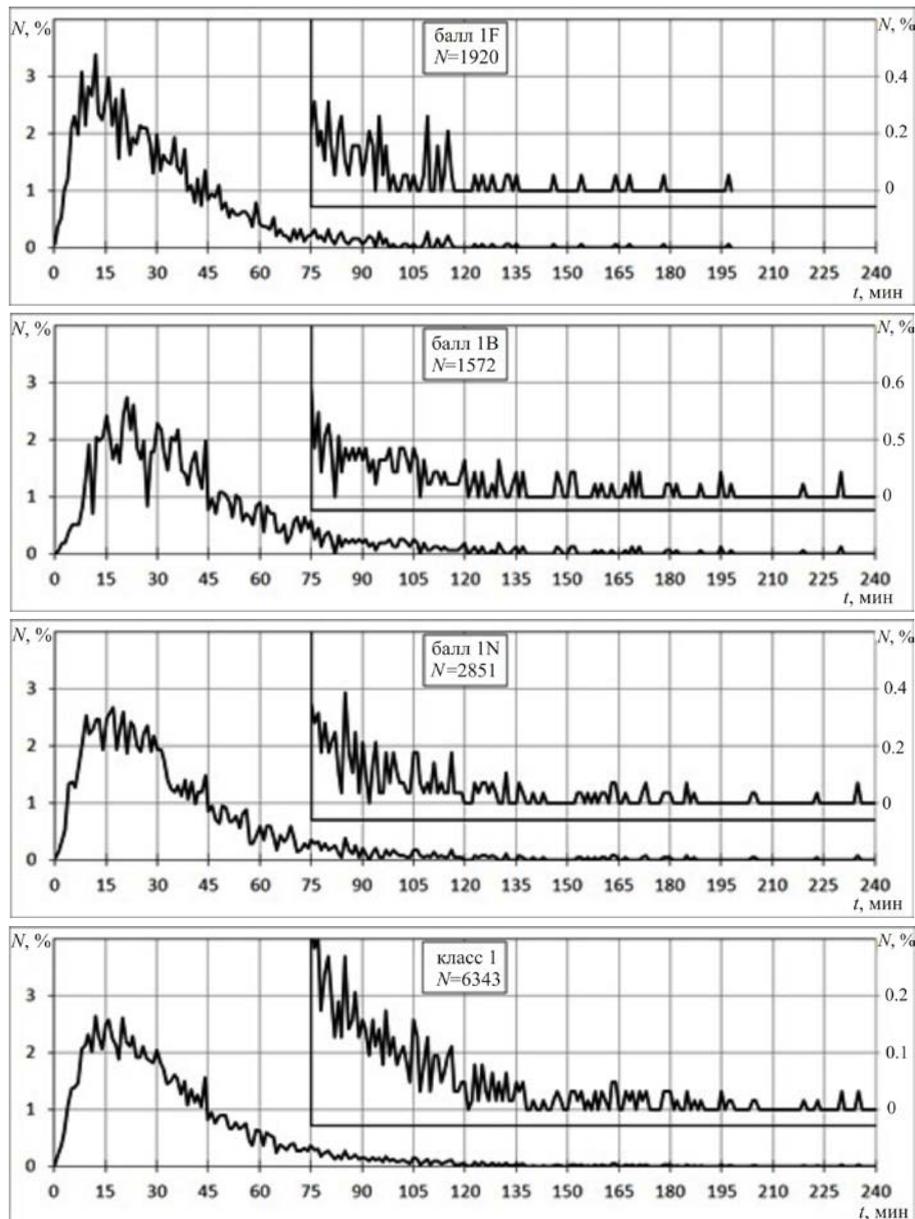


Рис. 4. Распределение вспышек класса площади 1 по времени спада яркости

также временные интервалы для 90 % вспышек, среднеквадратичные отклонения. Уменьшаются асимметрия и эксцесс распределений.

Несмотря на то, что доверительные интервалы для вспышек отдельных баллов довольно широкие (например, для вспышек (2–4)F), хорошо прослеживается связь времени спада интенсивности с яркостными характеристиками вспышек (табл. 3, 2).

ВРЕМЯ СПАДА ЯРКОСТИ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИЙ HOLL, LEAR, RAMU

Аналогичные исследования были выполнены по данным трех обсерваторий: HOLL — Holloman Solar Observatory (США), LEAR — Learmonth Solar Observatory (Австралия) и RAMU — Ramey Solar Observatory (Пуэрто-Рико). Количество вспышек дано в табл. 4, параметры распределений приведены на рис. 7, 8.

Таблица 3

Яркость	<i>N</i>	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	Δt
F	69310	13.0±0.1	4	9	1–27
N	25892	18.9±0.2	8	13	1–39
B	7066	28.4±0.6	8	20	1–62

По данным обсерваторий HOLL, LEAR и RAMU средние времена спада яркости вспышек малой мощности фактически совпадают (рис. 7, 8, а). Для вспышек более высоких классов площади они расходятся в пределах интервала рассеяния $\bar{\sigma}$.

Полученные результаты также подтверждают рост продолжительности главной фазы с увеличением балла и класса площади вспышек.

В результате проведенного на большом статистическом материале исследования впервые определены средние продолжительности главных фаз вспышек классов площади S, 1 и 2–4 (табл. 5, колонка II). В колонке I представлены результаты [Temmer et al., 2001].

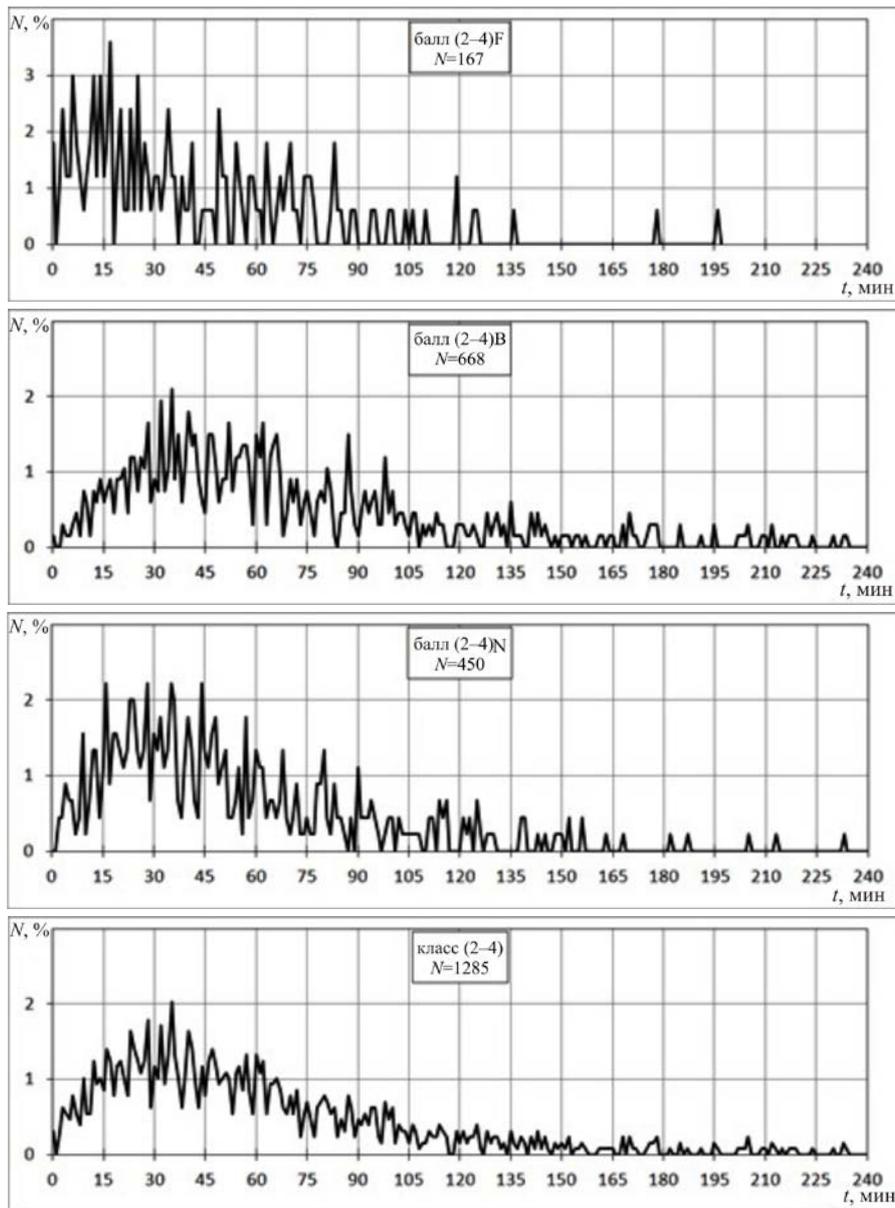


Рис. 5. Распределение вспышек классов площади 2–4 по времени спада яркости

Таблица 4

	Количество			
	все станции	HOLL	LEAR	RAMY
SF	55069	14224	11815	8347
SN	18098	2565	1638	1971
SB	3817	974	342	838
1F	1919	326	453	175
1N	2843	420	446	199
1B	1563	368	249	199
(2-4)F	166	27	35	9
(2-4)N	446	59	78	29
(2-4)B	638	156	150	79
S	76984	17763	13795	11156
1	6325	1114	1148	573
2-4	1250	242	263	117
Σ	84559	19119	15206	11846

Меньшее, чем у [Temmer et al., 2001], число использованных при статистическом анализе данных связано с более жестким подходом к отбору вспышек класса площади S и 1.

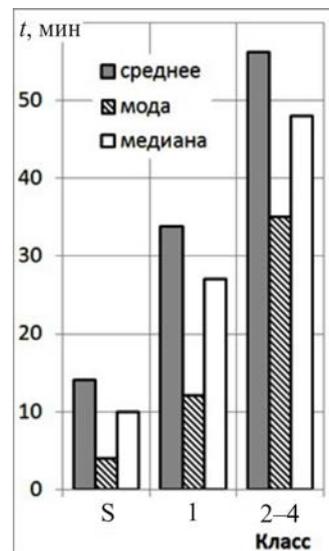


Рис. 6. Изменение статистических параметров распределений с ростом класса площади вспышек

Таблица 5

Класс	Кол-во		Среднее		Мода		Медиана	
	I	II	I	II	I	II	I	II
S	85 649	76 984	–	14.1	–	4	10	10
1	9176	6325	–	33.8	–	12	22	27
2–4	1120	1285	–	61.0	–	35	45	49
Σ	95 945	84 559	15.5	16.2	8	4	11	11

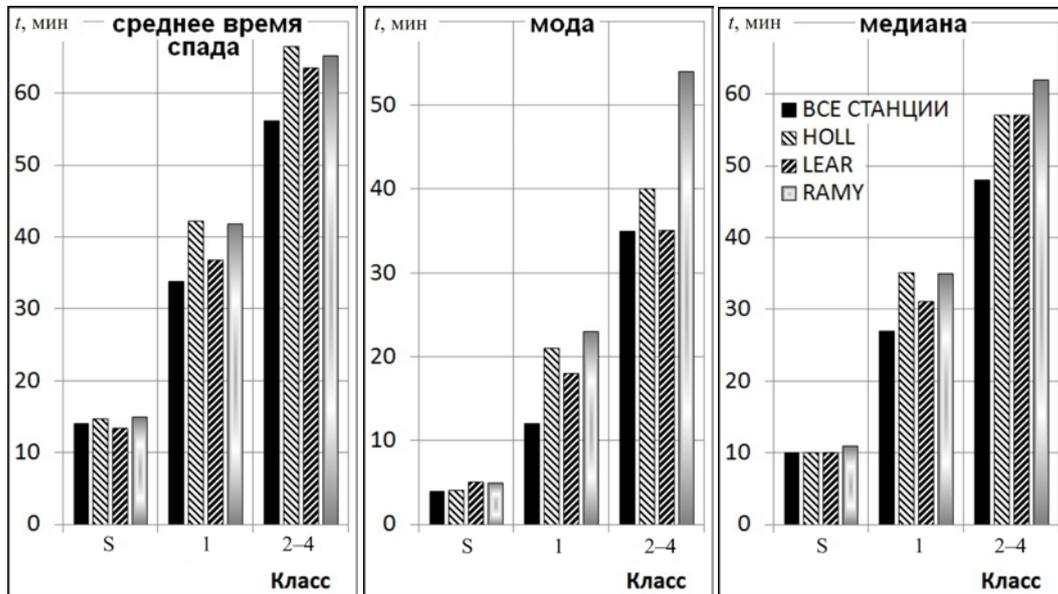


Рис. 7. Изменение статистических параметров распределений с ростом класса площади вспышек по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY

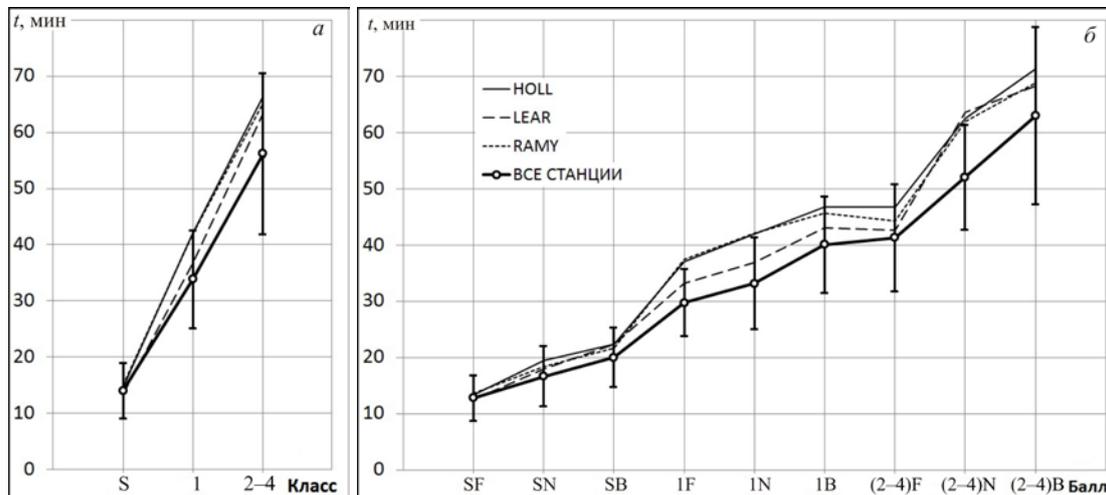


Рис. 8. Изменение среднего времени спада яркости вспышек с ростом класса площади (а) и балла вспышек (б) по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY и всех станций. Вертикальными линиями показаны интервалы рассеяния $\bar{\sigma}$ (рис. 1)

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИ СПАДА ЯРКОСТИ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ТИПОВ ВСПЫШЕК

Наряду с хорошо прослеживаемой тенденцией роста продолжительности главной фазы с увеличением класса площади вспышки обращает на себя внимание тот факт, что распределения в значительной степени перекрываются между собой (рис. 9, а). В результате в пределы временного интервала $\Delta t=1-111$ мин,

характерного для 90 % крупных вспышек, попадает до 99.9 % вспышек малой мощности и 98.1 % вспышек класса площади 1.

График на рис. 10 показывает, что функциональная зависимость между временем спада яркости и площадью вспышки отсутствует. Рассеяние довольно значительное, особенно для вспышек малой мощности. Коэффициент корреляции не превышает 0.4.

Чтобы выяснить, чем может быть обусловлена тенденция роста \bar{t} с увеличением класса площади, был проведен аналогичный статистический анализ

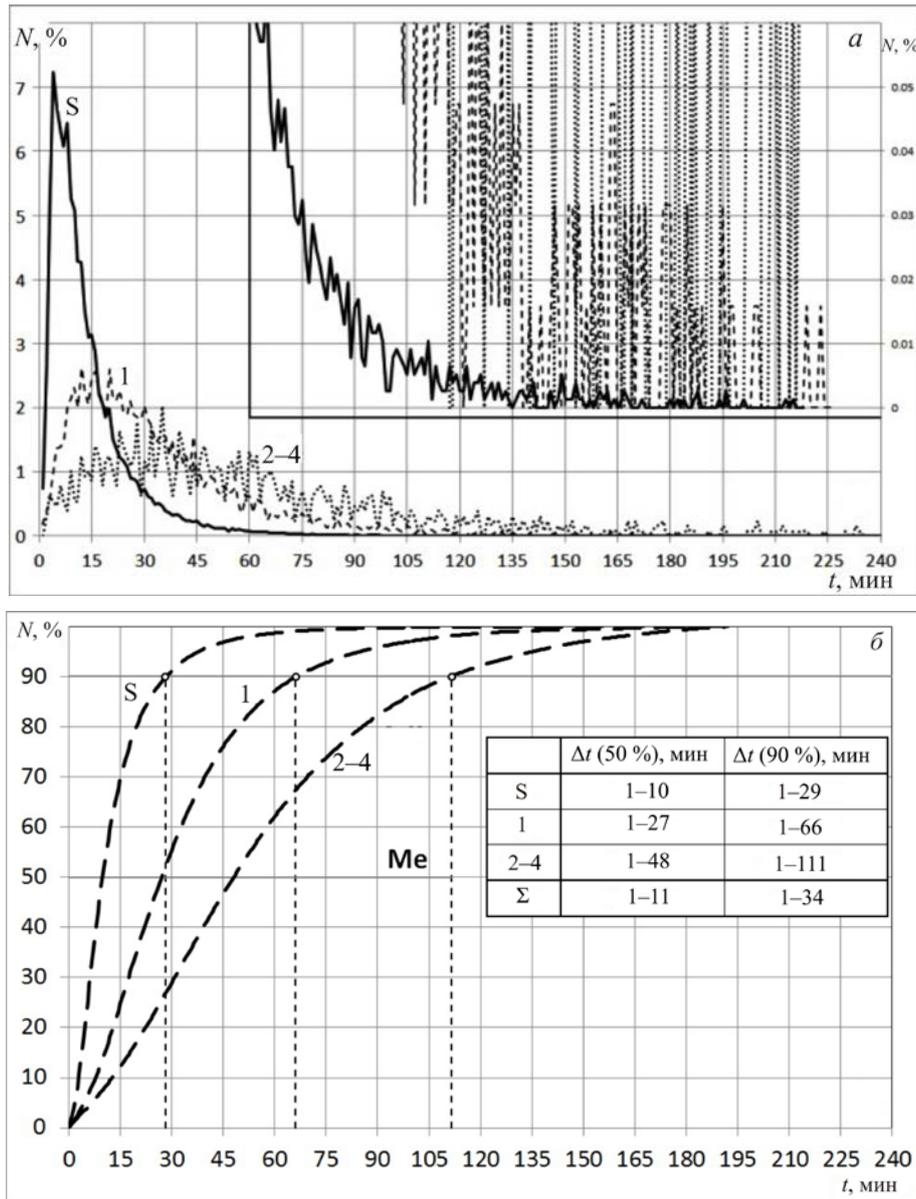


Рис. 9. Панель а — распределение вспышек классов площади S, 1, 2–4 по времени спада: сплошная линия — вспышки класса площади S; штриховая — вспышки класса 1; пунктирная — вспышки класса 2–4; в увеличенном масштабе показаны хвосты распределений. Панель б — кривые накопленных частот; в таблице указаны временные интервалы для 50 и 90 % вспышек

для отдельных типов вспышек. О некоторых из них станции сообщают в виде ремарок (remarks). Система ремарок, введенная международной патрульной службой [Solar-Geophysical Data, 1983], в общих чертах характеризует тип вспышки, сопутствующие и сопровождающие ее события, область возникновения, размер активной области и др. Ниже приводится список наиболее важных ремарок:

- D — Brilliant point;
- E — Two or more brilliant points;
- G — No visible spots nearby;
- H — Flare accompanied by high-speed dark filament;
- K — Several intensity maxima;
- L — Existing filaments suddenly active;
- M — White-light flare;
- R — Asymmetry in H-alpha line suggests high speed mass ejection;

- S — Brightness followed filament disappearance in same position;
- U — Two bright branches, parallel or converging;
- V — An explosive phase: important expansion in about 1 min that often includes a significant intensity increase;
- W — Great area increase after time of maximum brightness;
- Z — Major sunspot umbra covered by flare.

Обозначенные выше особенности наблюдаются у вспышек всех баллов. Частота их встречаемости подробно рассмотрена в работе [Боровик, Жданов, 2018]. К сожалению, не все станции отмечают особенности развития вспышек, поэтому удалось проанализировать только те типы вспышек, статистический вес которых был достаточно высоким.

При расчетах статистических параметров к данным применялись те же ограничения, что и для всех

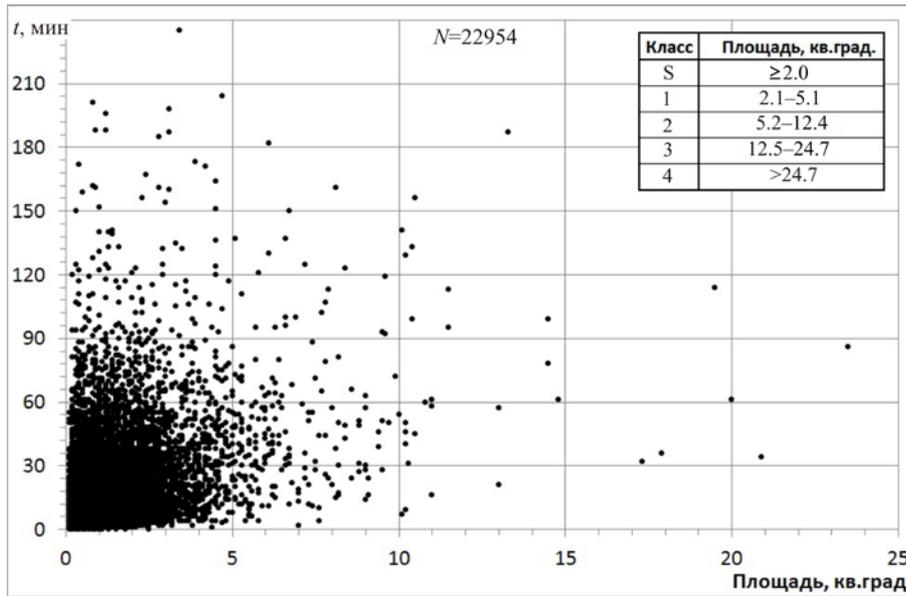


Рис. 10. Зависимость между продолжительностью главной фазы и площадью вспышек. В таблице приведена классификация солнечных вспышек в линии H α

Таблица 6

Класс	S			1			2-4		
	все вспышки	V	K	все вспышки	V	K	все вспышки	V	K
N	76984	2762	1021	6325	270	303	1250	47	94
$\bar{t} \pm \alpha$	14.1 \pm 0.1	15.4 \pm 0.4	33.5 \pm 1.6	33.8 \pm 0.6	36.6 \pm 3.3	50.6 \pm 3.9	56.2 \pm 2.1	66.3 \pm 12.0	67.6 \pm 7.5
Mo	4	8	18	12	20	36	35	44	48
Me	10	12	26	27	28	42	48	54	61
Δt	1-29	1-30	1-65	1-66	1-72	1-101	1-111	1-125	1-126

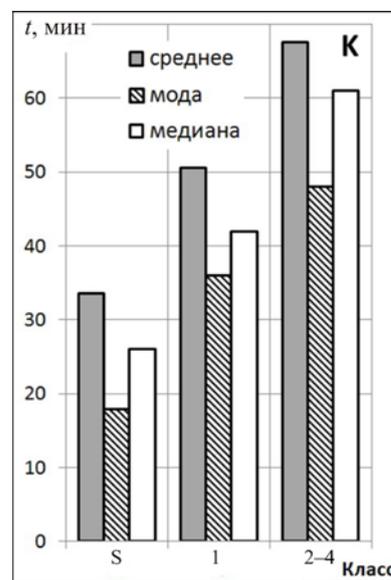
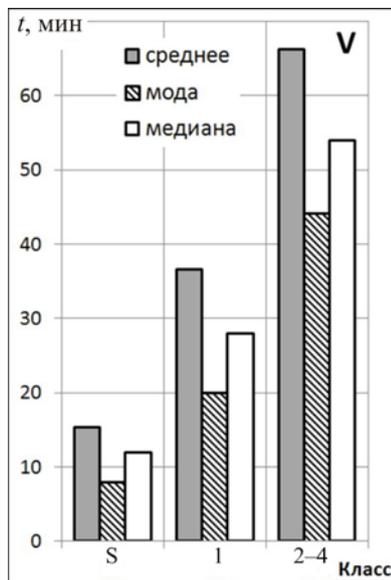


Рис. 11. Статистические параметры V- и K-вспышек

вспышек. Из-за относительно низкой обеспеченности данными модальные времена вспышек класса площади 2-4 оценивались по сглаженным кривым распределений.

V- и K-вспышки

V-вспышки (вспышки взрывного типа) характеризуются быстрым и значительным ростом интенсивности и площади.

K-вспышки отличает несколько максимумов интенсивности.

Для классов площади S и 1 средняя продолжительность времени спада яркости V-вспышек по отношению к K-вспышкам меньше в 2.2-1.4 раза (табл. 6, рис. 11), в 2.2-1.5 раза меньше значения медианы и в 2.2-1.1 раза короче временные интервалы для 90 % вспышек. Для классов площади 2-4

Таблица 7

Класс	S		1		2-4	
	все вспышки	U	все вспышки	U	все вспышки	U
<i>N</i>	76984	569	6325	429	1250	215
$\bar{t} \pm \alpha$	14.1±0.1	25.4±1.7	33.8±0.6	50.0±3.0	56.2±2.1	80.2±5.4
Mo	4	12	12	22	35	66
Me	10	20	27	42	48	76
Δt	1-29	1-53	1-66	1-93	1-111	1-38

Таблица 8

Класс	S		1		2-4	
	все вспышки	H	все вспышки	H	все вспышки	H
<i>N</i>	76984	2356	6325	429	1250	215
$\bar{t} \pm \alpha$	14.1±0.1	14.3±0.5	33.8±0.6	29.5±2.0	56.2±2.1	49.8±5.5
Mo	4	4	12	13	35	37
Me	10	10	27	24	48	46
Δt	1-29	1-29	1-66	1-59	1-111	1-89

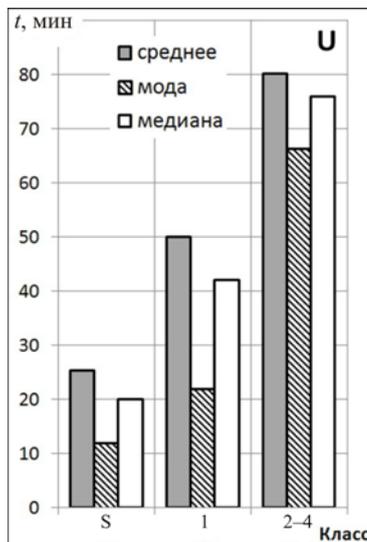


Рис. 12. Статистические параметры U-вспышек

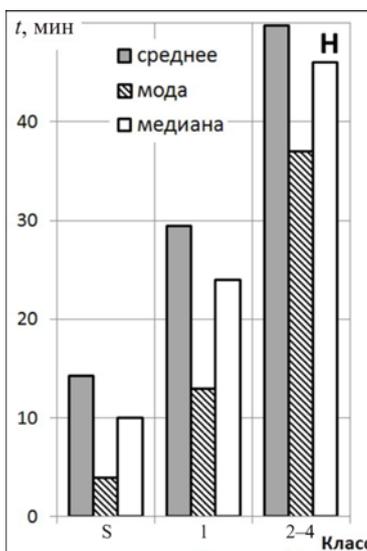


Рис. 13. Статистические параметры H-вспышек

таких различий нет. Одна из возможных причин — слабая обеспеченность данными.

U-вспышки (двухленточные)

U-вспышки представляют собой вспышки с параллельными или сходящимися яркими лентами.

Среднее время спада яркости двухленточных вспышек, а также другие параметры распределений существенно выше, чем у всех вспышек (табл. 7, рис. 12).

H-вспышки

Вспышки H-типа сопровождаются высокоскоростным темным волокном.

Статистические параметры H-вспышек ближе всего к параметрам всех вспышек (табл. 8, рис. 13).

G-вспышки

G-вспышки, или внепятенные вспышки, — события довольно редкие. По разным источникам, их процент от общего числа вспышек составляет от 2 до 7 % [Dodson, Hedeman, 1970; Чистяков, 1988; Altas, 1994, Barlas, Altas, 1992; Yatini, 2001; Luo, 1985]. Основную часть вспышек составляют вспышки малой мощности. Подробные исследования внепятенных вспышек были выполнены в работах [Vogovik, Muachin, 2002, 2010; Боровик и др., 2016].

Статистический вес данных по G-вспышкам относительно невысокий, особенно для крупных вспышек. Для внепятенных вспышек малой мощности параметры несколько выше, чем для всех вспышек (табл. 9, рис. 14).

D- и E-вспышки

D-вспышки имеют один центр повышенной яркости внутри вспышечной области, E-вспышки — два и более центра. Статистические параметры D- и E-вспышек приведены в табл. 10 и на рис. 15.

По сравнению с E-вспышками D-вспышки имеют более короткие средние времена спада яркости и вре-

Таблица 9

Класс	S		1		2-4	
тип вспышки	все вспышки	G	все вспышки	G	все вспышки	G
N	76984	484	6325	68	1250	215
$\bar{t} \pm \alpha$	14.1±0.1	15.9±1.2	33.8±0.6	28.6±6.9	56.2±2.1	56.5±27.1
Mo	4	8	12	13	35	54
Me	10	12	27	19	48	54
Δt	1-29	1-31	1-66	1-69	1-111	1-116

Таблица 10

Класс	S			1			2-4		
тип вспышки	все вспышки	D	E	все вспышки	D	E	все вспышки	D	E
N	76984	3291	6856	6325	218	1501	1250	30	251
$\bar{t} \pm \alpha$	14.1±0.1	11.2±0.4	16.7±0.4	33.8±0.6	21.0±2.7	31.3±1.2	56.2±2.1	46.4±12.3	52.5±5.0
Mo	4	4	8	12	13	17	35	37	32
Me	10	8	12	27	14	25	48	41	41
Δt	1-29	1-23	1-34	1-66	1-44	1-62	1-111	1-81	1-109

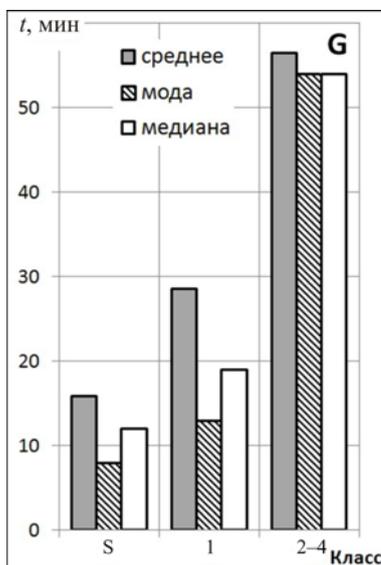


Рис. 14. Статистические параметры G-вспышек

менные интервалы и более низкие медианные значения распределений для 90 % вспышек.

Все рассмотренные типы вспышек следуют тенденции роста времени спада яркости с увеличением класса площади. Вместе с тем они существенно отличаются между собой по продолжительности главной фазы как друг от друга, так и от \bar{t} для всех вспышек (табл. 11, рис. 16).

Независимо от класса площади самое короткое время спада имеют вспышки с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области, самое продолжительное — вспышки с несколькими максимумами интенсивности и двухленточные вспышки. С ростом класса площади вспышки (кроме вспышек типов D, K и U) меняют свое относительное положение (рис. 16). Так, например, вспышки взрывного типа (V) перемещаются в разряд с более длительным временем спада. E-вспышки, наоборот, уходят в разряд с более короткой главной фазой.

По особенностям развития заметно выделяются вспышки взрывного типа и двухленточные вспышки [Боровик, Жданов, 2018]. Среди V-вспышек наблю-

дается высокий процент случаев появления в местах распада волокон (S). Чаще всего это вспышки с одним центром повышенной яркости (D). В структуре практически всех двухленточных вспышек присутствует несколько центров повышенной яркости (E). Значительная часть двухленточных вспышек характеризуется несколькими максимумами интенсивности (K). Среди них самый высокий процент вспышек, покрывающих тени больших пятен (Z).

Из полученных результатов следует вывод, что обобщенные статистические параметры солнечных вспышек складываются из параметров отдельных типов вспышек. Можно предположить, что в зависимости от фазы солнечного цикла они могут изменяться.

СВЕРХПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВНЫЕ ФАЗЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Обычно главная фаза солнечных вспышек продолжается в пределах одного часа. Однако встречаются случаи, когда она длится значительно дольше (более 60 мин). Информация по солнечным вспышкам со сверхпродолжительными главными фазами, включая размах значений времен спада L , приведена в табл. 12. За рассматриваемый период таких вспышек было зарегистрировано 3393, что составляет 2.9 % от общего числа вспышек.

Сверхпродолжительные времена спада яркости встречаются у вспышек всех классов площади. Максимальные времена спада яркости для вспышек класса площади S и 1 составляют 531 и 693 мин, для крупных вспышек — 498 мин. Для 90 % солнечных вспышек главная фаза продолжается в пределах 2-3 ч. В очень редких случаях она может длиться порядка 12 ч.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного статистического анализа можно сделать следующие выводы:

1. На большом статистическом материале определены средние продолжительности главных фаз

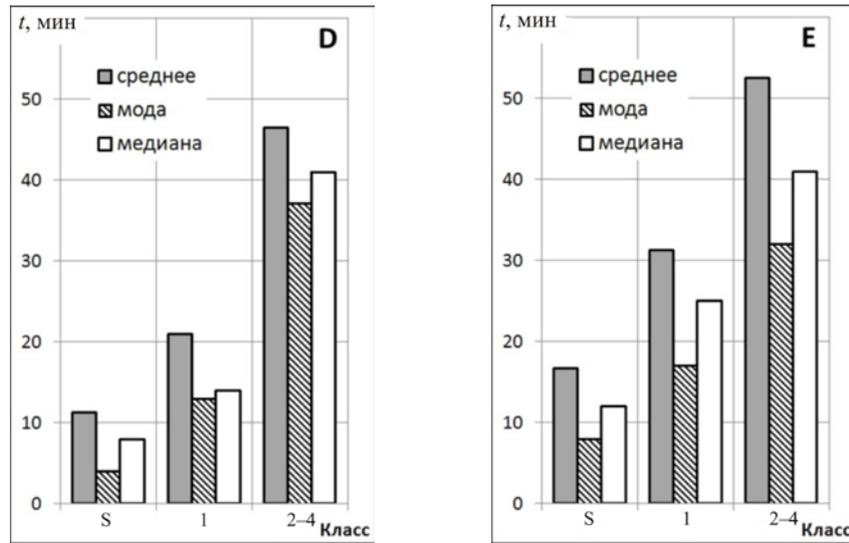


Рис. 15. Статистические параметры D- и E-вспышек

Таблица 11

Класс	D	все вспышки	H	V	G	E	U	K
S	11.2	14.1	14.3	15.4	15.9	16.7	25.4	33.5
1	21.0	33.8	29.5	36.6	28.6	31.3	50.0	50.6
2-4	46.4	56.2	49.8	66.3	56.5	52.5	80.2	67.6
Σ	12.1	16.2	18.1	18.0	17.9	20.2	43.8	39.4

Таблица 12

Класс	N	(N, %)	$\bar{t} \pm \alpha$	Me	Δt	L
S	1570	46.3	84.3 \pm 1.6	74	60–119	60–531
1	1189	35.0	91.4 \pm 2.4	78	60–132	60–693
2-4	634	18.7	108.9 \pm 4.4	90	60–178	60–498
Σ	3393	100	91.4 \pm 1.4	78	60–136	60–693

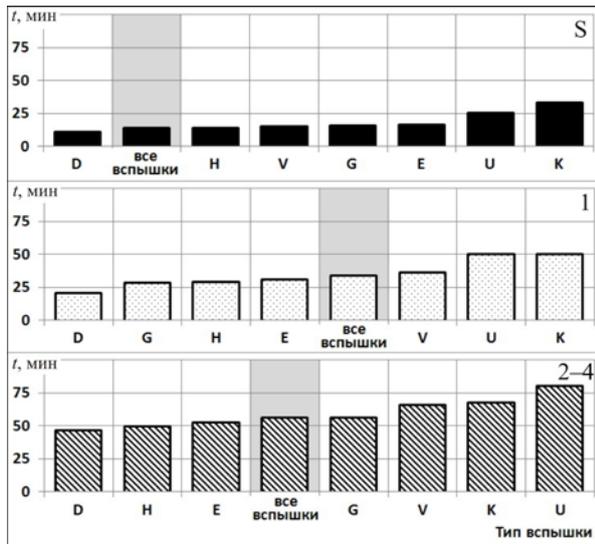


Рис. 16. Среднее время спада яркости отдельных типов вспышек в зависимости от класса площади. Гистограммы построены в порядке возрастания \bar{t}

вспышки классов площади S, 1 и 2-4. Подтверждена тенденция увеличения средней продолжительности главной фазы с ростом класса площади и яркости вспышек [Смит, Смит, 1966; Temmer et al., 2001].

2. Показано, что, несмотря на хорошо выраженную тенденцию, распределения вспышек всех классов

площади по времени спада яркости существенно перекрываются между собой, прямая функциональная зависимость между временем спада и площадью вспышки отсутствует.

3. Установлено, что время спада яркости зависит от типа вспышки. Наименьшую среднюю продолжительность главной фазы имеют вспышки с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области, наибольшую — вспышки с несколькими максимумами интенсивности и двухленточные вспышки.

4. Выделено 3393 вспышки с продолжительностью главной фазы более 60 мин. Для 90 % солнечных вспышек продолжительность главной фазы составляет 2–3 ч. Однако в отдельных случаях главная фаза может длиться около 12 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абраменко С.И., Дубов Э.Е., Огирь М.Б. и др. Фотометрия солнечных вспышек // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. 1960. Т. 23. С. 341–361.
 Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. М.: Наука, 1982. 246 с.
 Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности. Распределения вспышек по площади, яркости и баллам // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 34–45.
 Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности. Распределение

вспышек во времени подъема яркости к максимуму // Геомагнетизм и аэронаука. 2018. (В печати).

Боровик А.В., Мячин Д.Ю., Уралов А.М. Модель внепятенной вспышки // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. 2016. Т. 112, № 1. С. 38–46.

Копецкая Ф., Копецкий М. Характеристики больших хромосферных вспышек каталога Фритцевой, Копецкого, Швестки // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1971. Вып. 2. С. 117–130.

Прист Э. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985. 592 с.

Россада В.М. Статистический анализ 6600 вспышек за 1965–1966 гг. // Вестн. Киев. гос. ун-та. Сер. Астрономия. 1977. № 19. С. 49–55.

Смит Г., Смит Э. Солнечные вспышки. М.: Мир, 1966. 426 с.

Чистяков В.Ф. Вспышки вне солнечных пятен // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1988. Вып. 79. С. 70–75.

Altas L. Spotless flare activity // *Solar Phys.* 1994. V. 151, N 1. P. 169–176.

Barlas O., Altas L. The duration of spotless flares // *Astrophys. Space Sci.* 1992. V. 197, N 2. P. 337–341.

Borovik A.V., Myachin D.Yu. The spotless flare of March 16, 1981. I. Preflare activations of the fine structure of the chromospheric fine structure // *Solar Phys.* 2002. V. 205, N 1. P. 105–116.

Borovik A. V., Myachin D.Yu. Structure and development of the spotless flare on March 16, 1981 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010. V. 50, N 8. P. 937–949.

Dodson H.W., Hedeman E.R. Major H α flares in centers of activity with very small or no spots // *Solar Phys.* 1970. V. 13. P. 401–419.

Giersch O. GONG Inter-site H α flare comparison // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V. 440. 0120062013.

Luo B. The flares of spotless regions // *Proc. Kunming Workshop “Solar Physics and Interplanetary Travelling Phenomena”*: November 21–25, 1983, Kunming, China / Eds. C. de Jager, Biao Chen. Beijing: Science Press, 1985. V. 1. P. 718.

Potzi W., Veronig A.M., Riegler G., et al. Real-time flare detection in ground-based H α imaging at Kanzelhöhe Observatory // *Solar Phys.* 2014. V. 290, N 3. P. 951–977.

Solar-Geophysical Data. 1983. Part 1, January, N 461. P. 30.

Švestka Z. Solar Flares. D. Reidel Publ. Co., 1976. 415 p. (*Geophys. Astrophys. Monographs*; V. 8).

Temmer M., Veronig A., Hanslmeier A., et al. Statistical analysis of solar H α flares // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 375. P. 1049–1061.

Ward F., Cornevall R.F., Hendle R. Solar flare observations from a pair of matched instruments // *Solar Phys.* 1973. V. 31. P. 131.

Warwik C.S. Solar flare frequency and observing-time patterns // *Astrophys. J.* 1965. V. 142, N 2. P. 767–771.

Yatini C.Y. Characteristics of H α flare in the solar spotless area // *Majalah LAPAN.* 2001. V. 3. P. 53.

REFERENCES

Abramenko S.I., Dubov E.E. Ogir M.B., Steshenko N.E., Shaposhnikov E.F., Tsap T.T. Photometry of solar flares. *Izvestiya Krymskoi astrofizicheskoi observatorii* [Bull. of the Crimean Astrophysical Observatory]. 1960, vol. 23, pp. 341–361. (In Russian).

Altas L. Spotless flare activity. *Solar Phys.* 1994, vol. 151, no. 1, pp. 169–176.

Altyntsev A.T., Banin V.G., Kuklin G.V., Tomozov V.M. *Solnechnye vspyshki* [Solar flares]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 246 p. (In Russian).

Barlas O., Altas L. The duration of spotless flares. *Astrophys. Space Sci.* 1992, vol. 197, no 2, pp. 337–341.

Borovik A.V., Myachin. D.Yu. The spotless flare of March 16, 1981. I. Preflare activations of the fine structure of the chromospheric fine structure. *Solar Phys.* 2002, vol. 205, no. 1, pp. 105–116.

Borovik A. V., Myachin D.Yu. Structure and development of the spotless flare on March 16, 1981. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010, vol. 50, no. 8, pp. 937–949.

Borovik A.V., Zhdanov A.A. Statistical studies of low-power solar flares. Distributions of flares by area, brightness, and classes. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.] 2017, vol. 3, no. 1, pp. 34–45. (In Russian).

Borovik A.V., Zhdanov A.A. Statistical studies of low-power solar flares. Distributions of flares by time of rise to the maximum brightness. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2018. (In print). (In Russian).

Borovik A.V., Myachin D.Yu., Uralov A.M. The model of extra-sunspot flare. *Izvestiya Krymskoi astrofizicheskoi observatorii* [Bull. of the Crimean Astrophysical Observatory]. 2016, vol. 112, no. 1, pp. 38–46. (In Russian).

Chistyakov V.F. Flares out of sunspots. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1988, iss. 79, pp. 70–75. (In Russian).

Dodson H.W., Hedeman E. Ruth. Major H α flares in centers of activity with very small or no spots. *Solar Phys.* 1970, vol. 13, pp. 401–419.

Giersch O. GONG Intersite H α flare comparison. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013, vol. 440, 0120062013.

Kopetskaya F., Kopetsky M. Characteristics of large chromospheric flares from Frittseva, Kopetsky, Švestka Catalogue. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1971, iss. 2, pp. 117–130. (In Russian).

Luo B. The flares of spotless regions. *Proc. Kunming Workshop “Solar Physics and Interplanetary Travelling Phenomena”*. November 21–25, 1983, Kunming, China. Beijing Science Press, 1985, vol. 1, p. 718.

Potzi W., Veronig A.M., Riegler G., Amerstorfer U., Pock T., Temmer M., Polanec W., Baumgartner D.J. Real-time flare detection in ground-based H α imaging at Kanzelhöhe Observatory. *Solar Phys.* 2014, vol. 290, no. 3, pp. 951–977.

Priest E. *Solar Magnetohydrodynamics*. Moscow, Mir Publ., 1985, 592 p. (In Russian).

Rossada V.M. Statistical analysis of 6600 flares over 1965–1966. *Vestnik Kievskogo Natsionalnogo Universiteta. Ser. Astronomiya* [Bull. of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Ser. Astronomy]. 1977, no. 19, pp. 49–55. (In Russian).

Smith H.J., Smith E. *Solar flares*. Moscow, Mir Publ., 1966, 426 p. (In Russian).

Solar-Geophysical Data. 1983, Part 1, January, no. 461, p. 30. Švestka Z. Solar Flares. D. Reidel Publ. Co., 1976, 415 p. (*Geophys. Astrophys. Monographs*, vol. 8).

Temmer M., Veronig A., Hanslmeier A., Otruba W., Messerotti M. Statistical analysis of solar H α flares. *Astron. Astrophys.* 2001, vol. 375, pp. 1049–1061.

Ward F., Cornevall R.F., Hendle R. Solar flare observations from a pair of matched instruments. *Solar Phys.* 1973, vol. 31, p. 131.

Warwik C.S. Solar flare frequency and observing-time patterns. *Astroph. J.* 1965, vol. 142, no. 2, pp. 767–771.

Yatini C.Y. Characteristics of H α flare in the solar spotless area. *Majalah LAPAN.* 2001, vol. 3, p. 53.

Как цитировать эту статью

Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности. Продолжительность главной фазы. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 4. С. 5–16. DOI: 10.12737/szf-34201701.