

## ПРОЦЕССЫ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

### PROCESSES OF ENERGY RELEASE IN LOW-POWER SOLAR FLARES

**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 международного вспышечного патруля за 1972–2010 гг. [<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares>] выполнены статистические исследования малых солнечных вспышек (класс площади S). Установлена высокая корреляционная зависимость между продолжительностью вспышек и временем подъема яркости к максимуму. Получены новые данные по относительным временам подъема яркости (отношение времени подъема к общей продолжительности вспышки). Установлено, что распределения  $T_{\text{отн}}$  малых солнечных вспышек содержат ряд максимумов с наиболее значимыми 0.2, 0.25, 0.33 и 0.5. При переходе от вспышек низких оптических классов к более крупным вспышкам максимумы постепенно исчезают. Получены распределения солнечных вспышек по энергии в оптическом диапазоне длин волн, свидетельствующие о том, что интервалы энергий вспышек разного класса площади в значительной степени перекрываются. До 9.5 % малых вспышек попадает в интервал энергий крупных солнечных вспышек (класс площади 2–4). Еще более значительное перекрытие — со вспышками класса площади 1.

**Ключевые слова:** солнечные вспышки.

**Abstract.** Using flare patrol data for 1972–2010 [<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares>], we have conducted statistical studies of small solar flares. We have established a correlation between the flare brightness rise time and the total duration of small flares, and obtained evidence of the discreteness of relative rise times ( $T_{\text{rel}}$ ). The most significant  $T_{\text{rel}}$  values are 0.2, 0.25, 0.33, and 0.5. As the area class and importance of flares increase, maxima of  $T_{\text{rel}}$  distributions decrease, flatten, and completely disappear in case of large flares. We have found the discreteness of the area distribution of small flares. We have obtained distributions of solar flare energy, which exhibit significant overlap for flare energy of different area classes. The energy range of large solar flares contains 9.5 % of small flares. The energy range of flares of area class 1 has even a more significant overlap.

**Keywords:** solar flares.

## ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки — явление быстрого превращения энергии электрических токов плазмы в энергию мощных гидродинамических движений, потоков тепла, излучения и ускорения частиц — порождают сложную цепочку процессов, воздействующих на магнитосферу, ионосферу и нейтральную атмосферу Земли, оказывают существенное влияние на радиационную обстановку в ближнем космосе.

Наблюдения в широком диапазоне длин волн свидетельствуют о том, что вспышки на Солнце возникают вследствие крупномасштабного пересоединения корональных магнитных полей. В области контакта магнитных потоков противоположной направленности образуются токовые слои. Во время их разрыва и следующего за ним магнитного пересое-

единения избыточная энергия переходит в кинетическую энергию ускоренных частиц и тепловую энергию плазмы [Priest, 1992; Rust, Gauzzi, 1992; Somov, 1992; Roumeliotis, Moore, 1993; Masuda et al., 1994; Raman et al., 1994]. Энергичные частицы, распространяясь вдоль силовых линий магнитного поля в хромосфере, в основаниях генерируют оптическое и жесткое рентгеновское излучение. Разогретая до высоких температур хромосферная плазма испаряется, заполняет магнитные петли и становится видимой в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении. Установлена зависимость между потоками жесткого и мягкого рентгеновского излучения вспышки: производная по времени потока мягкого рентгеновского излучения пропорциональна потоку жесткого рентгеновского излучения (эффект Нойперта) [Neupert, 1968]. Относительно оптического

излучения вспышек, особенно на начальной фазе развития, еще нельзя сделать однозначные выводы — слишком сложна физическая картина [Somov, 1992; Fletcher et al., 2011]. Попытки найти связь между оптическими параметрами вспышек результатов не дали [Смит, Смит, 1966]. Не обнаружена зависимость между продолжительностью вспышек, площадью, интенсивностью и шириной линии  $H\alpha$ . Корреляция между максимальной шириной линии  $H\alpha$  и баллом вспышки оказывается довольно слабой. Отсутствует связь между временем подъема яркости вспышек к максимуму и временем спада (по нашим оценкам, коэффициент корреляции не превышает 0.4).

В работах [Боровик, Жданов, 2017б, 2018а, б], выполненных по большому объему данных, нами были получены распределения солнечных вспышек по времени подъема яркости к максимуму, времени спада и продолжительности в соответствии с международной классификацией хромосферных вспышек. Согласно оптической классификации, вспышки подразделяются по площади на пять классов: S, 1, 2, 3, 4. В каждом классе площади вспышки делятся на три класса яркости: F (слабые вспышки), N (умеренные) и B (яркие). Сочетание этих двух параметров составляет оптический балл вспышки.

В настоящей работе проводится анализ полученных в работах [Боровик, Жданов, 2017б, 2018а, б] результатов, приводится ряд важных, на наш взгляд, заключений о динамике и энергетике вспышечных процессов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### 1. Корреляционные связи между оптическими параметрами вспышек

Статистические исследования выполнены по данным международного вспышечного патруля за 1972–2010 гг. [<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/spaceweather/solar-data/solar-features/solar-flares>]. Отдельно исследования выполнялись по данным обсерваторий HOLL (Holloman Solar Observatory, Нью-Мексико, США), LEAR (Learmonth Solar Observatory, Австралия) и RAMY (Ramey Solar Observatory, Пуэрто-Рико), использующих для наблюдений идентичные автоматизированные вакуумные 25-см рефракторы, оснащенные перестраиваемыми монохроматическими фильтрами, центрированными на линию  $H\alpha$  (пространственное разрешение телескопа ~0.3 угл. сек). Во время наблюдений автоматически определяются интенсивность вспышки, время роста и спада излучения, рассчитывается и корректируется за перспективное сокращение площадь хромосферы, охваченная эмиссией. Вспышка яркостью 160–260 % относительно яркости спокойного участка хромосферы, считается слабой (F), 260–360 % — умеренной (N), свыше 360 % — яркой (B).

В результате проведенного нами анализа было установлено, что для малых солнечных вспышек класса S (площадь менее 194 м.д.д.) существует высокая корреляционная зависимость между общей продолжительностью вспышки и временем подъема яркости излучения к максимуму. Коэффициент корреляции  $r \approx 0.7$  (табл. 1). Для крупных вспышек классов 2–4, площадь которых превышает 504 м.д.д.,  $r \approx 0.5$ .

Таблица 1

Коэффициенты корреляции:  
подъем — продолжительность

	Все вспышки		HOLL, LEAR, RAMY	
	N	r	N	r
SF	59 555	0.69	34 083	0.69
SN	20 202	0.64	6194	0.63
SB	4226	0.63	2127	0.62
1F	2453	0.66	1049	0.63
1N	3423	0.65	1144	0.65
1B	1775	0.59	835	0.61
(2–4)F	168	0.31	71	0.58
(2–4)N	467	0.66	162	0.47
(2–4)B	653	0.55	371	0.53
S	83 983	0.67	42 404	0.67
1	7651	0.63	3028	0.63
2–4	1288	0.56	604	0.52

Аналогичный вывод следовал из анализа вспышек отдельных типов (табл. 2), из которых самый высокий коэффициент корреляции (0.7–0.8) показывают вспышки H-типа, сопровождающиеся высокоскоростным выбросом волокна.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между подъемом и продолжительностью вспышек отдельных типов

Тип вспышки	Класс S		Класс 1		Класс 2–4	
V	2762	0.61	271	0.65	50	0.46
K	1029	0.51	309	0.56	97	0.61
H	2357	0.78	434	0.74	128	0.79
U	569	0.59	432	0.65	232	0.59
G	484	0.63	68	0.79	6	0.43
D	3291	0.69	218	0.70	31	0.48
E	6859	0.68	1501	0.66	233	0.48

Пояснения к таблице: N — число вспышек; r — коэффициент корреляции;

V — значительный рост площади вспышки в течение 1 мин, часто сопровождаемый большим увеличением интенсивности (вспышка взрывного типа);

K — несколько максимумов интенсивности;

H — вспышка, сопровождаемая высокоскоростным темным волокном;

U — две ярких ленты, параллельные или сходящиеся (двухленточная вспышка);

G — отсутствие поблизости видимых пятен (внепятенная вспышка);

D — вспышка с одним центром повышенной яркости;

E — два и более ярких центра.

Установленная зависимость послужила поводом для более детального анализа по большому числу событий относительного времени подъема яркости  $T_{отн}$  — параметра, представляющего собой отношение времени подъема яркости до максимума к общей продолжительности вспышки.

### 2. Относительные времена подъема яркости солнечных вспышек

Сообщения станций об одной и той же вспышке обычно отличаются, и в каталогах вспышки объединяются в группы под одним номером [Solar-Geophys.

Data, 1983]. Чтобы оценить дисперсию  $T_{отн}$ , в групповых сообщениях станций для классов площади и баллов вспышек определены средние среднеквадратичные отклонения  $T_{отн}$  ( $\bar{\sigma}$ ). Согласно полученным результатам, с ростом класса площади и балла  $\bar{\sigma}$  постепенно уменьшается от 0.12 до 0.08 (табл. 3).

Таблица 3

Изменение  $\bar{\sigma}$  для  $T_{отн}$  в зависимости от класса площади и балла вспышек.  $N_{гр}$  — число проанализированных групп

	$N_{гр}$	$\bar{\sigma}$
SF	6417	0.12
SN	2600	0.11
SB	599	0.09
1F	155	0.09
1N	466	0.10
1B	375	0.08
(2-4)F	12	0.08
(2-4)N	65	0.08
(2-4)B	157	0.09
S	13 386	0.12
1	1646	0.09
2-4	353	0.09

Статистический анализ  $T_{отн}$  выполнен для 73416 вспышек. Получены распределения  $T_{отн}$  для вспышек отдельных классов площади и баллов. Статистические параметры распределений приведены в табл. 4, в которой указаны количество вспышек  $N$ , средняя относительная продолжительность подъема  $\bar{T}_{отн}$  с доверительным интервалом  $\alpha$ , медианы распределений  $Me$ , интервалы  $T_{отн}$  для 90 % вспышек  $\Delta T_{отн}$ .

Для малых вспышек  $\bar{T}_{отн} \sim 0.28$ ,  $Me \sim 0.25$ . Для 90 % малых вспышек  $\Delta T_{отн}$  не превышает 0.54. Для сравнения: по данным [Смит, Смит, 1966] средняя относительная продолжительность подъема яркости малых вспышек составляет 0.36, вспышек класса площади 1 — 0.28, крупных вспышек — 0.24.

Изменения параметров показывают, что отношение времени подъема к общей продолжительности вспышек с ростом класса площади, балла и яркости постепенно уменьшается (рис. 1, табл. 4).

По обработанным нами данным обсерваторий HOLL, LEAR и RAMY средние относительные времена подъема яркости малых вспышек отличаются незначительно (рис. 2, а). У вспышек более высоких классов площади они расходятся в пределах интервала рассеяния  $\bar{\sigma}$ .

Более значительные расхождения наблюдаются для баллов вспышек (рис. 2, б), что может быть связано с недостаточно высоким статистическим весом данных, особенно для крупных вспышек. Тем не менее, достаточно хорошо прослеживается тенденция относительного подъема яркости вспышек с увеличением балла.

Все полученные распределения  $T_{отн}$  имеют положительную асимметрию и протяженный спад и так же, как временные параметры вспышек [Боровик, Жданов, 2017б, 2018а, б], показывают существенное взаимное перекрытие распределений (рис. 3, а, б). Это означает, что высокий процент вспышек с ростом класса площади не следует общей тенденции.

Таблица 4

Статистические параметры распределений  $T_{отн}$  для баллов, классов площади и яркости солнечных вспышек

	$N$	$\bar{T}_{отн} \pm \alpha$	$Me$	$\Delta T_{отн}$ (90 %)
SF	46 277	0.29±0.002	0.25	0.54
SN	16 258	0.27±0.003	0.23	0.50
SB	3440	0.24±0.006	0.20	0.47
1F	1859	0.27±0.007	0.23	0.50
1N	2794	0.24±0.006	0.20	0.46
1B	1531	0.21±0.008	0.17	0.43
(2-4)F	156	0.28±0.027	0.25	0.50
(2-4)N	444	0.24±0.015	0.20	0.48
(2-4)B	657	0.19±0.011	0.14	0.39
S	65 974	0.28±0.001	0.25	0.52
1	6184	0.24±0.004	0.20	0.46
2-4	1257	0.22±0.009	0.17	0.44
F	48 292	0.29±0.002	0.25	0.54
N	19 496	0.26±0.002	0.22	0.50
B	5628	0.23±0.004	0.18	0.45

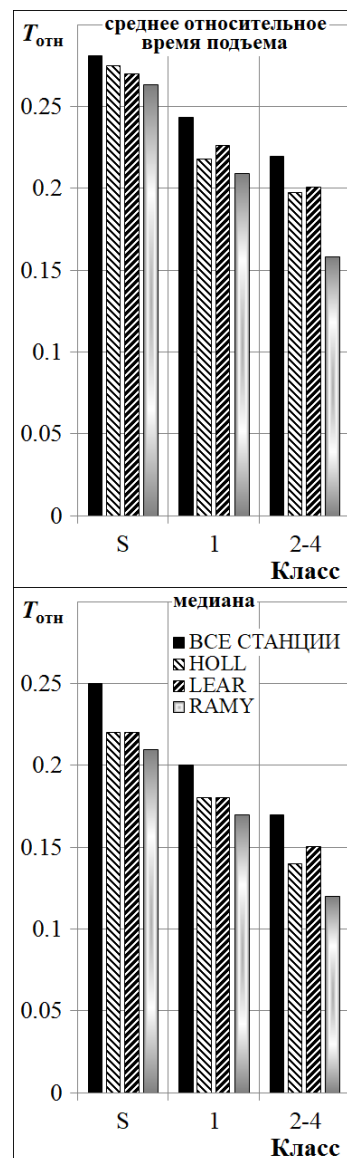


Рис. 1. Изменение статистических параметров распределений  $T_{отн}$  с ростом класса площади вспышек по данным вспышечного патруля и данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY

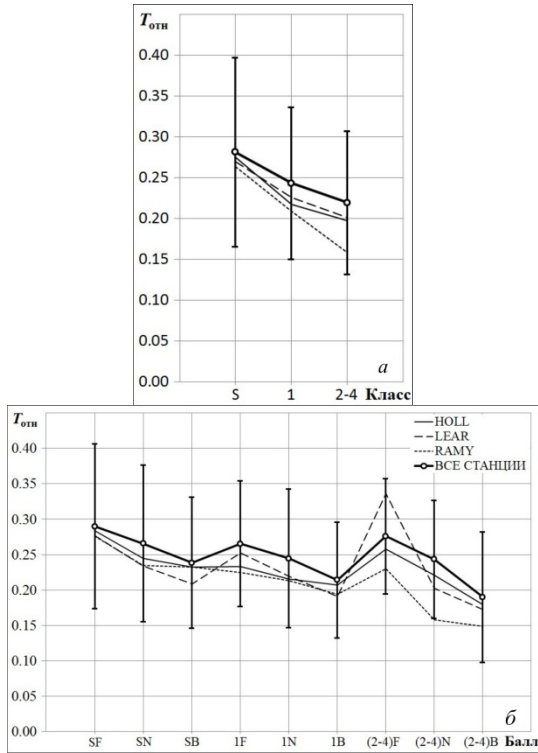


Рис. 2. Изменение  $\bar{T}_{отн}$  с ростом класса площади (а) и балла вспышек (б) по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY и по всем станциям. Интервалы рассеяния  $\bar{\sigma}$  указаны вертикальными отрезками

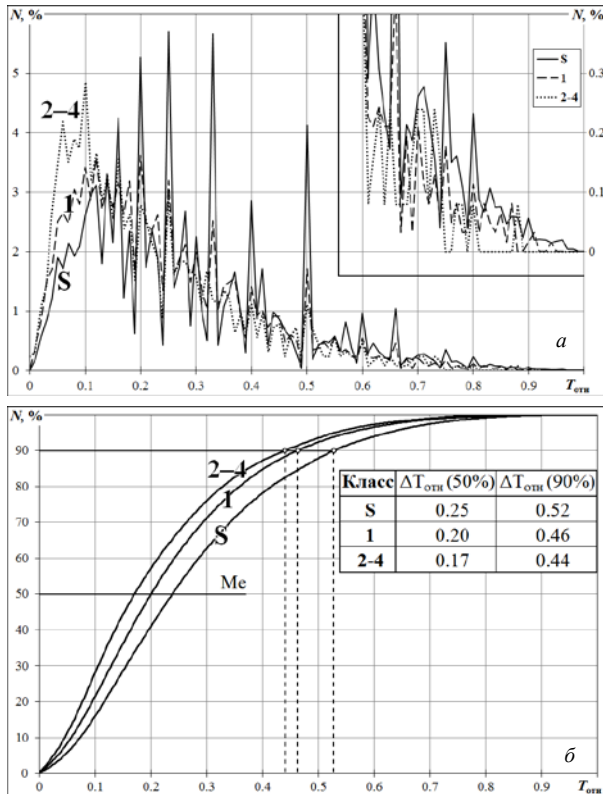


Рис. 3. Распределение относительной продолжительности подъема вспышек классов площади S, 1 и 2-4 (а) (сплошная линия — вспышки класса площади S; штриховая — вспышки класса 1; пунктирная — вспышки класса 2-4). В увеличенном масштабе показаны хвосты распределений (ось справа); б — графики накопленных частот. В таблице приведены интервалы  $T_{отн}$  для 50 и 90 % процентов вспышек

Обращает также на себя внимание присутствие на распределениях малых всплесков ряда максимумов (рис. 4, 5) с наиболее значимыми 0.2, 0.25, 0.33 и 0.5. С ростом класса площади и балла всплесков максимумы слабеют, сглаживаются и фактически полностью исчезают у крупных всплесков.

Как дополнительное свидетельство в пользу возможной дискретизации  $T_{отн}$  малых всплесков на рис. 6 приведены распределения  $T_{отн}$  для всплесков 7 типов.

Четкие максимумы  $T_{отн}$  присутствуют на распределениях D- и G-всплесков. На распределениях всплесков V-, H- и E-типов максимумы постепенно сокращаются и исчезают для U- и K-всплесков.

Самые короткие средние относительные времена подъема имеют малые всплески взрывного типа и двухленточные всплески. Среднее относительное время подъема для всплесков D- и G-типов выше, чем для всплесков других типов (табл. 5, рис. 7).

Следует сказать, что ни распределения по времени подъема яркости всплесков к максимуму, ни распределения по продолжительности не имеют дискретного характера [Боровик, Жданов, 2018а, б]. По-видимому, максимумы не имеют отношения и к дискретности времени наблюдений — рассеяние временных параметров всплесков в пределах максимумов довольно значительное. Тем не менее, полученный результат требует дальнейшего тщательного исследования. Мы не исключаем того, что дискретность  $T_{отн}$  малых всплесков может быть реальным явлением.

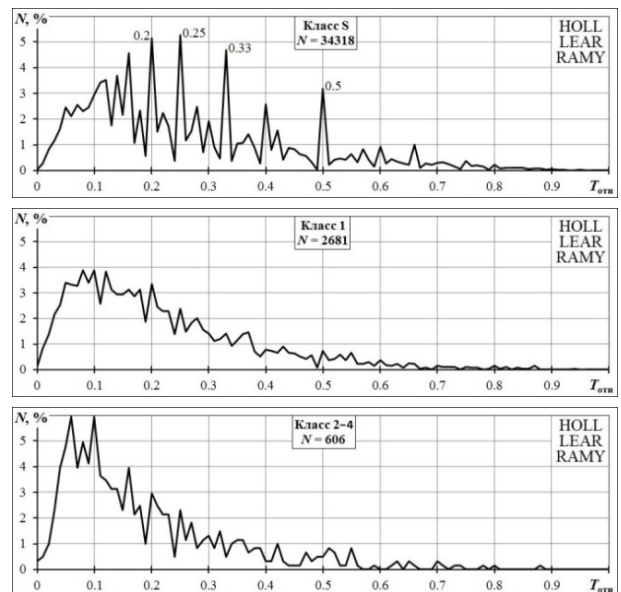


Рис. 4. Распределение относительного времени подъема солнечных вспышек классов площади S, 1, 2-4 по данным обсерваторий HOLL, LEAR и RAMY в пределах 65° от центрального меридиана

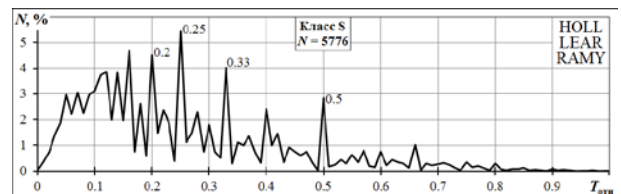


Рис. 5. Распределение относительного времени подъема солнечных вспышек класса S в пределах 10° от центрального меридиана

Таблица 5

Статистические параметры распределений  $T_{отн}$  для отдельных типов вспышек

Тип	Класс S				Класс 1				Класс 2-4			
	$N$	$\bar{T}_{отн} \pm \alpha$	$Me$	$\Delta T_{отн}$ (90 %)	$N$	$\bar{T}_{отн} \pm \alpha$	$Me$	$\Delta T_{отн}$ (90 %)	$N$	$\bar{T}_{отн} \pm \alpha$	$Me$	$\Delta T_{отн}$ (90 %)
V	2444	0.23±0.006	0.20	0.40	260	0.18±0.015	0.15	0.35	50	0.16±0.041	0.10	0.36
U	528	0.24±0.015	0.20	0.50	425	0.20±0.014	0.17	0.40	225	0.18±0.016	0.14	0.34
K	982	0.26±0.013	0.19	0.61	304	0.27±0.022	0.22	0.56	97	0.26±0.036	0.22	0.52
E	6482	0.28±0.004	0.25	0.50	1478	0.24±0.008	0.20	0.48	228	0.23±0.021	0.18	0.49
H	2111	0.28±0.007	0.25	0.50	420	0.24±0.014	0.21	0.45	126	0.22±0.029	0.16	0.48
G	461	0.29±0.014	0.26	0.50	68	0.25±0.028	0.23	0.38	6	0.24±0.070	0.25	0.33
D	3066	0.29±0.006	0.26	0.50	212	0.28±0.022	0.23	0.50	30	0.22±0.061	0.15	0.36

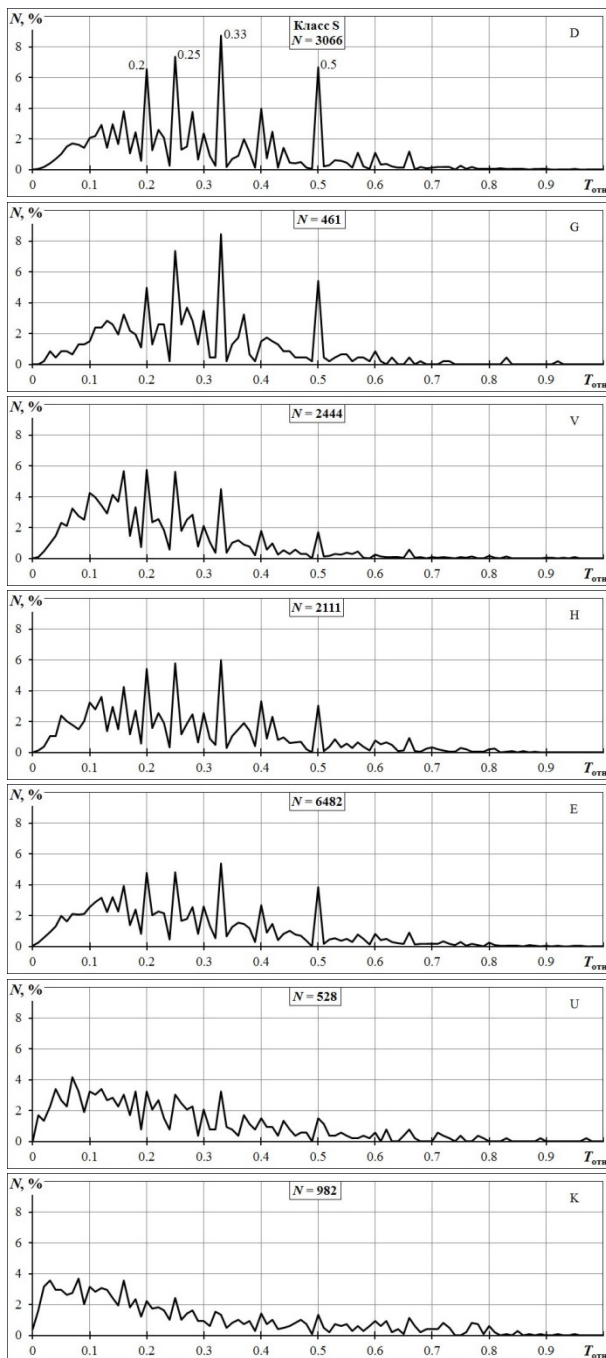


Рис. 6. Распределения относительных времен подъема для малых вспышек семи типов в пределах  $65^\circ$  от центрального меридиана

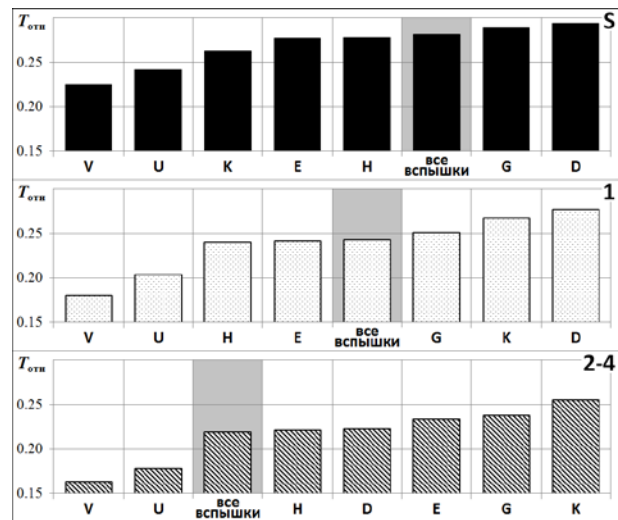


Рис. 7. Средняя относительная продолжительность подъема яркости вспышек отдельных типов в зависимости от класса площади. Гистограммы построены в порядке возрастания  $T_{отн}$

### 3. Структурные особенности малых солнечных вспышек

По современным модельным представлениям малые солнечные вспышки относят к структурам типа простой петли. В мягком рентгене она имеет небольшие объемы, низкие высоты и большие плотности энергии. Энергия петельной вспышки выделяется обычно в импульсной фазе. Наиболее типичен один всплеск жесткого рентгеновского излучения, продолжающийся около минуты [Прист, 1985].

По наблюдениям, в линии  $H\alpha$  на диске малые вспышки представляют собой небольшие яркие узлы, которые не всегда соединяются между собой и не всегда образуют ленты. На лимбе малые вспышки возникают в виде ярких точек, которые затем быстро формируют единый источник излучения, обычно конической или цилиндрической формы. Со временем они могут расширяться, пульсировать, формировать выбросы и петли [Северный, Шапошникова, 1961; Смит, Смит, 1966; Огирь, 1970; Švestka, 1976].

В работе [Боровик, 1994] было установлено, что малые вспышки имеют дискретную структуру и состоят из трех основных элементов: вспышечный узел, очаг, петля. Вспышечный узел имеет вытянутую эллипсоидную форму, характерный размер

вспышечных узлов  $1.5 \times 3$  угл. сек и, площадь  $\sim 1.2$  м.д.д. Часто они образуют плотное скопление — очаги. На начальной фазе развития очаг выглядит как крупный яркий узел, от которого расходятся петли. На стадии затухания он обычно разрешается на отдельные узлы, соединенные петлями, являющимися связующим звеном вспышечных узлов. Часто одно из оснований петли выглядит более ярким, чем другое. Из одиночных вспышечных узлов выходят слабые петли, замыкающиеся на узлы усиленной хромосферной сетки. Характерные размеры петель 10 и 30 тыс. километров. Возникают и развиваются малые вспышки, как правило, по границам конвективных ячеек типа мезогранул и супергранул, часто образуя кольцеобразные структуры [Боровик, 1990].

На лимбе малая вспышка выглядит как один или два близко расположенных конуса, расстояние между которыми составляет от 7 до 37 тыс. километров. По мере развития вспышки между конусами могут образовываться петли. При внимательном изучении внутри вспышечного конуса можно обнаружить одну или две узкие вытянутые яркие детали — структуры типа струи. Если конус содержит две струи, они обычно сближаются в вершине конуса и со временем вытягиваются вверх. Нередко лимбовые малые вспышки имеют довольно сложную структуру, состоящую из системы узлов и петель.

По-видимому, вследствие особенностей развития и структуры малых вспышек их распределение по площади показывает, в отличие от крупных вспышек, хорошо выраженный максимум 21 м.д.д. (рис. 8, табл. 6).

При более детальном исследовании с использованием данных обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY, разрешающая способность телескопов которых в несколько раз превышает размеры тонкой структуры малых вспышек, было обнаружено, что распределения включают как минимум два максимума: 15 и 21 м.д.д. (рис. 9). По нашим оценкам, они могут иметь отношение к вспышкам, развивающимся по границам мезогранул.

Таблица 6

Статистические параметры распределений вспышек по площади

	$N$	$\bar{S} \pm \alpha$	$Mo$	$Me$	$\Delta S$ (90 %)
SF	49 305	$49.8 \pm 0.3$	21	38	1–101
SN	15 927	$84.5 \pm 0.7$	31	76	5–154
SB	3456	$100.9 \pm 1.6$	64	96	10–174
1F	1296	$271.7 \pm 3.8$	–	249	200–383
1N	2340	$285.4 \pm 2.9$	–	266	200–403
1B	1586	$305.4 \pm 4.0$	–	287	200–436
(2–4)F	65	$750.2 \pm 91.2$	–	620	500–1045
(2–4)N	281	$421.3 \pm 32.1$	–	627	500–1047
(2–4)B	504	$812.1 \pm 33.7$	–	675	500–1211
S	68 688	$60.4 \pm 0.3$	21	46	1–126
1	5222	$28.1 \pm 2.1$	–	266	200–410
2–4	850	$777.3 \pm 23.8$	–	654	500–1110

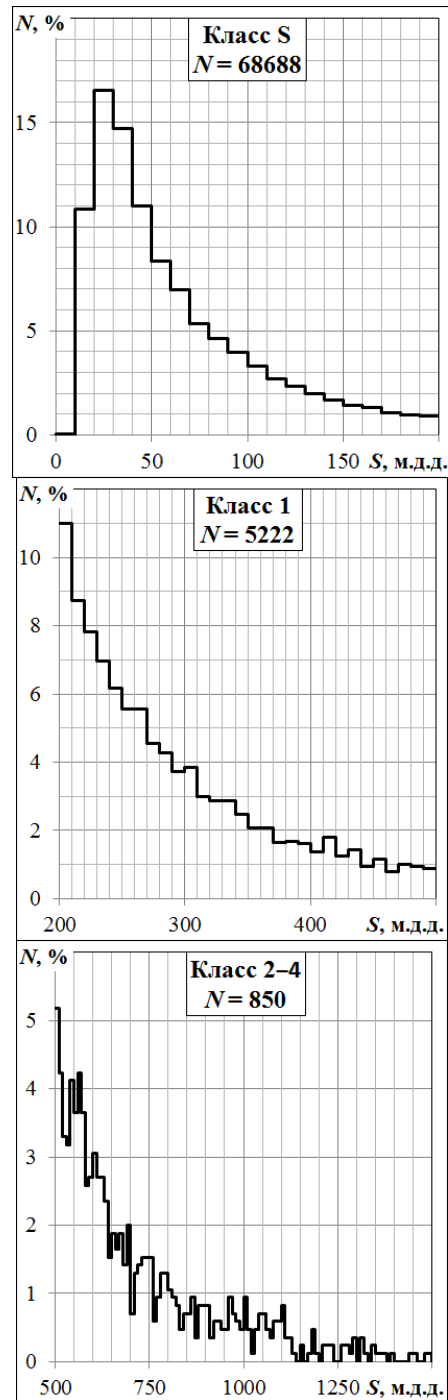


Рис. 8. Распределение солнечных вспышек по площади с учетом перспективного сокращения в пределах  $65^\circ$  от центрального меридиана

#### 4. Энергетика солнечных вспышек

Одним из фундаментальных вопросов физики солнечных вспышек является механизм накопления и высвобождения энергии. Согласно статистике [Боровик, Жданов, 2017a], на Солнце происходит более 90 % малых вспышек с энергией  $\approx 10^{29}$  эрг и примерно 1.5 % крупных вспышек, энергия самых мощных из которых составляет  $\approx 3 \cdot 10^{32}$  эрг. Большая часть энергии излучения вспышек заключена в ультрафиолетовой области и балмеровских линиях спектра [Woods et al., 2006]. В работах [Курочка, Стасюк, 1981; Курочка, Россада, 1981a, б] было показано, что полная энергия вспышек во всех линиях и

континуумах водородных серий тесным образом связана с излучением в линии H $\alpha$ . С учетом изменения во времени площади и интенсивности вспышек авторами было получено выражение для суммарной средней энергии, излучаемой оптическими вспышками разной мощности (табл. 7, столбец II).

$$E = 4.7 \cdot 10^{-22} \alpha(i) S(i) T(i) I^2(i),$$

где  $E$  — энергия вспышки, эрг;  $i$  — балл вспышки;  $I(i)$  — центральная интенсивность H $\alpha$ , эрг/(см<sup>3</sup>·с·ср);  $S(i)$  — типичная площадь вспышки, см<sup>2</sup>;  $T(i)$  — типичное время жизни вспышки, с;  $\alpha(i)$  — коэффициент, учитывающий распределение интенсивности во вспышке.

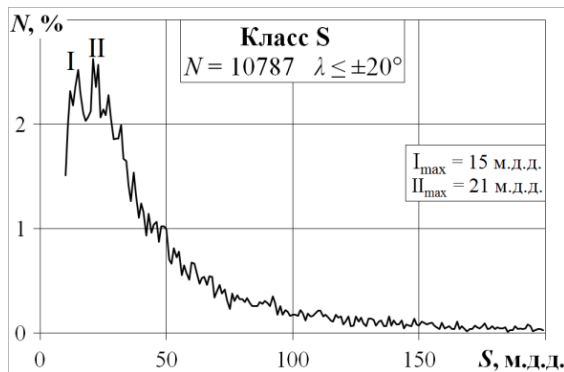


Рис. 9. Распределение малых вспышек по площади в пределах 20° от центрального меридиана по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY

Используя данные  $\alpha(i)$  и  $I(i)$  из работы [Курочка, Стасюк, 1981; Курочка, Россада, 1981a, б] и распределения вспышек по продолжительности [Боровик, Жданов, 2018a] и площади, нами были получены распределения солнечных вспышек по энергиям в видимой области спектра в зависимости от класса площади и балла (рис. 10). Результаты показали небольшие отличия в средних энергиях вспышек (табл. 7).

Таблица 7

Средние значения энергии вспышек в видимой области спектра

	N	$\bar{S} \cdot 10^{-18}$ , см <sup>2</sup>		$\bar{T} \cdot 10^{-3}$ , с		$\bar{E}$ , эрг	
		I	II	I	II	I	II
SF	49305	0.8	1.7	1.1	1.0	$2.2 \cdot 10^{27}$	$3.8 \cdot 10^{27}$
SN	15927	1.3	1.7	1.4	1.0	$8.7 \cdot 10^{27}$	$7.1 \cdot 10^{27}$
SB	3456	1.5	1.7	1.6	1.0	$2.9 \cdot 10^{28}$	$1.7 \cdot 10^{28}$
1F	1296	4.2	4.2	2.3	2.5	$4.2 \cdot 10^{28}$	$4.9 \cdot 10^{28}$
1N	2340	4.4	4.2	2.7	2.5	$1.2 \cdot 10^{29}$	$1.1 \cdot 10^{29}$
1B	1586	4.7	4.2	3.2	2.5	$5.0 \cdot 10^{29}$	$3.5 \cdot 10^{29}$
2F	59	9.9	11.9	3.3	5.2	$3.2 \cdot 10^{29}$	$6.2 \cdot 10^{29}$
2N	268	10.3	11.9	4.4	5.2	$1.5 \cdot 10^{30}$	$2.0 \cdot 10^{30}$
2B	453	10.8	11.9	5.0	5.2	$5.9 \cdot 10^{30}$	$6.2 \cdot 10^{30}$
3F	6	27.2	24.6	3.5	8.8	$2.8 \cdot 10^{30}$	$7.1 \cdot 10^{30}$
3N	11	22.7	24.6	9.1	8.8	$2.2 \cdot 10^{31}$	$2.2 \cdot 10^{31}$
3B	48	25.0	24.6	6.6	8.8	$4.4 \cdot 10^{31}$	$6.0 \cdot 10^{31}$
4F	0	—	42.5	—	13.0	—	$5.5 \cdot 10^{31}$
4N	2	37.9	42.5	2.7	13.0	$2.8 \cdot 10^{31}$	$1.5 \cdot 10^{32}$
4B	3	48.1	42.5	3.7	13.0	$1.3 \cdot 10^{32}$	$4.5 \cdot 10^{32}$

Пояснения к таблице: столбец I — результаты настоящей работы; столбец II — данные работы [Курочка, Стасюк, 1981; Курочка, Россада, 1981a, б].

Вместе с тем они показывают, что между оптическими вспышками разных классов площади существует существенное взаимное перекрытие по энергиям (рис. 10 а, б; табл. 8).

В интервал энергий крупных солнечных вспышек (классов 2–4) попадает до 9.5 % малых вспышек (класс S). Еще более значительное перекрытие со вспышками класса 1. Следует отметить, что вспышки со сверхпродолжительными временами жизни в данном случае не учитывались [Боровик, Жданов, 2018a].

## ВЫВОДЫ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

- На большом статистическом материале для малых солнечных вспышек установлена высокая корреляционная зависимость между временем подъема яркости к максимуму и общей продолжительностью вспышек.

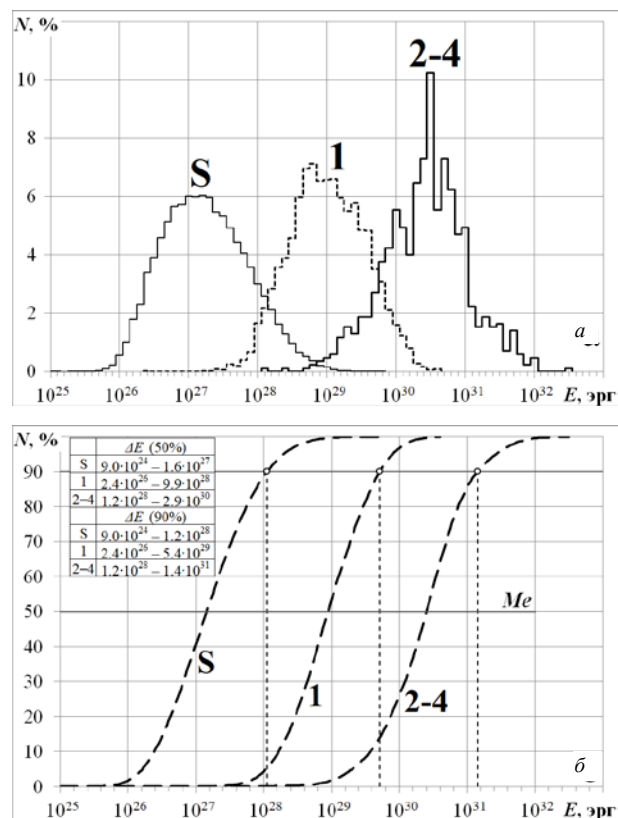


Рис. 10. Распределение солнечных вспышек по энергиям (а); графики накопленных частот (б)

Таблица 8

Статистические параметры распределений вспышек по энергиям.  $L$  — размах распределений

	N	$\bar{E} \pm \alpha$	Me	$\Delta E$ (90 %)	L
S	68688	$5.1 \cdot 10^{27} \pm 0.09$	$1.6 \cdot 10^{27}$	$9.0 \cdot 10^{24} - 1.2 \cdot 10^{28}$	$9.0 \cdot 10^{24} - 5.9 \cdot 10^{29}$
1	5222	$2.2 \cdot 10^{29} \pm 0.09$	$9.9 \cdot 10^{28}$	$2.4 \cdot 10^{26} - 15.4 \cdot 10^{29}$	$2.4 \cdot 10^{26} - 4.2 \cdot 10^{30}$
2-4	850	$7.0 \cdot 10^{30} \pm 1.10$	$2.9 \cdot 10^{30}$	$1.2 \cdot 10^{28} - 1.4 \cdot 10^{31}$	$1.2 \cdot 10^{28} - 3.3 \cdot 10^{32}$

• Получены новые данные по средним значениям относительного времени подъема яркости солнечных вспышек для различных классов площади, баллов и яркости. Показано, что с увеличением класса площади, балла и яркости вспышек средняя относительная продолжительность подъема яркости уменьшается.

• Установлено, что самые продолжительные относительные времена подъема яркости имеют малые вспышки с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области и внепятенные вспышки. Самые короткие — малые вспышки взрывного типа и двухленточные вспышки.

• Обнаружены свидетельства возможной дискретности  $T_{\text{отн}}$  для малых солнечных вспышек — последовательности максимумов на распределении  $T_{\text{отн}}$ . Наиболее значимые из них: 0.2, 0.25, 0.33 и 0.5. С ростом балла и класса площади вспышек максимумы слабеют, сглаживаются и полностью исчезают у крупных вспышек. Такие же максимумы присутствуют на распределениях D- и G-вспышек. На распределениях вспышек V-, H-, и E-типов они постепенно уменьшаются и исчезают для U- и K-вспышек.

• Получено распределение солнечных вспышек по энергиям в оптическом диапазоне длин волн, показывающее, что между вспышками разных классов площади существует значительное перекрытие по энергиям. В интервал энергий крупных солнечных вспышек (классов 2–4) попадает до 9.5 % малых вспышек (класс S). Еще более значительное перекрытие — со вспышками класса I.

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2019 г. по Программе фундаментальных исследований СО РАН II.16 № 1.6.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боровик А.В. Солнечные вспышки и супергрануляционная структура активных областей // Иссл. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1990. Вып. 91. С. 141–144.

Боровик А.В. Статистические параметры и элементы тонкой структуры малых солнечных вспышек // Иссл. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. 1994. Вып. 102. С. 161–177.

Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности. Распределения вспышек по площади, яркости и баллам // Солнечно-земная физика. 2017а. Т. 3, № 1. С. 34–45. DOI: [10.12737/22486](https://doi.org/10.12737/22486).

Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности. Продолжительность главной фазы // Солнечно-земная физика. 2017б. Т. 3, № 4. С. 5–16. DOI: [10.12737/szf-34201701](https://doi.org/10.12737/szf-34201701).

Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования продолжительности солнечных вспышек малой мощности // Солнечно-земная физика. 2018а. Т. 4, № 2. С. 35–46. DOI: [10.12737/szf-42201803](https://doi.org/10.12737/szf-42201803).

Боровик А.В., Жданов А.А. Распределение солнечных вспышек малой мощности по времени подъема яркости к максимуму // Солнечно-земная физика. 2018б. Т. 4, № 3. С. 5–16. DOI: [10.12737/szf-43201801](https://doi.org/10.12737/szf-43201801).

Курочка Л.Н., Стасюк Л.А. Энергия излучения оптических солнечных вспышек, I. // Солнечные данные. 1981. № 5. С. 83–91.

Курочка Л.Н., Россада В.М. Энергия излучения оптических вспышек, II // Солнечные данные. 1981а. № 6. С. 78–83.

Курочка Л.Н., Россада В.М. Энергия излучения оптических вспышек, III // Солнечные данные. 1981б. № 7. С. 95–104.

Огирь М.Б. Некоторые виды движений в хромосферных вспышках // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. 1970. Т. 16–17. С. 25–44.

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

Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф. Динамика лимбовых вспышек на Солнце и пинч-эффект // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. 1961. Т. 24. С. 235–257.

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

Fletcher L., Dennis B. R., Hudson H. S., et al. An observational overview of solar flares // Space Sci. Rev. 2011. V. 159. P. 19–106. DOI: [10.1007/s11214-010-9701-8](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8).

Masuda S., Kosugi T., Hara H., et al. Loop-top impulsive hard X-ray source of a solar flare as evidence for magnetic reconnection // Nature. 1994. V. 371. P. 495–497. DOI: [10.1038/371495a0](https://doi.org/10.1038/371495a0).

Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares // Astrophys. J. 1968. V. 153. P. L59–L64. DOI: [10.1086/180220](https://doi.org/10.1086/180220).

Priest E.R. Solar flare MHD processes // Pub. Astron. Inst. Acad. Sci. Czech Republic. 1992. V. 88. P. 95–120.

Raman S.K., Aleem S.M., Singh J., et al. H-alpha flare of 14 March, 1984 – evidence for reconnection? // Solar Phys. 1994. V. 149, N 1. P. 119–127. DOI: [10.1007/BF00645182](https://doi.org/10.1007/BF00645182).

Roumeliotis G., Moore R.L. A linear solution for magnetic reconnection by converging or diverging footpoint motions // Astrophys. J. 1993. V. 416, N 1. Pt. 1. P. 386–391. DOI: [10.1086/173243](https://doi.org/10.1086/173243).

Rust D.M., Gauzzi G. Variation of the vector magnetic field in an eruptive flare // World Space Congress: the 43<sup>rd</sup> Congress of the International Astronautical Federation (IAF) and the 29<sup>th</sup> Plenary Meeting of the Committee of Space Research (COSPAR). Washington. 1992. P. 486.

Solar Geophys. Data. 1983. Pt. 1, N 461. P. 30.

Somov B.V. Physical processes in solar flares. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publ. 1992. 249 p.

Švestka Z. Solar flares. Dordrecht: Reidel, 1976. 399 p.

Woods T.N., Kopp G., Chamberlin P.C. Contributions of the solar ultraviolet irradiance to the total solar irradiance during large flares // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, iss. A10. P. 1–10. DOI: [10.1029/2005JA011507](https://doi.org/10.1029/2005JA011507).

URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/so-lar-flares> (дата обращения 12 августа 2019 г.).

## REFERENCES

Borovik A.V. Solar flares and supergranulation structure of active regions. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on geomagnetism, Aeronomy and Solar Phys.]. 1990, iss. 91, pp. 141–144. (In Russian).

Borovik A.V. Statistical parameters and fine structure elements of small solar flares. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Res. on geomagnetism, Aeronomy and Solar Phys.]. 1994, iss. 102, pp. 161–177. (In Russian).

Borovik A.V., Zhdanov A.A. Statistical studies of low-power solar flares. Distribution of flares by area, brightness, and classes. *Solar-Terr. Phys.* 2017a, vol. 3, no. 1, pp. 40–56. DOI: [10.12737/article\\_58f96fda7e3e76.83058648](https://doi.org/10.12737/article_58f96fda7e3e76.83058648).

Borovik A.V., Zhdanov A.A. Statistical research into low-power solar flares. Main phase duration. *Solar-Terr. Phys.* 2017b, vol. 3, no. 4. P. 5–16. DOI: [10.12737/stp-34201701](https://doi.org/10.12737/stp-34201701).



- Borovik A.V., Zhdanov A.A. Statistical studies of duration of low-power solar flares. *Solar-Terr. Phys.* 2018a. vol. 4, no. 2, pp. 8–16. DOI: [10.12737/stp-42201803](https://doi.org/10.12737/stp-42201803).
- Borovik A.V., Zhdanov A.A. Distribution of low-power solar flares by brightness rise time. *Solar-Terr. Phys.* 2018b, vol. 4, no. 3, pp. 3–12. DOI: [10.12737/stp-43201801](https://doi.org/10.12737/stp-43201801).
- Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., Krucker S., Phillips K., Veronig A., et al. An observational overview of solar flares. *Space Sci. Rev.* 2011, vol. 159, pp. 19–106. DOI: [10.1007/s11214-010-9701-8](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8).
- Kurochka L.N., Stasjuk L.A. Radiation energy of optical solar flares, I. *Solnechnye dannye* [Solar Data]. 1981, no. 5, pp. 83–91. (In Russian).
- Kurochka L.N., Rossada V.M. Radiation energy of optical solar flares, II. *Solnechnye dannye* [Solar Data]. 1981, no. 6, pp. 78–83. (In Russian).
- Kurochka L.N., Rossada V.M. Radiation energy of optical solar flares, III. *Solnechnye dannye* [Solar Data]. 1981, no. 7, pp. 95–104. (In Russian).
- Masuda S., Kosugi T., Hara H., Tsuneta S., Ogawara Y. Loop-top impulsive hard X-ray source of a solar flare as evidence for magnetic reconnection. *Nature*. 1994, vol. 371, pp. 495–497. DOI: [10.1038/371495a0](https://doi.org/10.1038/371495a0).
- Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares. *The Astrophys. J.* 1968, vol. 153, pp. L59–L64. DOI: [10.1086/180220](https://doi.org/10.1086/180220).
- Ogir' M.B. Some types of movements in chromospheric flares. *Izvestija Krymskoi astrofizicheskoi observatorii* [Bull. of the Crimean Astrophysical Observatory]. 1970, vol. 16–17, pp. 25–44. (In Russian).
- Priest E. *Solnechnaya magnitogidrodinamika* [Solar Magnetohydrodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1985, 592 p. (In Russian).
- Priest E.R. Solar flare MHD processes. *Pub. Astron. Inst. Acad. Sci. Czech. Republic.* 1992, vol. 88, pp. 95–120.
- Raman S.K., Aleem S.M., Singh J., Selvendran R., Thiagarajan R. H-alpha flare of 14 March, 1984 – Evidence for reconnection? *Solar Phys.* 1994, vol. 149, no. 1, pp. 119–127. DOI: [10.1007/BF00645182](https://doi.org/10.1007/BF00645182).
- Roumeliotis G., Moore R.L. A linear solution for magnetic reconnection by converging or diverging footpoint motions. *The Astrophys. J.* 1993, vol. 416, no. 1, pt. 1, pp. 386–391. DOI: [10.1086/173243](https://doi.org/10.1086/173243).
- Rust D.M., Gauzzi G. Variation of the vector magnetic field in an eruptive flare // World Space Congress: the 43rd Congress of the International Astronautical Federation (IAF) and the 29th Plenary Meeting of the Committee of Space Research (COSPAR). Washington. 1992, p. 486.
- Severnyi A.B., Shaposhnikova E.F. Dynamics of limb flares on the Sun and pinch effect. *Izvestija Krymskoi astrofizicheskoi observatorii* [Bull. of the Crimean Astrophysical Observatory]. 1961, vol. 24, pp. 235–257. (In Russian).
- Smith H., Smith E. *Solnechnye vspyshki* [Solar Flares] Moscow, Mir Publ., 1966, 426 p. (In Russian). English edition: Smith H.J., Smith E. *Solar Flares*. Macmillan, 1963, 322 p.
- Solar Geophys. Data. 1983, pt. 1, no. 461, p. 30.
- Somov B.V. *Physical Processes in Solar Flares*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publ. 1992, 249 p.
- Švestka Z. *Solar flares*. Dordrecht: Reidel, 1976, 399 p.
- Woods T.N., Kopp G., Chamberlin P.C. Contributions of the solar ultraviolet irradiance to the total solar irradiance during large flares. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, iss. A10, pp. 1–10. DOI: [10.1029/2005JA011507](https://doi.org/10.1029/2005JA011507).  
URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares> (accessed 12 August, 2019).

Как цитировать эту статью

Боровик А.В., Жданов А.А. Процессы энерговыделения в солнечных вспышках малой мощности *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 3–11. DOI: [10.12737/szf-54201901](https://doi.org/10.12737/szf-54201901).