

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

### STATISTICAL STUDIES OF DURATION OF 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.** Работа является продолжением серии работ, посвященных исследованию временных параметров солнечных вспышек в линии  $H\alpha$ . По данным международного вспышечного патруля за период 1972–2010 гг. определены средние продолжительности вспышек различных баллов и классов площади. Установлено, что 94.6 % вспышек имеют продолжительность не более 60 мин. Для 90 % вспышек с  $\bar{t} > 60$  мин время жизни составляет 2.1–3.3 ч. В редких случаях вспышки могут существовать порядка 12 ч. Время жизни мощных солнечных вспышек не превышает 8.3 ч.

Установлено, что продолжительности солнечных вспышек зависят от особенностей их развития. Самые короткие времена жизни имеют вспышки с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области, самые продолжительные — двухленточные вспышки и вспышки, демонстрирующие несколько всплесков интенсивности. Подтверждено, что с увеличением класса площади и яркости вспышек их продолжительность увеличивается.

**Ключевые слова:** солнечная активность, солнечные вспышки.

**Abstract.** This paper is a sequel to papers dealing with time parameters of solar flares in the  $H\alpha$  line. Using data from the international flare patrol for 1972–2010, we have determined mean duration of flares of different importance and classes of area. We have established that 94.6 % of flares last more than 60 min. The duration of 90 % of flares with  $\bar{t} > 60$  min is 2.1–3.3 hrs. In rare cases, flares can last about 12 hrs. The duration of powerful solar flares does not exceed 8.3 hrs.

We have found that the duration of solar flares depends on features of their development. Flares with one brilliant point in the flare region have the shortest duration; two-ribbon flares and flares exhibiting several intensity maxima have the longest duration. We have confirmed that the duration of flares increases with increasing classes of area and brightness.

**Keywords:** solar activity, solar flares.

## ВВЕДЕНИЕ

Временные параметры солнечных вспышек были подробно изучены еще в годы становления международного вспышечного патруля. Первые результаты, полученные по относительно небольшим выборкам данных, показали, что солнечные вспышки могут продолжаться от нескольких минут до 12 ч и более [Смит, Смит, 1966].

К настоящему времени Международной службой Солнца накоплен достаточно большой статистический материал по солнечным вспышкам. Это дает возможность провести дополнительные исследования, уточнить временные параметры солнечных вспышек. В последние десятилетия к этой теме обращались в работах [Temmer et al., 2001; Giersch, 2013; Potzi et al., 2014], однако детального анализа сделано не было.

Известно, что продолжительность солнечных вспышек складывается из двух характерных временных интервалов: начальной (флэш-фазы) и главной (основной) фазы. Подробно главная фаза была

изучена в работе [Боровик, Жданов, 2017a]. Настоящая работа посвящена исследованию общей продолжительности солнечных вспышек. Особое внимание, как и в предыдущих работах, уделяется вспышкам малой мощности с площадью менее 2 кв. град.

## 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 нее вошли параметры 123 801 вспышки, из которых 110 778 относились к вспышкам малой мощности, 11 280 — к классу площади 1 и 1743 — к мощным вспышкам классов 2–4. В исходных каталогах программными методами исправлены ошибки, исключено дублирование одних и тех же событий. Учтены случаи, когда станции не сообщали класс яркости, класс площади, время начала, максимума, окончания вспышки и др.

Как известно, данные международного вспывшечного патруля страдают неоднородностью [Алтынцев и др., 1982]. Продолжительности вспывшек в групповых сообщениях по данным разных станций часто не совпадают. Чтобы оценить дисперсию в группах, были определены среднеквадратичные отклонения продолжительности вспывшек  $\sigma$ :

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

где  $n$  — количество сообщений разных станций о данной вспывшке. Среднеквадратичные отклонения затем усреднялись по соответствующим баллам и классам площади (табл. 1, рис. 1). Предварительно из групп были исключены обобщенные данные и данные, полученные визуально и при плохих условиях наблюдения, а также отмеченные классификаторами неопределенности моментов начала и окончания вспывшки D, E, U и \*. Число проанализированных групп  $N_{gr}$  указано во втором столбце табл. 1.

Полученные результаты показывают, что с ростом класса площади и балла вспывшек  $\bar{\sigma}$  постепенно увеличивается от 5.2 до 17.8 мин.

Чтобы снизить дисперсию, обычно привлекают большие выборки данных или используют наблюдения отдельной станции. В настоящей работе реализованы оба подхода.

Таблица 1

	$N_{gr}$	$\bar{\sigma}$
SF	8433	5.2
SN	2991	6.5
SB	699	6.7
1F	161	7.0
1N	469	9.8
1B	395	10.2
(2-4)F	13	10.7
(2-4)N	65	10.6
(2-4)B	161	17.8
S	16352	6.2
1	1697	10.5
2-4	359	16.4

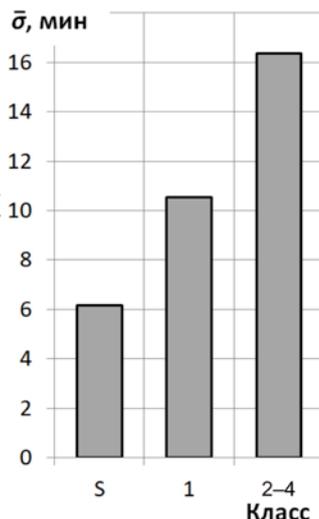


Рис. 1. Изменение  $\bar{\sigma}$  в зависимости от класса площади вспывшек

## ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ ВСЕХ СТАНЦИЙ

Как и в работе [Боровик, Жданов, 2017a], при оценке временных параметров солнечных вспывшек на базу данных были наложены те же ограничения, что и при оценке дисперсии в группах (см. предыдущий раздел). Поскольку для малых вспывшек на краю солнечного диска данные не столь надежны, как для вспывшек вблизи центра, из базы данных были исключены вспывшки классов площади S и 1 с долготой более 65°. Для крупных вспывшек такое ограничение не вводилось. В группах, после применения вышеуказанных ограничений использовались данные той станции, которая в базе данных имела больше всего сообщений.

В результате селекции общее число вспывшек составило 85 983. Распределение их по продолжительности (в процентах от общего числа вспывшек с шагом в одну минуту) приведено на рис. 2. Вертикальной штриховой линией отмечено положение медианы. В увеличенном масштабе показан хвост распределения (рис. 2, ось справа).

Полученное распределение довольно асимметричное и протяженное. Продолжительность некоторых вспывшек превышала 360 мин, поэтому размах распределения был ограничен 322 мин — временем, когда непрерывность распределения нарушалась. Неучтенные вспывшки (15) составили 0.02 %. В дальнейшем статистические параметры вспывшек оценивались только в границах этого временного интервала.

На рис. 3–5 приведены распределения вспывшек по продолжительности для отдельных классов площади и баллов. Крупные вспывшки, чтобы придать им больший статистический вес, были объединены в группу 2–4.

Все распределения характеризуются хорошо выраженной положительной асимметрией и одним ярко выраженным максимумом, за которым следует протяженный спад. В табл. 2 приведены количество вспывшек  $N$ , средняя продолжительность  $\bar{t}$  с доверительным интервалом  $\alpha$ , модальные  $Mo$  и медианные  $Me$  параметры распределений, временные интер-

Таблица 2

	$N$	$\bar{t} \pm \alpha$	$Mo$	$Me$	$\Delta t$
SF	55799	17.4±0.1	8	13	1–35
SN	18538	22.1±0.3	10	17	1–43
SB	3867	25.9±0.7	12	19	1–53
1F	1959	40.3±1.4	17	33	1–79
1N	2912	44.0±1.3	22	35	1–85
1B	1590	51.5±1.8	31	42	1–99
(2-4)F	172	57.1±6.7	26	45	1–113
(2-4)N	460	69.3±4.5	41	55	1–137
(2-4)B	671	85.5±4.5	49	69	1–170
S	78204	18.9±0.1	8	14	1–38
1	6461	44.7±0.8	20	36	1–87
2-4	1303	76.0±3.0	44	61	1–149
$\Sigma$	85968	21.7±0.2	8	15	1–45

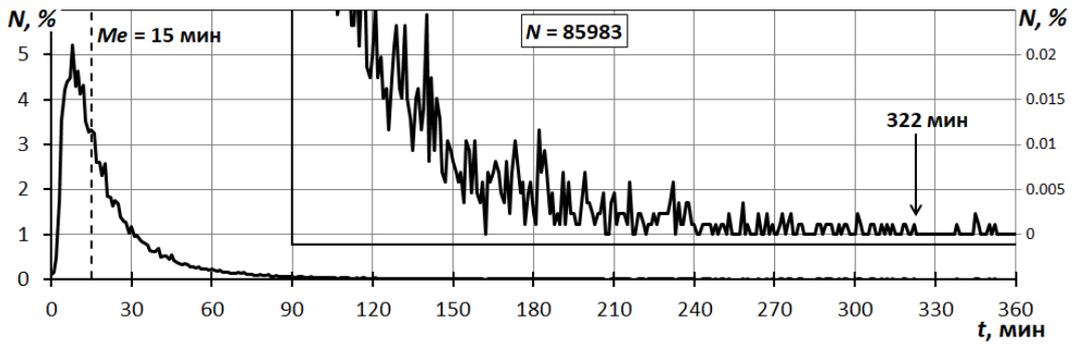


Рис. 2. Распределение солнечных вспышек по продолжительности

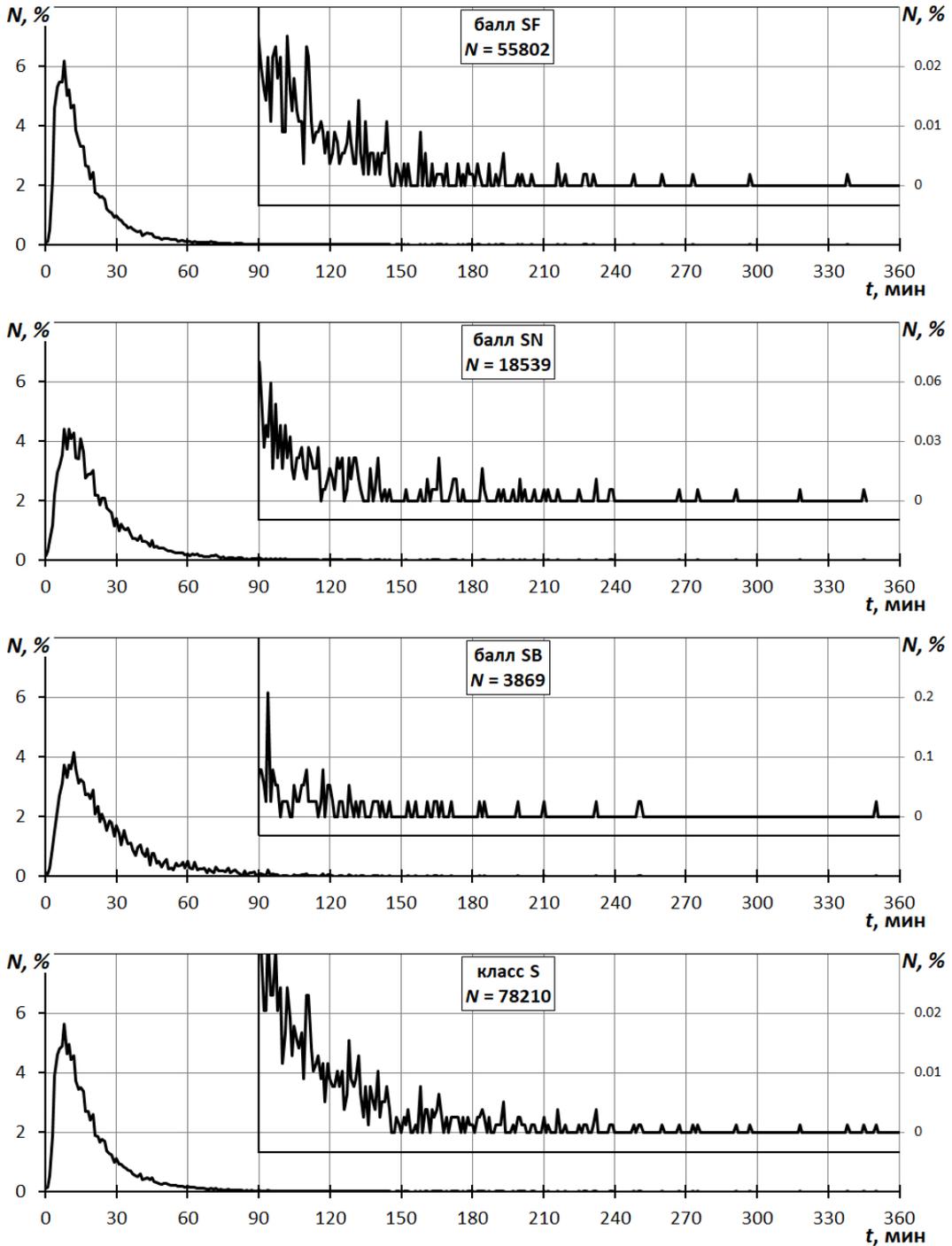


Рис. 3. Распределение вспышек класса площади S по продолжительности

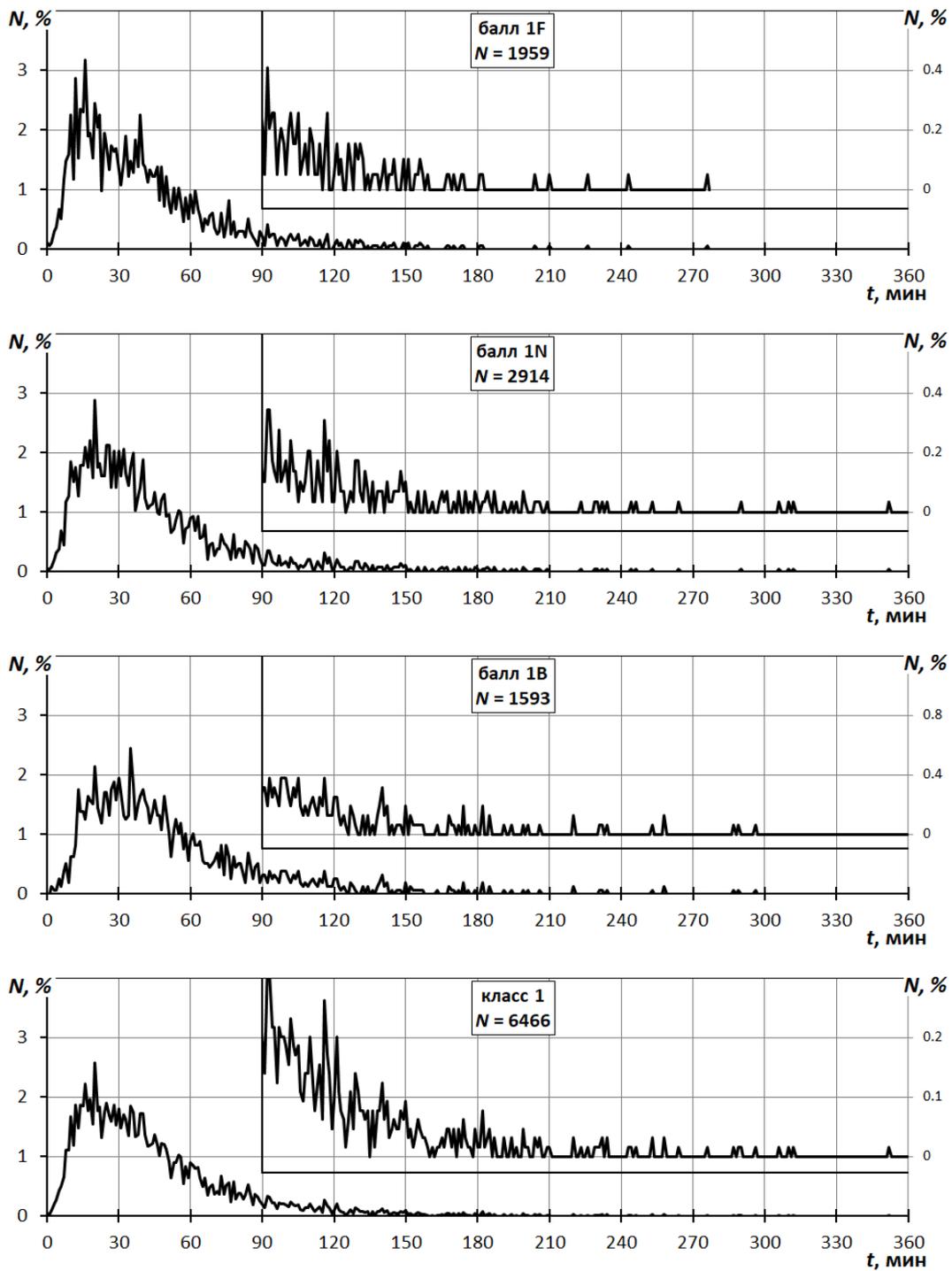


Рис. 4. Распределение вспышек класса площади 1 по продолжительности

валы  $\Delta t$  для 90 % вспышек. Доверительные интервалы определялись по формуле

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

где  $\bar{t}$  — средняя продолжительность вспышек,  $\Omega$  — коэффициент Стьюдента (1.96),  $P$  — доверительная вероятность (95 %),  $N$  — количество вспышек.

Поскольку с ростом класса площади в распределениях появляется многопиковая структура, связанная, очевидно, с уменьшением количества вспышек, модальные времена оценивались по сглаженным кривым распределений.

На рис. 6 показаны изменения статистических параметров распределений с ростом класса площади вспышек.

Из полученных результатов следует, что с ростом балла и класса площади вспышек их средняя продолжительность увеличивается с 17.4 до 85.5 мин, мода смещается с 8 до 49 мин, медиана — с 13 до 69 мин. Увеличиваются также временные интервалы для 90 % вспышек.

Статистические параметры вспышек по классам яркости приведены в табл. 3. Ограничение по долготе в данном случае не вводилось. В предпоследней колонке табл. 3 для сравнения приведены медианные времена, полученные в работе [Temmer et al., 2001].

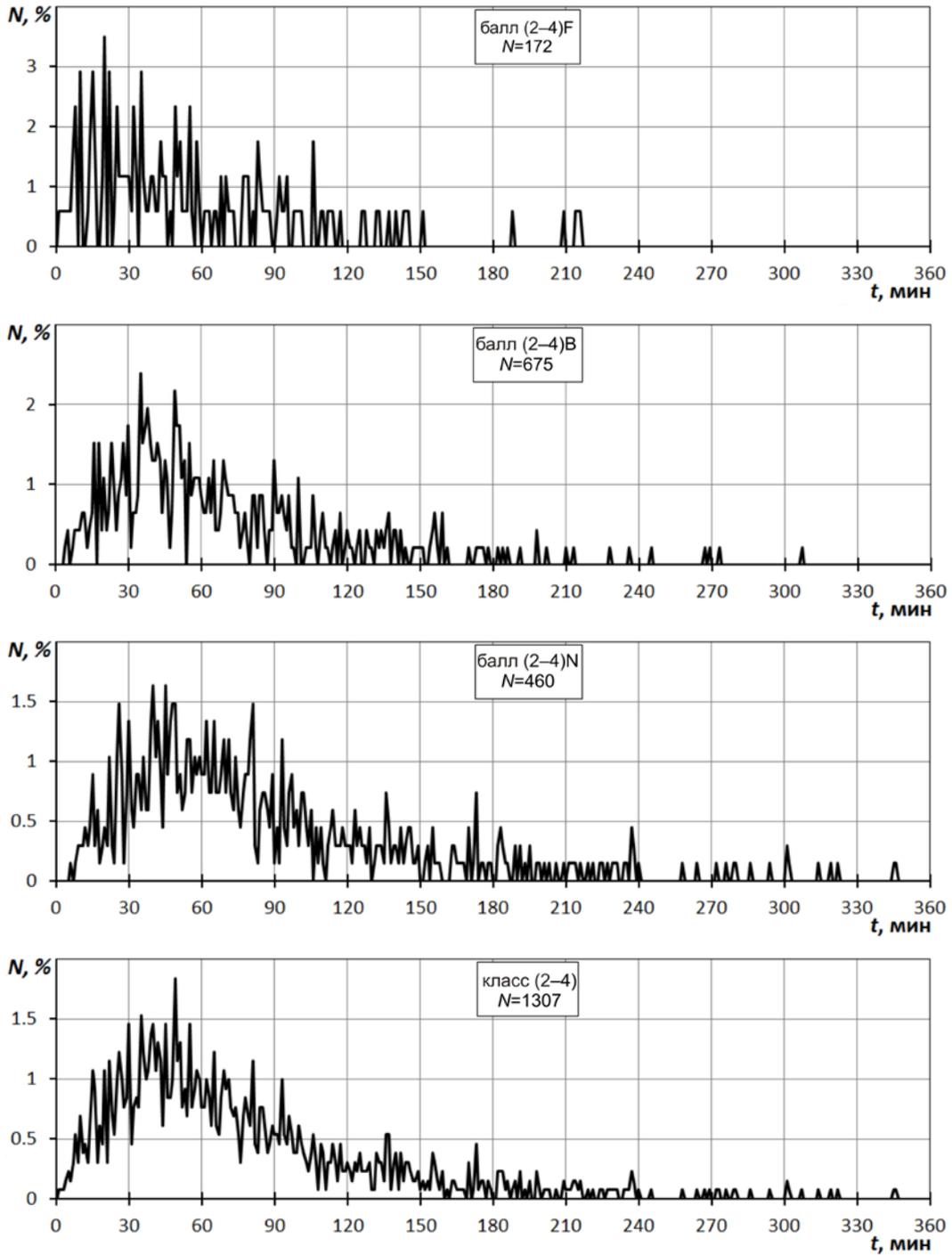


Рис. 5. Распределение вспышек классов площади 2-4 по продолжительности

Таблица 3

Яркость	N	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	Me <sup>T</sup>	$\Delta t$
F	70390	17.8±0.1	8	13	13	1-36
N	26697	25.3±0.3	10	18	19	1-51
B	7210	37.3±0.9	12	26	24	1-79
$\Sigma$	104297	21.1±0.1	8	15	15	1-43

Хорошо прослеживается рост продолжительности вспышек с увеличением класса яркости (табл. 2, 3). Подтверждается один из выводов работы [Боровик, Жданов, 20176]: с ростом оптического балла увеличивается число вспышек с более высоким классом яркости (табл. 2).

### ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИЙ HOLL, LEAR, RAMU

Чтобы убедиться в достоверности полученных результатов, аналогичный анализ был выполнен по данным обсерваторий HOLL (Holloman Solar Observatory, США), LEAR (Learmonth Solar Observatory, Австралия) и RAMU (Ramey Solar Observatory, Пуэрто-Рико). Количество вспышек указано в табл. 4, параметры распределений приведены на рис. 7, 8.

По данным трех обсерваторий средние продолжительности вспышек малой мощности различаются

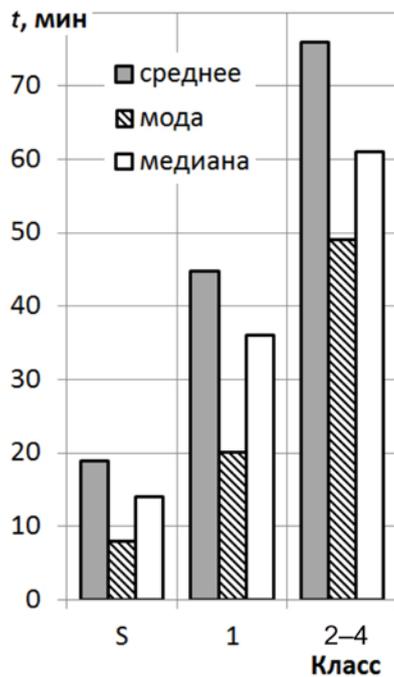


Рис. 6. Изменение статистических параметров распределений с ростом класса площади вспышек

Таблица 4

	все станции	HOLL	LEAR	RAMY
SF	55799	14232	11838	8353
SN	18538	2570	1643	1976
SB	3867	974	343	841
1F	1959	326	455	175
1N	2912	421	447	199
1B	1590	369	251	200
(2-4)F	172	28	35	9
(2-4)N	460	60	78	29
(2-4)B	671	164	155	84
S	78204	17776	13824	11170
1	6461	1116	1153	574
2-4	1303	252	268	122
Σ	85968	19144	15245	11866

незначительно (рис. 7, 8, а). Для вспышек более высоких классов площади они находятся в пределах интервала рассеяния  $\bar{\sigma}$ . Тенденция роста средней продолжительности с увеличением класса площади вспышек выражена достаточно четко.

Более значительные различия наблюдаются для баллов вспышек (рис. 8, б). Причина, вероятнее всего, заключается в недостаточном статистическом весе данных (особенно для крупных вспышек). Тем не менее рост продолжительности вспышек с увеличением их балла достаточно хорошо прослеживается.

Суммируя результаты, можно сделать следующие выводы:

- на большом статистическом материале получены достоверные значения средней продолжительности солнечных вспышек различных классов площади и баллов;
- подтверждено, что с увеличением класса площади и яркости вспышек их средняя продолжитель-

ность возрастает [Смит, Смит, 1966; Temmer и др., 2001]. Аналогичная тенденция проявляется с увеличением балла вспышек.

## ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ОТДЕЛЬНЫХ ТИПОВ ВСПЫШЕК

Как можно заметить, распределения вспышек по продолжительности в зависимости от класса площади довольно сильно перекрываются (рис. 9). В пределы временного интервала  $\Delta t=1-38$  мин, в котором заключена продолжительность 90 % вспышек малой мощности, попадает 53.8 % вспышек класса площади 1 и 25.5 % крупных вспышек (рис. 10).

Рисунок 11 свидетельствует, что прямая функциональная зависимость между продолжительностью и площадью вспышек отсутствует. Коэффициент корреляции не превышает 0.3.

Чтобы выяснить, чем может быть обусловлен такой широкий спектр значений времени жизни солнечных вспышек, был проведен аналогичный статистический анализ для отдельных типов вспышек.

Международной службой Солнца определено 26 отличительных особенностей развития вспышек. В общих чертах они характеризуют тип вспышки, сопутствующие и сопровождающие ее события, область возникновения, размер активной области и др. Ниже приводятся наиболее важные, на наш взгляд, особенности развития вспышек:

- 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.

К сожалению, не все станции отмечают особенности развития вспышек, поэтому удалось проанализировать только семь типов вспышек, статистический вес которых был достаточно большим. К данным применялись те же ограничения, что и для всех вспышек. Полученные для этих типов вспышек статистические параметры приведены в табл. 5 и на рис. 12. Для сравнения в последней строке табл. 5 приведены параметры для всех вспышек. Поскольку доверительные интервалы для крупных вспышек довольно широкие, часть выводов будет основываться на данных по вспышкам классов S и 1.

Из полученных результатов следует, что рассмотренные типы вспышек по продолжительности существенно отличаются друг от друга.

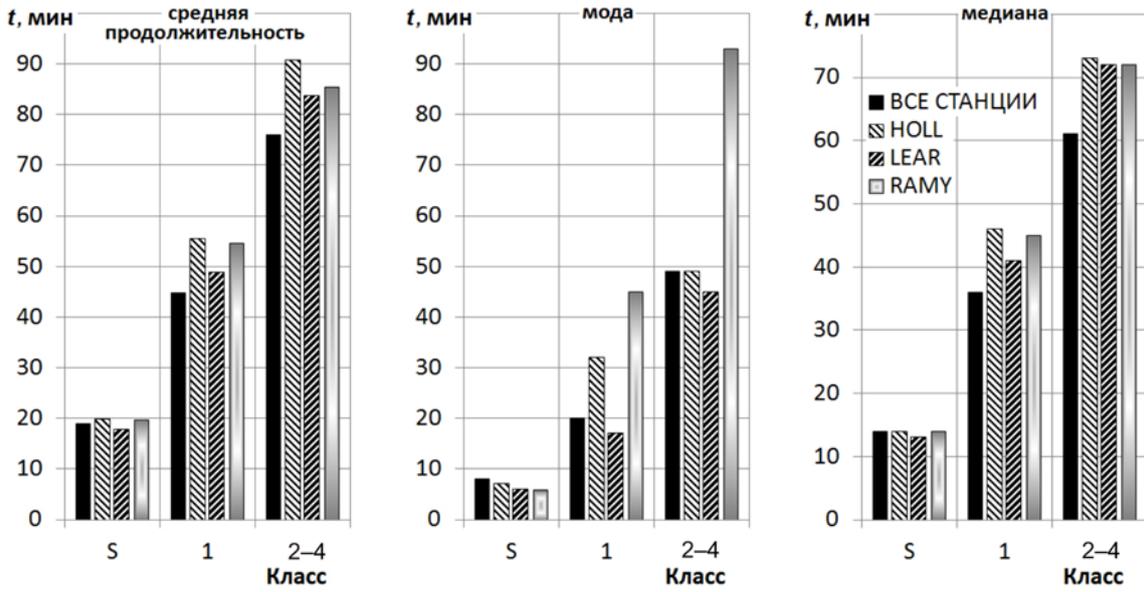


Рис. 7. Изменение статистических параметров распределений с ростом класса площади вспышек по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY

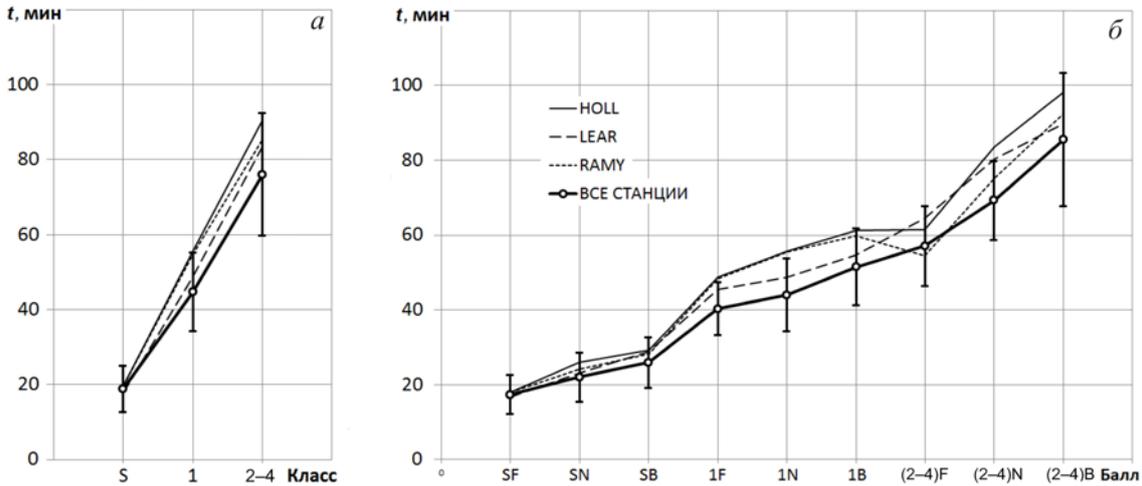


Рис. 8. Изменение средней продолжительности вспышек с ростом класса площади (а) и балла (б) по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY. Вертикальными линиями показаны интервалы рассеяния  $\bar{\sigma}$  (табл. 1)

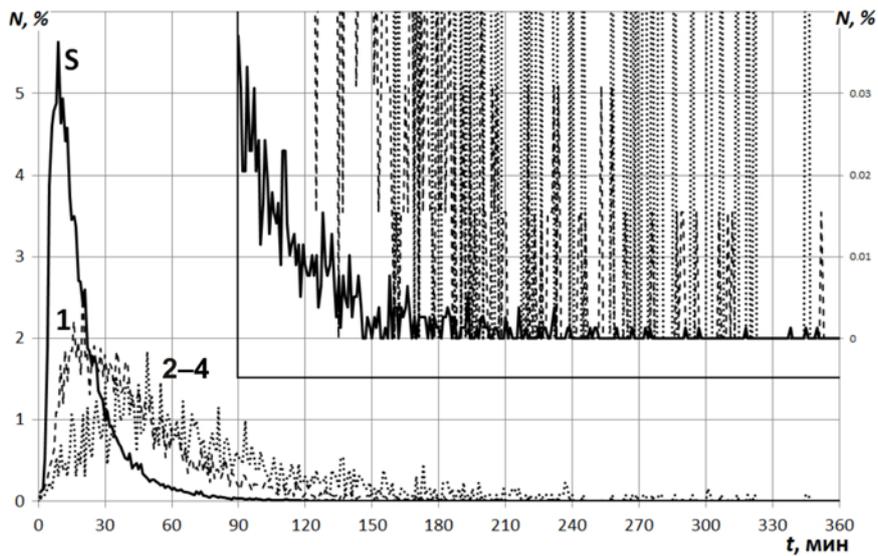


Рис. 9. Распределение вспышек классов площади S, 1 и 2-4 по продолжительности: сплошная линия — вспышки класса площади S; штриховая — вспышки класса 1; пунктирная — вспышки класса 2-4

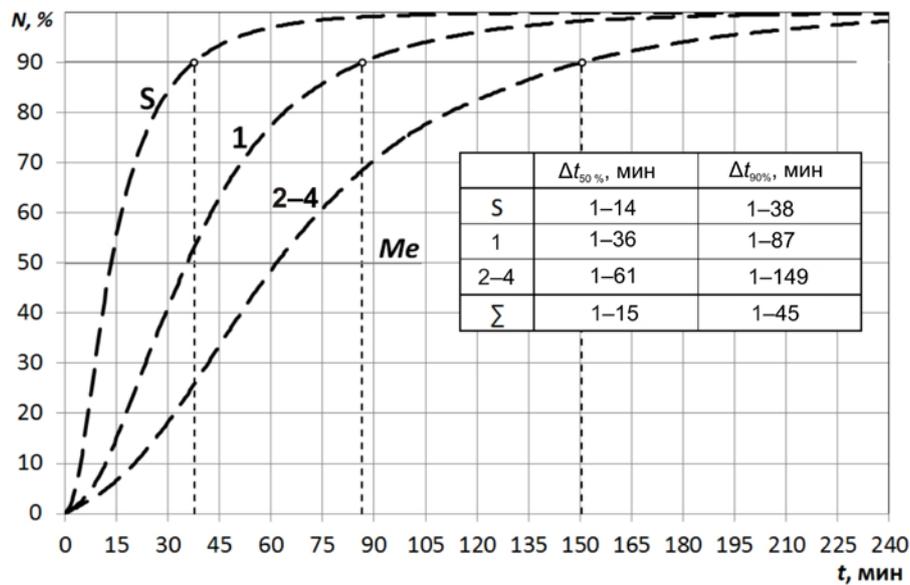


Рис. 10. Кривые накопленных частот. В таблице указаны временные интервалы для 50 и 90 % вспышек

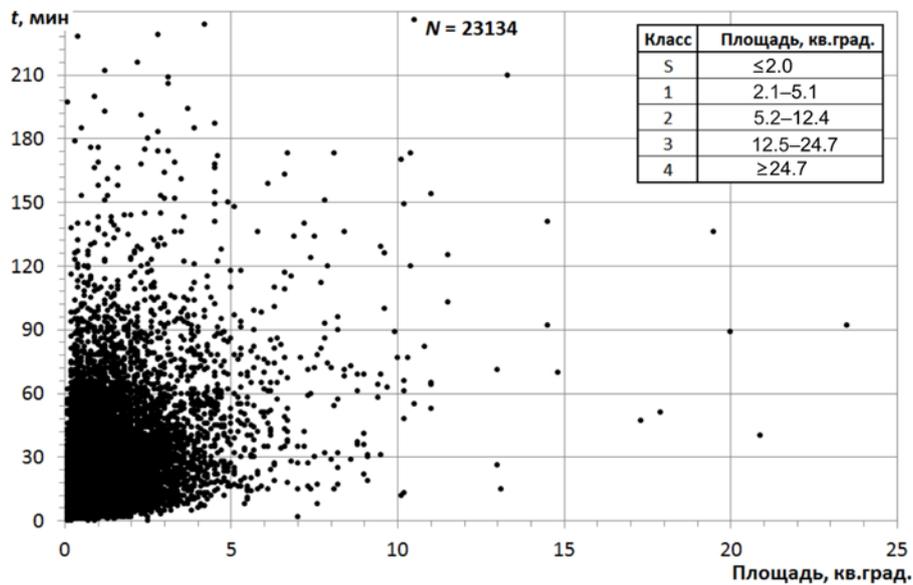


Рис. 11. Зависимость между продолжительностью и площадью вспышек. В таблице приведена классификация солнечных вспышек в линии Na

Таблица 5

тип	класс S					класс 1					классы 2-4				
	N	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	$\Delta t$	N	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	$\Delta t$	N	$\bar{t} \pm \alpha$	Mo	Me	$\Delta t$
D	3445	15.2±0.4	7	11	1-30	227	27.7±3.4	10	18	1-58	31	65.1±17.5	41	51	1-114
E	7009	22.5±0.5	10	17	1-45	1527	40.9±1.5	20	32	1-80	234	68.6±6.3	40	54	1-137
V	2943	19.1±0.5	10	15	1-36	286	44.7±4.2	25	34	1-91	53	83.2±15.5	50	65	1-173
K	1034	46.0±2.1	24	38	1-85	309	72.8±5.6	33	58	1-144	98	97.2±10.9	70	78	1-173
H	2370	19.3±0.7	8	14	1-40	436	38.8±2.6	19	32	1-74	128	65.0±7.2	52	56	1-119
U	574	32.7±2.0	8	26	1-64	440	63.7±3.9	31	55	1-118	229	109.1±8.0	87	93	1-199
G	498	21.7±1.5	12	17	1-42	73	37.3±8.1	10	27	1-80	6	71.8±29.1	79	77	1-128
	78204	18.9±0.1	8	14	1-38	6461	44.7±0.8	20	36	1-87	1303	76.0±0.3	49	61	1-149

Из всех типов вспышек самое короткое время жизни имеют вспышки, внутри которых присутствует один центр повышенной яркости (D): для классов S и 1  $\bar{t} = 15$  и 28 мин, что примерно в 1.5 раза меньше, чем для вспышек с двумя и более центрами (E). Как было установлено в работе [Borovik, Muachin, 2010], такие центры угасают медленно и живут фактически до конца вспышки. Это дает основания предположить, что энергия, поступающая из коро-

нального источника вдоль магнитных трубок в хромосферу, локализована на тех участках вспышечной области, где яркость наиболее высокая. Как было обнаружено ранее [Švestka et al., 1982] и подтверждено другими авторами [Fletcher et al., 2011], с самыми яркими участками вспышек связаны основания рентгеновских петель. Естественно предположить, что чем больше каналов связывает корональный источник (или источники) с хромосферной

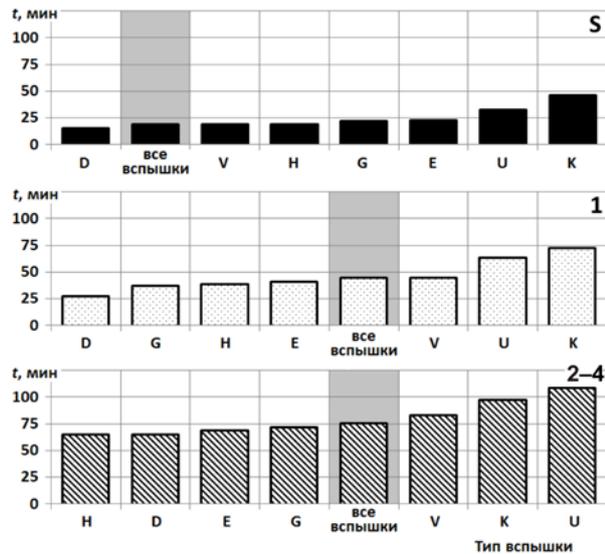


Рис. 12. Средняя продолжительность отдельных типов вспышек в зависимости от класса площади. Гистограммы построены в порядке возрастания  $\bar{t}$

вспышкой, тем дольше будет продолжительность ее жизни.

Самыми продолжительными из рассмотренных являются вспышки, световые кривые которых показывают несколько максимумов интенсивности (К). Их время жизни ( $\bar{t} = 46$  и 73 мин) в 2.4–1.6 раза больше, чем у вспышек взрывного (V) типа ( $\bar{t} = 19$  и 45 мин), и в 3.0–2.6 раза больше, чем у D-вспышек. Прерывистый рост яркости вспышки и многократные всплески интенсивности, очевидно, связаны с динамикой области выделения энергии. Выделение энергии, вероятно, происходит постепенно в различных вспышечных арках, и каждому вспышечному всплеску соответствует выделение энергии в отдельной магнитной трубке [Боровик и др., 2014].

Иногда для вспышек определенного типа характерны несколько особенностей. Вспышки взрывного типа чаще всего возникают в местах исчезновения волокон (S). Среди них практически не встречается вспышек с несколькими максимумами интенсивности (К). В большом числе случаев внутри вспышечной области присутствует только один центр повышенной яркости (D). Это дает основания полагать, что физическая природа таких вспышек отличается от природы, например, двухленточных вспышек (U). Вероятнее всего, вспышки взрывного типа имеют отношение к так называемым вспышкам Хайдера, которые, согласно гравитационной модели [Hyder, 1967], возникают в результате падения (возвращения) вещества эруптивного протуберанца из короны в хромосферу.

Двухленточные вспышки по продолжительности занимают предпоследнее место во временном ряду на рис. 12 (перед К-вспышками). Их средняя продолжительность для классов S и 1 составляет 33 и 64 мин, что значительно выше среднестатистических значений для всех вспышек. Как правило, внутри двухленточных вспышек присутствуют несколько центров повышенной яркости (E). Высокий процент вспышек пока-

зывает многократные всплески интенсивности (К). Механизм развития двухленточных вспышек представлен моделью CSHKP [Carmichael, 1964; Sturrock, 1966; Hirayama, 1974; Копп, Pneuman, 1976].

Обращает на себя внимание тот факт, что с ростом класса площади некоторые типы вспышек меняют свое относительное положение на временной шкале (рис. 12). Так, например, вспышки взрывного типа (V) перемещаются в разряд с большей продолжительностью. Вспышки с двумя и более центрами повышенной яркости (E), наоборот, уходят в разряд с более коротким временем жизни.

Можно заключить, что пространственные и временные особенности развития во многом определяют продолжительность вспышек и объясняют в какой-то мере широкий спектр значений времени жизни солнечных вспышек. Можно также предположить, что, поскольку с фазой солнечного цикла число вспышек разных типов и классов площади меняется, будут меняться и суммарные среднестатистические продолжительности солнечных вспышек: уменьшаться к минимуму и возрастать к максимуму солнечной активности.

## СВЕРХПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Из всех рассмотренных вспышек 94.6 % имели продолжительность менее одного часа, 5.4 % (6675 вспышек) существовали значительно дольше. Статистические параметры сверхпродолжительных солнечных вспышек, включая размах продолжительностей вспышек  $L$ , приведены в табл. 6. Для 90 % вспышек с  $t > 60$  мин продолжительность составляла 2.1–3.3 ч.

Сверхпродолжительные времена жизни встречаются у вспышек практически всех классов, но чаще у вспышек малой мощности. Для вспышек класса площади S и 1 максимальные продолжительности составляли 9.2 и 11.7 ч, для крупных вспышек — 8.3 ч. В очень редких случаях вспышки существуют порядка 12 ч.

В заключение в табл. 7 приводятся средние продолжительности вспышек по классам площади, полученные в разное время разными авторами. Таблица сформирована по данным работ [Смит, Смит, 1966; Temmer et al., 2001], скорректирована и дополнена. В верхней части таблицы указаны классы площади вспышек, введенные в 1956 г. (первая международная классификация солнечных вспышек в линии H $\alpha$ ).

В табл. 8 приведены модальные и медианные времена распределений.

Как можно заметить, полученные в настоящей работе временные параметры солнечных вспышек в большинстве случаев отличаются от результатов других авторов. Одной из причин, вероятнее всего, является недостаточный объем данных, использованных авторами для статистического анализа. Это подтверждает, в частности, и тот факт, что полученные в работе значения средней продолжительности вспышек малой мощности полностью совпадают с результатами работы [Temmer et al., 2001].

Таблица 6

	<i>N</i>	<i>N</i> , %	$\bar{t} \pm \alpha$	Me	$\Delta t$	<i>L</i>
S	3649	54.7	86.3±1.1	75	60–124	60–549
1	2167	32.5	95.8±1.9	82	60–142	60–700
2–4	859	12.9	118.8±4.2	97	60–198	60–499
$\Sigma$	6675	100	93.6±1.1	79	60–140	60–700

Таблица 7

Авторы	Период	Кол-во вспышек	Средняя продолжительность						$\Sigma$
			1–S	1	2	3	3+	2, 3, 3+ 2–4	
Newton & Barton (1937) <sup>1</sup>	1935–1936	–	–	–	–	–	–	–	20.0–40.0
Waldmeier (1938)	1935–1937	357	–	21.0	38.0	61.0	–	–	27.0
Giovanelli (1948)	1937–1938	24	–	–	–	–	–	–	30.0
Waldmeier (1948)	1935–1944	927	–	20.3	33.4	62.4	–	–	24.8
Ellison (1949)	1935–1947	109	–	17.0	29.0	62.0	≈180.0	–	–
Warwick (1954)	1951–1953	357	31.0	60.0				–	40.0
Dodson et al. (1956) <sup>2</sup>	1949–1952	194	28.0	43.0	66.0	84.0		–	–
Waldmeier & Bachmann (1959)	1945–1954	1604	–	22.1	44.8	84.9	–	–	28.1
Г. Смит и Э. Смит (1966) <sup>3</sup>	1957–1958	–	16.8	32.2	68.8	146.0	–	–	39.4
Reid (1968)	1958–1965	2907	16.5	28.2	–	–	–	60.5	–
Ružičková-Topolová (1974) <sup>4</sup>	1957–1965	661	–	–	71.3	129.9	305.5	–	–
Wilson (1983)	1980	1348	–	–	–	–	–	–	29.8
Antalova (1985)	1970–1974	460	27.0	55.0	78.0	–	–	–	–
	1975–1979	561	30.0	51.0	78.0	201.0	–	–	–
Wilson (1987)	1975	850	16.6	38.7	62.7	–	–	–	18.1
Barlas & Altas (1992) <sup>5</sup>	1947–1990	3569	24.0	38.0	–	–	–	78.0	–
Настоящая работа <sup>5</sup>	1972–2010	577	21.7	37.3	–	–	–	71.8	24.2
Temmer et al. (2001)	1975–1999	75739	18.9	35.7	66.3	116.0	–	–	20.6
Настоящая работа	1972–2010	85968	18.9	44.7	72.8	106.9	85.6	76.0	21.7

<sup>1</sup>Меньшее число относится к менее интенсивным вспышкам, большее — к более интенсивным.

<sup>2</sup>Продолжительность рассчитана по фотометрическим кривым вспышек.

<sup>3</sup>Данные получены по результатам Международного геофизического года (МГГ).

<sup>4</sup>Рассмотрены только крупные солнечные вспышки.

<sup>5</sup>Рассмотрены только внепятенные солнечные вспышки.

Таблица 8

Авторы	Период	Мода						Медиана					
		1–S	1	2	3	2, 3, 3+ 2–4	$\Sigma$	1–S	1	2	3	2, 3, 3+ 2–4	$\Sigma$
Г. Смит и Э. Смит (1966)	1935–1944	–	7.5	22.5	57.5	–	7.5	–	13.0	22.5	70.0	–	15.0
	1945–1954	–	7.5	22.5	50.0	–	7.5	–	16.0	33.0	40.0	–	23.5
	1957–1958	10	12.5	62.5	62.5	–	25.0	13	23.5	55.0	130.0	–	25.0
Temmer et al. (2001)	1975–1999	–	–	–	–	–	8	14	28	–	–	57	15
Настоящая работа	1972–2010	8	20	49	71	49	8	14	36	59	86	61	15

## ВЫВОДЫ

1. На большом статистическом материале впервые получены наиболее полные и достоверные данные по средней продолжительности солнечных вспышек различных баллов и классов площади. Подтверждена тенденция роста средней продолжительности вспышек с увеличением их класса площади и яркости [Смит, Смит, 1966; Temmer et al., 2001]. Аналогичная тенденция установлена для баллов вспышек.

2. Показано, что, несмотря на хорошо выраженную тенденцию, распределения вспышек по продолжительности существенно перекрываются, прямая функциональная зависимость между продолжительностью и площадью вспышек отсутствует.

3. Обнаружено, что продолжительность вспышек зависит от особенностей их развития. Впервые получены значения средней продолжительности для семи типов вспышек. Установлено, что среди рассмотренных типов вспышек наименьшую среднюю продолжительность имеют вспышки с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной

области, наибольшую — вспышки с несколькими максимумами интенсивности и двухленточные вспышки. Вспышкам всех типов присуща тенденция роста продолжительности с увеличением класса площади.

4. Установлено, что 94.6 % солнечных вспышек имеют продолжительность не более 1 ч, 90 % сверхпродолжительных вспышек ( $t > 60$  мин) существуют в пределах 2.1–3.3 ч. В очень редких случаях вспышки могут существовать 12 ч. Для крупных солнечных вспышек максимальная продолжительность составляет не более 8.3 ч, 54.7 % сверхпродолжительных вспышек — вспышки малой мощности.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Ку克林 Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. М.: Наука, 1982. 246 с.

Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности. Продол-

жительность главной фазы // Солнечно-земная физика. 2017а. 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 солнечных вспышек малой мощности. Распределения вспышек по площади, яркости и баллам // Солнечно-земная физика. 2017б. Т. 3, № 1. С. 34–45. DOI: [10.12737/22486](https://doi.org/10.12737/22486).

Боровик А.В., Мячин Д.Ю., Томозов В.М. Наблюдения внепятенных солнечных вспышек в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и их интерпретация // Известия ИГУ. Сер. «Науки о Земле». 2014. Т. 7, № 1. С. 23–45.

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

Antalova A. Comprehensive solar flare indices and duration of H-alpha flares // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. 1985. V. 13. P. 243–246.

Barlas O., Altas L. The duration of spotless flares // Astrophys. Space Sci. 1992. V. 197, N 2. P. 337–341. DOI: [10.1007/BF00645745](https://doi.org/10.1007/BF00645745).

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. DOI: [10.1134/S0016793210080037](https://doi.org/10.1134/S0016793210080037).

Carmichael H. A process for flares // Proc. AAS-NASA Symp. on the Physics of Solar Flares (NASA-SP 50). 1964. P. 451–456.

Dodson H.W., Hedeman E.R., McMath R.R. Photometry of solar flares // Astrophys. J. Suppl. 1956. V. 2. P. 241–270.

Ellison M.A. Characteristic properties of chromospheric flares // Monthly Not. Royal Astron. Soc. 1949. V. 109. P. 3–27.

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).

Giersch O. GONG Inter-site H $\alpha$  flare comparison // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 440. 0120062013. DOI: [10.1088/1742-6596/440/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/440/1/012006).

Giovanelli R.G. Chromospheric flares // Monthly Not. Royal Astron. Soc. 1948. V. 108. P. 163–176.

Hirayama T. Theoretical model of flares and prominences. I: Evaporating flare model // Solar Phys. 1974. V. 34, N 2. P. 323–338.

Hyder C.L. A phenomenological model for disparities brusques followed by flare-like chromospheric brightenings // Solar Phys. 1967. V. 2, N 3. P. 267–284.

Kopp R.A., Pneuman G.W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // Solar Phys. 1976. V. 50. P. 85–98.

Newton H.W., Barton H.J. Bright solar eruptions and radio fadings during the years 1935–1936 // Monthly Not. Royal Astron. Soc. 1937. V. 97, N 8. P. 594–611.

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

Quarterly Bulletin on Solar Activity. 1972–1973.

Reid J.H. Cape lyot H $\alpha$ -heliograph results // Solar Phys. 1968. V. 5, N 2. P. 207–235.

Ružičková-Topolová B. Some characteristics of great solar flares in the period 1957–1965 // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1974. V. 25. P. 345–352.

Solar Geophysical Data. 1975–2010.

Sturrock P.A. Model of the high-energy phase of solar flares // Nature. 1966. V. 211. P. 695–697.

Švestka Z., Dodson-Prince H.W., Martin S.F., et al. Study of the post-flare loops on 29 July 1973 // Solar Phys. 1982. V. 78, N 2. P. 271–285. DOI: [10.1007/BF00151609](https://doi.org/10.1007/BF00151609).

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

Waldmeier M. Chromosphärische eruptionen. I. Mit 6 Abbildungen // Zeitschrift für Astrophysik. 1938. V. 16. P. 276–290.

Waldmeier M. // Astron. Mitt. Zürich. 1948. N 153.

Waldmeier M., Bachmann H. Statistik der sonneneruptionen 1945–1954 // Zeitschrift für Astrophysik. 1959. V. 47. P. 81–93.

Warwick C.S. Some characteristics of solar flares // Astrophys. J. 1954. V. 120. P. 237–244.

Wilson R.M. Statistical aspects of the 1980 solar flares. Part III: Parametric comparison and final comments // NASA Techn. Memorandum. 82526. Marshall Space Flight Center, Alabama, 1983. 27 p.

Wilson R.M. Statistical Aspects of Solar Flares .1987. 40 p. (NASA Techn. Paper 2714).

## 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).

Antalova A. Comprehensive solar flare indices and duration of H-alpha flares. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. 1985, vol. 13, pp. 243–246.

Barlas O., Altas L. The duration of spotless flares. *Astrophys. Space Sci.* 1992, vol. 197, no. 2, pp. 337–341. DOI: [10.1007/BF00645745](https://doi.org/10.1007/BF00645745).

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. DOI: [10.1134/S0016793210080037](https://doi.org/10.1134/S0016793210080037).

Borovik A.V., Zhdanov A.A. Statistical studies of low-power solar flares. Main phase duration. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017a, vol. 3, no. 4, pp. 5–16. DOI: [10.12737/stp-34201701](https://doi.org/10.12737/stp-34201701).

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

Borovik A.V., Myachin D.Yu., Tomozov V.M. Observation of spotless solar flares at Baikal Astrophysical Observatory of ISTP SB RAS and their interpretation. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta* Ser. “Nauki o Zemle” [The Bulletin of Irkutsk State University. Ser. Earth Sciences]. 2014, vol. 7, no. 1, pp. 23–45. (In Russian).

Carmichael H. A process for flares. *Proc. AAS-NASA Symp. on the Physics of Solar Flares (NASA-SP 50)*. 1964, pp. 451–456.

Dodson H.W., Hedeman E.R., McMath R.R. Photometry of solar flares. *Astrophys. J. Suppl.* 1956, vol. 2, pp. 241–270.

Ellison M.A. Characteristic properties of chromospheric flares. *Monthly Not. Royal Astron. Soc.* 1949, vol. 109, pp. 3–27.

Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., Krucker S., Phillips K., Veronig A., Battaglia M., Bone L., Caspi A., Chen Q., Gallagher P., Grigis P.T., Ji H., Liu W., Milligan R.O., Temmer M. 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).

Giersch O. GONG Inter-site H $\alpha$  flare comparison. *J. Phys. Conf. Ser.* 2013, vol. 440, 0120062013. DOI: [10.1088/1742-6596/440/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/440/1/012006).

Giovanelli R.G. Chromospheric flares. *Monthly Not. Royal Astron. Soc.* 1948, vol. 108, pp.163–176.

Hirayama T. Theoretical model of flares and prominences. I: evaporating flare model. *Solar Phys.* 1974, vol. 34, no. 2, pp. 323–338.

Hyder C.L. A phenomenological model for disparities brusques followed by flare-like chromospheric brightenings. *Solar Phys.* 1967, vol. 2, no. 3, pp. 267–284.

Kopp R.A., Pneuman G.W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon. *Solar Phys.* 1976, vol. 50, pp. 85–98.

Newton H.W., Barton H.J. Bright solar eruptions and radio fadings during the years 1935–1936. *Monthly Not. Royal Astron. Soc.* 1937, vol. 97, no. 8, pp. 594–611.

Potzi W., Veronig A.M., Riegler G., Amerstorfer U., Pock T., Temmer M., Polanec W. Real-time flare detection in ground-

based H $\alpha$  imaging at Kanzelhöhe Observatory. *Solar Phys.* 2014, vol. 290, no. 3, pp. 951–977.

Quarterly Bulletin on Solar Activity. 1972–1973.

Reid J.H. Cape Lyot H $\alpha$ -heliograph results. *Solar Phys.* 1968, vol. 5, no. 2, pp. 207–235.

Ružičková-Topolová B. Some characteristics of great solar flares in the period 1957–1965. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 1974, vol. 25, pp. 345–352.

Solar Geophysical Data. 1975–2010.

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.

Sturrock P.A. Model of the high-energy phase of solar flares. *Nature*. 1966, vol. 211, pp. 695–697.

Švestka Z., Dodson-Prince H.W., Martin S.F., Mohler O.C., Moore R.L., Nolte J.T., Petrasso R.D. Study of the post-flare loops on 29 July 1973. *Solar Phys.* 1982, vol. 78, no. 2, pp. 271–285. DOI: [10.1007/BF00151609](https://doi.org/10.1007/BF00151609).

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

Waldmeier M. Chromosphärische eruptionen. I. Mit 6 Abbildungen. *Zeitschrift für Astrophysik*. 1938, vol. 16, pp. 276–290.

Waldmeier M. *Astron. Mitt. Zürich*. 1948, no. 153.

Waldmeier M., Bachmann H. Statistik der sonneneruptionen 1945–1954. *Zeitschrift für Astrophysik*. 1959, vol. 47, pp. 81–93.

Warwick C.S. Some characteristics of solar flares. *Astrophys. J.* 1954, vol. 120, pp. 237–244.

Wilson R.M. Statistical aspects of the 1980 solar flares — III. Parametric comparison and final comments. NASA Techn. Memo. 82526. Marshall Space Flight Center, Alabama, 1983, 27 p.

Wilson R.M. Statistical Aspects of Solar Flares .1987. 40 p. (NASA Techn. Paper 2714).

*Как цитировать эту статью*

Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования продолжительности солнечных вспышек малой мощности. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 2. С. 35–46. DOI: [10.12737/szf-41201803](https://doi.org/10.12737/szf-41201803).