

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СУПЕРВСПЫШЕК У ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

А.А.АКОПЯН

Поступила 13 июля 2016

Принята к печати 14 декабря 2016

В работе приводится статистическое исследование выборки 1547 супервспышек у 279 звезд, выявленных при анализе данных (полученные орбитальной обсерваторией "Кеплер" в течение первых 500 дней наблюдений) более 80000 звезд солнечного типа. Приведены оценки полного числа звезд, способных на супервспышки, определена функция распределения частоты супервспышек.

Ключевые слова: *супервспышка; частота вспышек*

1. Введение. Супервспышка звезды солнечного типа представляет собой внезапное и резкое повышение блеска с последующим, относительно медленным спадом, с общей продолжительностью от нескольких минут до десятков часов. Выделенная при супервспышках энергия от 10 до 10^6 раз превышает энергию самых мощных солнечных вспышек, зарегистрированных когда-либо [1], и сопоставима с энергией мощных вспышек вспыхивающих звезд. Естественно, возникают вопросы о механизмах образования супервспышек, о возможной связи между супервспышками, солнечными вспышками и вспышками вспыхивающих звезд. Интерес к супервспышкам обусловлен также с интенсивным развитием астробиологии и с исследованиями экзопланет [1].

Данные о супервспышках, опубликованные до 2012г., являлись результатом разрозненных, нецеленаправленных исследований и в значительной степени носили случайный характер. Систематическое обнаружение и исследование супервспышек звезд солнечного типа стало возможным после запуска орбитальной обсерватории "Кеплер", которая была предназначена для обнаружения внесолнечных планет и планетных систем, путем высокоточных, непрерывных фотометрических измерений огромного количества звезд. Наблюдения "Кеплер" одновременно дают ценную и однородную информацию о переменных звездах и переменных явлениях почти всех типов, в том числе о супервспышках. Относительно к супервспышкам данные "Кеплер" имеют двойную ценность, поскольку позволяют не только регистрировать их, но и

в определенной степени ответить на вопрос о существовании вокруг вспыхнувшей звезды массивной планеты или звезды, а также проследить поведение звездных пятен, которые (планета/звезда, пятна) в разных моделях привлекаются для объяснения механизма супервспышек.

Начало систематическим исследованиям супервспышек звезд солнечного типа было положено в работе Маехары и др. [2], где были представлены данные о 365 супервспышках, обнаруженных у 148 звезд солнечного типа. Общее количество рассмотренных звезд данного типа при этом составляло более 83000. Были исследованы кривые блеска, полученные обсерваторией "Кеплер" в период от апреля 2009г. до декабря 2009г.

На основе этих данных в работе [3] было проведено статистическое исследование этих звезд с привлечением методов, используемых при решении аналогичных задач для вспыхивающих звезд. Были получены оценки полного числа звезд, способных на супервспышки, определены функции распределения частоты супервспышек как для полной выборки звезд, так и для отдельных подвыборок, составленных путем разбиения полной выборки на две части по значениям периодов вращения и амплитуд переменности.

В дальнейшем [4,5] были представлены результаты исследований супервспышек, охватывающие примерно в четыре раза больший период наблюдений (примерно 500 дней). В целом у 279 звезд было обнаружено 1547 вспышек. В данной работе приводится статистическое исследование этой выборки с целью уточнения и корректировки результатов, полученных в работе [3], касательно функции распределения частоты супервспышек для полной выборки звезд, а также оценки полного числа звезд, способных на супервспышки. В отличие от [3], в данной статье для определения функции распределения привлечен также метод Амбарцумяна, что стало возможным благодаря большому количеству данных.

2. Новые оценки числа звезд, способных на супервспышки. Для оценки полного числа звезд, способных на супервспышки, можно применить оценку, полученную Амбарцумяном [6] для обыкновенных вспыхивающих звезд:

$$n_0 = \frac{n_1^2}{2n_2}, \quad (1)$$

где n_0 - число вспыхивающих звезд, у которых еще не были зарегистрированы вспышки, n_1 и n_2 - числа известных вспыхивающих звезд, у которых уже наблюдались, соответственно, по одной и по две вспышки. Оценка (1) дает лишь нижний предел числа n_0 [7].

Соответственно, полное число вспыхивающих звезд в системе определяется как сумма уже известных и еще неизвестных вспыхивающих звезд:

$$N = n_0 + N_{obs}. \quad (2)$$

Дисперсия и доверительные интервалы оценки n_0 были получены в работе [8], согласно которой дисперсия имеет вид:

$$\sigma_{n_0}^2 = n_2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 + \frac{1}{4} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^4 \right]. \quad (3)$$

Имеющиеся данные позволяют определить временное распределение вспышек (рис.1), что в свою очередь позволяет определить распределение числа вспышек на любой момент времени (окончательное распределение числа вспышек для звезд полной выборки приведено в табл.1).

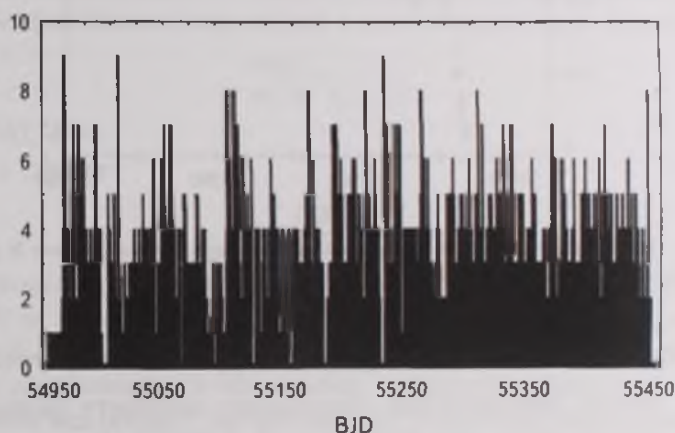


Рис.1. Распределение вспышек во времени (посуточное).

Таблица 1

ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ВСПЫШЕК ДЛЯ ЗВЕЗД ПОЛНОЙ ВЫБОРКИ

k	n_k	k	n_k	k	n_k	k	n_k
1	102	6	10	11	5	16	4
2	42	7	9	12	6	17	1
3	28	8	6	13	1	18	2
4	19	9	6	14	3	19	2
5	11	10	2	15	6	≥ 20	14

Это, в свою очередь, позволяет уследить за временным поведением оценки числа звезд (2), способных на супервспышки (рис.2). Видно, что начиная с момента BJD = 55240, когда было обнаружено около 800 супервспышек у 220

звезд, оценка "стабилизируется" на уровне примерно 380-400 звезд (на последний момент времени $n_i = 124$, $N = 403$, со среднеквадратичным отклонением $\sigma_{n_0} = 33$), что составляет около 0.5% от общего числа звезд.

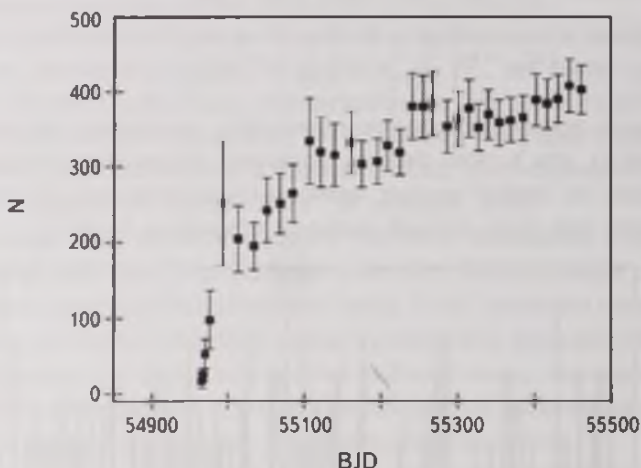


Рис.2. Оценка общего числа звезд, способных на супервспышки. На оси X приводятся барицентрические юлианские дни.

3. Определение функции распределения частоты супервспышек.

3.1. *Метод Амбарцумяна.* Определение плотности распределения частоты супервспышек $\varphi(v)$ путем прямых подсчетов пока практически невозможно из-за сравнительно малого числа зарегистрированных вспышек у отдельных звезд. В 1978г. Амбарцумян [9] предложил статистический метод определения $\varphi(v)$, позволяющий обойти эту трудность. Решение было получено с помощью обратного преобразования Лапласа (L^{-1}) наблюдаемой функции $m_1(t)/m_1(0)$:

$$\varphi(v) = \frac{v_m}{v} L^{-1} \left[\frac{m_1(t)}{m_1(0)} \right], \quad (4)$$

где

$$m_1(t) = N \int v e^{-vt} \varphi(v) dv$$

представляет собой число новых вспыхивающих звезд за единицу времени в момент времени t . В частности, для начального момента $t=0$

$$m_1(0) = N v_m = \frac{n(t)}{t}, \quad (5)$$

где v_m - средняя частота вспышек звезд, $n(t)$ - число зарегистрированных вспышек к моменту t .

Наблюдаемая функция $m_1(t)/m_1(0)$ подвержена сильным флуктуациям, поэтому желательно произвести предварительное сглаживание функции. В работе Амбарцумяна предлагалось провести сглаживание с помощью статистики вторых вспышек звезд. В данной работе сглаживание проводится с помощью соотношения:

$$\frac{m_1(t)}{m_1(0)} = \frac{n_1(t)}{n(t)}, \quad (6)$$

где $n_1(t)$ - число звезд с одной вспышкой к моменту t .

На рис.3 приводятся как вычисленная прямыми подсчетами (квадраты), так и сглаженная (кружки) с помощью соотношения (6) функции $m_1(t)/m_1(0)$, а также аппроксимация этих данных в виде аналитической функции:

$$\frac{m_1(t)}{m_1(0)} = \frac{1}{(1 + at)^b},$$

где $a = 0.03$, $b = 1$.

Из (4) следует:

$$\varphi(v) = \frac{v}{a} \frac{e^{-v/a}}{v}. \quad (7)$$

Полученное выражение (7) не является плотностью распределения, поскольку не нормируется из-за сингулярности подынтегральной функции в точке $v = 0$. Аналогичная ситуация имела место и в работе Амбарцумяна [9], где было предположено и обосновано, что реальная функция плотности может иметь вид $\varphi(v)g(v)$, где функция $g(v)$ в некоторой окрестности точки

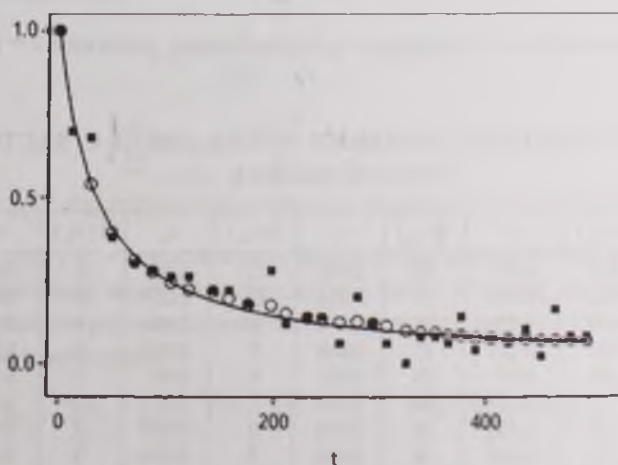


Рис.3. Вычисленная прямыми подсчетами (квадраты) и сглаженная (кружки) функции $m_1(t)/m_1(0)$, а также их аппроксимация аналитической функцией (линия).

$v = 0$ принимает нулевые или близкие к нулю значения, а вне этой окрестности равна единице. При этом становится возможным лишь определение количества звезд с частотой вспышек равной или больше заданной частоте вспышек. Этот подход был применен и в данной работе. Соответственно этому подходу число звезд с частотой вспышек $v \geq v_0$ равно:

$$N(v_0) = N \int_{v_0}^{\infty} g(v) \frac{v_m}{v} \frac{e^{-v/a}}{a} dv.$$

Вне некой окрестности нуля, где можно принять $g(v) = 1$:

$$N(v_0) = N v_m \int_{v_0}^{\infty} \frac{e^{-v/a}}{v a} dv.$$

В данном методе число невспыхнувших звезд n_0 считается неизвестным и поэтому невозможно по отдельности определить величины N и v_m , однако их произведение $N v_m$ легко можно оценить с помощью соотношения (5), используя наблюдаемые данные:

$$N v_m \approx 3.1 \text{ день}^{-1}.$$

Вычисленные значения $N(v_0)$, начиная со значения $v_0 = 0.002$, которое соответствует одной вспышке за весь период наблюдений T , приводятся в табл.2.

На рис.4 приводятся сравнения вычисленных величин с аналогичными наблюдаемыми, вычисленные с помощью выражения:

$$N(v_0) = \sum_k n_k,$$

где k последовательно принимает целочисленные значения $k = 1, 2, 3, \dots$, а

Таблица 2

ВЫЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛА ЗВЕЗД С ЧАСТОТОЙ СУПЕРВСПЫШЕК $v \geq v_0$

v_0	$N(v_0)$	v_0	$N(v_0)$	v_0	$N(v_0)$	v_0	$N(v_0)$	v_0	$N(v_0)$
0.002	227	0.022	36	0.042	12	0.062	5	0.082	2
0.004	162	0.024	32	0.044	11	0.064	4	0.084	2
0.006	126	0.026	28	0.046	10	0.066	4	0.086	2
0.008	103	0.028	25	0.048	9	0.068	4	0.088	1
0.01	86	0.03	23	0.05	8	0.07	3	0.09	1
0.012	73	0.032	20	0.052	7	0.072	3	0.092	1
0.014	62	0.034	18	0.054	7	0.074	3	0.094	1
0.016	54	0.036	16	0.056	6	0.076	2	0.096	1
0.018	47	0.038	15	0.058	6	0.078	2	0.098	1
0.02	41	0.04	13	0.06	5	0.08	2	0.1	1

$\nu_0 = k/T$. Как видно, наблюдается хорошее соответствие с наблюдаемыми данными, начиная с частоты $\nu_0 = 0.002$.

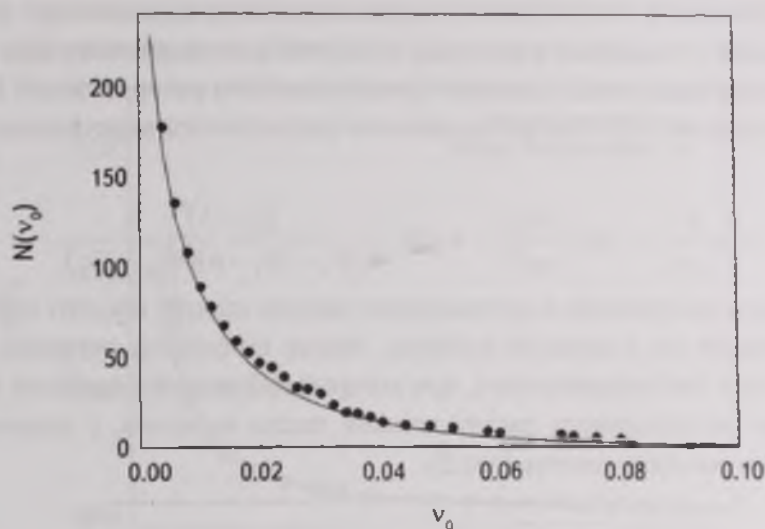


Рис.4. Сравнение вычисленных величин $N(\nu_0)$ с аналогичными наблюдаемыми.

3.2. Метод моментов. В работе [10] был предложен другой метод определения функции распределения частоты вспышек. Суть метода - в определении искомой функции через собственные моменты распределения. В качестве исходных данных используются наблюдаемые числа вспышек, при помощи которых можно вычислить моменты распределения числа вспышек. Используя выражения

$$\mu k_1 = \int \sum_{k=0}^{\infty} k \frac{(\nu t)^k}{k!} e^{-\nu t} \varphi(\nu) d\nu,$$

$$\mu k_j = \int \sum_{k=0}^{\infty} (k - \mu k_1)^j \frac{(\nu t)^k}{k!} e^{-\nu t} \varphi(\nu) d\nu, \quad j = 2, 3, 4,$$

$$\mu \nu_1 = \int \nu \varphi(\nu) d\nu, \quad \mu \nu_j = \int (\nu - \mu \nu_1)^j \varphi(\nu) d\nu, \quad j = 2, 3, 4,$$

где, в частности, μk_j - статистические моменты распределения числа вспышек, $\mu \nu_j$ - статистические моменты распределения частот вспышек, можно выразить моменты функции распределения частоты вспышек через соответствующие моменты числа вспышек:

$$\begin{aligned} \mu \nu_1 &= \frac{\mu k_1}{t}, \quad \mu \nu_2 = \frac{\mu k_2 - \mu k_1^2}{t^2}, \quad \mu \nu_3 = \frac{\mu k_3 - 3\mu k_2 \mu k_1 + 2\mu k_1^3}{t^3}, \\ \mu \nu_4 &= \frac{\mu k_4 - 6\mu k_3 \mu k_1 - 6\mu k_2 \mu k_1^2 + 11\mu k_1^4 - 6\mu k_1^3 \mu k_2 + 3\mu k_1^2 \mu k_1^2}{t^4}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя эмпирические моменты распределения числа вспышек в (8), получим соответствующие эмпирические моменты функции распределения частоты вспышек. Таким образом, задача сводится к определению функции распределения с помощью известных моментов распределения. Для этого в [10] был использован метод подгонки кривых семейства распределений Пирсона методом моментов [11]. Тип распределения определяется величинами β_1 , β_2 , κ , где

$$\beta_1 = \frac{\mu v_3^2}{\mu v_2^3}, \quad \beta_2 = \frac{\mu v_4}{\mu v_2^2}, \quad \kappa = \beta_1 \frac{(\beta_2 + 3)^2}{4(2\beta_2 - 3\beta_1 - 6)(4\beta_2 - 3\beta_1)}.$$

Используя полученную в предыдущем разделе оценку общего количества звезд и варьируя ею в пределах ошибок, можно вычислить значения β_1 , β_2 , κ и определить тип распределения, при котором наблюдается наиболее хорошее соответствие наблюдаемого распределения числа вспышек с теоретически вычисленным распределением (рис.5).

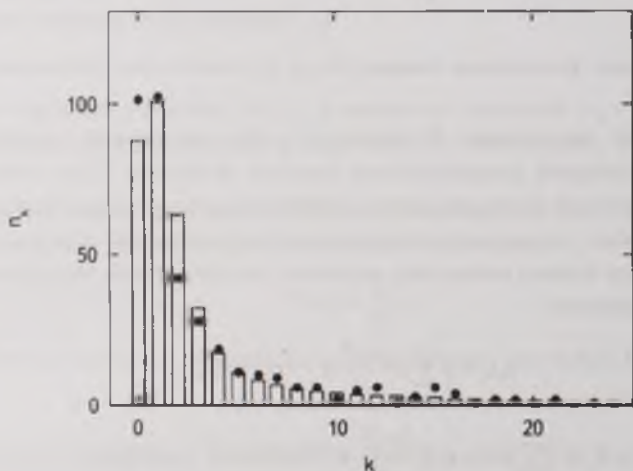


Рис.5. Сравнение наблюдаемого распределения числа вспышек с теоретически вычисленным распределением.

Оказалось, что функцию распределения можно представить в виде распределения Пирсона I типа (β -распределение):

$$\Phi(v) = C \int_{\hat{v}-a}^v \left(1 + \frac{\eta - \hat{v}}{a}\right)^{m_1} \left(1 - \frac{\eta - \hat{v}}{b}\right)^{m_2} d\eta,$$

где $\hat{v}$ - среднее распределение, а $(\hat{v} - a)$ - нижний предел распределения. Соответственно, верхним пределом будет $(\hat{v} + b)$.

Параметры распределения принимают следующие значения: $\hat{v} = 0.008$

$a = 0.006$ $b = 0.140$, $C = 16.368$, $m_1 = -0.861$ $m_2 = 2.176$. Сравнение функций плотности распределения, полученных методом Амбарцумяна и методом моментов, приведено на рис.6. Функции почти совпадают, начиная со значения частоты супервспышек $\nu = 0.004$ д⁻¹.

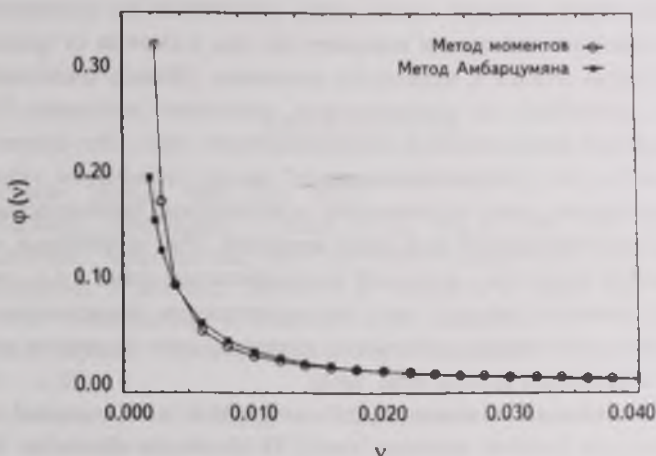


Рис.6. Сравнение функций плотности распределения, полученных методом Амбарцумяна и методом моментов.

Сравнение функций распределения, полученных в данной работе и в работе [3] методом моментов, приведено на рис.7, где точками представлена функция распределения из работы [3].

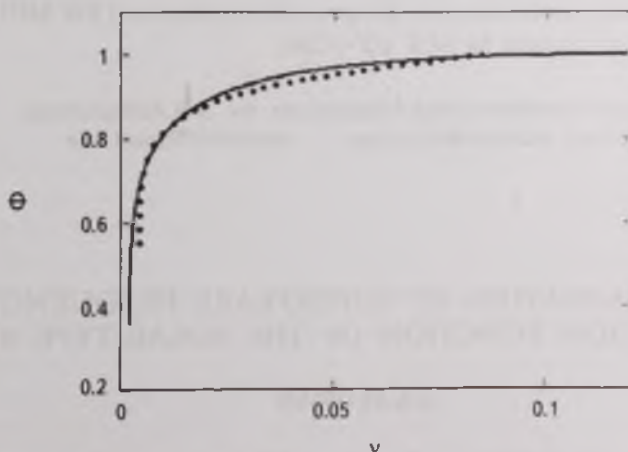


Рис.7. Сравнение функций распределения, полученных в данной работе и в работе [3] методом моментов.

4. *Заключение.* В работе приводится статистическое исследование выборки 1547 супервспышек 279 звезд, выявленных при анализе данных (полученные орбитальной обсерваторией "Кеплер" в течение первых 500 дней наблюдений) более 80000 звезд солнечного типа [4,5].

Получена оценка общего числа звезд, способных на супервспышки. Временное поведение этой оценки указывает, что она, в отличие от предыдущей оценки [3], очень близка к истинному значению. Можно заключить, что число звезд, способных на супервспышки, составляет примерно 0.5% от общего числа всех исследованных звезд солнечного типа. Это скорее всего указывает на то, что "супервспыхивающие" звезды солнечного типа либо обладают некоторыми, редко встречаемыми особенностями/особенностью, либо находятся на кратковременной фазе своей эволюции. Учет неизбежных ошибок наблюдательного характера, неверной классификации звезд и т.д., вряд ли повлияет на основной вывод о том, что подавляющее большинство звезд солнечного типа не способны показывать супервспышки в течение времени сравнимого с временем жизни этих звезд.

Двумя независимыми методами определена функция распределения частоты супервспышек для полной выборки звезд. Полученные функции хорошо согласуются как между собой, так и с аналогичной функцией, полученной ранее, а также с имеющимися наблюдательными данными. Некоторая несогласованность наблюдается в узком диапазоне низких частот супервспышек, что неудивительно, поскольку наблюдения с продолжительностью $T=500$ дней содержат малую информацию о частотах порядка $1/T$ и меньше. Применение полученных функций будет представлено в последующих работах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта № SCS 15T-1C081.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,
Армения, e-mail: aakopian@bao.sci.am aakopian57@gmail.com

DETERMINATION OF SUPERFLARE FREQUENCY DISTRIBUTION FUNCTION OF THE SOLAR-TYPE STARS

A.A.AKOPIAN

Statistical study of 1547 superflares from 279 stars, revealed by the analysis of data more than 80000 solar-type stars (obtained by orbital observatory "Kepler")

in the first 500 days of observations) is presented. The total number of superflare stars is estimated. The distribution function of superflares frequency is determined.

Key words: superflare: flare frequency

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.Schaefer*, *Nature*, **485**, 456, 2012.
2. *H.Maehara, T.Shibayama, S.Notsu et al.*, *Nature*, **485**, 478, 2012.
3. *А.А.Акопян*, *Астрофизика*, **56**, 537, 2013, (*Astrophysics*, **56**, 488, 2013).
4. *T.Shibayama, H.Maehara, S.Notsu et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **209**, 5, 2013.
5. *S.Notsu, T.Shibayama, H.Maehara et al.*, *Astrophys. J.*, **771**, 127, 2013.
6. *В.А.Амбарцумян*, "Звезды, Туманности, Галактики", Изд. АН Арм ССР, 1969, с.283.
7. *В.А.Амбарцумян, Л.В.Мирзоян, Э.С.Парсаян и др.*, *Астрофизика*, **6**, 7, 1970, (*Astrophysics*, **6**, 1, 1970).
8. *A.Chao*, *Biometrics*, **43**, 783, 1987.
9. *В.А.Амбарцумян*, *Астрофизика*, **14**, 367, 1978, (*Astrophysics*, **14**, 209, 1978).
10. *А.А.Акопян*, *Астрофизика*, **46**, 75, 2003, (*Astrophysics*, **46**, 58, 2003).
11. *W.Elderton, N.Johnson*, "Systems of frequency curves", Cambridge Univ. Press, 1969, 216p.

