

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ЧАСТОТЫ СУПЕРВСПЫШЕК ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

А.А.АКОПЯН

Поступила 21 ноября 2014

Принята к печати 5 декабря 2014

Проведено статистическое исследование переменности частоты супервспышек 46 звезд солнечного типа, обнаруженных орбитальной обсерваторией "Кеплер". Рассмотрены два возможных сценария изменения частоты супервспышек. В первом из них временная последовательность супервспышек рассматривается как кусочно-стационарный пуассоновский процесс. В результате у 5-ти звезд обнаружены статистически значимые изменения частот супервспышек в несколько раз. Моменты изменения частоты сопровождаются изменениями в поведении яркости звезды вне вспышек. Яркость звезды на короткое время становится иррегулярной, со значительным уменьшением амплитуды яркости. Во втором сценарии временная последовательность супервспышек рассматривается как пуассоновский процесс с периодическим параметром (частота супервспышек). В рамках второго сценария проверено наличие возможной периодичности частоты супервспышек с периодом, равным периоду орбитального или осевого вращения звезды. У звезды KIC 7264976 обнаружена периодичность частоты с периодом, совпадающим с возможным периодом орбитального вращения. Периодичность частоты, с периодом, равным вероятному периоду осевого вращения, выявлена у звезды KIC 10422252.

Ключевые слова: *супервспышка: частота вспышек: переменность*

1. *Введение.* Во время супервспышки происходит внезапное увеличение яркости звезды солнечного типа с продолжительностью от нескольких минут до десятки часов, с выделением энергии, превышающей энергию самых мощных солнечных вспышек от 10 до 10^6 раз [1]. Энергия супервспышек 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.

Возросший интерес к супервспышкам связан также с интенсивным развитием астробиологии и с исследованиями экзопланет. С одной стороны, огромная энергия выхода супервспышек может сделать любые планеты вокруг звезд непригодными для обитания и астробиологи должны учитывать влияние супервспышек на возможную инопланетную жизнь. С другой стороны, супервспышки могут служить источником высокоэнергетического излучения, необходимого для образования органических молекул, и возможно, планетные системы вокруг "супервспыхивающих" звезд являются хорошим местом для поиска инопланетной жизни, которая при своей

дальнейшей эволюции благополучно избежала губительных последствий огромных вспышек [1].

До последнего времени число известных супервспышек не превышало нескольких десятков [2-4]. Данные о супервспышках, опубликованные до 2012г. не были результатом однородных, целенаправленных исследований и в значительной мере носили случайный характер. Ситуация резко улучшилась после запуска обсерватории "Кеплер", основной задачей которой было обнаружение экзопланет. Однако, благодаря своим характеристикам, наблюдения "Кеплер" одновременно дают ценную и однородную информацию о переменных звездах и переменных явлениях почти всех типов.

В данном случае наблюдения "Кеплер" имеют двойную ценность, поскольку позволяют не только регистрировать супервспышки, но и в некоторой степени ответить на вопрос о существовании у звезды массивной планеты, которая, согласно одной из физических моделей образования супервспышек (модель "горячего Юпитера" [5-7]), способна содействовать возникновению супервспышек. Кроме этого, можно также определить период вращения и степень запятнанности звезды, которые в данной задаче являются очень важными характеристиками.

Целью данной работы является статистическое исследование переменности наблюдаемой частоты супервспышек. Изменение наблюдаемой частоты супервспышек может быть обусловлено рядом причин:

- реальным изменением вспышечной активности звезды;
- возможными геометрическими эффектами, связанными с изменением расположения и видимости активных областей вспышек в результате, например, осевого вращения звезды или орбитального вращения другой звезды, или массивной планеты вокруг главной звезды;
- возможной наблюдательной селекцией, связанной с изменением яркости звезды вне вспышки, обусловленной, в частности, осевым вращением и неравномерным распределением яркости на поверхности звезды и т.д.

Естественно предполагать, что частота супервспышек вследствие периодического осевого или орбитального вращения звезды может приобрести периодический характер с периодом, равным периоду осевого или орбитального вращения.

В данной работе проверено наличие возможной периодичности частоты супервспышек звезд с известными периодами осевых или орбитальных вращений.

Кроме этого, рассмотрена более общая задача обнаружения возможного скачкообразного изменения частоты супервспышек. Для этого были привлечены методы, разработанные при решении аналогичных задач для вспыхивающих звезд [8-10]. Для супервспышек впервые такая работа [11] была проделана на основе сравнительно малочисленных данных, полученных в результате наблюдений обсерватории "Кеплер", представленных в работе

[12]. У звезды KIC 7264976 было обнаружено статистически значимое изменение частоты вспышек.

Базовым в этих методах является предположение о случайном и независимом характере супервспышек, что позволяет рассмотреть последовательность супервспышек у каждой звезды как случайный пуассоновский процесс.

2. Используемые данные. Впервые данные "Кеплер" о супервспышках звезд солнечного типа были представлены в работе [12]. Общее количество рассмотренных звезд данного типа при этом составляло более 83000. Были исследованы кривые яркости, полученные обсерваторией "Кеплер" в период от апреля 2009г. до декабря 2009г.

Для определения порогов супервспышек были вычислены распределения разности яркости между всеми парами последовательных измерений яркости с экспозицией 30 минут [12,13]. В качестве порогов были выбраны значения три раза превышающие значения квантилей $p=0.99$ этих распределений. Типичная величина этих порогов составила около 0.1% яркости звезд. Поярчание звезды принималось за супервспышку, когда яркость звезды превосходила установленный для данной звезды порог, по крайней мере, в трех последовательных измерениях. Этим определяется нижний предел продолжительности регистрированных супервспышек - 1.5 час. При этом кривая яркости должна иметь характерный вид - крутой подъем и относительно медленный спад. Другие детали методики выделения вспышек и обработки данных приведены в работах [12,13].

В результате у 148 звезд солнечного типа было обнаружено 365 супервспышек. В дальнейшем эта же группа авторов представила [13,14] результаты исследований супервспышек, охватывающих примерно в четыре раза больший период наблюдений (примерно 500 дней). Было обнаружено 1547 вспышек у 279 звезд.

Ни у одной из звезд не была обнаружена планета, что является серьезным аргументом против модели "горячего Юпитера". Согласно [14], наблюдаемые квазипериодические изменения яркости можно объяснить вращением звезды, имеющей на своей поверхности звездные пятна огромных размеров, покрывающих площади в десятки раз превышающие соответствующие солнечные, а энергию супервспышек можно объяснить магнитной энергией, содержащейся вблизи крупных звездных пятен.

Из этих 279 звезд 46 имеют по десять и более вспышек. Они и стали предметом исследований в данной работе. Список этих звезд приводится в табл.1, где в столбцах последовательно приводятся номер звезды; координаты; количество супервспышек; эффективная температура, ускорение силы тяжести, радиус звезды и видимая звездная величина в полосе наблюдений "Кеплер" по каталожным данным [15]; период осевого вращения

в днях [13].

Моменты всех вспышек, а также другие характеристики звезд и их

Таблица 1

СПИСОК ИССЛЕДОВАННЫХ ЗВЕЗД

KIC	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	n_r	T_{eff}	$\log(g)$	$R_{\odot}$	m_{bol}	P_r
10422252	19 51 39.06	+47 33 49.7	57	5118	4.2	1.3	13.6	5.2
6034120	19 16 21.58	+41 20 00.5	45	5407	4.7	0.8	14.9	5.6
7264976	19 02 36.12	+42 48 31.7	40	5184	4.1	1.7	12.0	12.6
8547383	19 04 49.26	+44 37 43.0	40	5376	4.5	0.9	14.2	14.8
8479655	18 57 43.24	+44 35 55.8	39	5126	4.6	0.8	12.8	19.3
6697041	19 33 39.51	+42 11 29.8	37	5204	4.4	1.0	14.4	15.5
6691930	19 27 50.54	+42 10 18.3	35	5348	4.5	0.9	15.5	13.5
11764567	19 30 33.63	+49 56 04.7	34	5238	4.4	1.1	13.2	22.2
7174505	18 46 05.55	+42 44 14.3	29	5220	4.4	1.0	14.5	3.7
3425756	19 02 46.20	+38 32 38.5	28	5417	4.6	0.9	15.4	1.7
11235995	19 09 56.07	+48 56 53.8	25	5251	4.5	0.9	15.0	5.1
10120296	18 48 11.70	+47 08 43.0	23	5490	4.4	1.1	12.9	3.9
3557532	19 38 39.12	+38 37 58.9	21	5221	4.6	0.8	14.4	2.0
8226464	19 17 31.57	+44 11 10.3	21	5754	4.1	1.7	11.5	3.1
9459362	19 17 46.48	+46 02 13.2	19	5357	4.6	0.8	14.1	12.3
11186775	19 19 16.11	+48 52 32.7	19	5948	4.3	1.2	13.9	1.8
4749912	19 31 00.05	+39 49 56.1	18	5554	4.3	1.3	14.1	5.2
10528093	19 15 32.24	+47 45 34.2	18	5143	4.5	0.9	13.6	12.5
3118883	19 27 52.70	+38 16 47.5	17	5195	4.5	1.0	14.4	8.5
4142137	19 07 57.44	+39 12 46.1	16	5447	4.4	1.1	12.7	1.9
6032920	19 14 37.67	+41 23 58.3	16	5611	4.6	0.8	13.5	3.2
9655134	19 36 59.88	+46 20 31.5	16	5229	4.5	1.0	13.6	7.7
12354328	19 19 42.41	+51 11 56.2	16	5115	4.4	1.0	14.7	0.8
2860579	19 32 38.79	+38 02 13.2	15	5162	4.5	0.9	14.2	5.1
5528061	19 20 17.58	+40 43 55.3	15	5424	4.6	0.9	14.9	3.8
8074287	18 42 39.92	+43 56 35.4	15	5488	4.4	1.0	14.3	2.9
8162830	19 22 59.37	+44 03 43.4	15	5770	4.6	0.8	15.0	2.6
9146690	19 13 03.76	+45 35 55.1	15	5216	4.5	0.9	15.1	0.7
10220756	19 46 14.71	+47 13 37.6	15	5753	4.2	1.3	13.4	5.0
4742436	19 21 49.53	+39 50 07.4	14	5628	4.2	1.5	10.6	2.3
6865416	19 30 03.82	+42 19 59.6	14	5222	4.4	1.0	13.7	3.3
8482482	19 04 23.74	+44 30 09.8	14	5521	4.5	0.9	15.3	4.6
6503434	18 58 29.66	+41 55 07.5	13	5714	4.3	1.2	12.6	3.9
5529084	19 21 24.94	+40 43 39.5	12	5232	4.6	0.8	15.5	9.8
6127565	19 32 20.04	+41 27 22.6	12	5305	4.1	1.6	13.6	2.6
6865484	19 30 07.92	+42 23 37.0	12	5688	4.4	1.1	13.8	11.2
8491470	19 21 41.94	+44 35 47.7	12	5340	4.9	0.6	14.3	4.3
9897464	19 37 57.69	+46 47 19.2	12	5538	4.4	1.0	15.0	3.3
12003808	19 03 19.22	+50 28 58.9	12	5126	4.8	0.6	15.9	3.6
8091757	19 19 16.80	+43 58 30.1	11	5871	4.6	0.9	13.0	2.0
8143783	18 45 59.47	+44 03 25.3	11	5625	4.6	0.8	15.7	0.7
9150539	19 20 42.49	+45 30 05.3	11	5409	4.5	0.9	15.1	3.3
9653110	19 33 48.32	+46 21 54.0	11	5223	4.4	1.0	12.9	1.6
10745663	19 47 53.70	+48 04 10.7	11	5754	4.6	0.9	14.3	3.1
7532880	19 33 17.78	+43 06 17.8	10	5562	4.4	1.1	13.1	2.2
11283805	18 55 29.73	+49 02 40.1	10	5218	4.1	1.5	13.8	4.4

супервспышек (амплитуда, переменность) можно найти в электронной версии работы [13].

3. Обнаружение изменения частоты.

3.1. Используемый метод. Предположим, что по некоторым причинам, в частности - по изложенным выше - в течение сравнительно небольшого промежутка времени происходит скачкообразное изменение наблюдаемой частоты супервспышек с одного значения на другое. Это наиболее простой сценарий изменения частоты супервспышек.

В этом случае последовательность супервспышек можно описать как кусочно-стационарный пуассоновский процесс, при котором в отдельных интервалах времени наблюдений частота вспышек (параметр пуассоновского распределения) имеет разные значения. С математической точки зрения задача сводится к обнаружению переменности параметра пуассоновского распределения.

В работах [8-10], привлекая результаты, полученные в теории обнаружения изменения свойств сигналов и динамических систем для кусочно-стационарных пуассоновских процессов (см. напр. [16]), для обнаружения изменения частоты вспышек вспыхивающих звезд были предложены и применены следующие статистики:

$$\text{а) } \Lambda \equiv \sup_{\tau} L = n \sup_{\tau} K\left(\frac{k_{\tau}}{n}, \frac{\tau}{T}\right), \text{ где } K(p, r) = p \ln \frac{p}{r} + (1-p) \ln \frac{(1-p)}{(1-r)}$$

$$\text{б) } \Lambda 1 \equiv \sup_{\tau} L 1 = n \frac{2k_{\tau}}{n} \left(1 - \frac{k_{\tau}}{n}\right) \sup_{\tau} K\left(\frac{k_{\tau}}{n}, \frac{\tau}{T}\right),$$

$$\text{в) } \Lambda 2 \equiv \sup_{\tau} L 2 = n \sup_{\tau} \left| \frac{k_{\tau}}{n} - \frac{\tau}{T} \right|,$$

где $\frac{2k_{\tau}}{n} \left(1 - \frac{k_{\tau}}{n}\right)$ - весовая функция, $\left(\frac{k_{\tau}}{n} - \frac{\tau}{T}\right) = \frac{\tau(T-\tau)}{nT} \left(\frac{k_{\tau}}{\tau} - \frac{n-k_{\tau}}{T-\tau}\right)$ - нормированная разность между оценками частот, τ - момент изменения частоты, T - полное время наблюдений, k_{τ} - количество зарегистрированных вспышек за время τ , n - количество зарегистрированных вспышек за время T ($n = k_T$).

Статистика Λ получается в результате максимизации логарифма отношения правдоподобий $\ln L_{H_1/H_0}$:

$$\Lambda \equiv \sup_{\tau} \sup_{v_1} \sup_{v_2} \inf_{\nu} \ln L_{H_1/H_0},$$

где H_0 - гипотеза о стационарном пуассоновском процессе (постоянная частота), H_1 - гипотеза о кусочно-стационарном пуассоновском процессе (частота меняется), ν - частота вспышек при предположении о ее постоянстве, v_1 - частота вспышек до предполагаемого момента изменения частоты, v_2 - частота вспышек после предполагаемого момента изменения частоты. Статистики $\Lambda 1$, $\Lambda 2$ являются модификациями статистики Λ .

Очевидно, что во всех случаях кусочно-стационарная модель, как

общий случай стационарного процесса, будет лучше согласована с наблюдательными данными, из чего следует, что "изменение" частоты будет обнаружено почти во всех случаях. Поэтому существенным становится вопрос о статистической значимости этих изменений.

Изменение частоты можно считать установленным с уровнем значимости α , если значение статистики критерия Λ (Λ_1 , Λ_2) превышает некую пороговую величину $c(\alpha)$. Зависимости пороговой величины от числа зарегистрированных всплесков n , для двух уровней значимости, ранее были получены нами с помощью численного моделирования [9].

3.2. Результаты. С помощью описанного выше метода и данных о моментах супервсплесков [13] были вычислены значения статистик Λ , Λ_1 , Λ_2 , которые приводятся на рис.1. Там же приводятся вычисленные зависимости пороговой величины от числа зарегистрированных всплесков n для двух уровней значимости. Как видно из рис.1 у некоторых звезд наблюдается значимое изменение частоты супервсплесков.

Эти звезды разбиты на две группы (табл.2). В первую группу попали

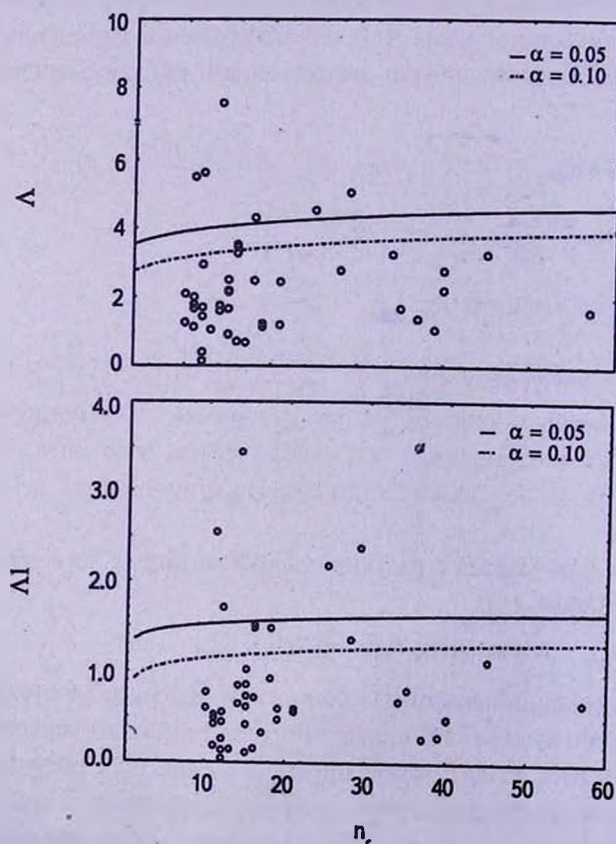


Рис.1. Вычисленные значения статистик Λ , Λ_1 , Λ_2 (кружки) и зависимости пороговой величины от числа зарегистрированных всплесков n , для двух уровней значимости (кривые).

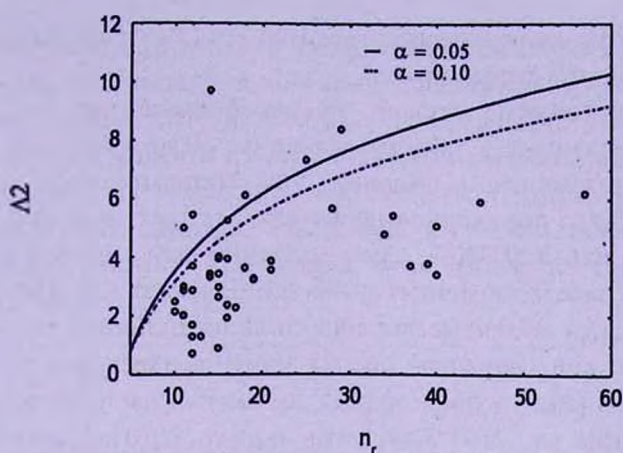


Рис.1. (Окончание).

5 звезд, у которых переменность частоты подтверждается всеми статистиками (Λ , Λ_1 , Λ_2) на уровне значимости 0.05, а во вторую - 4 звезды, у которых переменность частоты подтверждается не всеми статистиками или/и на уровне значимости 0.1. В дальнейшем основное внимание уделено звездам первой группы.

В табл.2. приводятся - порядковый номер; номер звезды по каталогу KIC; t - предполагаемый момент изменения частоты; τ и k_τ - соответственно, продолжительность времени (в днях) от начала наблюдений до вероятного момента изменения частоты супервспышек и число супервспышек в этом интервале; $T-\tau$ и $n-k_\tau$ - соответственно, продолжительность времени от момента изменения до конца наблюдений и число супервспышек в этом интервале; v_1, v_2, v - соответственно, наблюдаемые частоты супервспышек до момента изменения частоты, после момента изменения частоты и в целом;

вычисленные по формуле $q = \frac{\tau^k (T-\tau)^{n-k}}{T^n} \frac{n!}{k!(n-k)!}$ значения вероятности

Таблица 2

ЗВЕЗДЫ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ СУПЕРВСПЫШЕК

N	KIC	t (BJD)	τ	k_τ	$T-\tau$	$n-k_\tau$	v_1	v_2	v	q	$\Lambda, \Lambda_1, \Lambda_2$
1	4742436	55073.10	109	11	391	3	0.100	0.008	0.028	$9.2 \cdot 10^{-6}$	Λ_1
2	7174505	55034.44	71	11	429	18	0.155	0.042	0.028	$1.0 \cdot 10^{-3}$	Λ_1
2a	7174505	55198.68	235	22	265	7	0.094	0.026	0.058	$1.1 \cdot 10^{-3}$	Λ, Λ_2
3	9150539	55055.28	91	7	409	4	0.077	0.001	0.022	$9.8 \cdot 10^{-4}$	$\Lambda, \Lambda_1, \Lambda_2$
4	12003808	55104.18	140	8	360	4	0.057	0.011	0.021	$5.0 \cdot 10^{-3}$	Λ_1
5	11235995	55310.17	346	10	154	15	0.027	0.097	0.050	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$\Lambda, \Lambda_1, \Lambda_2$
6	3425756	55350.44	386	16	114	12	0.041	0.105	0.056	$9.6 \cdot 10^{-3}$	Λ_1
7	4142137	55422.51	459	11	41	5	0.024	0.122	0.031	$6.3 \cdot 10^{-3}$	Λ, Λ_1
8	4749912	55244.53	281	4	219	14	0.014	0.064	0.036	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$\Lambda, \Lambda_1, \Lambda_2$
9	12354328	55284.03	320	5	180	11	0.016	0.061	0.052	$6.2 \cdot 10^{-3}$	$\Lambda, \Lambda_1, \Lambda_2$

распределения вспышек по интервалам времени τ и $(T - \tau)$, при предположении о постоянной частоте супервспышек.

В последнем столбце указано, по какой статистике (Λ , Λ_1 , Λ_2) вычислены приводимые в таблице величины. Дело в том, что моменты изменения, определенные с помощью этих статистик, могут отличаться друг от друга. Такое положение имеет место для трех звезд (KIC 7174505, KIC 4742436 и KIC 12003808). Соответственно, для звезды KIC 7174505 приводятся два набора табличных значений. Для звезд KIC 4742436 и KIC 12003808 приводятся табличные значения согласно статистике Λ_1 , поскольку две другие дают лишь нижнюю оценку момента изменения частоты.

Как видно из табл.2 у приведенных звезд наблюдается весьма существенное изменение частоты. При этом, однако, другие характеристики супервспышек значимо не меняются (см. табл.3). В табл.3 для звезд первой группы приводятся средние значения амплитуд и продолжительности вспышек, как в целом, так и до и после изменения частоты супервспышек. Соответствующие необходимые данные взяты из работы [13].

Очевидно, что приведенные в табл.2 моменты изменения частоты весьма условные. На самом деле изменение частоты не может быть вызвано моментально, а скорее всего является результатом некоего продолжительного процесса, и приведенные моменты нужно рассматривать как характерные моменты этого процесса. Процесс или процессы, вызывающие изменение частоты в несколько раз, могут повлиять и на поведение яркости звезды в стационарном состоянии. Рассмотрение кривых яркости звезд первой группы вблизи моментов изменения частоты супервспышек выявило интересную закономерность (рис.2). Оказалось, что моменты изменения частоты соседствуют с участками, где на короткое время сильно нарушается периодическое квазирегулярное поведение кривых яркости, а также существенно уменьшается амплитуда яркости звезды. То же самое имеет место и для звезд второй группы, кроме звезды KIC 12354328, которая по своим характеристикам сильно отличается от подавляющего большинства звезд (очень короткий период вращения - 0.8д, и очень большие амплитуды супервспышек).

Таблица 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПЕРВСПЫШЕК ЗВЕЗД С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ

KIC	Амплитуда вспышек			Продолжительность вспышек		
	$\bar{A}_f$	$\bar{A}_{f1}$	$\bar{A}_{f2}$	$\bar{T}_f$	$\bar{T}_{f1}$	$\bar{T}_{f2}$
4742436	0.564	0.627	0.333	0.126	0.131	0.107
7174505	1.583	1.673	1.528	0.091	0.116	0.076
9150539	1.609	1.371	2.025	0.073	0.086	0.050
12003808	3.150	3.125	3.200	0.063	0.053	0.085
11235995	1.140	1.130	1.147	0.066	0.066	0.065

У тех звезд первой группы, у которых происходит уменьшение частоты супервспышек, эти участки предшествуют моменту изменения частоты, а для единственной звезды (KIC 11235995), у которой частота увеличивается - наоборот. На рис.2 моменты изменения показаны вертикальными стрелками, а горизонтальными стрелками подчеркнуты промежутки времени с иррегулярным поведением яркости. По всей видимости, в этих промежутках происходит постепенное уменьшение и исчезновение старых пятен, и зарождение новых.

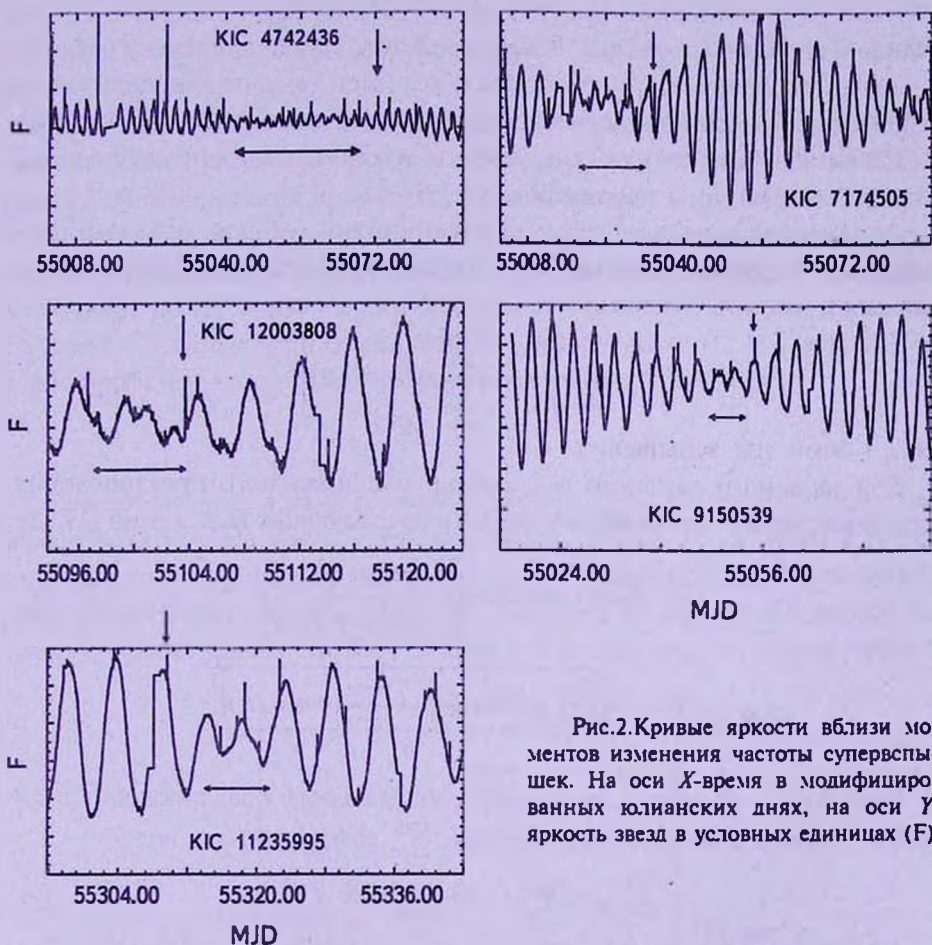


Рис.2.Кривые яркости вблизи моментов изменения частоты супервспышек. На оси X-время в модифицированных юлианских днях, на оси Y-яркость звезд в условных единицах (F).

4. Обнаружение периодического изменения частоты.

4.1. *Использованный метод.* Предположим, что частота вспышек обусловлена или модулируется неким периодическим процессом, например - осевым вращением звезды или орбитальным вращением другой звезды, или массивной планеты вокруг основной звезды. В этом случае частоту вспышек можно представить в виде периодической функции от времени,

а сам процесс рассмотреть как пуассоновский с периодическим параметром. В данной работе в качестве периодической функции частоты супервспышек предлагается использовать следующую функцию:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda \exp[k \sin(\omega_0 t + \vartheta)]}{I_0(k)} \quad (k \geq 0, \omega_0 \geq 0, 0 \leq \vartheta \leq 2\pi, \lambda > 0),$$

где

$$I_0(k) = \int_0^{2\pi} \exp[k \sin(u)] du$$

модифицированная функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

Такой выбор функции во многом обусловлен тем, что обеспечивается разнообразие видов периодической функции, в зависимости от значения k . Для этой функции известны оценки максимального правдоподобия входящих в функцию параметров [17,18].

Если рассмотреть в качестве статистического события реализацию n вспышек в интервале времени $(0, T)$, то функцией правдоподобия данного события будет:

$$e^{-\lambda T/2\pi} \left(\frac{\lambda}{I_0(k)} \right)^n \exp \left[k \sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i + \vartheta) \right],$$

где t_i - моменты вспышек.

Для заданного значения ω_0 , оценки максимального правдоподобия остальных параметров можно определить из следующих выражений [17,18]:

$$\hat{\lambda} = \frac{2\pi n}{T}, \quad \tan(\hat{\vartheta}) = \frac{\sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i)}{\sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i)}, \quad (1)$$

$$\left. \frac{d \log I_0(k)}{dk} \right|_{k=\hat{k}} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) \right)^2}}{n}$$

Если же ω_0 не задана, то оценку максимального правдоподобия ($\hat{\omega}_0$) можно получить максимизируя сумму $\sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i + \vartheta)$ по ω_0 :

$$\sum_{i=1}^n t_i \cos(\omega_0 t_i + \vartheta) \Big|_{\omega_0 = \hat{\omega}_0} = 0. \quad (2)$$

Как видно она неоднозначна и зависит от другого параметра. Поэтому, в этом случае для набора первоначальных предполагаемых значений ω_0 , методом последовательных приближений решается система из вышеприведенных уравнений (1, 2), и из полученных решений выбирается то решение, которое обеспечивает лучшее согласие с наблюдательными данными.

Чтобы оценить насколько гипотеза H_1 о периодичности частоты супервспышек предпочтительнее гипотезы H_0 о постоянной частоте, вычисляется значение логарифма отношения правдоподобий $\ln L_{H_1/H_0}$ и сравнивается с

результатами численного моделирования. Численное моделирование было проведено для ряда характерных значений числа зарегистрированных супервспышек. Результаты моделирования дают представление о вероятностях получения ложных периодических функций, при справедливости гипотезы о постоянной частоте.

4.2. Результаты. Звезда KIC 7264976. В предыдущей работе [11], на основе сравнительно малочисленных данных, у звезды была обнаружена переменность частоты вспышек, однако, как следует из результатов предыдущего раздела, новые данные не подтвердили переменность частоты супервспышек звезды KIC 7264976 в рамках модели кусочно-стационарного пуассоновского процесса.

Недавние спектральные исследования этой звезды показали, что спектральные линии звезды - двухкомпонентные и она, скорее всего, двойная звезда [19]. Наблюдения проводились в два коротких периода разделенных между собой промежутком в 270 дней. Поскольку за это время не произошло ощутимое смещение компонент линий относительно друг друга, то авторы заключили, что вероятный период орбитального вращения близок к значению 270 дней. Обобщая данное заключение, можно сказать, что вероятный период орбитального вращения может принимать значения

$$P \approx \frac{270}{k}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Соответственно, в рамках предположения, что двойственность звезды может повлиять на частоту супервспышек, звезда была проверена на наличие переменной периодической частоты супервспышек, с периодами, указанными выше. Оказалось, что наблюдаемое распределение моментов супервспышек можно хорошо объяснить в том случае, когда период

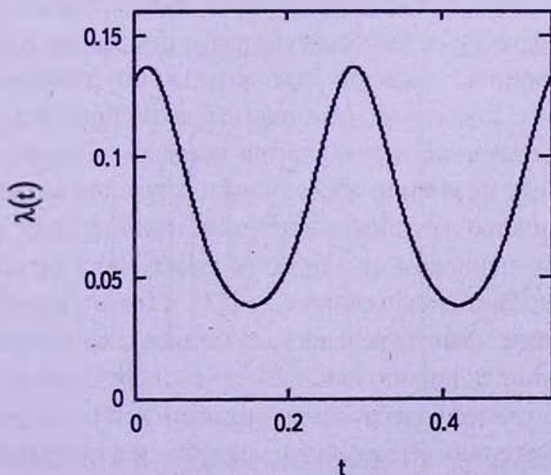


Рис.3. Функция частоты супервспышек звезды KIC 7264976.

функции частоты супервспышек $P = 134$.

На рис.3 приводится функция частоты супервспышек. На оси ординат приводятся частоты вспышек в единицах день^{-1} , а на оси абсцисс время в долях от общего времени наблюдений. Начальная точка абсцисс совпадает с началом наблюдений. На рис.4 приводятся сложенное в единый период наблюдаемое распределение супервспышек, (распределение супервспышек по фазам периодической функции), с теоретически вычисленным распределением (обозначены кружками), а также соответствующие кумулятивные функции распределения. Как видно наблюдается очень хорошее соответствие, что подтверждается также критерием χ^2 .

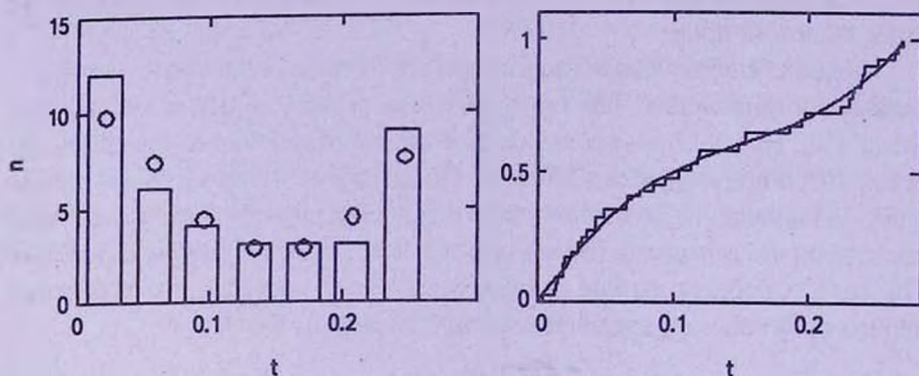


Рис.4. Наблюдаемое и теоретическое (кружки) распределения супервспышек звезды KIC 7264976 по фазам периодической функции (слева). Справа соответствующие кумулятивные распределения.

Логарифм отношения правдоподобий получился равным $\ln L_{H_1/H_0} \approx 3.8$. Как показали результаты моделирования, только в 4-х из 200 численных симуляций значение логарифма отношений правдоподобий превышает полученное значение при постоянной частоте супервспышек. Все это говорит в пользу периодичности частоты супервспышек звезды KIC 7264976. Чтобы ответить на вопрос, вызвано она возможной двойственностью звезды или это случайное совпадение, необходимы дальнейшие исследования.

Исследование периодической переменности частоты. Периоды осевых вращений исследованных звезд были определены в результате анализа кривых яркости [12,13]. Большинство звезд показывает квазипериодические модуляции яркости с характерным периодом от одного до нескольких десятков дней.

В рамках представлений, изложенных в [13], следует ожидать также периодическое изменение частоты вспышек, связанное с вращением звезды. Реальная картина усложняется тем, что пятна или другие образования (например, факелы) - возможные ответственные за неравномерность поверхностной яркости звезды - являются непостоянными как во времени, так и в пространстве. Про характерные времена изменений этих образований можно судить по аналогии

с Солнцем, однако это представляется крайне рискованным, учитывая слишком разные масштабы исследуемых явлений. Точность определения периодов во многом зависит от того, как соотносятся характерные времена изменений к периоду вращения и длительности наблюдений. Точность зависит также от неизвестного закона дифференциального вращения звезды и наклона оси вращения. Все это приводит к тому, что очень трудно выявить точные периоды вращения. Учитывая вышесказанное, правильнее будет воспринимать приведенные в табл.1 периоды P_r в прямом смысле, т.е. как наблюдаемые периоды изменения яркости или как вероятные периоды осевых вращений.

В данной работе исследованы звезды, показавшие более 20-ти супервспышек и только у звезды KIC 10422252 выявлен период частоты супервспышек, совпадающий с вероятным периодом осевого вращения (5.2 дня). Логарифм отношения правдоподобий получился равным $\ln L_{H_1/H_0} \approx 3.3$.

На рис.5 приводится функция частоты супервспышек звезды KIC

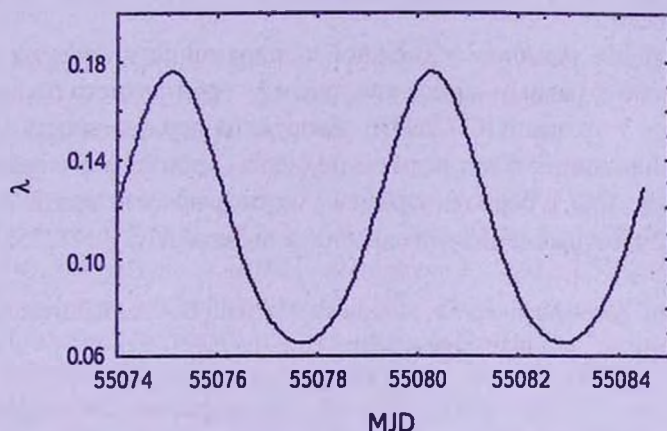


Рис.5. Функция частоты супервспышек звезды KIC 10422252.

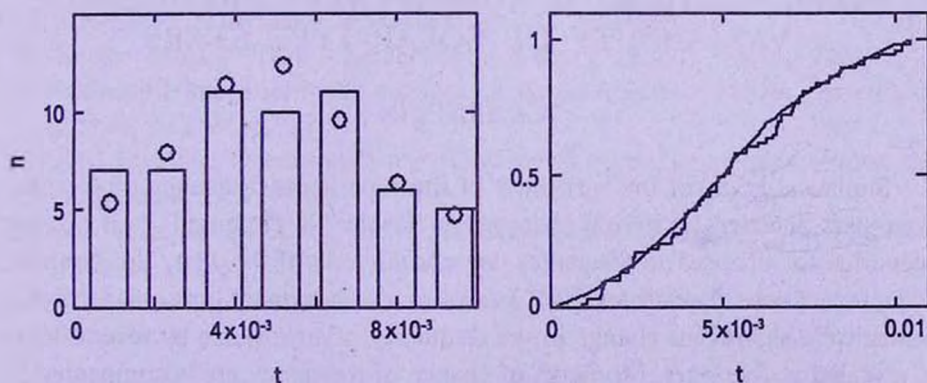


Рис.6. Наблюдаемое и теоретическое (кружки) распределения супервспышек звезды KIC 10422252 по фазам периодической функции (слева). Справа соответствующие кумулятивные распределения.

10422252. Оси ординат и абсцисс те же, что и на рис.3. На рис.6 приводятся наблюдаемое распределение супервспышек по фазам периодической функции, с теоретически вычисленным распределением (обозначены кружками), а также соответствующие кумулятивные функции распределения. Наблюдается хорошее соответствие, что подтверждается также критерием χ^2 .

5. Заключение. В результате статистического исследования переменности частоты супервспышек 46-ти звезд солнечного типа, обнаруженных орбитальной обсерваторией "Кеплер", у звезд KIC 4742436, KIC 7174505, KIC 9150539, KIC 12003808, KIC 11235995 обнаружены статистически значимые изменения частот супервспышек в несколько раз. Еще 4 звезды заподозрены в наличии переменности частоты.

Обнаруженные моменты изменения частоты сопровождаются резкими изменениями в поведении яркости звезды вне вспышек. Яркость звезды на короткое время становится иррегулярной, со значительным уменьшением амплитуды яркости.

Проверено также наличие возможной периодичности частоты супервспышек с периодом, равным известному периоду орбитального или осевого вращения звезды. У звезды KIC 7264976 обнаружена периодичность частоты с периодом, совпадающим с возможным периодом орбитального вращения. Периодичность частоты, с периодом, равным периоду яркости звезды (вероятный период осевого вращения), выявлена у звезды KIC 10422252.

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

INVESTIGATION OF SUPERFLARES FREQUENCY VARIABILITY OF SOLAR-TYPE STARS

А.А.АКОПЯН

Statistical study of the variability of the superflares frequency of 46 solar-type stars detected by orbital observatory "Kepler" is presented. Two possible scenarios for changes in frequency are considered. In the first, the temporal sequence of superflares is regarded as a piecewise stationary poissonian process. Statistically significant change in the frequency of superflares by several times is revealed at five stars. Moments of change of frequency are accompanied by sudden changes in the behavior of the star's brightness. Brightness of a star for a short time becomes irregular, with a significant decrease in the amplitude

of brightness. In the second scenario, the temporal sequence of superflares regarded as a Poisson process with the periodic parameter (frequency superflares). Under the second scenario, the availability of possible periodicity superflares frequency with a period equal to period of orbital or axial rotation of the star is examined. It is shown, that the frequency of superflares of star KIC 7264976 has a period of 134 days, which coincides with a possible period of orbital rotation. Frequency with a period equal to the possible period of axial rotation is revealed in case of star KIC 10422252.

Key words: *superflare: flare frequency: variability*

ЛИТЕРАТУРА

1. B.Schaefer, Nature, 485, 456, 2012.
2. B.Schaefer, Astrophys. J., 337, 927, 1989.
3. B.Schaefer, Astrophys. J., 366, L39-L42, 1991.
4. B.Schaefer, J.R.King, C.P.Deliyannis, Astrophys. J., 529, 1026, 2000.
5. E.P.Rubenstein, B.Schaefer, Astrophys. J., 529, 1031, 2000.
6. M.Cuntz, S.H.Saar, Z.E.Musielak, Astrophys. J., 533, L151-L154, 2000.
7. W.-H.Ip, A.Kopp, J.-H.Hu, Astrophys. J., 602, L53-L56, 2004.
8. А.А.Акопян, Астрофизика, 42, 555, 1999.
9. А.А.Акопян, Астрофизика, 44, 131, 2001.
10. А.А.Акопян, Л.Саргсян, Астрофизика, 45, 29, 2002.
11. А.А.Акопян, Астрофизика, 56, 537, 2013.
12. H.Maehara, T.Shibayama, S.Notsu et al., Nature, 485, 478, 2012.
13. T.Shibayama, H.Maehara, S.Notsu et al., Astrophys. J. Suppl. Ser., 209, 5, 2013.
14. S.Notsu, T.Shibayama, H.Maehara et al., Astrophys. J., 771, 127, 2013.
15. Kepler Mission Team, Kepler Input Catalog (KIC), NASA, 2009.
16. "Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем", сб. статей, М., Мир, 1989.
17. Ю.А.Кутоянц, Оценивание параметров случайных процессов, Изд-во АН Армянской ССР, 1980.
18. D.J.Daley, D.Vere-Jones, An Introduction to the Theory of Point Processes, Springer-Verlag, 2003.
19. R.Wichmann, B.Fuhrmeister, U.Wolter, E.Nagel, Astron. Astrophys., 567, A36, 2014.

