

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ЧАСТОТЫ ВСПЫШЕК АКТИВНЫХ ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЕЗД ОБНАРУЖЕННЫХ TESS

А.А.АКОПЯН

Поступила 8 ноября 2023

По данным орбитальной обсерватории TESS проведено исследование наиболее активных вспыхивающих звезд, показавших по 100 и более вспышек за период с июля 2018 по октябрь 2020гг. Основными направлениями исследования были: а) анализ кривых блеска, определение периодов осевых вращений, выявление физических особенностей у отдельных звезд, б) определение параметров периодической/циклической переменности частоты вспышек вспыхивающих звезд, обусловленной осевыми/орбитальными вращениями. Были получены соответствующие периоды функции частоты вспышек и проведено сравнение с периодами вращения звезд. Периоды функций частоты вспышек оказались близкими к периодам осевых вращений звезд. Построены теоретические распределения вспышек по фазам, которые сравнены с аналогичным наблюдаемым распределением вспышек при данном периоде. Для всех без исключения звезд сравнение с помощью критерия χ^2 свидетельствует в пользу периодичности частоты вспышек. Предположено, что распределение пятен по долготе вспыхивающих звезд можно представить угловым распределением фон Мизеса, параметры которой определяются через соответствующие параметры функции частоты вспышек. Подробно обсуждена двойственность звезды CD-56 1032.

Ключевые слова: *вспыхивающие звезды; частота вспышек; периодическая переменность; двойная звезда CD-56 1032; распределение фон Мизеса*

1. Введение. За последнее время благодаря космическим телескопам "Кеплер" и TESS, предназначенных для поиска и обнаружения экзопланет, резко возрос интерес к вспыхивающим звездам и родственным объектам. Уникальные наблюдательные характеристики этих телескопов позволили получить совершенно новые по своим характеристикам данные о переменных звездах и переменных явлениях почти всех типов, в том числе о вспыхивающих звездах и вспышечных явлениях. В случае вспыхивающих звезд эти данные позволяют: а) получить кривую блеска на протяжении достаточно долгого времени, что в принципе позволяет исследовать изменение вспышечной активности в цикле звездной активности (аналогично циклу солнечной активности), б) оценить период вращения, запятненность звезд и, соответственно, размеры и энергетические характеристики активных областей, в) обнаружить дифференциальное вращение, миграцию активных областей и

исследовать их взаимосвязь со вспышечной активностью, г) исследовать периодическую/циклическую переменность наблюдаемой частоты вспышек активных вспыхивающих звезд.

Периодическая переменность наблюдаемой частоты вспышек может быть обусловлена реальным изменением вспышечной активности звезды в течение цикла звездной активности и/или эффектами, связанными: а) с изменением видимости активных областей вспышек из-за осевого или орбитального вращения звезды, б) неравномерным распределением яркости на поверхности звезды.

Исходя из этого можно предположить, что частота вспышек вследствие периодического осевого или орбитального вращения звезды модулируется с периодом, равным периоду осевого или орбитального вращения. В данной работе проверено наличие возможной периодичности частоты вспышек наиболее активных из недавно опубликованного списка [1] вспыхивающих звезд, обнаруженных обсерваторией TESS.

Ранее такая работа была выполнена для вспыхивающих звезд, обнаруженных обсерваторией "Кеплер" [2]. Данные обсерватории TESS позволяют уверенно обнаружить вспышки с продолжительностью ~ 10 мин и больше, в то время как для обсерватории "Кеплер" продолжительность обнаруженных вспышек на порядок выше. В результате, при прочих равных условиях, число вспышек зарегистрированных обсерваторией TESS, больше, особенно если учитывать, что наблюдения TESS охватывают почти всю небесную сферу с лучшим пространственным разрешением.

В работе [1] был проведен поиск и подробный статистический анализ характеристик звездных вспышек, зарегистрированных TESS с июля 2018 по октябрь 2020гг. Было обнаружено 60810 вспышек на 13478 звездах из данных секторов наблюдений 1-30 TESS и определены параметры вспышек.

Из этих звезд для данной работы были отобраны наиболее часто (100 и более зарегистрированных вспышек) вспыхнувшие звезды. В табл.1 приведены: название звезд по каталогу TIC (TESS Input Catalogue), количество вспышек n , координаты RA, DE, расстояние по каталогу Gaia DR3, собственные движения pmRA, pmDE в м.у.с/г (mas/y) по каталогу Gaia DR3, обозначение звезды в базе SIMBAD. Как видно, кроме близких по своему типу к обычным вспыхивающим звездам, в список попали также две звезды с рентгеновским излучением, одна звезда с EUV излучением и даже кандидат в классическую Новую звезду.

Для выполнения поставленных задач анализированы кривые блеска этих звезд, в частности, определены периоды их осевых вращений.

Таблица 1

СПИСОК ИССЛЕДОВАННЫХ ЗВЕЗД

	TIC	<i>n</i>	RA	DE	D, пк	pmRA	pmDE	Обозначение в базе SIMBAD
1	25118964	103	61.93	-68.419762	61.05	58.64	22.39	2MASS J04074372-6825111 - Eruptive Variable
2	141807839	122	92.87	-72.227429	56.89	19.41	63.16	AL 442 - Double or Multiple Star
3	141914082	119	94.62	-72.044877	39.22	-7.91	74.29	V* AO Men - Eruptive Variable
4	141975926	123	95.92	-75.075775				2MASS J06234024-7504327, Low-mass Star
5	150359500	231	96.48	-60.057571		-25.39	110.75	EUVE J0625-60.0 - Eruptive Variable
6	167344043	165	98.67	-69.885098	71.82	18.04	37.88	HD 47875 - Eruptive Variable
7	220432563	114	73.43	-58.606877	30.22	101.11	69.07	2MASS J04534379-5836247 - Eruptive Variable
8	220433363	109	73.38	-55.8603		126.12	76.86	CD-56 1032A - Eruptive Variable
9	220433364	110	73.38	-55.8588		146.27	69.58	CD-56 1032B - Eruptive Variable
10	220473309	166	75.2	-57.2571	26.88	35.20	74.14	CD-57 1054 - Eruptive Variable
11	233745344	104	278.53	64.640801	48.71	-0.73	55.70	RX J1834.1+6438 - Star
12	236778955	104	282.89	57.75762	91.31	30.29	65.36	ASAS J185134+5745.5 - High Proper Motion Star
13	272232401	215	117.3	-76.7018		-101.0	-193.26	L 34-26 - Low-mass Star
14	277298771	113	84.57	-69.392268	52.89	65.35	107.02	[W60] A68 - Low-mass Star
15	358176584	122	107.17	-76.706532		-99.83	106.56	UCAC4 067-005738 - Eruptive Variable
16	359313701	120	268.01	56.607758	28.71	-47.85	56.04	RX J1752.0+5636 - High Proper Motion Star
17	364588501	192	85.4	-76.072828	110.34	37.07	99.53	HD 39150 - Eruptive Variable
18	373431012	112	81.01	-71.159571	56.11	27.04	61.76	HA 120-S 162 - Classical Nova Candidate
19	382258517	122	82.58	-53.9801		47.24	645.45	L 234-26 C - High Proper Motion Star
20	394030788	112	282.2	80.673928	93.78	19.161	70.944	TYC 4595-107-1 - High Proper Motion Star
21	441734910	111	258.25	73.934726	32.112	93.318	-30.333	Eruptive Variable

2. *Определение периодов осевого вращения.* У девяти из отобранных звезд, в астрономической базе SIMBAD отсутствовали данные об их переменности. С целью определения периодов осевого вращения этих звезд и обеспечения однородности используемых данных, для всех звезд с помощью программных средств Python [3], был проведен периодограммный анализ кривых блеска из базы данных TESS. При этом использовались данные SPOC (Science Processing Operations Center) с двухминутной экспозицией. Периоды осевых вращений звезд были определены с помощью двух взаимодополняющих алгоритмов - BLS (Box-fitting Least Squares) [4] и Ломба-Скаргла (ЛС) [5,6].

BLS - алгоритм предназначен, в частности, для поиска периодических транзитов внесолнечных планет. Он выполняет поиск сигналов, характеризующихся периодическим чередованием двух дискретных уровней, при этом на более низком уровне ("плато") затрачивается гораздо меньше времени. Использование алгоритма BLS в настоящей работе оправдано определенным сходством транзита планеты/планет с перемещением звездных пятен в поле зрения наблюдателя из-за вращения звезды, т.е. в данной задаче "транзитирующими" объектами являются звездные пятна, которые непосредственно связаны с активными областями.

Таблица 2

ВЫЧИСЛЕННЫЕ ПЕРИОДЫ ИССЛЕДОВАННЫХ ЗВЕЗД

	TIC	Период, ЛС	Период, BLS	Период, SIMBAD
1	25118964	1.0177	1.0179/0.1375	1.0187
2	141807839	0.8467	0.8468/0.2126	0.8481
3	141914082	2.6672	2.6503/0.1055	2.6730
4	141975926	1.1500	1.1542/0.2686	-
5	150359500	1.0332	1.0336/0.1451	1.033
6	167344043	2.8852	2.8909/0.0796	2.93330, 2.99380, 3.0000
7	220432563	1.1384	1.1384/0.2283	-
8	220433363	0.4279	0.4276/0.1500	0.84891, 0.98, 1.496
9	220433364	0.8551	0.8551/0.1600	0.84891, 0.8543, 4.14
10	220473309	8.8093	8.7439/0.0739	8.6742, 8.729000, 8.60
11	233745344	5.8800	6.1459/0.1790	-
12	236778955	1.0231	1.0237/0.2442	1.023800
13	272232401	2.8147	2.8320/0.1024	2.83050, 2.8330, 2.827000
14	277298771	1.1825	1.1829/0.1860	1.1798
15	358176584	0.9059	0.9045/0.1216	-
16	359313701	1.7892	1.8037/0.1940	-
17	364588501	2.2137	2.2156 /0.1128	2.2800, 1.726000
18	373431012	0.5004	0.4997/0.1601	-
19	382258517	3.1251	3.0818/0.1590	-
20	394030788	3.3221	3.3360/0.1319	-
21	441734910	1.3594	1.3582/0.1399	-

Алгоритм ЛС основан на подборе синусоид для выборок неравномерно распределенных данных с помощью метода наименьших квадратов.

Полученные значения периодов приведены в табл.2. При использовании алгоритма BLS был определен не только период вращения звезды, но и продолжительность P_l пребывания звезды на нижнем дискретном уровне светимости. Очевидно, что эта величина связана с распределением пятен на поверхности звезды и может служить мерой компактности (концентрации) этого распределения.

В табл.2 рядом с периодом BLS приводится отношение P_l/P . В качестве примера на рис.1 проиллюстрирована процедура определения для звезды TIC 359313701, где в левом верхнем углу периодограмма с выделенным вертикальной линией периодом вращения, справа от нее - фазовая кривая блеска звезды, в средней части рисунка - кривая блеска, под которой виден подвижной бар (отмечен стрелкой), с помощью которой на фазовой диаграмме корректируется значение P_l . В данном случае $P_l = 0.35$, $P_l/P = 0.194$.

Как видно из табл.2, существенного отличия между периодами полученными двумя способами, нет.

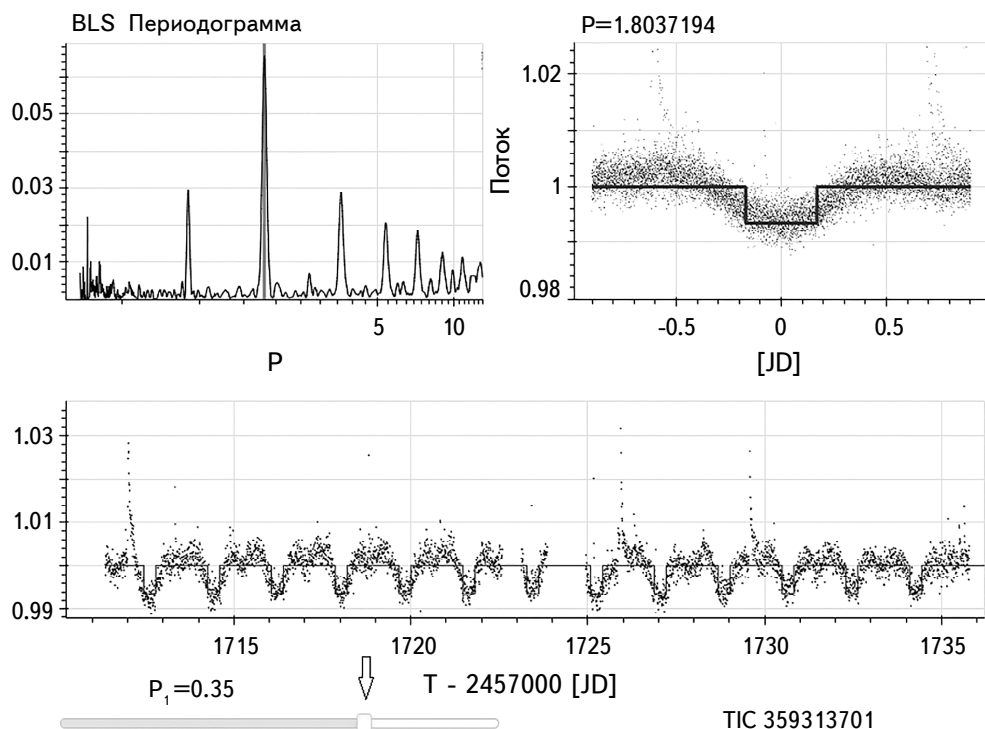


Рис.1. Иллюстрация процедуры определения P_e .

Двойная звезда CD-56 1032. Среди звезд из списка есть двойная звезда CD-56 1032 (TIC 220433363, TIC 220433364), где кривые блеска компонентов (полученные TESS) полностью совпадают, что свидетельствует о том, что TESS регистрировала суммарное излучение двух компонентов. Это хорошо заметно на рис.2, где показано поле детектора излучения, в центра которого видны компоненты двойной звезды.

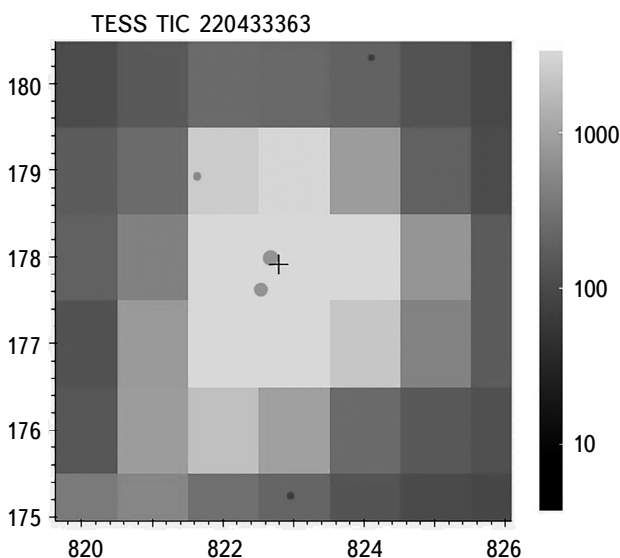


Рис.2. Поле детектора излучения. В центре, около креста компоненты двойной звезды.

Анализ показал, что суммарную кривую блеска можно хорошо аппроксимировать суммой двух синусоид $A_i(1 + \sin(\omega_i t + \vartheta_i)) + b_i$, $i = 1, 2$, с приведенными в табл.2 периодами, которые явно выделяются на общей для компонентов периодограмме (рис.3). При этом амплитуда блеска CD-56 1032A (TIC 220433363) должна быть примерно на ~ 1.2 раза больше. На рис.4 приведены расчетные кривые блеска отдельных компонентов и двойной системы в целом.

Можно предположить, что звезда CD-56 1032 является системой из двух вращательных переменных звезд, периоды которых находятся в резонансе 1:2.

3. Определение периодической функции частоты вспышек.

3.1. Используемый подход. В работе базовым является предположение о случайном и независимом характере вспышек, что позволяет рассмотреть последовательность вспышек звезды как случайный пуассоновский процесс [7]. Поскольку в данной работе предполагается, что частота вспышек модулируется периодическим процессом - осевым вращением звезды, то частоту

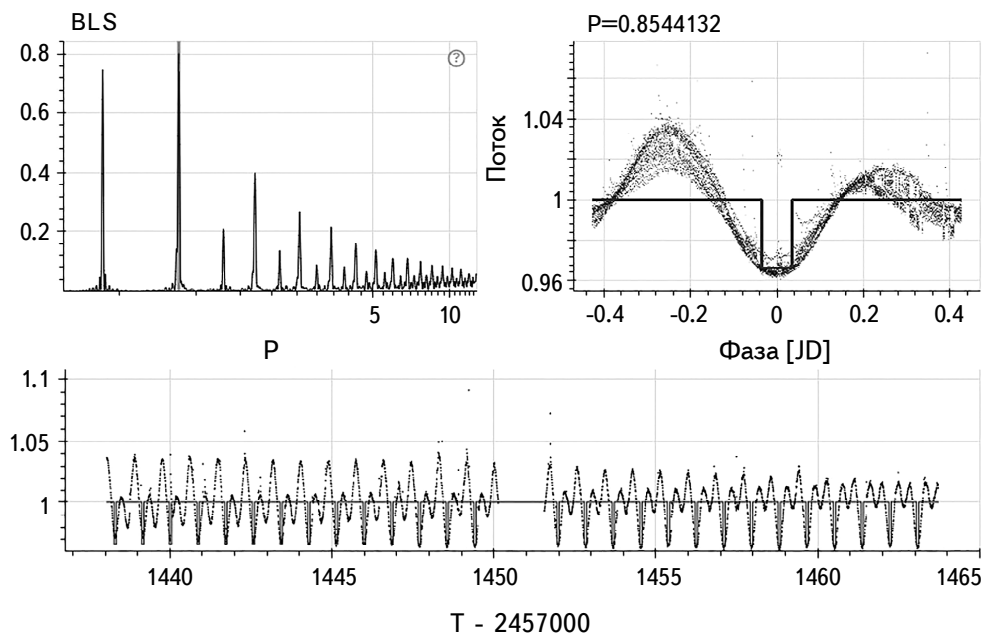


Рис.3. Периодограмма, фазовая кривая и кривая блеска двойной звезды CD-56 1032.

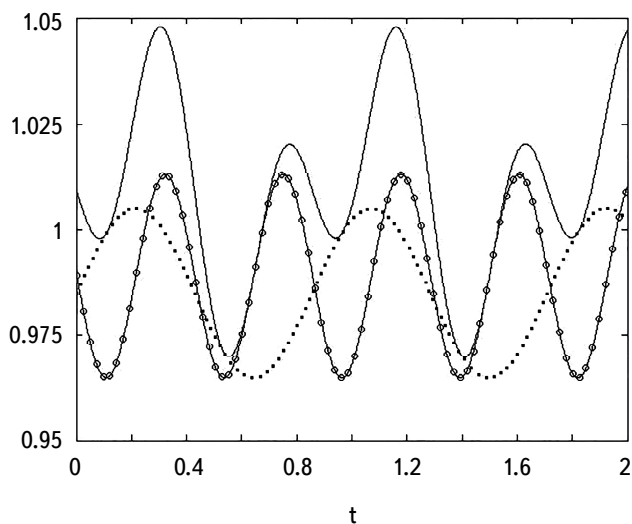


Рис.4. Расчетные кривые блеска первой звезды (линия с кружочками), второй звезды (точки) и системы в целом (сплошная линия). Параметры (A_p , ω_i , ϑ_i , b_i) соответственно равны для первой звезды - (0.024, 14.684, π , 0.4825), для второй - (0.02, 7.35, 0.0, 0.4825).

вспышек целесообразно представить в виде периодической функции от времени, а сам процесс рассмотреть как пуассоновский процесс с периодическим параметром. В качестве периодической функции частоты вспышек/параметра

пуассоновского распределения предлагается использовать 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 k , ω_0 , ϑ , λ - постоянные, а $I_0(k) = \int_0^{2\pi} \exp[k \sin(u)] du$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка первого рода. Выбор такой функции обусловлен тем, что в зависимости от значения k обеспечивается разнообразие видов периодической функции.

Если рассмотреть в качестве статистического события реализацию n вспышек в интервале времени $(0, T)$, то функция правдоподобия данного события при пуассоновском процессе с периодическим параметром представляется в виде:

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

где t_i - моменты вспышек.

Из постановки задачи следует, что значение величины ω_0 должно быть равно или близко к значению циклической частоты осевого вращения звезды, которая считается заданной. В данной задаче в качестве исходных используются значения ω_0 , определенные в предыдущем разделе в результате периодограммного анализа кривых блеска звезд.

Максимизируя функцию правдоподобия [8,9], для заданного значения ω_0 оценки максимального правдоподобия остальных параметров можно получить:

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

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

При этом интервал времени T должен быть кратным искомому периоду $2\pi/\omega_0$, а из множества корней второго уравнения (1) $\hat{\vartheta}$ выбирается по следующему правилу:

$$\hat{\vartheta} = \begin{cases} \hat{\vartheta}, & \text{если } \operatorname{sgn}\left(\sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i)\right) = \operatorname{sgn}\left(\sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i)\right) \\ \hat{\vartheta} + 2\pi, & \text{если } \hat{\vartheta} < 0 \text{ и } \operatorname{sgn}\left(\sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i)\right) = \operatorname{sgn}\left(\sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i)\right) \\ \hat{\vartheta} + \pi, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Заданием ω_0 и определением параметров $\hat{\lambda}$, $\hat{\vartheta}$, $\hat{k}$ функция $\lambda(t)$ определяется полностью. Однако неизбежные ошибки при получении и обработки данных, неопределенности, связанные с статистическим характером задачи, а также физические причины (дифференциальное вращение звезд, миграция

пятен), приводящие к вариациям наблюдаемой частоты вращения, неизбежно приводят к необходимости задаваться не точечным значением ω_0 , а сравнительно узким интервалом значений циклических частот вокруг значения ω_0 . Таким образом, задача сводится к необходимости определить, варьируя значение циклической частоты внутри заданного интервала, то значение ω_0 , которое дает правдоподобную периодическую функцию частоты вспышек и обеспечивает лучшее согласие с наблюдательными данными.

В данной работе мерой правдоподобности является логарифм отношения функций правдоподобий двух пуассоновских процессов: с периодическим параметром (гипотеза H_1) и стационарным (гипотеза H_0), соответственно:

$$\ln L_{H_1/H_0} = k \sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i + \vartheta) - n \ln(I_0(k)).$$

Согласие с наблюдательными данными проверяется сравнением теоретического распределения вспышек по фазам найденной периодической функции с соответствующим наблюдаемым распределением с помощью критерия χ^2 .

Оценку максимального правдоподобия $\omega_0 = \hat{\omega}_0$ 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 решение уравнения (2) неоднозначно и зависит от параметра ϑ . Поэтому, 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 соответствие с наблюдательными данными.

Этот подход был использован ранее в [2,10] для исследования вспыхивающих звезд и звезд солнечного типа с супервспышками.

3.2. Полученные результаты. Применяя предложенный способ, были определены вероятные периодические функции частоты вспышек для всех звезд. В табл.3 приведены: период функции частоты вспышек P_f , параметры функции k , ϑ , отношение максимума функции к минимуму, логарифм отношения правдоподобий $\ln L_{H_1/H_0}$, значение критерия χ^2 . Из данных табл.1 и табл.3 следует, что примерно для 50% звезд, периоды частоты вспышек P_f и осевого вращения звезды P отличаются меньше чем на 2%, максимальное отличие меньше 10%. В табл.4 представлена более подробная статистика отношения P_f/P .

С помощью полученных функций частоты вспышек, построены теоретические распределения вспышек по фазам, которые сравнены с аналогичным наблюдаемым распределением вспышек при данном периоде. Для всех без исключения звезд это сравнение (с помощью критерия χ^2) свидетельствует в пользу периодичности частоты вспышек.

Таблица 3

ПАРАМЕТРЫ ФУНКЦИИ ЧАСТОТЫ ВСПЫШЕК

	ТІС	P_f	k	ϑ	$\lambda_{\max}/\lambda_{\min}$	$\ln L_{H_1}/H_0$	χ^2
1	25118964	1.0077	0.489	2.075	2.661	5.901	3.155
2	141807839	0.8131	0.324	1.619	1.912	3.142	1.533
3	141914082	2.6545	0.318	3.991	1.889	3.026	1.890
4	141975926	1.1546	0.508	5.579	2.764	7.578	1.131
5	150359500	1.0571	0.398	0.342	2.215	8.870	0.952
6	167344043	2.6624	0.393	2.330	2.191	6.167	4.385
7	220432563	1.1344	0.540	5.396	2.925	7.788	2.834
8	220433363	0.3977	0.392	3.355	2.189	4.067	4.115
9	220433364	0.8423	0.390	3.921	2.181	4.027	1.306
10	220473309	8.2785	0.223	1.539	1.563	2.050	5.357
11	233745344	6.1912	0.261	1.190	1.684	1.743	0.946
12	236778955	0.9956	0.481	3.873	2.619	2.287	5.775
13	272232401	2.5612	0.226	5.171	1.572	2.722	1.568
14	277298771	1.1563	0.434	5.988	2.382	4.776	4.720
15	358176584	0.9208	0.326	2.487	1.920	3.207	2.475
16	359313701	1.7645	0.428	1.244	2.351	5.301	1.985
17	364588501	2.2523	0.274	0.131	1.729	3.548	2.641
18	373431012	0.5097	0.332	4.579	1.941	3.016	2.185
19	382258517	3.2953	0.363	2.238	2.066	3.916	2.470
20	394030788	3.2014	0.324	5.418	1.910	2.876	2.719
21	441734910	1.3591	0.461	1.376	2.513	5.665	1.014

Таблица 4

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТНОШЕНИЯ

Характеристика	Значение
Среднее	1.0148
Медиана	1.0100
Среднеквадратичное отклонение	0.0410
Минимум	0.9484
Максимум	1.0989
Квантиль 25%	0.9838
Квантиль 75%	1.0377

Очевидно, что пуассоновский процесс с малой амплитудой периодической функции сравнительно мало будет отличаться от стационарного процесса и приведет к малым значениям $\ln L_{H_1}/H_0$. Малая амплитуда может быть следствием того, что либо предположение о периодичности не имеет места, либо (в рамках принятого в статье подхода) области вспышечной активности более или менее равномерно распределены по поверхности звезды. Естественно,

возникает вопрос, при каких значениях $\ln L_{H_1/H_0}$ можно уверенно отвергнуть гипотезу о стационарности? Очевидно, что пуассоновский процесс с малой амплитудой периодического параметра сравнительно мало будет отличаться от стационарного процесса и приведет к малым значениям $\ln L_{H_1/H_0}$ (см. рис.4). Малая амплитуда может быть следствием того, что либо предположение о периодичности не имеет места, либо (в рамках принятого в статье подхода) области вспышечной активности более или менее равномерно распределены по поверхности звезды.

В работе [2] было установлено, что гипотезу о стационарности можно уверенно отвергнуть, если логарифм отношения правдоподобий $\ln L_{H_1/H_0} < 3$. К этому результату привело применение критерия сравнения двух пуассоновских процессов - периодического с функцией $\lambda(t)$ и стационарного, приведенного в работе [11], согласно которого стационарность не отвергается,

если
$$\left[\left(\sum_{i=1}^n \sin(\omega_0 t_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \cos(\omega_0 t_i) \right)^2 \right] / 3n \leq 1.$$

Со значением $\ln L_{H_1/H_0} < 3$ оказались 5 звезд (на рис.5 отмечены номерами указанными в табл.1.), которые на рис.5 находятся ниже штриховой линии. Однако и в этих случаях наблюдательные данные хорошо согласуются с предположением о периодической частоте вспышек.

Это видно на рис.6, где приводятся функция частоты вспышки в условных

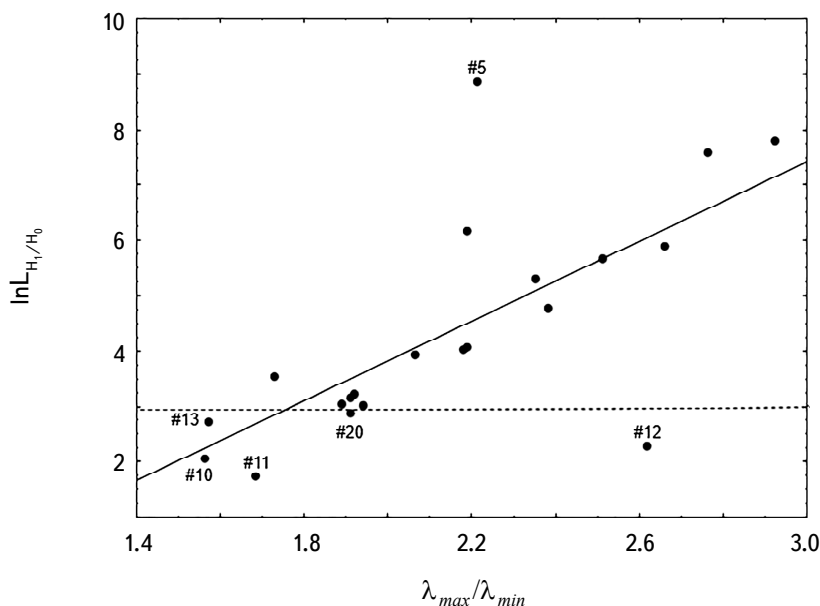


Рис.5. Зависимость отношения правдоподобий $\ln L_{H_1/H_0}$ от $\lambda_{max}/\lambda_{min}$.

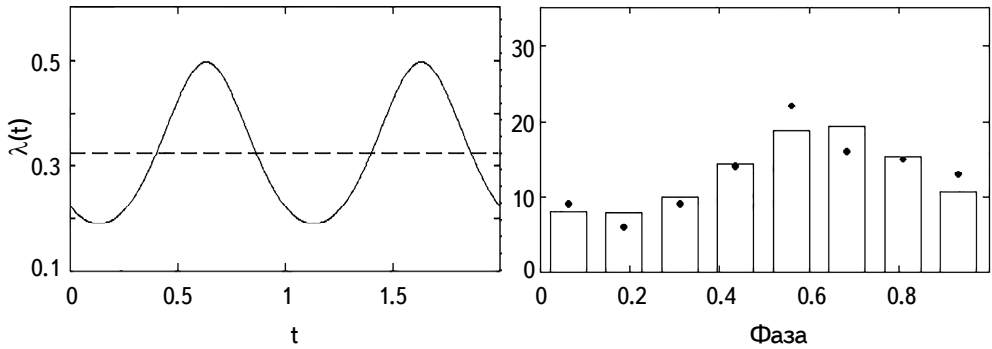


Рис.6. Функция частоты вспышки $\lambda(t)$ в условных единицах (левая панель) и сложенные в единый период теоретические (бары) и наблюдаемые (точки) распределения вспышек по фазам периодической функции звезды TIC 236778955 (правая панель).

единицах относительно среднего значения (штрих-линия) и сложенные в единый период теоретические и наблюдаемые распределения вспышек по фазам периодической функции звезды TIC 236778955 (#12 на рис.5).

На рис.5 положительно, с точки зрения применяемого в статье подхода, выделяется звезда с EUV излучением TIC 150359500 (#5 на рис.5). На рис.7 приведены результаты относительно TIC 150359500. Звезда с EUV излучением, скорее всего, отличается от обычных вспыхивающих звезд и может стать предметом дальнейших исследований. Не исключено, что природа переменности блеска и механизм вспышек у TIC 150359500 могут быть совершенно разными.

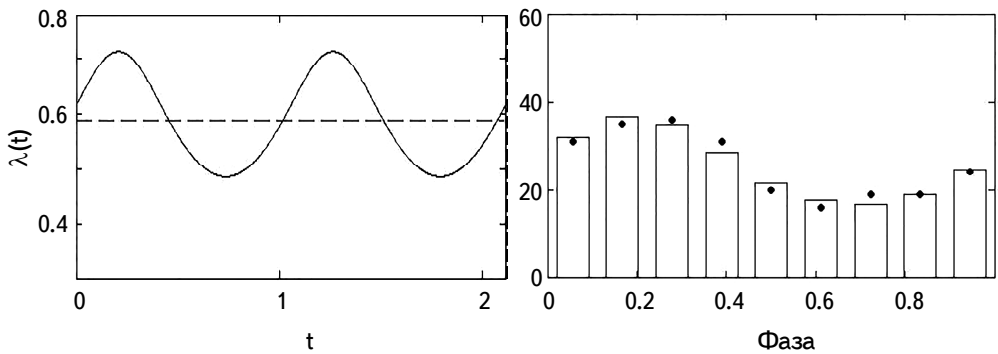


Рис.7. Функция частоты вспышки $\lambda(t)$ в условных единицах (левая панель) и сложенные в единый период теоретические (бары) и наблюдаемые (точки) распределения вспышек по фазам периодической функции звезды TIC 150359500 (правая панель).

Сказанное в равной мере относится и к двум звездам с рентгеновским излучением (TIC 233745344, TIC 359313701), а также LHA 120-S 162 - кандидату в Новую звезду.

3.3. О связи $P_l/P \sim k$. Существование зависимости $P_l/P \sim k$ можно заподозрить исходя из следующих соображений.

Во-первых, обе величины представляют собой своеобразную меру компактности /концентрации распределения связанных с ними физических величин. В случае P_l/P это компактность распределения звездных пятен и групп пятен, ответственных за периодическое изменение блеска звезды, а в случае k - мера концентрации частот вокруг моды функции частоты вспышек, которая при больших k стремится к δ -функции).

Во-вторых, согласно [12] размер звездных пятен положительно коррелирует со вспышечной активностью. В данной работе такая корреляция должна проявляться как зависимость $\lambda(t) \sim A(t)$, где $A(t)$ - величина запятненности проекции полусферы звезды обращенной к наблюдателю в момент времени t . Эта же величина, совместно с функцией пространственного распределения пятен на поверхности звезды, по существу определяет периодическую кривую блеска.

Из вышесказанного неизбежно следует, что величины P_l/P , k должны коррелировать. Действительно, из результатов, полученных в предыдущих разделах (см. табл.2, 3), следует существование положительной значимой корреляции $P_l/P \sim k$ (рис.8).

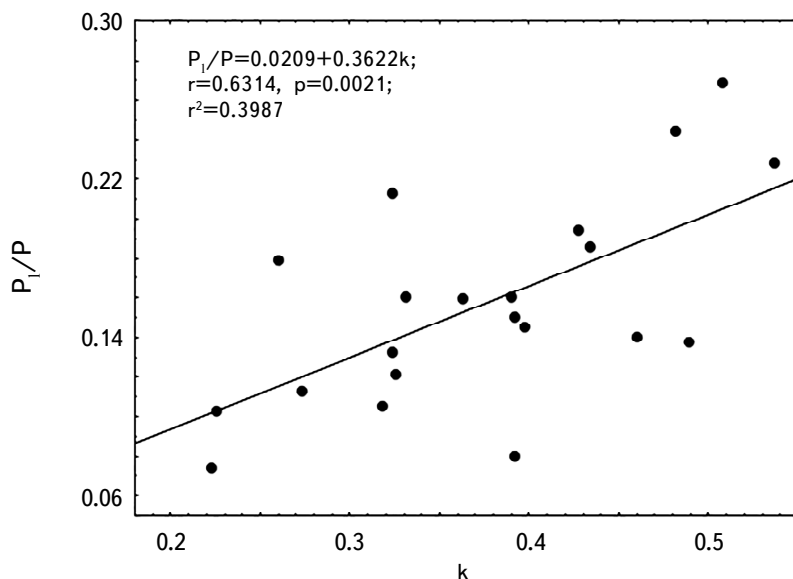
Необходимо отметить, что продолжительность P_l меньше временного интервала от момента полного восхода (для земного наблюдателя) доминирующей группы пятен до начала ее заката. Это следствие совместного действия двух краевых эффектов, геометрического - уменьшение видимой площади поверхности пятен на краях звезды из-за проецирования полусферы на плоскость и физического - из-за потемнения к краю диска звезды. Эти эффекты влияют также на частоту регистрируемых вспышек.

Полученные результаты подсказывают о возможном пути дальнейших исследований. Нетрудно заметить, что функция $\lambda(t)$, предложенная в качестве периодической функции частоты вспышек, по существу совпадает с функцией плотности распределения фон Мизеса (известное также как круговое нормальное распределение или распределение Тихонова), широко применяемое при статистической обработке угловых (круговых) данных:

$$M(x|\mu, k) = \frac{\exp[k \cos(x - \mu)]}{2\pi I_0(k)},$$

где μ - среднее (одновременно мода и медиана) распределения, k - мера концентрации, $1/k$ - дисперсия, $1 - I_1(k)/I_0(k)$ - круговая дисперсия. Распределение фон Мизеса является хорошим приближением к намотанному нормальному распределению (круговой аналог нормального распределения).

Учитывая, что запятненность $A(t)$ есть угловая величина, а функция

Рис.8. Зависимость $P_i/P \sim k$.

частоты вспышек, схожая с функцией плотности распределения фон Мизеса, положительно коррелирует с $A(t)$, можно предположить, что распределение пятен по долготе звезды связан с угловым распределением фон Мизеса, параметры которой выражаются через соответствующие параметры функции частоты вспышек. Предварительные результаты анализа зависимости $P_i/P \sim k$ в рамках такого подхода обнадеживают.

4. Заключение. Используя данные орбитальной обсерватории TESS, проведено исследование наиболее активных вспыхивающих звезд, показавших по 100 и более вспышек за период с июля 2018 по октябрь 2020гг.

В результате был проведен подробный анализ кривых блеска всех звезд с целью выявления физических особенностей у отдельных звезд. Лишь небольшая часть этого анализа нашла свое отражение в данной работе.

Были определены периоды осевых вращений звезд, причем для 9-ти звезд впервые. При этом использовались два взаимодополняющих алгоритма - Ломба-Скаргла и BLS. С помощью BLS для всех звезд была определена продолжительность "плато" глубокого минимума, которая содержит определенную информацию о компактности распределения звездных пятен вдоль долготы звезды.

Вычисленные периоды осевых вращений были использованы для определения параметров периодической/циклической переменности частоты вспышек вспыхивающих звезд. Получены соответствующие периодические функции частоты вспышек. Периоды функций частоты вспышек оказались близкими к периодам осевых вращений звезд. Построены теоретические

распределения вспышек по фазам, которые сравнены с аналогичным наблюдаемым распределением вспышек при данном периоде. Для всех без исключения звезд это сравнение (с помощью критерия χ^2) свидетельствует в пользу периодичности частоты вспышек. Получена зависимость между k параметром периодических функций частоты вспышек и относительными продолжительностями "плато" глубокого минимума звезд.

Предположено, что схожесть периодической функции частоты вспышек с функцией углового распределения фон Мизеса скорее всего не случайна, что дает умеренную надежду на то, что распределение пятен по долготе вспыхивающих звезд представляется угловым распределением фон Мизеса, параметры которой можно определить через соответствующие параметры функции частоты вспышек.

Подробно обсуждена двойственность звезды CD-56 1032. Определены вероятные периоды и амплитуды отдельных компонентов звезды.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.Амбарцумяна
НАН Армении, e-mail: aakopian57@gmail.com

PERIODICITY OF FLARE FREQUENCY OF ACTIVE FLARE STARS DETECTED BY TESS

A.A.AKOPIAN

TESS data was used to study active flare stars, finding 100 or more flares between July 2018 and October 2020. The main objectives of this study were analyzing light curves, determining axial rotation periods, and identifying the physical features of flare stars. The corresponding periodic functions of the flare frequency are derived and checked for possible periodicity matching the star's rotation period. The flare frequency functions correlated closely with the stars' axial rotation periods. Theoretical phase distributions of flares are constructed and compared with a similar observed distribution of flares for a given period. For all stars without exception, this comparison (using the χ^2 criterion) argues in favour of the periodicity of the flare frequency. It is assumed that the distribution of spots along the longitude of flare stars can be represented using by the von Mises angular distribution, the parameters of which are determined through the corresponding parameters of the flash frequency function. The binarity of the star CD-561032 is discussed in detail.

Keywords: *flare stars: frequency of flares: periodic variability: binary star CD-561032: von Mises distribution*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Z.Yang, L.Zhang, G.Meng et al.*, *Astron. Astrophys.*, **669**, A15, 2023.
2. *A.A.Akopian*, *Astrophysics*, **62**, 518, 2019.
3. *Lightkurve Collaboration, J.V. de M.Cardoso, C.Hedges, M.Gully-Santiago et al.*, *Astrophysics Source Code Library*. ascl:1812.013, 2018.
4. *G.Kovacs, S.Zucker, T.Mazeh*, *Astron. Astrophys*, **391**, 369, 2022.
5. *N.R.Lomb*, *Astrophys. Space Sci.*, **39**, 447, 1976.
6. *J.D.Scargle*, *Astrophys. J.*, **263**, 835, 1982.
7. *В.А.Амбарцумян*, "Звезды, Туманности, Галактики", Изд. АН Арм ССР, 1969, с.283.
8. *Ю.А.Кутоянц*, *Оценивание параметров случайных процессов*, Изд-во АН Армянской ССР, 1980.
9. *D.J.Daley, D.Vere-Jones*, *An Introduction to the Theory of Point Processes*, Springer-Verlag, 2003.
10. *A.A.Akopian*, *Astrophysics*, **58**, 62, 2015.
11. *P.A.W.Lewis*, *J. Sound Vib.*, **12(3)**, 353, 1970.
12. *H.Yang, J.Liu, Q.Gao et al.*, *Astrophys. J.*, **849**, 36, 2017.