

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ЧАСТОТЫ ВСПЫШЕК ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЕЗД

А.А.АКОПЯН

Поступила 17 июля 2019

По данным орбитальной обсерватории "Кеплер" проведено статистическое исследование периодической/циклической переменности частоты вспышек 76 вспыхивающих звезд. Получены соответствующие периодические функции частоты вспышек и проверена возможная периодичность частоты вспышек с периодом, равным периоду вращения звезды. 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. Полученные результаты свидетельствуют о том, что: а) частота вспышек модулируется осевым вращением звезд, и б) структурные и физические изменения активных областей рассмотренных звезд происходили сравнительно медленно. Среди рассмотренных звезд оказались звезды с планетными системами. Подозревается, что орбитальное вращение планеты влияет на частоту вспышек звезды KIC 5791720.

Ключевые слова: *вспышка: частота вспышек: циклическая переменность*

1. *Введение.* За последнее десятилетие возобновился и резко возрос интерес к вспыхивающим звездам и родственным объектам. Это обусловлено, в основном, наблюдениями космического телескопа "Кеплер", предназначенного для поиска экзопланет. Однако, благодаря своим уникальным характеристикам, наблюдения "Кеплер" одновременно дают ценную и однородную информацию о переменных звездах и переменных явлениях почти всех типов, в том числе о вспыхивающих звездах и вспышечных явлениях. Сравнительно длинный ряд почти непрерывных и однородных наблюдений с высокой чувствительностью, большое поле и огромное количество одновременно наблюдаемых объектов дают возможность комплексного (как статистического, так и физического) исследования вспыхивающих звезд и вспышечных явлений. Комплексность выражается не только и не столько в количественных характеристиках данных, а в том, что одновременно получаются данные об очень важных физических параметрах, тесно связанных с переменностью звезд. В случае вспыхивающих звезд это данные, которые позволяют:

- получить кривую блеска на протяжении достаточно долгого времени, что в принципе позволяет исследовать изменение вспышечной активности в цикле звездной активности (аналогично циклу солнечной активности),

- оценить период вращения, запятненность звезд и, соответственно, размеры и энергетические характеристики активных областей,
- обнаружить дифференциальное вращение, миграцию активных областей и исследовать их взаимосвязь со вспышечной активностью.

Целью данной работы является статистическое исследование периодической/циклической переменности наблюдаемой частоты вспышек вспыхивающих звезд. Такая переменность наблюдаемой частоты вспышек может быть обусловлена:

- реальным изменением вспышечной активности звезды,
- геометрическими эффектами, связанными с изменением расположения и видимости активных областей вспышек из-за осевого или орбитального вращения 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 вспышек вследствие периодического осевого или орбитального вращения звезды может быть модулирована с периодом, равным периоду осевого или орбитального вращения. В данной работе проверено наличие возможной периодичности частоты вспышек вспыхивающих звезд с известными периодами осевых вращений.

2. Используемый метод. В этой работе, как и во многих статистических исследованиях вспыхивающих звезд, с математической точки зрения базовым является предположение о случайном и независимом характере вспышек, что позволяет рассмотреть последовательность вспышек звезды как случайный пуассоновский процесс [1]. Это предположение неоднократно было подтверждено наблюдательными данными (напр. [2]) и стало очень эффективным средством при статистических исследованиях вспыхивающих звезд. Поскольку в данной работе предполагается, что частота вспышек может модулироваться периодическим процессом (осевым вращением звезды), то в этом случае частоту вспышек разумно представить в виде периодической функции от времени, а сам процесс рассмотреть как пуассоновский процесс с периодическим параметром. Впервые такой подход был использован в работах [3,4] при исследовании вспыхивающих звезд и звезд солнечного типа с супервспышками.

В данной работе, как и в работе [4], в качестве периодической функции частоты вспышек/параметра пуассоновского распределения 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 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.

Такой выбор функции во многом обусловлен тем, что обеспечивается разнообразие видов периодической функции, в зависимости от значения k (рис.1).

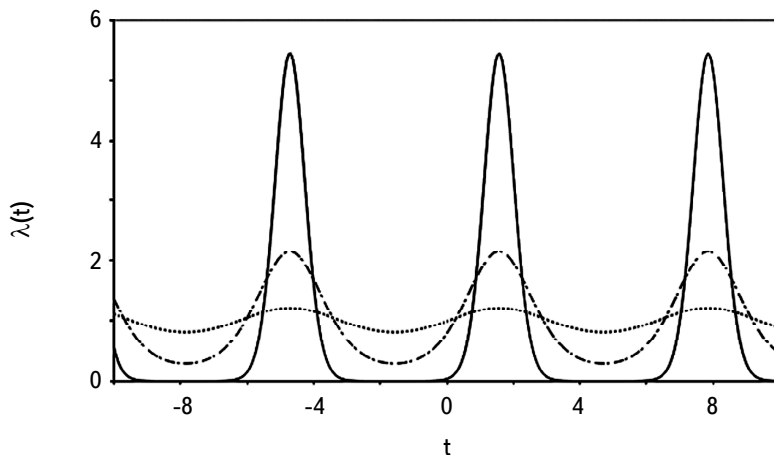


Рис.1. Периодическая функция $\lambda(t)$ в условных единицах, в зависимости от значения k , $k=0.2$ - пунктирная линия, $k=1$ - штрихпунктирная линия, $k=5$ - сплошная линия.

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

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 , полученные в результате периодограммного анализа кривых блеска звезд, регистрируемые обсерваторией "Кеплер".

Для заданного значения ω_0 оценки максимального правдоподобия остальных параметров можно определить, максимизируя функцию правдоподобия [5,6]:

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

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

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 статистический характер задачи, неопределенности и неизбежные ошибки при получении и обработки данных, а также физические причины, как например, дифференциальное вращение звезд, неизбежно приводят к выводу, что необходимо задаваться не точечным значением ω_0 , а сравнительно узким интервалом значений циклических частот вокруг ω_0 . В этом случае задача сводится к необходимости найти, 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 степень правдоподобности служит логарифм отношения $\ln L_{H_1/H_0}$ 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 путем построения и сравнения 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 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.

3. *Использованные данные.* В работе [7] представлены данные о 540 вспыхивающих М карликах в поле зрения космической обсерватории "Кеплер"

с 103187 вспышками, обнаруженными при обработке данных долгой каденции (long cadence) "Кеплера". Такие данные позволяют обнаружить только медленные вспышки, продолжительность которых около двух часов и больше. На рис.2 для иллюстрации приводится часть кривой блеска одной из звезд (KIC 7741987) со вспышками. Продолжительность большой вспышки составляет около 5-ти часов.

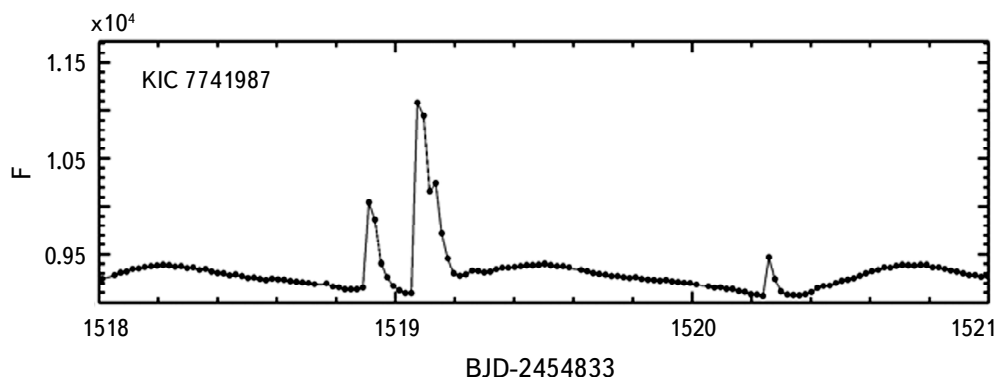


Рис.2. Часть кривой блеска звезды KIC 7741987.

В работе [7] оценены энергии вспышек и для каждой звезды измерена нормированная активность вспышек L_{flare}/L_{bol} (отношение светимости вспышки к болометрической светимости звезды), которая, согласно авторам, является хорошим индикатором звездной активности. Отметим один из результатов работы [7], согласно которому размер звездных пятен положительно коррелирует с вспышечной активностью. Этот результат соответствует принятому в данной статье подходу.

В работе [7] приведены также моменты вспышек, амплитуды блеска, периоды вращения, в основном заимствованные из [8], оценки площади области каждой вспышки, данные об эмиссии $\text{Na } 540$ звезд.

Из этих звезд в данной работе были отобраны 76 звезд с числом вспышек $n \geq 400$. Распределения основных параметров этих звезд и вспышек приведены на рис.3.

Периоды осевых вращений двух звезд неизвестны. Для полноты картины им присвоены отрицательные значения периода и на рис.3 они занимают область отрицательных значений диаграммы распределения периода. Амплитуды кривых блеска приведены в миллионных долях (ppm), а площадь, занимаемая вспышкой - в долях площади поверхности звезды.

4. Полученные результаты.

4.1. Циклическая переменность частоты вспышек. С исполь-

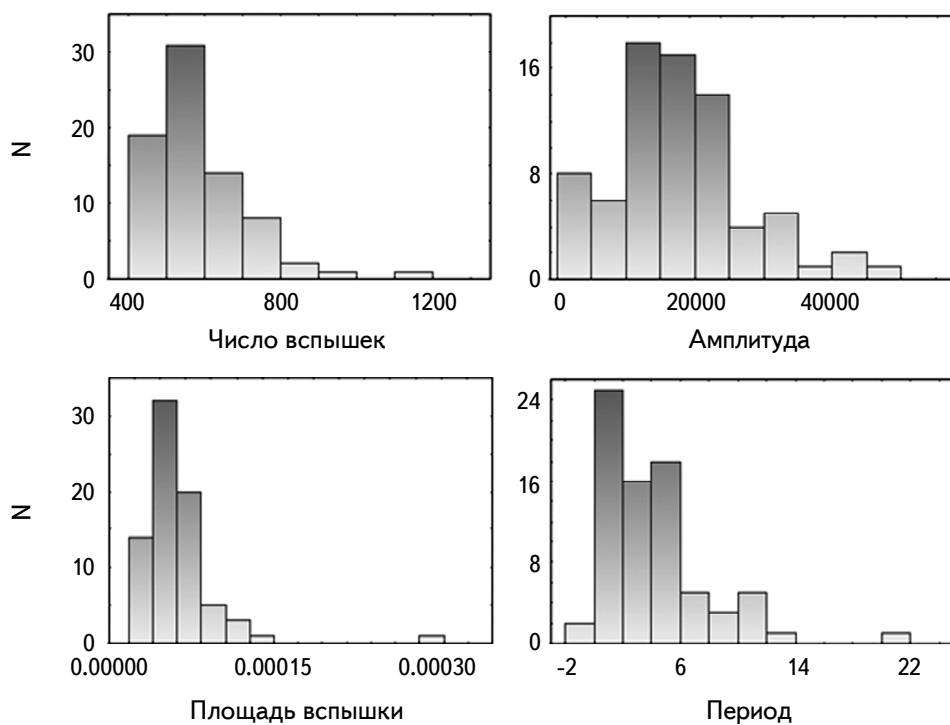


Рис.3. Распределения основных параметров выборки звезд.

зованием описанного метода для всех звезд выборки удалось определить вероятную периодическую функцию частоты вспышек с периодом, близким периоду частоты осевого вращения звезды (табл.1). Как видно из таблицы, для 50% звезд, периоды частоты вспышек P_f и осевого вращения звезды P_b отличаются примерно на 3% и меньше. Среди 74-х звезд лишь у 10-ти (13%) эти периоды отличаются более чем на 10%. Самое большое отклонение

Таблица 1

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТНОШЕНИЯ P_f/P_b

Характеристика	Значение
Среднее	1.013
Медиана	1.007
Среднеквадратичное отклонение	0.074
Минимум	0.864
Максимум	1.319
Квантиль_25%	0.975
Квантиль_75%	1.038

наблюдается у звезды KIC 5791720. Вероятная причина этого отклонения рассмотрена ниже.

Используя полученные функции 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.

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 место, 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 отвергнуть гипотезу о стационарности?

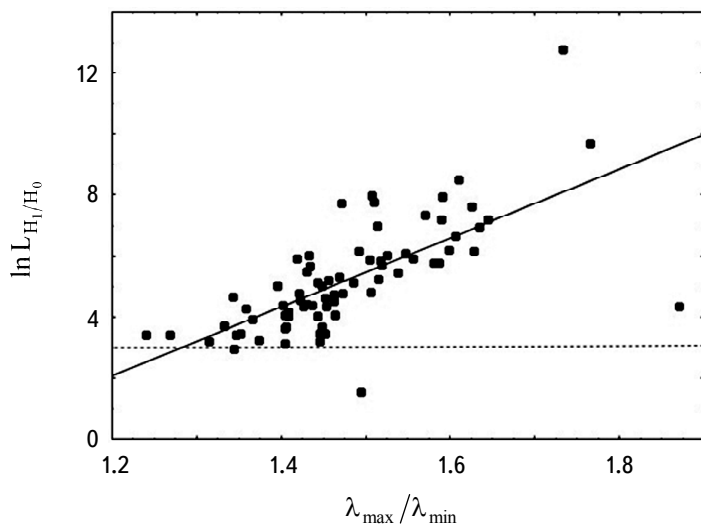


Рис.4. Зависимость отношения правдоподобий $\ln L_{H_1/H_0}$ от $\lambda_{\max}/\lambda_{\min}$.

Оказалось, что альтернативная гипотеза о постоянной частоте вспышек не отвергается лишь в том случае, 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 [9], согласно которому стационарность не отвергается, если

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

С значением $\ln L_{H_1/H_0} < 3$ оказались 2 звезды - KIC 9540467 и KIC 9941718, которые на рис.4 находятся ниже штриховой линии. Однако и в этом случае наблюдательные данные хорошо согласуются с предположением о периодической частоте вспышек. Это видно на рис.5, где для нескольких звезд приводятся сложенные в единый период теоретические и наблюдаемые распределения вспышек по фазам периодической функции. На левой стороне рисунка приведены распределения звезд с наиболее высокими значениями отношения правдоподобия, а на правой - с самыми низкими. В качестве начальной фазы принята фаза в момент начала наблюдений.

В табл.2 приводится список нескольких звезд, у которых периодичность

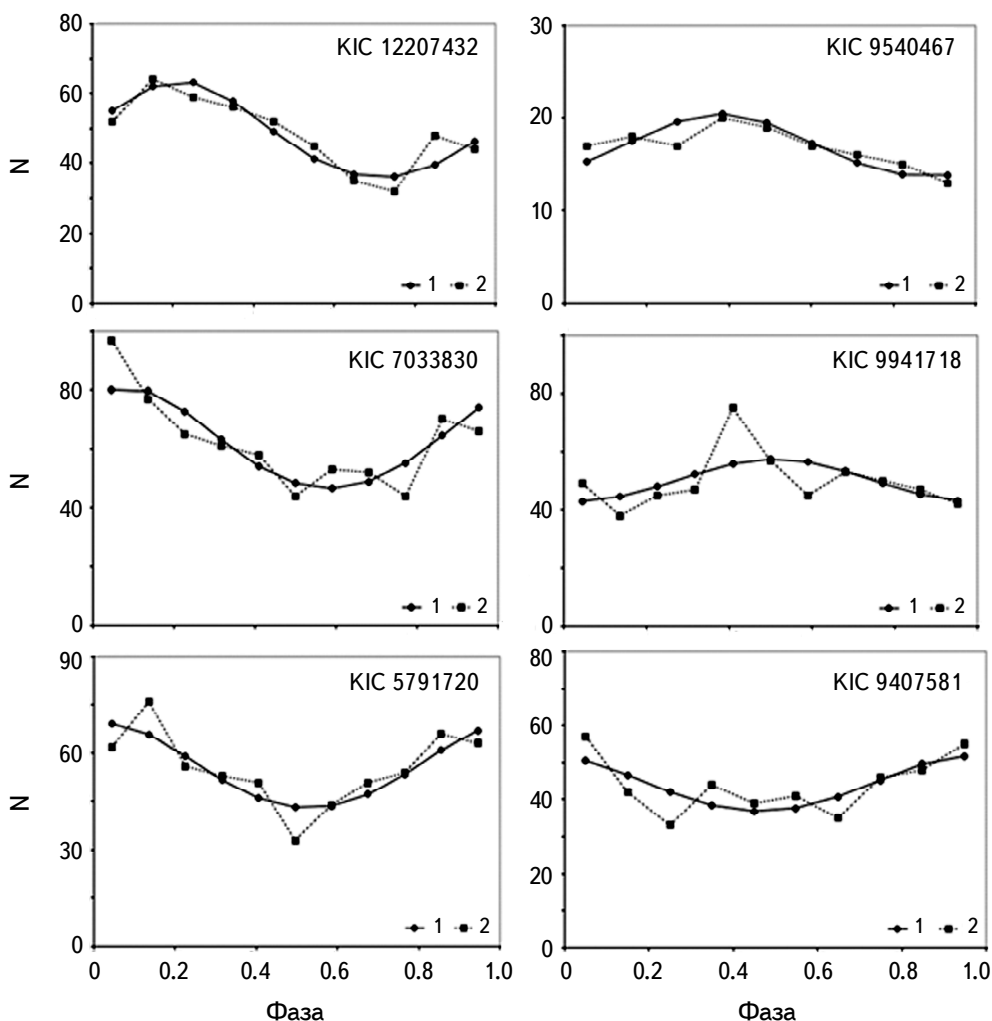


Рис.5. Теоретические (1) и наблюдаемые (2) распределения вспышек.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ЗВЕЗД С ХОРОШО
ВЫРАЖЕННОЙ ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ

KIC	n	P_b	A	P_f	P_f/P_b	$\lambda_{max}/\lambda_{min}$	L_{H_1/H_0}	χ^2_{cycl}
2300039	544	1.712	4325	1.771	1.035	1.589	7.212	6.083
2557669	479	1.864	14989	1.969	1.056	1.606	6.654	5.596
5607395	466	6.108	16866	5.277	0.864	1.634	6.940	9.018
5791720	609	0.765	13427	1.009	1.319	1.609	8.524	6.440
7033830	687	3.997	44970	4.000	1.001	1.733	12.789	9.921
7350067	657	3.514	22089	3.341	0.951	1.514	6.997	3.672
7741987	608	1.265	14104	1.102	0.871	1.570	7.335	9.920
8947255	596	7.450	13803	8.069	1.083	1.591	7.946	8.488
8977910	471	10.76	12224	12.960	1.204	1.645	7.204	6.969
10332732	737	3.492	4516	3.906	1.118	1.510	7.758	9.270
12207432	487	1.698	23695	1.698	1.000	1.766	9.693	3.557
12314646	835	2.725	16956	2.934	1.077	1.471	7.730	6.132

выражается наиболее отчетливо и убедительно с статистической точки зрения. В колонках 1-4 приведены номера звезд, количество вспышек n , периоды осевого вращения P_b в сутках, амплитуды кривых блесков A в миллионных долях, взятые из [7]. В колонках 5-9 приводится часть данных, полученных в данной работе. Это - периоды функции частоты вспышек P_f , отношения двух периодов P_f/P_b , отношения максимального значения функции частоты вспышек к минимальному $\lambda_{max}/\lambda_{min}$, отношения $\ln L_{H_1/H_0}$, значения χ^2_{cycl} при предположении о периодической частоте вспышек.

4.2. *Звезды с особенностями.* При более детальном рассмотрении некоторых звезд с экстремальными значениями параметров были замечены некоторые интересные факты, более подробное представление и обсуждение которых будет в следующей статье.

Звезда KIC 5791720. Выше было отмечено, что самое большое отношение $P_f/P_b = 1.319$ наблюдается у звезды KIC 5791720. Период вращения звезды в днях составляет 0.765 (циклическая частота - 8.213), а для периода функции частоты вспышек получено значение 1.009 (циклическая частота - 6.227). Данные о звезде и результаты обработки приведены в табл.2 и на рис.5.

По данным архива экзопланет (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>) эта звезда вероятно имеет планетную систему из двух планет-кандидатов, примерно с одинаковыми периодами вращения вокруг звезды - 1.532 (циклическая частота - 4.101). Радиус одной из планет равен 6-ти радиусам Земли, а его отношение к радиусу звезды составляет 0.097. Большая полуось орбиты равна 0.02 а.е. Исходя из этих данных, можно предположить наличие сильного

взаимодействия между звездой и планетой. Из приведенных данных следует, что среднее значение от циклических частот осевого вращения звезды и орбитального вращения планеты с точностью 1% совпадает с циклической частотой функции частоты вспышек. Является ли это случайным совпадением или это своего рода суперпозиция двух периодических функций, трудно сказать без дальнейших исследований. Планетными системами обладают также и другие звезды нашей выборки, например, звезда KIC 7741987, планетная система которой состоит из 6-ти планет с периодами от 1 до 55. Согласно данным [7], звезда входит в 10% самых активных звезд и показывает мощные вспышки, одна из которых приведена на рис.2.

Звезда KIC 9201463. Звезда выделяется среди звезд выборки двумя характеристиками - аномальной вспышечной активностью и очень малой амплитудой блеска. У этой звезды зарегистрировано наибольшее количество вспышек - 1184. Следующие за ней по количеству вспышек звезды имеют по 966 и 867 вспышек, соответственно. Период вращения звезды, согласно [7], равен $P_b = 5.62$. Для периода функции частоты было получено значение $P_f = 5.482$ с относительно низким правдоподобием $\ln L_{H_1/H_0} = 3.410$. Дальнейшие поиски привели к обнаружению нового периода - $P_f = 2.856$ с более высоким правдоподобием $\ln L_{H_1/H_0} = 4.713$. Легко заметить, что в этом случае $P_f \approx P_b/2$, что можно интерпретировать как свидетельство в пользу существования двух активных областей на поверхности звезды с противоположными долготами. Рассмотрение кривой блеска звезды по-видимому подтверждает это предположение (рис.6).

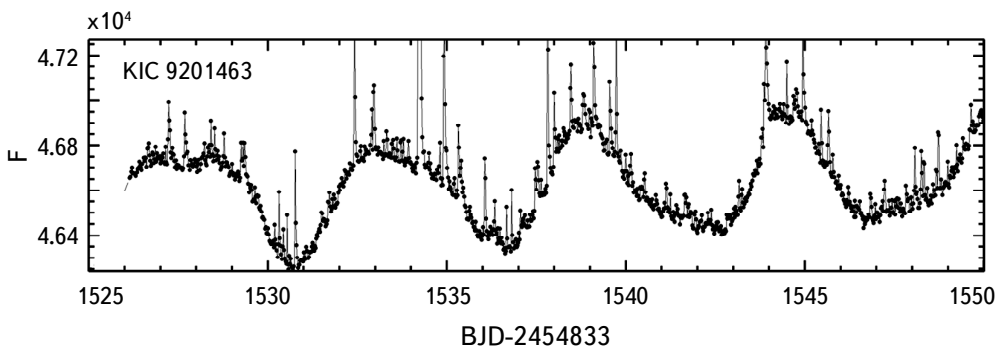


Рис.6. Часть кривой блеска звезды KIC 9201463, подтверждающая предположение о наличии двух активных регионов на противоположных полусферах.

5. Заключение. По данным орбитальной обсерватории "Кеплер" проведено статистическое исследование периодической/циклической переменности частоты вспышек 76 вспыхивающих звезд. Предположено, что временная последовательность представляет собой пуассоновский процесс с периодическим

параметром (частота вспышек). Получены соответствующие периодические функции частоты вспышек и проверено наличие возможной периодичности частоты вспышек с периодом, равным периоду вращения звезды. Периоды функций частоты вспышек, как и ожидалось, оказались близкими к периодам осевых вращений звезд.

Используя полученные функции частоты вспышек, построены теоретические распределения вспышек по фазам и 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. Полученные результаты свидетельствуют о том, что: а) частота вспышек модулируется осевым вращением звезд, и б) структурные и физические изменения активных областей рассмотренных звезд за время наблюдений (3-4 года) происходили сравнительно медленно.

Среди рассмотренных звезд есть звезды с планетными системами. Подозревается, что орбитальное вращение планеты влияет на частоту вспышек звезды KIC 5791720.

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

PERIODICITY OF THE FLARES FREQUENCY OF FLARE STARS

A.A.AKOPIAN

Using the data of the Kepler Orbital Observatory, a statistical study of the periodic/cyclic variability of the frequency of flares of 76 stars of flare stars was carried out. The corresponding periodic functions of the flash frequency are obtained and the presence of a possible periodicity of the flash frequency with a period equal to the period of rotation of the star is checked. The periods of the flare frequency functions turned out to be close to the periods of the axial rotation of the stars. The theoretical distribution of the phases of flares is 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) testifies in favour of the periodicity of the flare frequency. The results obtained show that а) the flare frequency is modulated by the axial rotation of the stars, and б) structural and physical changes in the active regions of these stars occur

relatively slowly. Among the stars were some with planetary systems. The impact of planet rotation on the flare frequency of the star KIC 5791720 is suspected.

Keywords: *flare: flare frequency: cyclic variability*

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Амбарцумян, Звезды, Туманности, Галактики, Изд. АН Арм ССР, 1969, с.283.
2. В.С.Осканян, В.Ю.Теребиж, Астрофизика, **7**, 83, 1971, (Astrophysics, **7**, 48, 1971).
3. А.А.Акопян, Астрофизика, **53**, 613, 2010, (Astrophysics, **53**, 544, 2010).
4. А.А.Акопян, Астрофизика, **58**, 75, 2015, (Astrophysics, **58**, 62, 2015).
5. Ю.А.Кутоянц, Оценивание параметров случайных процессов, Изд-во АН АрмССР, 1980.
6. D.J.Daley, D.Vere-Jones, An Introduction to the Theory of Point Processes, Springer-Verlag, 2003.
7. H.Yang, J.Liu, Q.Gao et al., Astrophys. J., **849**, 36, 2017.
8. A.McQuillan, T.Mazeh, S.Aigrain, Astrophys. J. Suppl. Ser., **211**, 24, 2014.
9. P.A.W.Lewis, J. Sound Vib., **12(3)**, 353, 1970.