

DOI: 10.54503/0571-7132-2025.68.4-371

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПЯТНЕННОСТИ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА СО СВЕРХМОЩНЫМИ ВСПЫШКАМИ

А.А.АКОПЯН

Поступила 12 ноября 2025

В работе рассмотрена задача определения степени запятненности звезд солнечного типа со сверхмощными вспышками, способом, ранее разработанным автором для оценки запятненности вспыхивающих звезд по хронологии зарегистрированных вспышек. Метод базируется на определении периодической функции частоты вспышек на основе статистического анализа временного ряда вспышек, интерпретируемого как пуассоновский процесс с циклическим параметром, связанным с периодом осевого вращения звезды. Трансформация этой функции в функцию плотности кругового распределения фон Мизеса позволяет перейти от частоты вспышек к оценке углового распределения звездных пятен и определить эффективную площадь покрытия поверхности пятнами. Исследованы девять наиболее активных звезд солнечного типа из каталога работы Окамото и др., для которых вычислены периоды осевого вращения с помощью хронологии зарегистрированных вспышек, коэффициенты концентрации распределения вспышек, получены угловые распределения запятненности. Значения степени запятненности оценки варьируются от 1-4% для минимально запятненных и до 10% для максимально запятненных полушарий, что существенно превышает значения для Солнца. Сравнение с результатами работы Окамото и др. показало высокую степень согласованности - коэффициент корреляции $r = 0.896$. Разработанный подход демонстрирует возможность определения запятненности звезд на основе временных рядов вспышечной активности без привлечения фотометрических или спектроскопических данных высокого разрешения, что делает его ценным инструментом для статистических исследований магнитной активности звезд солнечного типа, демонстрирующих сверхмощные вспышки.

Ключевые слова: *сверхмощные вспышки; запятненность*

1. *Введение.* Звездные пятна, аналогичные солнечным пятнам, представляют собой области магнитной активности на поверхности звезд, тесно связанные с вращательной переменностью, вспышечной активностью и внутренним строением звезд. Изучение их природы и их физических/статистических характеристик распределения имеет важное значение для понимания механизмов звездных динамо и циклов активности. Благодаря развитиям методов доплеровской визуализации и фотометрического анализа, а также данным наблюдений космических обсерваторий Kepler и TESS, в этой области достигнут серьезный прогресс, но остаются проблемы, в частности, со вспышечно-активными звездами.

Эта работа является продолжением работ [1,2], где были определены периодичность вспышек и запятненность вспышечно-активных (вспыхивающих) звезд с периодичными кривыми блеска, обнаруженных Kepler и TESS. Периодичность кривых блеска этих звезд обусловлена их осевым вращением и неравномерным распределением звездных пятен. В работах [3,4] было предположено и показано, что и частота вспышек модулируется осевым вращением звезд. При этом, временной ряд вспышек рассматривался как реализация пуассоновского процесса с циклическим параметром, с периодом близким к периоду осевого вращения.

В работе [1] был предложен новый способ оценки площади покрытия звездными пятнами для вспышечно-активных звезд (например, вспыхивающие звезды, звезды типа BY Дракона и RS Гончих Псов). Угловое распределение звездных пятен удалось выразить через круговое (угловое) распределение фон Мизеса с использованием параметров периодической функции частоты звездных вспышек. Для вспыхивающих звезд, исследованных в [1,2], были получены оценки площади покрытой пятнами, которые значительно превышают соответствующие оценки для Солнца, составляя от 2 до 30% звездной поверхности. Хотя предложенный способ имеет ограниченную область применения (применим только к вспышечно-активным звездам с достаточным количеством зарегистрированных вспышек), он представляется достаточно перспективным и может дополнить существующие методы определения запятненности звезд.

В данной статье этот способ применяется для определения запятненности звезд солнечного типа (звезды главной последовательности спектрального типа G, эффективная температура 5100–6000 K), демонстрирующих сверхмощные вспышки (сверхвспышки). За последние десятилетия, наблюдения с помощью космических обсерваторий Kepler [5–13] и TESS [14,15], а также рентгеновских (например, [16]) и ультрафиолетовых космических телескопов (например, [17]) выявили наличие сверхмощных вспышек у множества звезд солнечного типа. Энергия этих вспышек на несколько порядков превышает энергию солнечных вспышек.

В работе [18] приводится статистический анализ сверхвспышек на звездах солнечного типа с использованием всех данных основной миссии Kepler и каталога Gaia Data Release 2. В своем обновленном исследовании авторы [18] обнаружили 2341 сверхвспышку у 265 звезд солнечного типа и 26 сверхвспышек у 15 солнцеподобных звезд (эффективная температура 5600–6000 K и период вращения более 20 дней). В работе [18] приводятся также оценки запятненности этих звезд, полученные способом, представленным в работах [19,20]. У некоторых из этих звезд обнаружено несколько десятков сверхмощных вспышек.

В представленной работе отобраны наиболее часто вспыхнувшие звезды солнечного типа, для определения периодичности частоты их вспышек и запятненности способом примененным в работах [1,2]. Во втором разделе статьи представлены данные, которые были использованы в исследовании. В разделе 3 дается краткое изложение методологии. Полученные результаты, последующее обсуждение и выводы представлены в разделах 4 и 5. В *Приложении* приводится иллюстративный материал.

2. *Использованные данные.* В табл.1 приведены основные данные о рассмотренных в работе звездах, взятые из каталога [18]¹. В двух первых столбцах приводятся обозначения звезд. В остальных столбцах приводятся: число зарегистрированных сверхмощных вспышек N , эффективная температура T_{eff} , период осевого вращения, радиус звезды в единицах Солнца, отношение площади покрытия пятен к площади полушария Солнца $A_{sp} = S_{sp} / 2\pi R_{\odot}^2$. В этом же каталоге приводится хронология вспышек, необходимая для выполнения данной работы.

Периоды осевого вращения звезд, приведенные в каталоге [18], взяты из разных источников, в частности, периоды всех звезд, рассмотренных в данной

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ О РАССМОТРЕННЫХ ЗВЕЗДАХ

KIC	Другие обозначения	N	T_{eff}	P_{rot} [21]	$R / R_{\odot}$	A_{sp}
3728906	2MASS J19011219+3849255 DR3 2100137238499702016	55	5640	3.627	0.974	0.04
4142137	2MASS J19075743+3912461 DR3 2100395035319632256	68	5638	1.933	1.017	0.05
4249702	ZTF J191132.51+391925.3 DR3 2099740658399587328	66	5432	4.712	0.810	0.05
6865416	2MASS J19300381+4219595 DR3 2125738679559600384	86	5426	3.302	1.138	0.09
7532880	2MASS J19331778+4306178 DR3 2077840791959700992	78	5809	2.187	1.004	0.06
9150539	ZTF J192042.49+453005.1 DR3 2127088261362283648	71	5598	3.320	1.319	0.09
10537061	2MASS J19304196+4746014 DR3 2128505050814308864	77	5242	1.279	0.984	0.05
10861194	2MASS J19270528+4814035 DR3 2129278213646198784	77	5248	1.277	1.055	0.09
12354328	2MASS J19194240+5111562 DR3 2133193059155056512	58	5251	0.809	0.809	0.05

¹ cds.vizier.jp/apj/906/72.

работе, определены в работе [21].

Необходимые (см. ниже) данные об отношении максимальной светимости звезд к минимальной извлечены из кривых блеска. Во всех случаях были использованы данные 3-го квартала наблюдений. Эти же кривые были использованы для проверки периодов осевого вращения, приведенных в таблице.

3. *Способ оценки запятненности звезд через хронологию регистрованных вспышек.* Детальное описание использованного способа с техническими подробностями приведено в работе [1]. В этой работе для определения запятненности звезд солнечного типа со сверхмощными вспышками использованы предположения и предпосылки аналогичные тем, которые были приняты ранее для определения запятненности вспыхивающих звезд [1,2]:

- Звезды солнечного типа со сверхмощными вспышками обладают вращательной переменностью, обусловленной их вращением и неравномерным распределением пятен по поверхности звезды.

- Следуя Амбарцумяну [22], временная последовательность событий (вспышки звезды) представлена как пуассоновский процесс, но с циклическим/периодическим параметром, предложенным Кутоянцом [23,24]:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda \exp[k \sin(\omega_0 t + \vartheta)]}{I_0(k)} \quad (k \geq 0, \omega_0 \geq 0, 0 \leq \vartheta \leq 2\pi, \lambda > 0), \quad (1)$$

где в данном случае ω_0 - циклическая частота осевого вращения звезды, k , ϑ , λ - постоянные, которые надлежат определению, а $I_0(k) = \int_0^{2\pi} k \sin(u) du$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

- Вспышечная активность звезд положительно коррелирует с размерами пятен, что дает основание предположить (см. напр. [25]), что такая же корреляция имеет место между размерами пятен и числом вспышек. Из этого следует принципиальная возможность определения параметра запятненности звезд через определение параметра $\lambda(t)$.

- Функцию $\lambda(t)$ можно трансформировать (см. [1]) в функцию плотности распределения фон Мизеса:

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

где μ - среднее (одновременно мода и медиана) направление распределения, k - мера концентрации.

Распределение фон Мизеса широко применяется при статистической обработке угловых (круговых) данных и является хорошим приближением к намотанному нормальному распределению (круговой аналог нормального распределения), что делает его весьма привлекательным и перспективным для

применения в задачах, связанных с вращением звезд. Немаловажно, что статистические характеристики распределения фон Мизеса хорошо известны.

Таким образом, задача определения распределения запятненности, обращенной к наблюдателю полусферы звезды, сводится к определению периодической функции частоты вспышек $\lambda(t)$ (1) через хронологию зарегистрированных вспышек и ее представлению в виде функции плотности распределения фон Мизеса. Учитывая положительную корреляцию вспышечной активности с размерами пятен, можно определить эффективную площадь пятен. Практически это можно сделать, используя минимумы и максимумы периодической функции частоты вспышек и кривой блеска. При максимуме кривой блеска наблюдается минимально запятненная (из всех возможных) полусфера с минимальной вспышечной активностью и, наоборот, при минимуме блеска наблюдается максимально запятненная полусфера с максимальной вспышечной активностью. При больших наклонах оси ($60^\circ \div 90^\circ$) вращения звезды к лучу зрения эти полусферы, учитывая симметричность вышеприведенных функций, можно считать диаметрально противоположными, что дает возможность оценить запятненность звезды в целом.

В работе [1] для величины отношения площади поверхности пятен к площади поверхности минимально запятненной полусферы звезды в проекции получено следующее выражение:

$$A = \frac{1 - F_r}{(e^{2k} - F_r)(1 - L_r)},$$

где k - мера концентрации, F_r - отношение минимальной светимости звезд к максимальной, извлеченные из кривых блеска, L_r - отношение средних поверхностных яркостей звездных пятен и незапятненной поверхности звезды.

В случае пренебрежения излучением пятен $L_r = 0$, соответственно

$$A = \frac{1 - F_r}{e^{2k} - F_r}.$$

В этом случае для параметра запятненности можно получить только оценку снизу. В приближении чернотельного излучения по аналогии с Солнцем можно принять $L_r = 0.2 \div 0.3$, что приводит к увеличению оценки на $25 \div 40\%$. К некоторому увеличению может привести также учет краевых эффектов, в частности, потемнение звезды к краю.

По определению величина A является отношением площади поверхности пятен к площади поверхности минимально запятненной полусферы звезды в проекции. Для максимально запятненной полусферы оно больше на e^{2k} раза. Запятненность звезды в целом можно оценить только в том случае, если считать, что эти полусферы противоположны друг другу, что приближенно имеет место при наклоне оси вращения звезды на $\sim 60^\circ - 90^\circ$. В этом случае

параметр запятненности

$$A_{total} = \frac{A(1 + e^{2k})}{2}.$$

Детальное описание использованного способа с техническими подробностями приведено в работе [1].

4. *Оценки запятненности звезд.* В табл.2 и на рис.1-3 приведены основные результаты, полученные в данной работе. В табл.2 приведены - обозначение звезды; период обращения звезды P_f , определенной по хронологии зарегистрированных вспышек; вычисленное значение коэффициента концентрации k в (1) и (2); отношение минимальной светимости звезд к максимальному F_r ; запятненность минимально запятненной полусферы звезды A ; запятненность максимально запятненной полусферы звезды Ae^{2k} ; запятненность максимально запятненной полусферы в единицах квадрата радиуса Солнца $Ae^{2k} R^2 / R_\odot^2$, для сравнения с результатами работы Окамото и др. [18]; общая запятненность звезды A_{total} , если только угол наклона звезды сравнительно большой ($60^\circ - 90^\circ$), а также параметры $\hat{\mu}_0$, $\hat{\mu}$. Величина $\hat{\mu}_0$, которая не фигурирует в (2), имеет чисто техническое происхождение и связана с выбором в качестве нулевого момента времени момент первой зарегистрированной вспышки данной звезды, и соответствует началу первого бина кругового распределения [1].

Определение периодов осевого вращения звезд через хронологию звездных вспышек P_f было выполнено ровно так, как в работах [1-4], за одним исключением. Для большей достоверности полученных оценок, была проведена дополнительная проверка с привлечением непараметрического, байесовского метода Грегори-Лоредо. Как видно из табл.1 и 2, полученные периоды вращения звезд P_f хорошо согласуются с периодами P_{rot} . Одновременно с периодом определены также постоянные k , ϑ , λ , наиболее важный из

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

KIC	P_f	k	F_r	A	Ae^{2k}	$Ae^{2k} R^2 / R_\odot^2$	A_{total}	$\hat{\mu}$	$\hat{\mu}_0$
3728906	3.581	0.50081	0.973	0.015	0.041	0.039	0.028	5.4845	5.9409
4142137	1.924	0.43875	0.970	0.021	0.050	0.051	0.035	1.1378	2.2051
4249702	4.914	0.51191	0.942	0.031	0.087	0.057	0.059	0.1408	0.9298
6865416	3.447	0.42558	0.949	0.036	0.085	0.110	0.061	4.6353	0.9480
7532880	2.162	0.45166	0.973	0.018	0.044	0.044	0.031	3.4455	3.3793
9150539	3.245	0.42489	0.974	0.019	0.044	0.077	0.031	1.3991	1.5490
10537061	1.288	0.55355	0.963	0.018	0.054	0.052	0.036	3.2135	3.6601
10861194	1.275	0.51974	0.938	0.033	0.093	0.103	0.063	4.0195	5.5933
12354328	0.799	0.60536	0.975	0.011	0.035	0.033	0.023	3.5844	2.8347

которых, применительно к данной задаче, является коэффициент концентрации k . С определением этих констант, окончательно определяется периодический параметр пуассоновского процесса (1) и строятся фазовые распределения вспышек.

Для наглядности, на рис.1 приводятся фазовые распределения вспышек (вычисленное-бары и наблюдаемое-точки, нижняя панель,) для звезды KIC 4142137 и их представление в виде кругового распределения фон Мизеса (верхняя панель), где началом первого бина кругового распределения в данном случае является $\mu_0 = 2.2051$ рад (соответствует углу $\sim 126^\circ$, отмечен черным треугольником). Первый бин кругового распределения соответствует первому бину фазового распределения слева. Следующие бины по часовой стрелке совпадают с бинами фазового распределения слева направо. Точка с линией в предпоследнем бине круговой диаграммы это среднее (среднее направление) кругового распределения фон Мизеса $\hat{\mu} = 1.1378$ рад (соответствует углу $\sim 65^\circ$). В рамках приведенных выше предположений и предпосылок (раздел 3), полученное круговое распределение фон Мизеса одновременно представляет собой плотность распределения запятненности полусферы звезды, обращенной к наблюдателю. Соответственно, линия, соединяющая центр круга с нулевым углом, является абсциссой плотности распределения запятненности обращенной к наблюдателю полусферы звезды. Круговые диаграммы для других звезд приведены в *Приложении*.

На диаграмме (рис.2) приводится сравнение полученных в данной работе

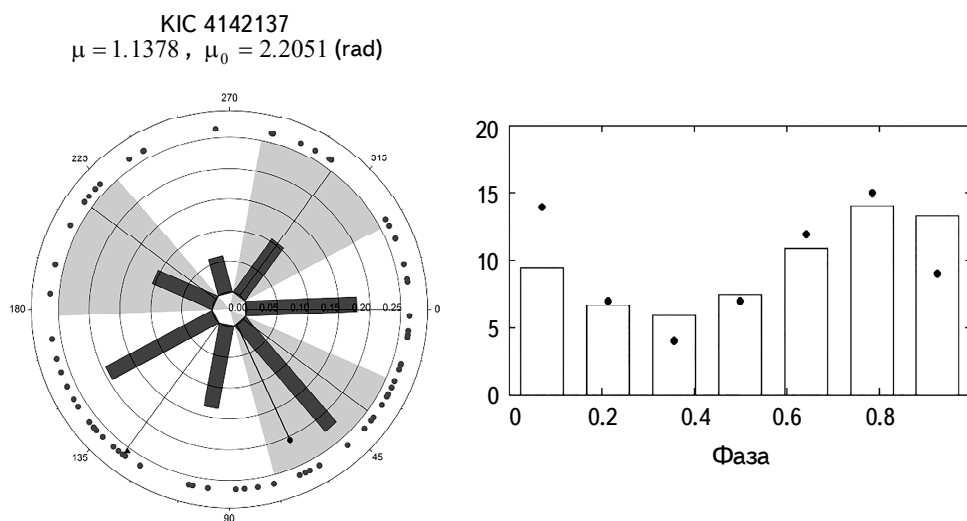


Рис.1. Фазовое распределение вспышек (вычисленное-бары и наблюдаемое-точки, нижняя панель) и его представление в виде кругового распределения фон Мизеса для звезды KIC 4142137.

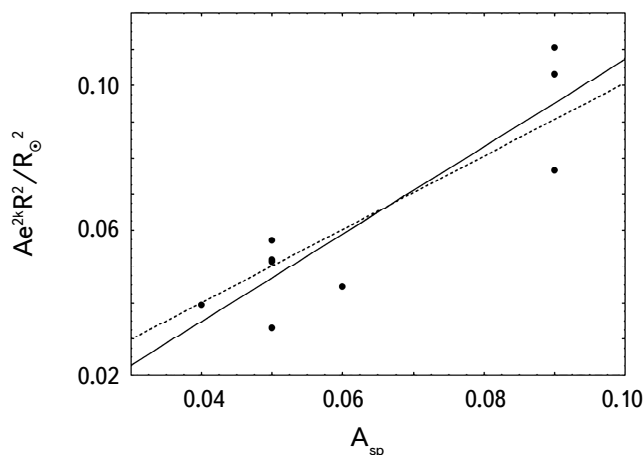


Рис.2. Корреляция (сплошная линия) между оценками запятненности для исследованных звезд результатами данной работы и работы Окамото и др. [18]. Штрих-линия на диаграмме соответствует равенству рассмотренных значений.

значений запятненности звезд с результатами работы Окамото и др. [18]. Видно, что наблюдается статистически значимая корреляция с коэффициентом корреляции $r=0.8959$, и p -уровнем значимости $p=0.0011$ между $Ae^{2k}R^2/R_{\odot}^2$ запятненностью максимально запятненной полусферы (данная работа) и запятненностью A_{sp} из [18]. Штрих-линия на диаграмме соответствует равенству рассмотренных значений.

5. Заключение. Проведенный анализ показал, что метод оценки запятненности вспыхивающих звезд по хронологии вспышек может успешно применяться и к звездам солнечного типа, демонстрирующих сверхмощные вспышки. Полученные результаты подтверждают наличие тесной корреляции между распределением вспышечной активности и угловым распределением звездных пятен, а также демонстрируют возможность количественной оценки площади покрытия поверхности пятнами. Получено, что запятненность наиболее активных звезд солнечного типа достигает до 10% поверхности, что более чем на порядок выше солнечных значений. Этот факт согласуется с наблюдаемыми высокими энергиями сверхвспышек и подтверждает предположение о связи между крупными пятнами и усиленной магнитной активностью. Совпадение полученных оценок с независимыми результатами, основанными на других методах, свидетельствует о надежности и физической обоснованности предложенного подхода.

Предложенный способ обладает потенциалом для дальнейшего применения в изучении вспышечно-активных областей и циклов активности у звезд различных спектральных типов. Он может применяться к большим выборкам данных космических миссий Kepler, TESS и, в ближайшем будущем, PLATO, что

позволит расширить статистику и исследовать зависимости запятнненности от возраста, скорости вращения и уровня вспышечной активности звезд. В частности, в последующих работах планируется раздельное исследование мощных, умеренных и слабых вспышек у вспыхивающих звезд, с целью выявления возможных отличий пространственного распределения областей генерирующих эти вспышки.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

В *Приложении* приводятся круговые распределения звездных сверхвспышек исследованных звезд, которые одновременно представляют собой плотности распределения запятнненности полусферы звезды, обращенной к наблюдателю, где начало первого отмечено черным треугольником, а точка с линией - среднее (среднее направление) кругового распределения фон Мизеса. Линия, соединяющая центр круга с нулевым углом, является абсциссой плотности распределения запятнненности обращенной к наблюдателю полусферы звезды. Бины пронумерованы по часовой стрелке.

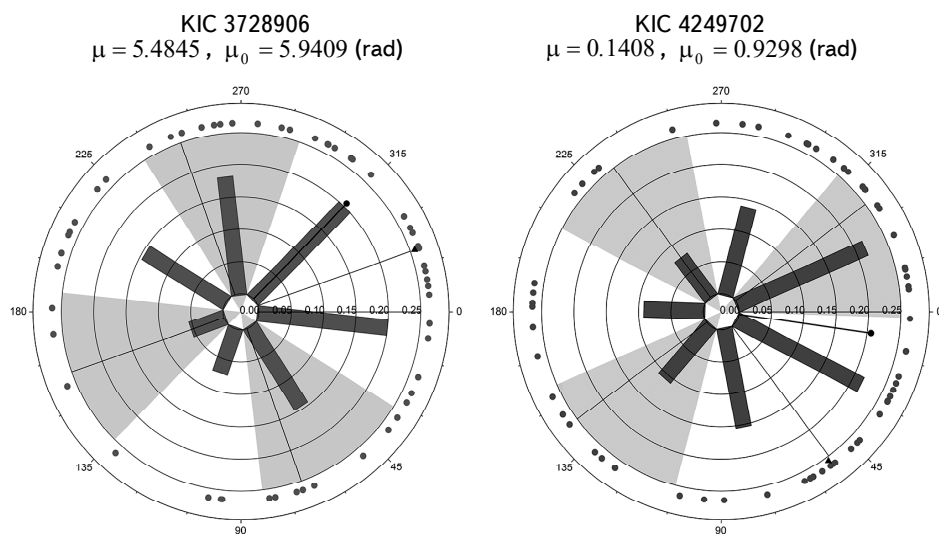


Рис.3. Распределение запятнненности исследованных звезд.

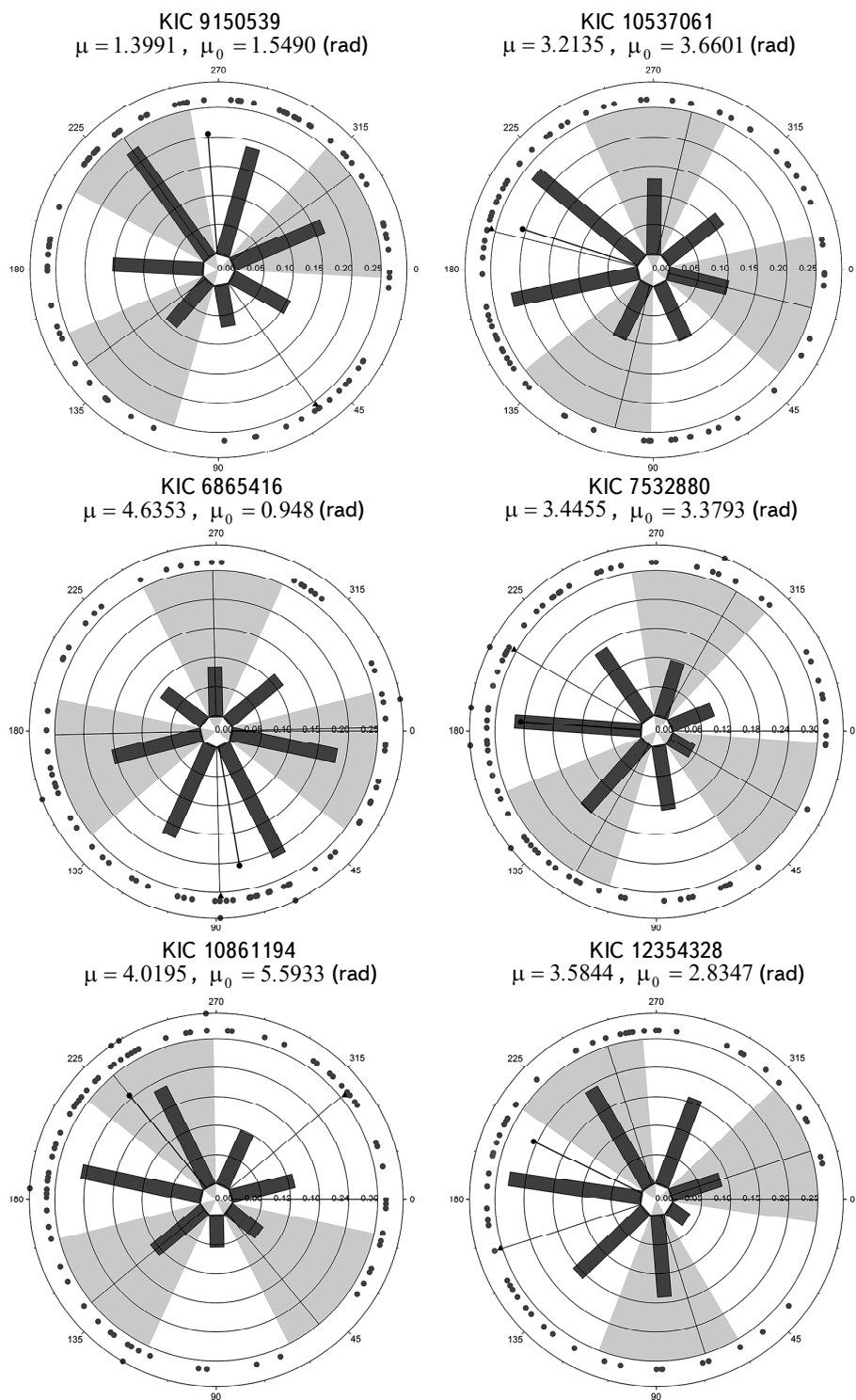


Рис.3. (Окончание)

DETERMINING THE SPOTTEDNESS OF SOLAR-TYPE STARS WITH SUPERFLARES

A.A.AKOPIAN

This paper considers the problem of determining the degree of spottedness of solar-type stars with superflares. The main focus is on the application of a method previously developed by the author for estimating the spotiness of flaring stars based on the chronology of recorded flares. The method is based on determining the periodic function of flare frequency based on statistical analysis of time series of flares, interpreted as a Poisson process with a cyclic parameter related to the period of the star's axial rotation. Converting this function into a von Mises distribution density function allows us to move from the frequency of flares to estimating the angular distribution of stellar spots and determine the effective surface area covered by spots. Nine of the most active solar-type stars from the Okamoto et al. catalog were studied, for which the axial rotation periods were calculated based on the chronology of recorded flares, and the flare distribution concentration coefficients and angular distributions of spots were obtained. The estimated values of spot coverage range from 1-4% for the least spotted to 10% for the most spotted hemispheres, which significantly exceeds the values for the Sun. Comparison with the results of Okamoto et al. showed a high degree of agreement - the correlation coefficient $r = 0.896$. The developed approach demonstrates the possibility of determining the spotting of stars based on the time series of flare activity without the use of high-resolution photometric or spectroscopic data, which makes it a valuable tool for statistical studies of the magnetic activity of solar-type stars exhibiting super-powerful flares.

Keywords: *superflares: spottedness of stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. A.A.Akopian, Astrophysics, **67**, 487, 2024, doi:10.1007/s10511-025-09847-4.
2. A.A.Akopian, Comm. of the Byurakan Astrophysical Observatory, **71**, 268, 2024. doi:10.52526/25792776-24.71.2-268.
3. A.A.Akopian, Astrophysics, **62**, 518, 2019, doi:10.1007/s10511-019-09601-7.
4. A.A.Akopian, Astrophysics, **66**, 516, 2023, doi:10.1007/s10511-024-09807-4.
5. H.Maehara, T.Shibayama, S.Notsu et al., Nature, **485**, 478, 2012. doi.org/10.1038/nature11063.

6. *T.Shibayama, H.Maehara, S.Notsu et al.*, *Astrophys J. Suppl.*, **209**, 5, 2013, doi:10.1088/0067-049/209/1/5.
7. *H.Maehara, T.Shibayama, Y.Notsu et al.*, *Earth Planet and Space*, **67**, 59, 2015, <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0217-z>.
8. *S.Candelaresi, A.Hillier, H.Maehara et al.*, *Astrophys. J.*, **792**, 67, 2014, doi: 10.1088/0004-637X/792/1/67.
9. *Chi-Ju Wu, Wing-Huen Ip, Li-Ching Huang*, *Astrophys. J.*, **798**, 92, 2015, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/2/92>.
10. *J.R.A.Davenport*, *Astrophys. J.*, **829**, 23, 2016, doi:10.3847/0004-637X/829/1/23.
11. *L.A.Balona*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, 2714, 2015, <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2651>.
12. *Y.Notsu*, *Astrophys. J.*, **876**, 58, 2019. doi:10.3847/1538-4357/ab14e6.
13. *T. Van Doorselaere, H.Shariati, J.Deboscher*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **232**, 26, 2017, doi:10.3847/1538-4365/aa8f9a.
14. *Zuo-Lin Tu, Ming Yang, Z.J.Zhang et al.*, *Astrophys. J.*, **890**, 46, 2020, doi:10.3847/1538-4357/ab6606.
15. *L.Doyle, G.Ramsay, J.G.Doyle*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **494**, 3596, 2020, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa923>.
16. *J.P.Pye, S.Rosen, D.Fyfe et al.*, *Astron. Astrophys.*, **581**, A28, 2015, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526217>.
17. *C.E.Brasseur, R.A.Osten, S.W.Fleming*, *Astrophys. J.*, **883**, 88, doi:10.3847/1538-4357/ab3df8.
18. *S.Okamoto, Y.Notsu, H.Maehara et al.*, *Astrophys. J.*, **906**, 72, 2021. doi:10.3847/1538-4357/abc8f5.
19. *K.Shibata, H.Isobe, A.Hillier et al.*, *PASJ*, **65**, 49, 2013, doi:10.1093/pasj/65.3.49.
20. *Y.Notsu, H.Maehara, S.Honda et al.*, *Astrophys. J.*, **876**, 58, 2019, doi:10.3847/1538-4357/ab14e6.
21. *A.McQuillan, T.Mazeh, S.Aigrain*, *Astrophys. J. Suppl.*, **211**, 24, 2014, doi: 10.1088/0067-0049/211/2/24.
22. *В.А.Амбарцумян*, "Звезды, Туманности, Галактики", Изд. АН Арм ССР, 1969, с.283.
23. *Ю.А.Кутоянц*, Оценивание параметров случайных процессов, Изд-во АН Армянской ССР, 1980.
24. *D.J.Daley, D.Vere-Jones*, *An Introduction to the Theory of Point Processes*, Springer, 2003.
25. *H.Maehara, Y.Notsu, S.Notsu et al.*, *PASJ*, **96**, 41, 2017, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx013>.