

УДК 524.316.4:524.3-14

АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ 11 К-КАРЛИКОВ С ПЛАНЕТАМИ В ЗОНЕ ОБИТАЕМОСТИ

© 2023 И. С. Саванов¹¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия¹

Поступила в редакцию 13 февраля 2023 года; после доработки 20 февраля 2023 года; принята к публикации 21 февраля 2023 года

Представлены результаты изучения проявлений пятенной активности 11 К-карликов с установленными планетами в зоне обитаемости по данным архива космического телескопа Кеплер, полученным в ходе наблюдений в сети Q3 длительностью в 90 суток. Найдено, что площадь пятен A на поверхности К-карликов из нашего списка превосходит величину, характерную для Солнца, но сопоставима с ее максимальными значениями, за исключением активной звезды КIC 9351316, для которой $A = 7588$ м.д.п. Выполнено подробное исследование К-карлика КIC 5938970 (Kepler-1540), вспышечная активность которого выше, чем солнечная, диапазон изменений энергий вспышек $\lg E$ составляет 32.95–34.48. Получены оценки периода вращения звезды $P = 15^{\text{д}}.1447$ и параметра $\Delta\Omega = 0.024 \pm 0.007$ рад./сут. По данным обзора Kamogata Wide-field Survey (99 оценок блеска звезды в фильтре V за 3310 суток) сделан вывод о наличии циклического и слабого монотонного возрастания блеска. Характерные величины возможных циклов составляют 2.8 и 4.4 года. Наше исследование активности примерно у половины из известных на настоящее время К-карликов с планетами в зоне обитаемости (11 объектов из 17 в полном списке), выполненное по высокоточным фотометрическим наблюдениям с телескопом Кеплер, указало на присутствие у них тех или иных проявлений активности (повышенная вспышечная активность у одного из них, высокая пятенная активность у другого и прочее). Сделан вывод, что при изучении планетных систем у звезд спектрального класса К, включая планеты в зоне обитаемости, детальное исследование проявлений активности каждой конкретной звезды остается крайне желательным.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — звезды: активные — звезды: маломассивные — экзопланеты*

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье Hill et al. (2023) была проведена каталогизация всех планет, обнаруженных в обитаемой зоне (HZ). Ее авторы предоставили данные о границах HZ, характеристики орбит и оценили перспективы последующих спектроскопических наблюдений. Демография планет HZ становится сопоставимой с полным каталогом экзопланет. Кроме того, Hill et al. (2023) выделили экстремальные планеты в пределах HZ и обсудили, как их уникальные свойства могут повлиять на их потенциальную обитаемость.

Большой постоянный интерес представляет поиск миров с обитаемой зоной у звезд, сходных по свойствам с Солнцем. Помимо этих объектов в последние годы активно изучаются М-карлики. Их обитаемая зона находится ближе к звезде, а сами звезды менее массивны, что облегчает обнаружение обитаемых аналогов Земли (и любой

другой планеты) с помощью метода транзитов или по лучевой скорости. Тем не менее, в обоих случаях в процессе исследования возникают значительные проблемы, как инструментального характера, так и связанные с физическими процессами. Хорошо известна высокая активность и запятненность поверхности М-карликов, в результате чего анализ лучевой скорости сталкивается с большими трудностями при обнаружении в ходе спектральных наблюдений планетоподобных сигналов на уровне метров в секунду. Сильные вспышки на этих активных звездах представляют угрозу обитаемости. Малая величина массы звезды и ограниченный диапазон границ зоны обитаемости оставляют малый динамический простор для уменьшенных версий Солнечной системы вокруг этих звезд, на что, возможно, указывает низкая частота встречаемости планет-гигантов вокруг М-карликов по сравнению с G-карликами. Кроме того, звездная активность приводит к затруднениям при оценке звездных параметров, что непосредственно влияет на определение свойств планеты (массы и радиуса).

¹E-mail: igs231@mail.ru

Существует также некоторое расхождение в определении металличности этих звезд с помощью различных методов, что сказывается на надежности определения корреляций между свойствами планет и металличностью.

Значительные по размеру звездные пятна также могут создавать соответствующие вариации блеска вследствие вращательной модуляции. Даже наименее активные М-карлики могут обладать достаточно сильным рентгеновским и ультрафиолетовым излучением. Излучение в XUV-диапазоне особенно важно с точки зрения истинной обитаемости планеты, поскольку оно может вызвать эрозию атмосферы. Высокий уровень XUV-потока может также повреждать клеточные структуры живых организмов и сильно ограничивать их размножение на поверхности таких планет. Кроме того, находясь близко к своим родительским звездам, планеты в HZ могут быть приливно-связанными, всегда обращенными одной и той же стороной к родительской звезде, что снижает вероятность поддержания жизни на их поверхности. У М-карликов планет с массой менее 10 масс Земли в два раза больше, чем у солнечных аналогов, и они расположены на орбитах с периодами менее 10 суток. С другой стороны, G-карлики обладают обитаемыми зонами с орбитами с периодичностью около одного года и выше. Это создает очевидные наблюдательные трудности при обнаружении скалистых планет с помощью метода определения радиальной скорости, требующего проведения кампаний продолжительностью в несколько лет со стабильностью измерительных приборов на уровне сантиметра в секунду.

По мнению Lillo-Vox et al. (2022), в случае К-карликов (более конкретно, поздних К-карликов — K4–M0, с эффективными температурами от 3800 К до 4600 К) имеется компромисс между техническими и физическими возможностями для поиска планет в обитаемой зоне. В отличие от G-карликов, у них обитаемая зона находится ближе, что облегчает обнаружение планет с использованием методов транзита или радиальной скорости. Их звездная активность имеет гораздо меньший масштаб по сравнению с М-карликами и, следовательно, оказывает меньшее влияние как на обнаружение планеты, так и на исследование ее возможной обитаемости. Кроме того, К-карлики являются спокойными с точки зрения осцилляций и шума грануляции. Недостаточная изученность К-карликов и их планет в HZ-зоне возможно связана с отсутствием соответствующих программ наблюдений.

Lillo-Vox et al. (2022) инициировали первый целенаправленный и систематический поиск пригодных для жизни планет вокруг К-карликов — эксперимент КОВЕ (K-dwarfs Orbited By habitable Exoplanets). В рамках этого проекта планируется

изучение переменности лучевой скорости 50 тщательно отобранных К-карликов с помощью прибора CARMENES в течение пяти семестров, в среднем по 90 измерений данных на объект. Основываясь на частоте встречаемости планет, сопоставленной с ограничениями обнаруживаемости, в итоге инициаторы проекта предполагают найти 1.68 ± 0.25 планет на звезду. Более того, в половине выборки ожидается обнаружить одну из этих планет в пределах обитаемой зоны. Очевидно, что для исследуемых звезд необходимо детальное определение их характеристик (см. подробнее об этом в работе Lillo-Vox et al. (2022)).

Цель нашего исследования состоит в изучении проявлений пятенной активности выборки К-карликов из работы Lillo-Vox et al. (2022) с установленными планетами в зоне обитаемости по данным архива космического телескопа Кеплер.

2. ВЫБОР ОБЪЕКТОВ И АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В таблице 1 Lillo-Vox et al. (2022) привели характеристики известных подтвержденных планет в пределах оптимистически оцениваемой обитаемой зоны вокруг поздних К-карликов ($3800 < T_{\text{eff}} < 4600$ К) по состоянию опубликованных данных на май 2022 года. Это сведения о 12 планетах с радиусами от 1.34 до 3.11 радиусов Земли и периодами обращения от 45 до 213 суток. Как указывалось выше, наиболее полный список всех планет, обнаруженных в обитаемой зоне, был представлен в таблице 1 каталога Hill et al. (2023). Мы сделали выборку планетных систем, удовлетворяющую требованиям Lillo-Vox et al. (2022), и установили, что таких систем стало 17. К объектам, перечисленным в таблице 1 (Lillo-Vox et al., 2022), следует добавить GJ 414 A b, HD 147379 b, BD-06 1339 c, Kepler-441 b, iot Dra c и BD-11 4672 c.

Мы сформировали объединенный список объектов и выделили те, для которых имеются данные в архиве космического телескопа Кеплер. Таким образом, были выбраны 11 звезд. Для них были рассмотрены кривые блеска, полученные в ходе наблюдений в сети Q3 длительностью в 90 суток. Основная цель нашего анализа состояла в изучении пятенной активности объектов по результатам определения амплитуд переменности блеска. Найденные величины периодов вращения объектов носят оценочный характер, поскольку нами рассматривался лишь один сет наблюдений Q3, а не максимально возможный набор данных для объекта. Более точные величины периодов вращения имеются в литературе, наши оценки достаточно хорошо согласуются с ними, мы их не приводим. Анализ фотометрических данных был проведен с

помощью модифицированной программы *activity* (Savanov, 2018). Полученные для отобранных объектов результаты проиллюстрированы на диаграммах рис. 1. Все кривые блеска характеризуются выраженной вращательной модуляцией блеска (они приведены на левых панелях рис. 1). Обработка данных была аналогична выполненной нами ранее для карликов поздних спектральных классов.

Рассчитанные спектры мощности переменности блеска звезд (см. панели в средней части рис. 1) указали на наличие пиков, соответствующих величинам периода вращения. Фазовые диаграммы переменности блеска представлены на правых панелях рис. 1. Для некоторых объектов (например, КИС 5871985, КИС 9351316) хорошо заметны изменения кривых блеска на временах, сопоставимых с периодами вращения звезд, что свидетельствует о достаточно быстрой эволюции пятен на их поверхности. Горизонтальные линии характеризуют величину R_{var} амплитуды вариаций блеска объектов. Максимальное значение величины полной амплитуды переменности блеска нескольких звезд может достигать 1.6–2.6%, что, несомненно, указывает на повышенную площадь пятен на их поверхности. Используя упрощенную методику (см., например, Savanov (2022)), на основе величин R_{var} и характеристик объектов из архива данных телескопа Кеплер можно получить значения параметра запятненности A . Следует отметить также, что амплитуда переменности блеска дает возможность получить только оценку площади пятен на поверхности звезды. Мы не располагаем сведениями о величине угла наклона оси вращения объекта к лучу зрения. Очевидно, что наличие полярных и равномерно распределенных по поверхности пятен не приводит к модуляции блеска и прочим эффектам.

Полученные нами данные о величинах R_{var} и значениях параметра запятненности A (выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) приводятся в таблице 1. По нашей оценке, площадь пятен на поверхности рассматриваемых в работе К-карликов превосходит величину A , характерную для Солнца, но сопоставима с ее максимальными значениями. Исключением является активная звезда КИС 9351316, для которой площадь пятен составляет 7588 м.д.п. Также обратим внимание, что кривая блеска КИС 5871985 обладает сложной структурой. На спектре мощности имеются детали, вероятно, указывающие на мультипериодичность изменений блеска. Отметим, что в каталоге данных о дифференциальном вращении звезд (Reinhold et al., 2013) приведено только одно значение периода — 24.3848 ± 0.1421 суток, совпадающее с нашим главным пиком на спектре мощности.

Таблица 1. Данные о величинах R_{var} и значениях параметра запятненности A

КИС	T_{eff} , К	R_{var}	A , м.д.п.
3642335	3903	0.0139	2525
4138008	4408	0.0034	1087
5871985	4476	0.0085	2592
5938970	4366	0.0056	1715
6106282	3813	0.0156	2299
6960913	4014	0.0057	1387
9351316	4243	0.0255	7588
10604335	4123	0.0111	2607
11176127	4464	0.0041	1216
11284772	4243	0.0058	1669
11622600	4313	0.0037	910

3. АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ КИС 5938970

При рассмотрении данных, представленных на рис. 1, наше внимание привлекла звезда КИС 5938970 (Kepler-1540). Среди исследованных объектов с планетными системами в зоне НЗ она является единственной, у которой открыты вспышки (Yang and Liu, 2019). Мы изучили проявления ее активности более детально.

Мы провели анализ всех имеющихся данных для КИС 5938970 в архиве космического телескопа Кеплер (13 сетов наблюдений). Их обработка была аналогична примененной нами в предыдущих работах. Прежде всего мы рассмотрели данные каждого из 13 сетов. Кривая блеска КИС 5938970, соответствующие ей спектр мощности и фазовая диаграмма для наблюдений в третьем сете представлены на рис. 1.

При дальнейшем анализе мы отобрали в совокупности 50 173 единичных измерений за период наблюдений длительностью около четырех лет. Для каждого интервала наблюдений соответствующие измерения были нормированы на среднее значение, все данные были объединены в единый массив. Рассчитанный спектр мощности (рис. 2а) характеризуется двумя изолированными пиками, соответствующими кратным периодам в $7^{\text{d}}5448$ и $15^{\text{d}}1447$. На спектре мощности на рис. 1 для данных только третьего сета период $7^{\text{d}}5$ отсутствует, есть лишь период порядка 15 суток. На рис. 2 пик на спектре мощности для меньшего из кратных периодов является доминирующим.

Как указывалось нами в предыдущих исследованиях, наличие двух кратных пиков на спектре мощности часто свидетельствует о существовании холодных областей на противоположных по долготу полушариях звезды. При этом, в зависимости

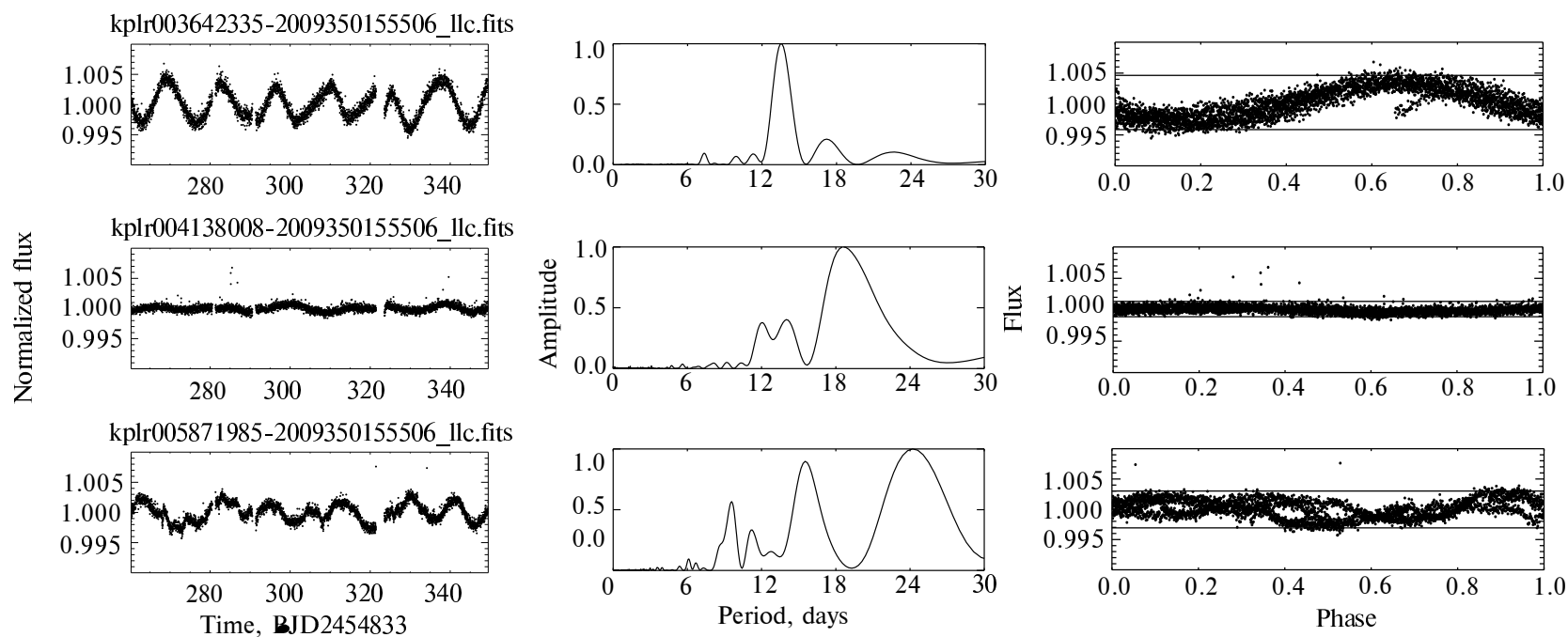


Рис. 1. Слева — кривые блеска для 11 К-карликов, в центре — спектры мощности переменности блеска, справа — фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторе Q3.

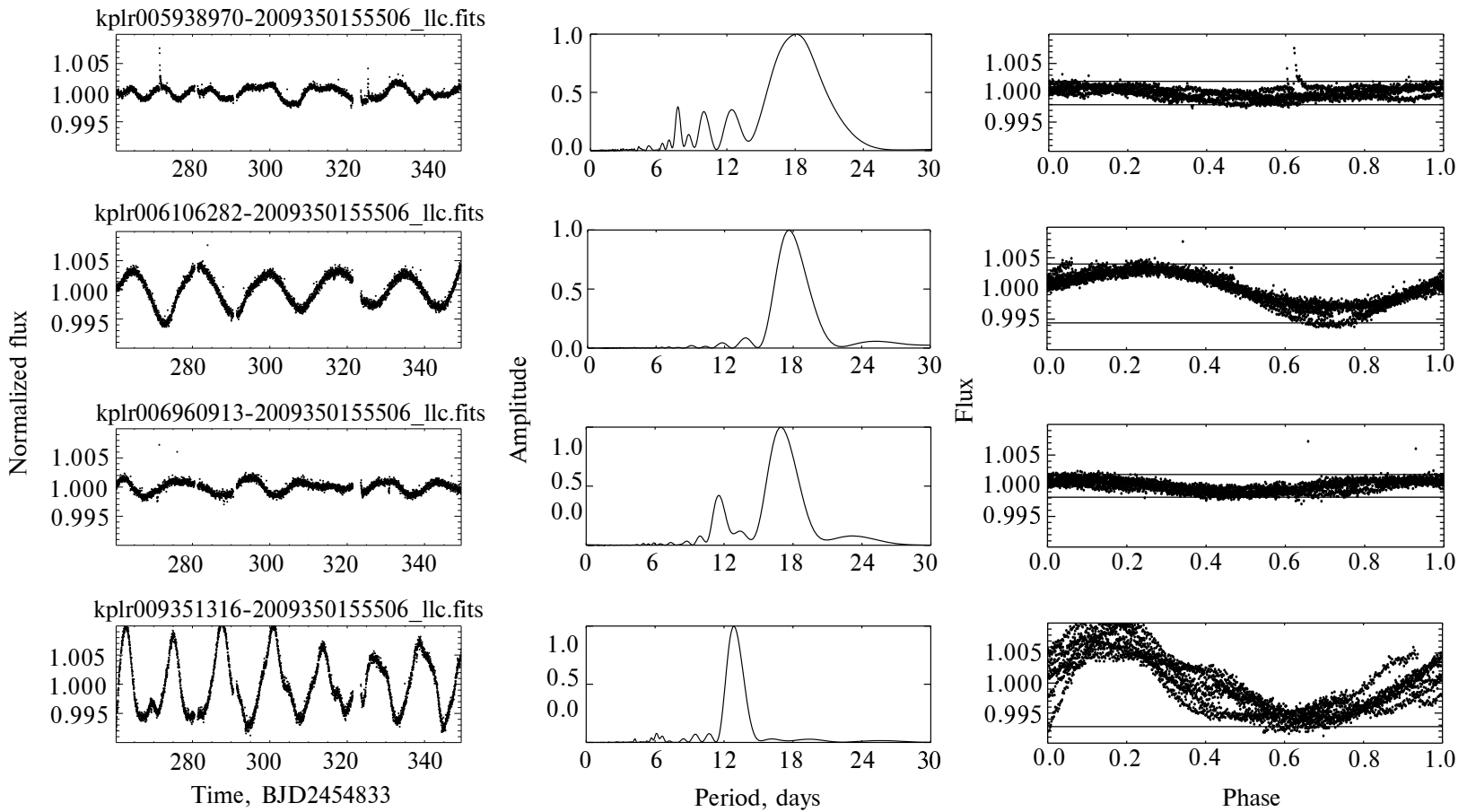


Рис. 1. Продолжение.

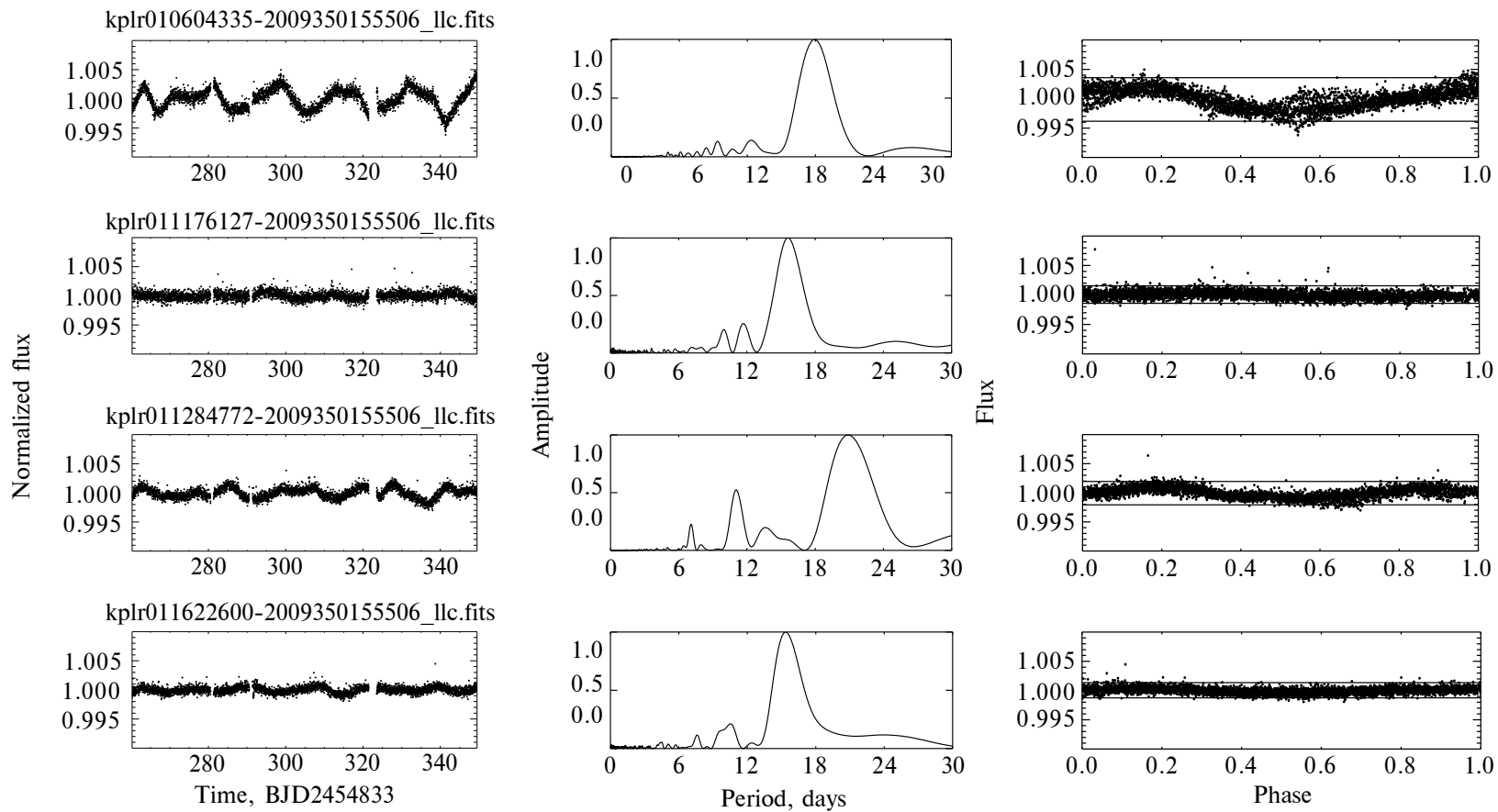


Рис. 1. Продолжение.

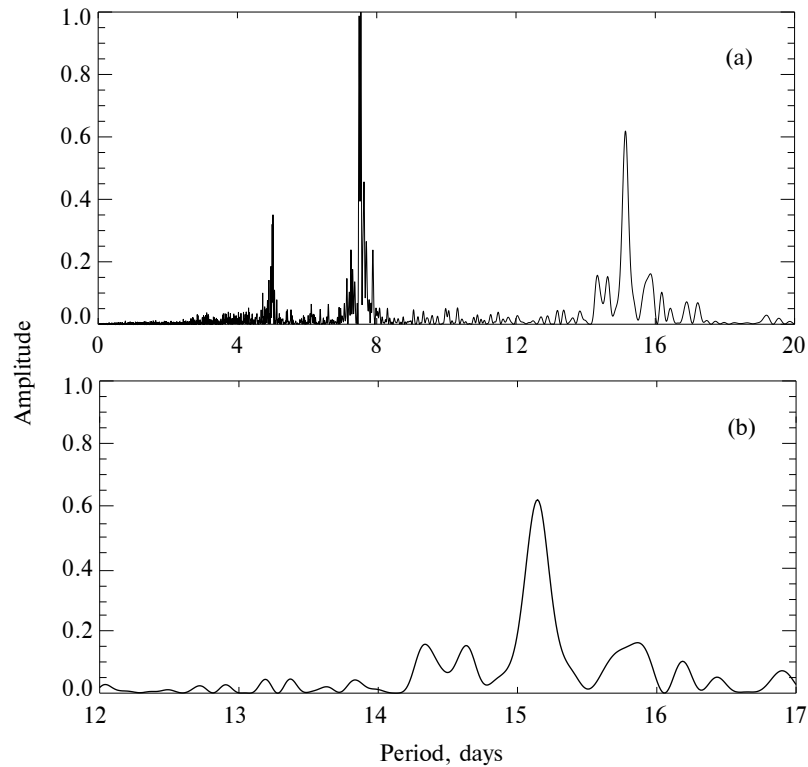


Рис. 2. Панель (а) — спектр мощности переменности блеска KIC 5938970. Панель (б) — спектр мощности переменности блеска объекта для интервала 12–17 суток.

от особенностей вида фазовой кривой блеска, доминирующим может являться и пик, соответствующий половинному значению периода вращения P . Для ответа на вопрос о присутствии второй активной долготы на поверхности KIC 5938970 может потребоваться, например, построение карт поверхностных температурных неоднородностей, которое станет возможным в будущем после установления угла наклона оси ее вращения.

Структура пика, характеризующего период вращения звезды, имеет сложную форму. Если придерживаться предположения о наличии пятен (или групп пятен), расположенных на различных широтах звезды, обладающей дифференциальным вращением, то по неоднократно применяемой нами методике (см. о ней, например, в работе Reinhold et al. (2013)) можно вычислить параметр $\Delta\Omega$, который по нашей оценке составляет 0.024 ± 0.007 рад./сут.

Согласно каталогу Yang and Liu (2019), вспышечная активность KIC 5938970 выше солнечной, диапазон изменений энергий вспышек $\lg E$ составляет 32.95–34.48. В каталоге приводятся данные о 19 наиболее сильных вспышках.

Оценка возможного долговременного изменения активности объекта была проведена нами по данным многолетнего обзора KWS¹ — Kamogata

¹kws.cetus-net.org

Wide-field Survey (Maehara, 2014). В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах V и I_c . Наиболее многочисленными являются данные о блеске объекта в фильтре V (в нашем исследовании мы изучим только эти измерения). Всего было рассмотрено 99 оценок блеска звезды в этом фильтре. Они охватывают длительный интервал наблюдений с 2013 по 2023 год продолжительностью в 3310 суток. Представленные на рис. За данные, несомненно, свидетельствуют об изменениях блеска звезды в доступном нам интервале наблюдений, которые, вероятно, имеют и циклический характер, и слабое монотонное увеличение блеска. Величины возможных циклов составляют 1060 и 1605 суток (2.8 и 4.4 года соответственно). В области малых величин периода вращения P доминирует пик около 7 суток, соответствующий половинному значению его величины.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В наших предыдущих работах мы неоднократно обращались к задаче изучения активности звезд с планетными системами, в том числе имеющих планеты в HZ (см. публикации Savanov (2015; 2022) и ссылки в них).

В настоящей работе представлены результаты изучения проявлений пятенной активности 11

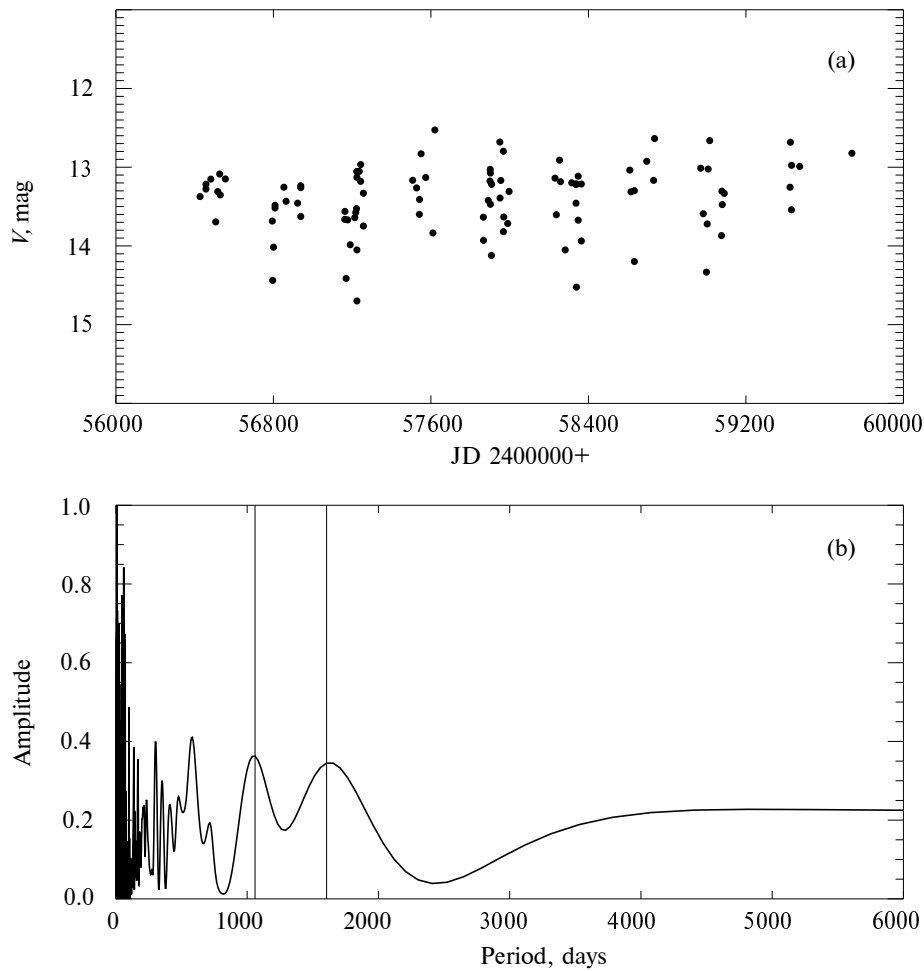


Рис. 3. (a) — фотометрические наблюдения KIC 5938970 по данным обзора Kamogata Wide-field Survey. (b) — спектр мощности для этих данных, вертикальные линии соответствует циклам активности 1060 и 1605 сут. (2.8 и 4.4 года соответственно).

К-карликов с установленными планетами в зоне обитаемости по данным архива космического телескопа Кеплер, согласно Lillo-Vox et al. (2022). Были рассмотрены их кривые блеска, полученные в ходе наблюдений в сети Q3 длительностью в 90 суток. Основные результаты нашего анализа пятенной активности объектов по определениям амплитуд переменности блеска приводятся в таблице 1 и проиллюстрированы на рис. 1. Найдено, что величины параметра A на поверхности К-карликов из нашего списка превосходят величину, характерную для Солнца, но сопоставимы с ее максимальными значениями. Исключением является активная звезда KIC 9351316, у которой $A = 7588$ м.д.п.

Выполнено детальное исследование звезды KIC 5938970 (Kepler-1540) — единственной среди рассматриваемых объектов с планетными системами в HZ, у которой были открыты вспышки. Согласно Yang and Liu (2019), ее вспышечная активность выше, чем солнечная, диапазон изменений энергии вспышек $\lg E$ составляет

32.95–34.48. Нами были получены оценки периода вращения звезды $P = 15^d.1447$ и параметра $\Delta\Omega = 0.024 \pm 0.007$ рад./сут. По данным многолетнего обзора KWS (99 оценок блеска звезды в фильтре V в интервале наблюдений продолжительностью в 3310 суток) сделан вывод о наличии циклического и слабого монотонного увеличения блеска. Характерные величины длительности возможных циклов равны 2.8 и 4.4 годам.

Как было отмечено выше, к объектам, перечисленным в таблице 1 работы Lillo-Vox et al. (2022), следует добавить еще шесть К-карликов и среди них, GJ 414 A, детальный анализ активности которого представил Savanov (2023). У этой звезды спектрального класса K7 обнаружено две планеты, одна из которых (GJ 414A b) при эксцентриситете $e = 0.45$ на протяжении большей части своей орбиты находится в пределах зоны обитаемости. Литературные данные указывают на период ее вращения $P = 42$ суток. Однако по периодограммам,

построенным по другим наблюдениям GJ 414A, наличие такого периода не подтверждается. Цикл долговременной активности звезды составляет величину порядка 3800 суток (10.4 лет). Полученные результаты изучения ее активности использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты GJ 414A b по аппроксимационной формуле для модели потери атмосферы с ограничением по энергии. По 486 оценкам параметра S_{HK} были выполнены расчеты потери вещества атмосферой GJ 414A b в течение 15.9 лет.

Таким образом, следует заключить, что наше исследование активности примерно у половины из известных на настоящее время K-карликов с планетами в зоне обитаемости (11 объектов из 17 в полном списке), выполненное по высокоточным фотометрическим наблюдениям с телескопом Кеплер, показало, что у них присутствуют те или иные проявления активности (повышенная вспыхивающая активность у одного из них, высокая пятенная активность у другого и прочее). Эти результаты свидетельствуют о том, что хотя K-карлики действительно имеют ряд преимуществ по сравнению с M-карликами и звездами солнечного типа, при изучении планетных систем, в том числе в HZ, детальное исследование проявлений активности каждой конкретной звезды остается крайне желательным.

БЛАГОДАРНОСТИ

В настоящей работе использовались сведения из астрономической базы данных SIMBAD, архивов космической миссии Кеплер и Kamogata Wide-field Survey.

Analysis of the Activity of 11 K-type Dwarfs with Planets in the Habitable Zone

I. S. Savanov¹

¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

We report the results of a study of spot activity manifestations in 11 K-type dwarfs with established planets in the habitable zone according to the data from the Kepler space telescope archive acquired during 90-day long Q3-set observations. We found that the spot area A on the surface of K-type dwarfs of our list is greater than the characteristic solar value, but is comparable to the maximum levels observed for the Sun, except for the active star KIC 9351316 with $A = 7588$ MSH. We performed a detailed study of the K-type dwarf KIC 5938970 (Kepler-1540) with flare activity is higher than that of the Sun and flare energy $\log E$ spanning the 32.95–34.48 interval. We estimated the rotation period of the star, $P = 15^{\text{d}}1447$, and its parameter $\Delta\Omega = 0.024 \pm 0.007$ rad/day. Based on the Kamogata Wide-field Survey data (99 V-band magnitude estimates in 3310 days) we conclude that photometric variations include cyclic changes and a weak monotonic brightness increase. The characteristic periods of possible cycles are equal to 2.8 and 4.4 years. Our study of the star's activity in about half of the currently known K-type dwarfs with planets in the habitable zone (11 objects among 17 stars in the complete list) based on high-precision observations made with the Kepler telescope revealed certain activity manifestations (high flare activity in one star, high spot activity in another, etc.). We conclude that a detailed study of activity manifestations in each particular star is highly desirable when studying planetary systems of K-type stars including planets in the habitable zone.

Keywords: *methods: data analysis—stars: activity—stars: low-mass—exoplanets*

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашения № 075-15-2019-1875 и № 075-15-2022-1109)).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. L. Hill, K. Bott, P. A. Dalba, et al., *Astron. J.* **165** (2), id. 34 (2023).
2. J. Lillo-Box, N. C. Santos, A. Santerne, et al., *Astron. and Astrophys.* **667**, id. A102 (2022).
3. H. Maehara, *J. Space Sci. Informatics Japan*, **3**, 119 (2014).
4. T. Reinhold, A. Reiners, and G. Basri, *Astron. and Astrophys.* **560**, id. A4 (2013).
5. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **70** (1), 83 (2015).
6. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **62** (11), 814 (2018).
7. I. S. Savanov, *Astrophysics* **65** (3), 361 (2022).
8. I. S. Savanov, *Astrophysics* **66** (2023) (accepted).
9. H. Yang and J. Liu, *Astrophys. J. Suppl.* **241** (2), article id. 29 (2019).