

УДК 524.316-13

ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДНЫХ ПЯТЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ЗВЁЗД, ОБЛАДАЮЩИХ ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ, ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА KEPLER

© 2015 И. С. Саванов*

Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 15 августа 2014 года; принята в печать 24 октября 2014 года

По фотометрическим наблюдениям космического телескопа Kepler рассмотрены свойства активных областей (холодных пятен) на поверхности 737 звезд, обладающих планетными системами (экзопланетами). Рассмотрены три метода определения площади запятненности (S) поверхности звезд. На примере двух звезд (KOI 877 и KOI 896) проведено сопоставление результатов определения S тремя указанными методами. Рассмотрены зависимости величины запятненности звезд с планетными системами от эффективной температуры и периода их осевого вращения. Не найдено указаний на то, что магнитная активность звезды с экзопланетами имеет выраженные особенности, отличающие ее от активности звезд более обширной выборки. Запятненность звезд с планетными системами в подавляющем большинстве случаев не превосходит 5% от площади их поверхности. Три объекта, для которых она превосходит величину в 5%, рассмотрены детально. Найдено, что для звезд с эффективными температурами менее 5750 К существует монотонное уменьшение величины запятненности с увеличением периода вращения звезды. Среди звезд с эффективными температурами менее 5750 К и периодами вращения до 10 суток отсутствуют звезды с малыми величинами S (менее 0.002). Звезды с эффективными температурами более 5750 К имеют очень малую запятненность при быстром вращении, но S возрастает для объектов с периодами вращения 20–25 суток.

Ключевые слова: *звёздные пятна — звёзды: статистика — звёзды: активность — планетные системы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдательные данные, полученные космическим телескопом Kepler, послужили материалом для многочисленных исследований как экзопланет, так и самих звезд, обладающих планетными системами. Беспрецедентная точность (лучше нескольких тысячных звездной величины) фотометрических наблюдений дала возможность определения параметров орбит и свойств планет (горячих юпитеров и планет земного типа). Помимо этого, высокая точность фотометрических наблюдений позволяет установить по периодической переменности блеска звезды, вызванной ее вращением, наличие и свойства активных областей (пятен) на поверхности звезд, обладающих планетными системами, и установить характеристики их магнитной активности. Исследования магнитной активности таких звезд дают обширные возможности для проверки разрабатываемых моделей генерации магнитных полей и изучения влияния магнитного поля звезды на окружающую ее планетную систему (аналог

формирования космической погоды в нашей Солнечной системе).

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для решения поставленной задачи изучения холодных пятен (активных областей) на поверхности звезд поздних спектральных классов, обладающих планетными системами, мы использовали данные таблицы 1 из работы [1] для 12 кварталов наблюдений (Q3–Q14). В окончательную выборку были включены данные о 737 объектах, для которых в [1] были установлены периоды вращения и имелись надежные определения параметров атмосфер (эффективной температуры и ускорения силы тяжести) и которые не являются затменно-двойными системами (т.е. их фотометрическая переменность обусловлена наличием холодных пятен). Согласно [1], величины периодов вращения для рассматриваемых 737 звезд лежат в интервале значений от 0.9 до 62 суток. При этом величины амплитуд фотометрической переменности R_{var} находятся в интервале от 0.18 до 64 mmag. Указанные величины R_{var} позволили нам оценить запятненность поверхности

*E-mail: isavanov@inasan.ru

изучаемых звезд и провести однородную оценку магнитной активности достаточно большой выборки звезд, обладающих планетными системами.

3. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАПЯТНЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗВЕЗД ПО ПЕРЕМЕННОСТИ ИХ БЛЕСКА

Запятненность поверхности исследуемых звезд по фотометрическим наблюдениям может быть оценена несколькими способами. Мы рассмотрим три из них.

Во-первых, это решение обратной задачи восстановления поверхностных температурных неоднородностей звезд по их кривым блеска. При этом нам требуется знать периоды вращения исследуемых звезд. Соответствующие данные о периодах вращения, установленные из анализа автокорреляционных функций, построенных для кривых блеска, были взяты нами из [1]. Анализ каждой индивидуальной кривой блеска исследуемой звезды был проведен с помощью программы *iRN* [2, 3]. Программа решает обратную задачу восстановления карты температурных неоднородностей звезды по кривой блеска в двухтемпературном приближении (при вычислениях задаются температуры невозмущенной фотосферы и пятна). Детали, связанные с описанием программы и ее тестов, были представлены нами ранее в [2]. Температура фотосфер звезд может быть принята по результатам, приведенным в таблице 1 работы [1], а температура пятен — по соотношению между температурами пятен и невозмущенной фотосферы [4]. Точные величины угла i (наклона оси вращения звезды к лучу зрения) в [1] не приводятся, но поскольку нами рассматриваются звезды, планетные системы которых были открыты по факту прохождения планет по диску звезд, в нашем анализе была принята величина $i = 90^\circ$. В результате вычислений (решения обратной задачи [2]) для каждой элементарной площадки размером $6^\circ \times 6^\circ$ на поверхности звезды может быть определен фактор заполнения f (доля поверхности элементарной площадки, занимаемая пятнами) и суммарная величина — полная площадь пятен S на поверхности звезды. В литературе (см. [4]) при оценке запятненности поверхности звезд рассматриваются как величины, определяемые, как доли от полной поверхности, которую мы можем видеть в течение периода вращения, так и величины, определяемые как доли от поверхности полусферы. В нашем анализе под величиной S мы всегда понимаем первое — долю от полной видимой поверхности звезды.

Это самый трудоемкий и требующий большого объема вычислений способ определения запятненности, однако он дает возможность установить величину S для каждого оборота звезды и проследить

эволюцию пятен со временем, а также положения активных областей на диске звезды (преимущественно — их долгот).

Помимо точных модельных расчетов, основанных на решении обратной задачи восстановления температурных карт по фотометрическим или спектральным наблюдениям, площадь пятен на поверхности звезд поздних спектральных классов может быть установлена по упрощенной методике, предложенной в [5]. Модификация метода, разработанная нами и представленная в [6], была эффективно применена к достаточно большой выборке объектов и позволила получить однородные данные, использованные для построения зависимости запятненности S от эффективной температуры звезды и величины проекции скорости вращения звезды на луч зрения. Как было отмечено в [6], метод, предложенный в [5], использует ряд предположений и допущений. При нашей реализации метода мы отказались от использования в вычислениях соотношений, связывающих параметр поверхностной яркости с показателями цвета, а использовали непосредственно данные, основанные на вычислениях с моделями атмосфер из сеток Куруца или Phoenix. В [6] было отмечено, что если мы не ставим цели определения температур пятен, то можно ограничиться рассмотрением переменности изучаемых звезд лишь в одном фильтре (в нашем случае это соответствует величинам R_{var} , приводимым в статье [1]). В [6] было отмечено, что при этом метод фактически указывает лишь на амплитуду изменения S максимально запятненного полушария звезды по сравнению с противоположным. Таким образом, нами может быть получена лишь нижняя граница величины запятненности, поскольку мы не знаем уровня блеска звезды при отсутствии пятен на ее поверхности. Несомненным достоинством является то, что метод может быть применен к достаточно большим выборкам объектов и, что самое важное, предоставляет однородные данные, которые могут быть использованы для статистических оценок и установления зависимостей общего характера. К их числу, прежде всего, принадлежит интересующая нас зависимость запятненности от эффективной температуры и периода вращения звезды. Информация о температуре пятен привлекается из независимых оценок — например, по уже упомянутой зависимости между температурами пятна и невозмущенной атмосферы [4]. Таким образом, входными параметрами нашей модели для определения величины S являются амплитуда переменности блеска звезды и данные о температурах фотосферы звезды и пятен на ее поверхности.

Именно этот метод мы выберем в качестве основного при расчетах в нашем исследовании.

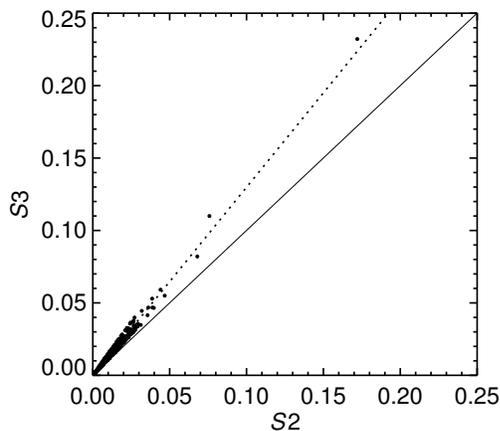


Рис. 1. Сопоставление величин $S2$ и $S3$ для 762 объектов из [1] (штриховая линия — средняя зависимость). Величины $S2$ и $S3$ выражены в долях от полной видимой поверхности звезды.

Наконец, совсем грубая оценка площади пятен на поверхности звезд поздних спектральных классов может быть получена из соотношения

$$\Delta F/F = (1 - (T_{\text{spot}}/T_{\text{phot}})^4) S, \quad (1)$$

где F — средний поток излучения от звезды (см. [7]).

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ S ТРЕМЯ УКАЗАННЫМИ МЕТОДАМИ

На примере двух объектов из полной выборки 737 звезд мы провели сопоставление результатов определения величин S по трем указанным методам (мы будем обозначать их соответственно $S1$, $S2$ и $S3$). Ранее в [8] нами были рассмотрены звезды KOI 877 и KOI 896 (они были выбраны, т.к. входят в число объектов, классифицированных как кандидаты в мультипланетные системы). В то время были выполнены лишь непрерывные 33.5-суточные наблюдения с космическим телескопом Kepler, но это позволило провести изучение поверхностных температурных неоднородностей и проследить эволюцию пятен в течение 2–3 периодов вращения этих объектов. Были получены доказательства существования на поверхности KOI 877 и KOI 896

Запятненность поверхности звезд с планетными системами, определенная разными методами

Звезда	$S1$	$S2$	$S3$
KOI 877	0.0127	0.014	0.019
KOI 896	0.0096	0.011	0.014

двух активных долгот, разделенных между собой расстояниями 165° и 135° для KOI 877 и KOI 896 соответственно. Суммарная площадь запятненной поверхности звезд оказалась сопоставима с солнечной и составляет примерно 0.6–1.1% от полной видимой поверхности объектов. Было установлено, что, вероятно, у KOI 877 в ходе наблюдений произошла смена активности долгот. Сейчас, по более обширному наблюдательному материалу нами было повторено исследование [8]. При этом в совокупности для дальнейшего анализа для каждого объекта было отобрано 64 810 единичных измерений блеска, охватывающих период наблюдений 1459.5 суток. Для уточнения периода вращения KOI 877 и KOI 896 в интересующем нас временном диапазоне от одного до сорока дней по программе Брегера [9] были рассчитаны амплитудные спектры мощности. На графиках спектров мощности имеются характерные пики, соответствующие временам изменений блеска звезды 13.4 и 24.3 суток (P_{phot}). Ранее в [8] нами по ограниченному интервалу наблюдений 33.5 суток были получены оценки периодов вращения объектов: 13.4 и 25.2 суток для KOI 877 и KOI 896 соответственно. Уточненные значения P_{rot} и были приняты при построении температурных карт поверхностей звезд. Весь наблюдательный материал был разделен на 107 сетов для KOI 877 и на 60 — для KOI 896, каждый из которых последовательно охватывал один полный период вращения звезды. Неполные сеты для каждого объекта в дальнейшем анализе не рассматривались. Подробное описание результатов анализа кривых блеска KOI 877 и KOI 896 будет представлено в отдельной публикации. В данном исследовании сообщим лишь результаты определения запятненности поверхности для KOI 877 и KOI 896. Средние значения параметра $S1$, установленные по 107 сетам для KOI 877 и по 60 для KOI 896, составили 1.27% и 0.96% соответственно.

Полученные результаты ($S1$) были сопоставлены с определениями параметра запятненности по упрощенной методике ($S2$), предложенной в [5] и модифицированной нами [6], а также с вычисленными по соотношению (1) — $S3$. Они приведены в таблице. Данные таблицы указывают на то, что результаты точных вычислений и результаты определений S по методике [6] согласуются между собой, хотя величины последних систематически выше. Можно предположить, что данное обстоятельство обусловлено тем, что при определении величин $S2$ используются экстремальные значения амплитуд переменности блеска за весь промежуток наблюдений, а при определении $S1$ — амплитуды кривых блеска единичных сетов, охватывающих один оборот звезды вокруг своей оси. Вычисленные по соотношению (1) величины $S3$ — самые большие (до полутора раз по отношению к точным

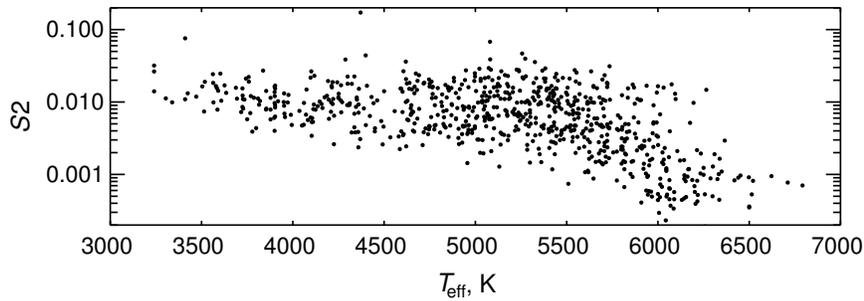


Рис. 2. Изменение запятненности $S2$ звезд, обладающих планетными системами, с изменением эффективной температуры этих объектов. Величины $S2$ выражены в долях от полной видимой поверхности звезды.

вычислениям $S1$). Сопоставление величин $S2$ и $S3$, представленное на рис. 1, подтверждает сделанный выше вывод о систематических различиях величин $S2$ и $S3$ и, кроме того, указывает на возможность калибровки полученных по формуле (1) результатов (благодаря наличию линейной зависимости между $S2$ и $S3$). Это обстоятельство может быть полезным при сопоставлении с результатами других исследований (например, [7]), использующих при оценках S соотношение (1).

5. ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРА ЗАПЯТНЕННОСТИ ОТ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЕРИОДА ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ ЗВЁЗД С ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ

На рис. 2 представлен основной результат нашего исследования — график изменения запятненности $S2$ (индикатора магнитной активности) звезд с экзопланетами с изменением эффективной температуры этих объектов. Для удобства сравнения с рис. 3 из работы [10] ось ординат на рис. 2 представлена в логарифмическом масштабе. По аналогичной [1] методике авторы [10] выполнили исследование периодов вращения 34 030 звезд поздних спектральных классов. Как отмечено в [10], в их результатах явно заметен (рис. 3 в [10]) намечающийся на рис. 2 недостаток объектов с эффективными температурами около 4500 К и 4000 К (им соответствуют массы звезд $0.55 M_{\odot}$ и $0.7 M_{\odot}$), что является артефактом, вызванным температурной калибровкой данных каталога Kepler. Недостаток объектов в области холодных звезд не дает возможности различить бимодальность распределения периодов и переменность у холодных звезд [10]. Верхняя огибающая величин $S2$ достигает своего максимума для температур примерно 5400 К и спадает в области более высоких температур (6000 К–6500 К). Хорошо заметно отсутствие холодных звезд с малой величиной $S2$ (малой амплитудой фотометрической переменности), отмеченное в [10]. Таким образом, можно заключить,

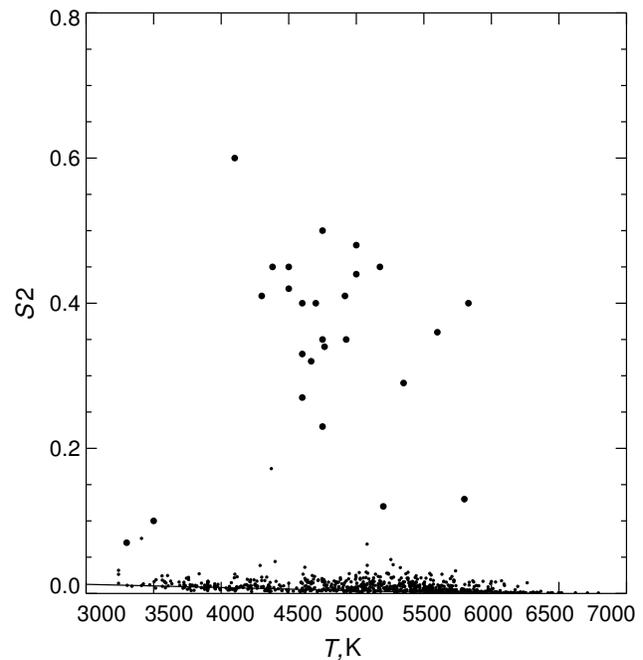


Рис. 3. Сопоставление найденных нами величин $S2$ с данными о запятненности хромосферно-активных звезд, приведенными в обзоре [4] (крупные символы). Величины $S2$ выражены в долях от полной видимой поверхности звезды.

что данные, представленные нами на рис. 2 для звезд с экзопланетами, демонстрируют аналогичные характерные особенности, отмеченные авторами [10] и более заметные для их выборки из 34 030 объектов. При этом нет указаний на то, что магнитная активность звезд с экзопланетами имеет выраженные особенности, отличающие ее от активности звезд более обширной выборки из [10].

На рис. 3 полученные нами результаты сопоставлены с данными о запятненности избранных хромосферно-активных звезд, приведенными в обзоре [4]. Рисунок наглядно демонстрирует различия в уровне магнитной активности (как следствие, за-

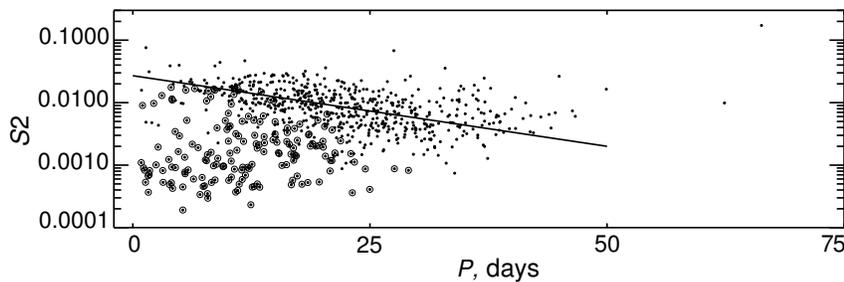


Рис. 4. Изменение запятненности S_2 звезд, обладающих планетными системами, с изменением периода вращения. Величины S_2 выражены в долях от полной видимой поверхности звезды. Данные для звезд с эффективными температурами менее 5750 К представлены черными кружками, для звезд с эффективными температурами более 5750 К — оконтуренными кружками. Сплошная линия — зависимость величины запятненности S_2 от периода вращения для звезд с эффективными температурами менее 5750 К.

пятненности) у этих двух групп объектов. Величина S_2 для рассматриваемых нами звезд с планетными системами в подавляющем большинстве случаев не превосходит 5% от площади их поверхности. Нами были установлены три объекта, для которых S_2 превосходит величину в 5%, эти объекты заслуживают особого внимания.

Объект KIC 3128793 ($S_2 = 0.17$), возможно, является затменной системой [11]. Переменность его блеска не может быть интерпретирована как проявление вращательной модуляции, вызванной холодным пятном на поверхности. Система KIC 11548140 ($S_2 = 0.08$) скорее всего относится к двойным системам, состоящим из активного МЗ-карлика и холодного белого карлика [12] (наблюдается прохождение белого карлика по диску звезды, а не планеты). И лишь для третьего из упомянутых объектов, KIC 11548140 ($S_2 = 0.07$), переменность блеска, возможно, связана с наличием холодных пятен на поверхности, но это обстоятельство в будущем должно быть исследовано более детально.

В нашем предыдущем исследовании [6] мы сделали попытку установить связь параметра S с другими свойствами изучаемых звезд. Рассмотрение диаграммы, связывающей запятненность S с периодом вращения звезды (по имеющимся в нашем распоряжении данным), привело нас к предварительному выводу об отсутствии связи между этими величинами. В [6] было отмечено недостаточное количество используемых данных. Например, периоды вращения звезд были лишь в пределах от 0.3 до 25 суток, кроме того фотометрическая точность была невысока по сравнению с фотометрической точностью наблюдений с телескопом Kepler. Было отмечено, что во всем диапазоне изменений периода встречаются звезды и с малыми, и с большими значениями S .

Выполненное нами исследование объектов с экзопланетами позволяет построить новую диаграмму зависимости S_2 от периода вращения звезды

(см. рис. 4). Для звезд с эффективными температурами менее 5750 К существует заметная зависимость величины запятненности от периода вращения звезды (монотонное уменьшение S_2 вплоть до периодов в 35–40 суток). Дальнейшее изменение S_2 неясно из-за малочисленности данных для звезд с периодами вращения более 40 суток. Еще одно любопытное обстоятельство состоит в том, что для звезд с эффективными температурами менее 5750 К и периодами вращения менее 10 суток отсутствуют звезды с малыми величинами S (менее 0.002). Напротив, звезды с эффективными температурами более 5750 К, как правило, имеют очень малую запятненность для быстровращающихся звезд, которая возрастает для объектов с периодами вращения 20–25 суток. Все эти особенности будут рассмотрены нами отдельно при исследовании данных с телескопа Kepler для более многочисленной выборки звезд (не обладающих планетными системами).

6. ВЫВОДЫ

По фотометрическим наблюдениям высокой точности, полученным с космическим телескопом Kepler, рассмотрены свойства активных областей (холодных пятен) на поверхности звезд с планетными системами. Анализ выполнен по данным о 737 объектах, для которых в [1] были установлены периоды вращения и имеются надежные определения параметров атмосфер. Рассмотрены три метода определения запятненности поверхности звезд по их фотометрическим наблюдениям (величины S_1 , S_2 и S_3). На примере двух звезд (KOI 877 и KOI 896) из полной выборки в 737 звезд мы провели сопоставление результатов определения S_1 – S_3 тремя указанными методами. Найдено, что результаты точных вычислений S_1 и определений S_2 по методике [6] согласуются между собой, хотя величины последних систематически выше. Рассмотрены изменения запятненности (S_2) звезд

с планетными системами с изменением эффективной температуры этих объектов и периода их осевого вращения. Величина S_2 для этих звезд в подавляющем большинстве случаев не превосходит 5% от площади их поверхности. Три объекта, для которых она более 5%, рассмотрены детально. Мы не нашли указаний на то, что магнитная активность звезды с экзопланетами имеет выраженные особенности, отличающие ее от активности звезд более обширной выборки из [10].

Найдено, что для звезд с эффективными температурами менее 5750 К величины запятненности монотонно уменьшаются с увеличением периода вращения звезды. Для звезд с эффективными температурами менее 5750 К и периодами вращения до 10 суток установлено отсутствие звезд с малыми величинами S (менее 0.002). Звезды с эффективными температурами более 5750 К имеют очень малую запятненность для быстровращающихся звезд, которая возрастает для объектов с периодами вращения порядка 20–25 суток.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен команде космического телескопа Kepler и команде архива MAST (архив

Б. А. Микульски для космических телескопов) за возможность использования данных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. McQuillan, T. Mazeh, and S. Aigrain, *Astrophys. J. Lett.* **775**, L11 (2013).
2. I. S. Savanov and K. G. Strassmeier, *Astronomische Nachrichten* **329**, 364 (2008).
3. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **56**, 116 (2012).
4. S. V. Berdyugina, *Living Reviews in Solar Physics* **2**, 8 (2005).
5. S. S. Vogt, *Astrophys. J.* **250**, 327 (1981).
6. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **58**, 478 (2014).
7. Y. Notsu, T. Shibayama, H. Maehara, et al., *Astrophys. J.* **771**, 127 (2013).
8. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **55**, 341 (2011).
9. M. Breger, *Comm. Asteroseism.* **6**, 1 (1990).
10. A. McQuillan, T. Mazeh, and S. Aigrain, *Astrophys. J. Suppl.* **211**, 24 (2014).
11. A. Prsa, N. Batalha, R. W. Slawson, et al., *Astron. J.* **141**, 83 (2011).
12. P. S. Muirhead, A. Vanderburg, A. Shporer, et al., *Astrophys. J.* **767**, 84 (2013).

A Study of Cold Spots on the Surfaces of Stars with Planetary Systems from the Kepler Space Telescope Data

I. S. Savanov

Based on the photometric observations obtained with the Kepler telescope, we investigated the properties of the active regions (cold spots) on the surfaces of 737 stars with planetary systems (exoplanets). We used three methods for determining the spottedness (S) of stellar surfaces. A comparison of the results of the S determination through these three methods was performed for two stars (KOI 877 and KOI 896), taken as examples. We studied the dependences of the spottedness of the stars with exoplanets on the effective temperature and on the period of their axial rotation. There is no evidence that the magnetic activity of a star with exoplanets has any special features that distinguish it from the activity of the stars from a wider sample. The spottedness of stars with planetary systems in most cases does not exceed 5% of the area of their surface. The three objects for which it exceeds 5% were examined in detail. It was found that for the stars with effective temperatures less than 5750 K, there is a monotonic decrease of the spottedness with the increase of the rotation period of the star. We established the absence of stars with small values of S (less than 0.002) among the stars with effective temperatures less than 5750 K and rotation periods less than 10 days. Stars with effective temperatures of more than 5750 K have small spottedness in the case of rapid rotation, but S increases for objects with rotation periods of 20–25 days.

Keywords: *starspots—stars: statistics—stars: activity—planetary systems*