ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ КАФЕДРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ АСТРОНОМИИ

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

«Пятна и активность звезд скопления Ясли по наблюдениям с космическим телескопом Кеплер»

Выполнила студентка

636 группы

Калиничева

Евгения Сергеевна

Научный руководитель

к.ф.-м.н. Шугаров Сергей Юрьевич

Москва 2018

Оглавление

1	E	Зведение
2	Γ	Ірирода пятен 5
	2.1	Солнечные пятна
	2.2	Пятна на других звездах9
	2.3	История наблюдений активных звезд11
	2.3	3.1 Космический спутник Кеплер12
3	Ι	Ц ели и задачи14
	3.1	Уровень активности звезд скопления Ясли 14
	3.2	Полностью конвективные карлики 14
4	C	Оценка уровня поверхностной активности звезд 17
	4.1	Погрешности оценок17
	4.2	Моделирование кривой блеска 19
	4.3	Восстановление поверхностной неоднородности по кривой
		блеска 24
	4.4	Наблюдаемые свойства пятен27
	4.4	4.1 Контраст27
	4.4	4.2 Время жизни
	4.4	4.3 Активные долготы
	4.4	4.4 Дифференциальное вращение29
	4.4	4.5 Переменность
	4.4	4.6 Эффект переключения долгот31

5 Результаты анализа фотометрических данных	34
5.1 Поверхностная активность	34
5.1.1 Температура	34
5.1.2 Macca	35
5.1.3 Период вращения	35
5.1.4 Звезды солнечных масс	36
5.1.5 Эволюция звезд разных масс	38
5.2 Карлики	40
6 Выводы	47
7 Список литературы	49
Приложение	52

1 Введение

Большая часть наблюдаемых звезд принадлежит к переменным. Эта переменность может иметь различные причины: пульсации, затмение одного компонента другим в случае двойных и кратных систем, а так же звезд с планетами, нестационарные процессы в аккреционных дисках, ядерные реакции на поверхности компактных объектов и другие. Периодические и квазипериодические изменения блеска некоторых звезд объясняются наличием на их поверхности более холодных и темных по сравнению с остальной фотосферой областей – пятен.

Магнитная активность, похожая на солнечную, наблюдается у большинства Вращение звезды типов холодных звезд. вместе С конвективным движением вещества внутри порождает магнитные поля. Они проявляются в виде темных пятен на фотосфере, ярких факельных полей, корональных петель, вспышек и излучении в ультрафиолетовом, рентгеновском и радио диапазонах. Изучение эволюции пятен на разных временных интервалах может дать нам информацию о вращении, дифференциальном вращении, циклах активности звезд. Это позволяет узнать и о порождающем такие явления магнитном поле. Подобные характеристики могут использоваться для проверки моделей солнечного динамо с помощью других звезд, а также их дополнения. Особенно актуальной эта тема становится в связи с развитием внеатмосферной астрономии и повышением качества получаемых фотометрических данных. Доплеровское картирование и интерферометрический метод получения изображения поверхности звезд точнее, чем фотометрический метод, однако, являются более трудоемкими. Фотометрический метод позволяет исследовать большее число звезд. Следует отметить, что все три

метода построения карт поверхностей звезд являются косвенными и независимыми.

2 Природа пятен

Темные пятна на поверхности – области магнитного поля, генерируемого вихревой турбулентностью в верхних слоях конвективной оболочки звезды. Магнитные линии поднимаются над фотосферой в область короны, подавляя конвекцию (Рисунок 1). Из-за отсутствия притока энергии из более глубоких слоев, температура на поверхности уменьшается. Это приводит к уменьшению потока от конкретной области, что мы и наблюдаем, как темное пятно ввиду сильного контраста с яркой фотосферой. Часто пятна формируются в виде двух близкорасположенных групп с разной магнитной полярностью. Рядом с группами пятен регулярно наблюдаются и так называемые факельные поля – более горячие и яркие области.



Magnetfeldlinien

Рисунок 1. Магнитные линии поднимаются над фотосферой. В местах, где магнитный поток пронизывает фотосферу, образуются пятна разной полярности.

2.1 Солнечные пятна

Первое историческое документально зафиксированное наблюдение солнечных пятен датируется 800 г. до н. э., Китай. Первые зарисовки пятен принадлежат Иоанну Вустерскому, 1128 год. Согласно древнерусским летописям, потемнение диска Солнца наблюдалось и в 14 веке. В 17 веке Галилей наблюдал солнечные пятна уже с помощью телескопа. Считая их особенностями солнечной структуры, он вычислил период обращения светила. В 1845 году Д. Генри и С. Александр экспериментально установили, что интенсивность излучения солнечных областей с пятнами чем незапятненных. В ЭТО время появляется заметно ниже, же представление о периодических изменениях уровня запятненности Солнца. В середине 19го века Р. Каррингтон обратил внимание на движение пятен. Ему удалось установить, что в новом цикле первые пятна появляются сначала на широте около 30 градусов по обе стороны от экватора, постепенно сближаясь до десятиградусных широт. Позднее Э. У. Маундер представил эту закономерность в виде графика, получившего название «Бабочки Маундера» из-за сходства с раскрытыми крыльями (Рисунок 2). В конце 19го века Э. У. Маундеру при изучении архива наблюдений удалось найти знаменитый минимум солнечной активности с 1645 по 1715 года, когда вместо ожидаемых 40000 пятен их было зарегистрировано всего около 50. Этот интервал совпадает с Малым ледниковым периодом на Земле. Тогда же, в конце 19го века, П. Зееман доказал, что в сильных магнитных полях возможно расщепление спектральных линий атомов водорода. В начале 20го века Э. Хэйл нашел такое расщепление в излучении от пятен и предсказанную Зееманом поляризацию света линий дуплета в противоположных направлениях. Это позволило Э. Хэйлу вычислить величину магнитного поля в пятнах – до 3000 гауссов. Ранее И. Ламонт и Э. Сэбин обнаружили корреляцию величины магнитного поля Земли, не превышающего в среднем и полгаусса, с количеством пятен на Солнце. Также Э. Хэйлом обнаружена закономерность парного появления пятен в каждом полушарии: пятна в паре имеют различную магнитную полярность и, более того, меняют ее с каждым 11-летним циклом. В честь

Э. Хэйла назван 22-летний солнечный цикл, то есть удвоенный 11-летний, учитывающий не только циклическое изменение количества пятен, но и смену магнитной полярности.



Рисунок 2. "Бабочки Маундера" - график распределения мест появления пятен по широте вдоль одной временной оси. Ниже - относительная площадь солнечных пятен в процентах.

Самые маленькие солнечные пятна – поры – имеют диаметр около 1000 км, самые большие – более 100000 км. Развитые пятна обычно затемненной областью – полутенью, окружены менее имеющей существенно больший диаметр (Рисунок 3). Отношение интенсивностей излучения пятна И фотосферы контрастность – _ зависит от УФ-области рассматриваемого Так, диапазона ДЛИН волн. В $\frac{F_{\text{пятна}}}{F_{\text{фотосферы}}} = 0.05$, а в далекой ИК-области $\frac{F_{\text{пятна}}}{F_{\phi \text{отосферы}}} = 0.6$. F_{фотосферы}



Рисунок 3. Тень и полутень пятна на Солнце. Также хорошо видна грануляция на поверхности.

Следует отметить, что существует несколько циклов активности Солнца, наиболее известные имеют периоды приблизительно 11 лет, 22 года, характерные времена – 100 лет и 1000 лет. В течение самого изученного цикла, 11-летнего, относительная площадь пятен меняется от 0.2% до 0.7%. Описанные циклы не являются стабильными, их названия условны. Так 11-летний цикл с 16-го века по 19-ый имел период от 7 до 17 лет и только в 20-ом стал в среднем длиться 10,5 лет (Рисунок 4).



Рисунок 4. Изменение количества солнечных пятен со временем за 400 лет (до 2000 года). Хорошо виден минимум Маундера, 11-летние циклы и 100-летние. Красным обозначено время нерегулярных наблюдений пятен, синим – время регулярных наблюдений.

В качестве индекса солнечной активности удобно использовать число Вольфа W – относительное число солнечных пятен, вычисляемое по формуле

W = k(f + 10g),

где *f* – количество пятен на поверхности Солнца, *g* – количество групп пятен, *k* – нормировочный коэффициент.

Поверхность Солнца вращается дифференциально. Период на экваторе составляет около 25 дней, в то время как полярные области вращаются с периодом 34 дня. Это приводит к относительному смещению пятен на разных широтах, что в свою очередь меняет форму кривой блеска от периода к периоду. Также на нее влияет и сам факт рождения и исчезновения пятен на поверхности звезды.

2.2 Пятна на других звездах

Идея существовании пятен Солнца 0 на звездах помимо принадлежит И. Бульяу. В 1667 году он пытался объяснить переменность Миры Кита именно наличием холодных темных пятен на поверхности. Хоть в том случае теория оказалась неверна, это было первое предположение о существовании на поверхности звезды градиента излучения. Далее в 1947 году Крон (Kron, 1947), изучая кривые блеска систем, обнаружил необъяснимую четырех двойных затмениями переменность. К выводу о существовании темных пятен на поверхностях звезд в середине 1960-ых независимо друг от друга пришли и Хофмейстер (Hoffmeister, 1965), Чугайнов (Chugainov, 1966), Каталано и Родоно (Catalano & Rodono, 1967).

В литературном обзоре (Berdyugina S. V., 2005) отмечено, что чем больше скорость вращения, тем сильнее проявления магнитной

активности: корональные выбросы массы, излучение в линиях Call и Ha,

УФ- и радиоизлучение. Именно такие короткопериодические звезды лучше всего подходят для тестирования существующих моделей звездного динамо. Чаще всего это звезды типа Т Таи или только вышедшие на главную последовательность молодые звезды типа Солнца. Также в этих целях могут быть полезны исследования звезд типов BY Dra, RS CVn и W UMa.



Рисунок 5. (Strassmeier, Starspots, 2009) Отличие размеров пятен на поверхности Солнца (<1%) и звезды ЕК Dra (>30%).

Наиболее значимые отличия анализа поверхностно активных звезд от исследований Солнца:

- Угол наклона к наблюдателю. Как известно, Солнце мы видим с экватора, что делает всю его поверхность видимой. Наклонение же других звезд может составлять произвольный угол с лучом зрения.
- Площадь пятен. Как уже говорилось выше, на Солнце пятна занимают меньше 1% видимой поверхности. В то время как на других звездах подобная величина бывает и более 30% (Рисунок 5).
- Способ детектирования. Прямые наблюдения пятен возможны только на Солнце. Для других звезд применимы лишь косвенные методы, такие как интерферометрический, доплеровский и



фотометрический. Пример построения карт поверхности звезды *о Geminorum* всеми тремя методами представлен ниже (Рисунок 6).

Рисунок 6. Карты поверхности звезды *о Geminorum*, полученные тремя различными методами: с помощью интерферометра, доплеровской томографии и из фотометрических данных. (Roettenbacher, и др., 2017)

2.3 История наблюдений активных звезд

Первые наблюдения звезд с поверхностной активностью проводились с помощью наземных телескопов. Регулярные наблюдения за такими звездами ведутся с 1970-ых годов. Но ввиду того, что такие объекты имеют достаточно слабую амплитуду изменений блеска, наиболее эффективными оказались внеатмосферные миссии. Так, запущенный в

2003 году канадский спутник MOST (Microvariability and Oscillations of STars), несмотря на сравнительно малые размеры, позволил получить высокоточные кривые блеска ярких звезд (до 6 mag). Следующим важным аппаратом стал французский CoRoT, запущенный в 2006 году при поддержке Европейского Космического Агентства. Его задачей был поиск экзопланет наряду с изучением внутреннего строения звезд.

2.3.1 Космический спутник Кеплер

Самый большой вклад в изучение активных звезд внесла Кеплер. Этот космический космическая миссия телескоп NASA. оснащенный сверхчувствительным фотометром, был запущен 7 марта 2009 года. Основной целью было обнаружение внесолнечных планетных систем с экзоземлями. Четыре года телескоп наблюдал одну и ту же площадку в толще галактического диска (созвездия Лебедь и Лира). После выхода из строя двух маховиков в 2013 году ориентировка аппарата на прежнюю исследуемую площадку стала невозможной. 30 мая 2014 года стартовала миссия К2, продолжающаяся по сей день. Телескоп работает в режиме 75наблюдения различных участков плоскости дневного эклиптики, используя для ориентации давление солнечного излучения (Рисунок 7). Трудно переоценить вклад этой миссии в наше представление о переменных звездах и экзопланетах. Так, например, анализ данных четырех лет основных наблюдений позволил определить периоды вращения 34030 звезд главной последовательности (McQuillan, Mazeh, & Aigrain, 2014). На сегодняшний день это самая большая выборка звезд с известным периодом. В рамках миссии К2 были получены высокоточные фотометрические скоплений Плеялы Ясли, исследования И рассматриваемые в данной работе.

Следует отметить, что анализ и вычисление периода вращения одиночных звезд основывается на периодическом изменении блеска из-за наличия неоднородностей в их поверхностной структуре – пятен.



Рисунок 7. Основное поле наблюдения Кеплера (обозначено красным) и площадки наблюдения миссии К2 (обозначены синим). Пунктиром обозначена плоскость Галактики.

3 Цели и задачи

3.1 Уровень активности звезд скопления Ясли

Для определения уровня поверхностной активности звезд используется параметр S – доля видимой поверхности звезды, занимаемая пятнами. Исследование запятненности звезд-членов одного скопления является перспективной задачей, так как принадлежность к одному скоплению означает одинаковый возраст.

Целью настоящей дипломной работы является исследование уровня запятненности звезд скопления Ясли (674 звезды) и сопоставление полученных результатов с данными для скопления Плеяды из (Саванов & Дмитриенко, 2017). Большое количество звезд одного скопления дает возможность оценить зависимость поверхностной активности от таких параметров как масса, температура, период вращения, число Россби.

Для сравнения уровней запятненности скоплений необходимо произвести оценки среднего значения параметра S в небольших интервалах по массе. Для решения данной задачи, с учетом количества используемых звезд, был выбран шаг 0.1 *М*_{sun}.

Наличие в упомянутых скоплениях статистически значимого количества звезд в пределах 0.95-1.05 *М_{sun}* даст возможность сравнить вычисляемые величины параметра S с активностью современного Солнца.

3.2 Полностью конвективные карлики

Выше было упомянуто, что вращение Солнца является неоднородным – экваториальные области совершают полный оборот быстрее полярных. Такой эффект называется дифференциальным вращением.

Периодограмма ЭТО зависимость спектральной плотности _ Ha мощности сигнала ОТ временного периода. периодограмме поверхностно активной звезды каждый пик, чаще всего, соответствует периоду вращения определенного пятна на поверхности. В случае если пиков больше одного, можно предположить дифференциальность вращения исследуемого объекта. Одной из задач данной работы является исследование распространенности дифференциального вращения ПО периодограммам звезд скопления Ясли.

Принято считать, что звезды, у которых *M* < 0.3*M*_{sun}, полностью конвективны. Среди звезд скопления Ясли найден 351 объект с такой массой. На графике №7 из статьи (Douglas, Agueros, Covey, & Kraus, 2017) (Рисунок 8) выбранные звезды располагаются справа от красной линии.

В настоящей работе поставлена задача визуально классифицировать эти звезды по кривым блеска и периодограммам Ломба-Скаргла. А также найти, если это возможно, звезды с дифференциальным вращением и несколькими активными долготами.



Рисунок 8. График зависимости периода вращения звезд скопления Ясли от их массы. Серым отмечены звезды, для которых периоды известны из литературы, зеленым – вычисленные по данным миссии К2 в статье (Douglas, Agueros, Covey, & Kraus, 2017). На графике также отмечены двойные системы: крест – подтвержденные, окружность кандидаты, квадрат – звезды, у которых в статье (Douglas, Agueros, Covey, & Kraus, 2017) найдено более одного периода вращения. Приблизительные спектральные классы отмечены на верхней панели.

4 Оценка уровня поверхностной активности звезд

4.1 Погрешности оценок

В настоящей работе мы руководствовались следующим определением параметра S: суммарная площадь пятен, отнесенная к площади видимой поверхности звезды. Ввиду малости углового радиуса пятна α : $S = sin^2 \alpha$. Данная оговорка необходима из-за наличия нескольких определений параметра S, отличающихся до 4 раз.

В данной работе определение поверхностной запятненности производилось фотометрическим методом - по кривой блеска. Предполагается, что для определения параметра S необходимо построение карты видимой поверхности звезды, затем вычисление площади пятен. На практике это требует наличия достаточной информации о звезде.

Существуют способы различные детектирования пятен ПО фотометрическим данным. Большие ограничения накладывает точность используемой фотометрии. В случае ее низкого качества становится практически невозможно разрешить группу пятен, стирается разница между большим слабоконтрастным пятном и контрастным маленьким. Следует отметить, что из фотометрических данных трудно получить информацию о широте пятен. Не стоит забывать также, что на поверхности звезд существуют не только темные пятна, но и так называемые факелы – более горячие области. Факельные поля часто располагаются вблизи групп пятен. Все описанное сильно затрудняет составление карт поверхности по кривым блеска.

Как уже отмечалось выше, угол наклонения оси вращения звезды к лучу зрения может быть произвольным. Как правило, он не известен. Возникает необходимость принимать некую фиксированную величину,

обычно $i = 90^{\circ}$. Это обстоятельство вносит еще большую неточность при картировании. Даже если угол наклонения *i* известен, в случае отличия его от 90° на поверхности звезды возникают три отдельных зоны:

• всегда видимая часть – от полюса до определенной широты *b*

$$\begin{cases} 0^{\circ} \le i \le 90^{\circ}, & b = i \\ 90^{\circ} \le i \le 180^{\circ}, & b = i - 90^{\circ} \end{cases}$$

- периодически появляющаяся часть между широтами *b* и *b*
- невидимая часть от широты *b* до второго полюса. Эта область всегда остается недоступной для наблюдателя.

В случае если пятно находится на незаходящей части звезды, оно всегда вносит вклад в кривую блеска. Поток от такого пятна лишь слегка изменяется со временем, что существенно затрудняет его детектирование.

С появлением и исчезновением пятен меняется блеск Солнца. Как уже было сказано выше, параметр S для Солнца в течение самого заметного, 11-летнего цикла меняется приблизительно от 0.002 до 0.007. То же самое должно происходить и с другими звездами. Частично этим может объясняться разброс уровня запятненности звезд равных масс или температур.

Отдельную проблему составляет определение периода вращения звезды. Самым простым способом может являться нахождение максимального пика периодограммы. Но у многих звезд наблюдается следующий эффект: поверхностно активными являются диаметрально противоположные долготы. Вследствие чего два пятна могут оказаться в

противоположных полушариях, приводя к ошибочному «половинному» пику на периодограмме.

Но самую большую неточность в определение параметра S вносит тот факт, что мы не знаем, каким был бы блеск звезды при отсутствии пятен.

Рассмотрим два метода определения параметра S по фотометрическим данным более детально.

4.2 Моделирование кривой блеска

В статье (Aigrain, Pont, & Zucker, 2012) предложен метод определения лучевых скоростей из известной фотометрии. Также предложен способ построения и самой кривой блеска в случае наличия в ней периодических изменений, связанных с холодными пятнами малых размеров на поверхности звезды. В рамках поставленных в настоящей работе целей по определению уровня запятненности такой подход означает решение обратной задачи. То есть, параметры пятен должны быть восстановлены по наблюдаемым данным. Напомним, что довольно часто решение обратной задачи оказывается не единственным.

Для конструирования кривой блеска в статье (Aigrain, Pont, & Zucker, 2012) предложено поток от звезды представлять в виде:

 $\Phi = \Phi_0(1 - F),$

где Ф – приходящий от звезды поток, а *F* – вклад в общий поток от пятна.

 $F = fMAX(\cos\beta; 0),$

где *f* – параметр пятна, *cosβ* – косинус угла между нормалью к поверхности пятна и лучом зрения.

Параметр пятна f вычисляется по формуле:

$$f = 2(1-c)(1-\cos\alpha),$$

где *с* – уровень контраста между пятном и фотосферой, *α* – угловой радиус пятна.

Итоговая формула для расчета потока звезды от времени:

$$\Phi(t) = \Phi_0 (1 - 2(1 - c)(1 - \cos\alpha) MAX(\cos\beta(t); 0)),$$

Возникает вопрос о методе расчета параметра *с*. Как уже отмечалось выше, контраст определяется как отношение интенсивностей излучения пятна и фотосферы, $c = \frac{l_{патна}}{l_{фотосферы}}$. Это отношение зависит от рассматриваемого диапазона длин волн. Так, в УФ-области $\frac{l_{патна}}{l_{\phi отосферы}} = 0.05$, а в далекой ИК-области $\frac{l_{патна}}{l_{\phi отосферы}} = 0.6$. Если при моделировании считать c = 0, что означает абсолютно черное, неизлучающее пятно, мы получим заведомо неверный результат. Наиболее распространенные способы

оценки контраста следующие:

- С учетом закона Стефана-Больцмана: $c = \left(\frac{T_{пятна}}{T_{\phi \circ \tau \circ c \phi e p s i}}\right)^4$
- По отношению интегралов функций планка для соответствующих температур в диапазоне длин волн, принимаемых телескопом

На основании данных об амплитуде изменения звездной величины, можно рассчитать отношение потоков, используя формулу Погсона:

$$\Delta m = -2.5 lg \frac{\Phi_{min}}{\Phi_0},$$

где Δm - амплитуда изменения звездной величины, Φ_{min} – поток от звезды в минимуме кривой блеска, Φ_0 – поток при отсутствии пятен. Это позволяет оценить размер экваториального пятна, которое могло бы создать такую переменность.

Укажем, что этот метод позволяет одновременно с моделированием кривой блеска получить и кривую лучевых скоростей. Для этого необходимо иметь информацию о радиусе звезды. Вклад в кривую лучевых скоростей от движения пятен по диску звезды представляется в виде:

$$\Delta RV_{rot}(t) = \frac{\dot{\Phi}(t)}{\Phi_0} \left[1 - \frac{\Phi(t)}{\Phi_0} \right] \frac{R_*}{2(1-c)(1-\cos\alpha)},$$

где ΔRV_{rot} - вклад в кривую лучевых скоростей, $\dot{\Phi}$ – производная потока по времени, R_{*} - радиус звезды.

Ниже приведен пример применения такого метода к звезде типа T Tau - V 819 Tau (Рисунок 9). Вклад факельных полей не учитывался. Данные фотометрии получены на 125 см телескопе КрАО (Donati, и др., 2015) и приведены для сравнения (Рисунок 10, Рисунок 11).



Рисунок 9. Кривая блеска и кривая лучевых скоростей звезды V 819 Tau, построенные методом из (Aigrain, Pont, & Zucker, 2012).



V819 Tau, 1.25-m CrAO, 2014 Sep-Dec

Рисунок 10. Кривая блеска звезды V 819 Тац из статьи (Donati, и др., 2015).



Рисунок 11. Кривая лучевых скоростей звезды V 819 Таи из статьи (Donati, и др., 2015)

Положительные стороны подхода, предложенного в статье (Aigrain, Pont, & Zucker, 2012), для определения уровня запятненности:

- Возможность строить карту поверхности из любого количества пятен
- Возможность одновременно рассчитать и кривую лучевых скоростей, если известен радиус звезды
- Возможность моделировать факельные поля, задавая контраст
 c > 1
- Метод допускает моделирование эволюции пятен

Отрицательные:

- Неоднозначность в случае решения обратной задачи
- Нет изменения геометрии пятен при движении. Ограничение на угловой размер пятен, только малые.
- Необходимо знать угол наклона звезды
- Необходимо знать уровень блеска незапятненной звезды

- Необходимо знать температуры фотосферы и пятен
- Нет информации о широте пятна при построении карты поверхности

4.3 Восстановление поверхностной неоднородности по кривой блеска

Существует способ избежать части описанных выше неточностей и предположений и получить изображение поверхности звезды из ее кривой блеска. Впервые метод был описан в (Messina, Guinan, & Lanza, 1999) и дополнен в (Berdyugina, Pelt, & Tuominen, 2002). Такая модель предполагает, что, из-за малого пространственного разрешения, интенсивность каждой малой площадки I_i на поверхности звезды складывается из влияния горячей фотосферы I_{ph} и холодных пятен I_{sp} с учетом весов $1 - f_i$ и f_i соответственно.

 $I_i = f_i I_{sp} + (1 - f_i) I_{ph}$

 f_i – фактор заполненности пятнами, $0 \le f_i \le 1$. При таком подходе видимый поток от звезды – это сумма интенсивности всех видимых на данной фазе площадок I_i . В таком случае из имеющейся кривой блеска можно получить информацию о факторе заполненности пятнами f_i , по которому легко найти искомый в данной задаче параметр S:

$$S = \sum_{i} f_i$$

Такой метод, безусловно, лучше описанного выше, так как содержит меньше свободных параметров. Но и здесь требуется указать температуру пятна и температуру фотосферы для определения их вкладов в поток от каждой площадки. Он позволяет достаточно точно определить долготу пятна, но также не дает никакой информации о широте. В качестве примера приведены карты поверхности звезды *о Geminorum* для разных моментов времени из статьи (Berdyugina S. V., 2005) (Рисунок 12).



Рисунок 12. (Berdyugina S. V., 2005) Результат картирования звезды *о Geminorum* методом восстановления карты поверхности по кривой блеска. Первая и третья колонки – карты фактора заполненности пятнами. Темные области соответствуют большему значению. Вторая и четвертая колонки – наблюдаемые и рассчитанные кривые блеска в полосе V. Рисунок хорошо иллюстрирует эффект переключения долгот 1988 года. Пятно около фазы 0.5 постепенно исчезает, в то время как пятно около фазы 0.0 увеличивается в размерах.

Предложенный еще в 1981 году в (Vogt, 1981) метод является схожим по принципу определения параметра S, но существенно более точным и расширенным, чем описанный выше. Он позволяет отличить геометрические эффекты от поверхностной температурной многие неоднородности. Однако его применение требует наличия данных одновременно, как минимум, в двух фотометрических полосах. Данные миссии Кеплер есть только в одной полосе, это обстоятельство делает Решение метод напрямую неприменимым. для однополосных

фотометрических данных найдено и детально проанализировано в (Savanov & Strassmeier, 2008) и (Саванов, 2014).

Плюсы такого метода:

- Нет необходимости выбирать размер пятна и его положение
- Однозначность решения

Минусы:

- Нет информации о широте пятна
- Необходимо определить вклады в интенсивность от пятна и фотосферы.
- Необходимо знать угол наклона звезды
- Необходимо знать уровень блеска незапятненной звезды

Видно, что последний метод, хоть и не избавляет от всех проблем, является более подходящим для поставленной в настоящей работе задачи.

При проведении оценок мы принимали максимум кривой блеска за уровень незапятненной фотосферы. Также ввиду отсутствия данных о наклонениях звезд, считали, что видим их с экватора. Фактически наша оценка дает разность уровня запятненности между более и менее запятненными полушариями в случае если звезда наблюдается с экватора.

Единственная на данный момент возможность немного нивелировать все описанные неточности, связанные с вычислением параметра S – вычисление средних значений. Если нам затруднительно точно определить уровень поверхностной активности конкретной звезды, то в случае работы с большим количеством звезд мы можем получить среднюю оценку уровня запятненности объектов определенного возраста и массы.

Оценки уровня поверхностной активности звезд должны быть корректными при использовании любых методов определения. Для этого,

безусловно, необходимы сведения о существующих явлениях и эффектах, связанных с пятнами.

4.4 Наблюдаемые свойства пятен

4.4.1 Контраст

Оба описанных выше подхода к получению оценки параметра S из фотометрии требуют определения разницы температур пятна и фотосферы. На сегодняшний день все наши знания о температуре пятен основываются на одновременном моделировании изменений блеска и избытка цвета звезд, а также доплеровском картировании и моделировании атомных спектров. Как видно из рисунка №7 в (Berdyugina S. V., 2005) (Рисунок 13), контраст пятен на более горячих звездах выше. Разность температур пятна и фотосферы для холодных звезд уменьшается от 2000 К для звезд класса G0 до 200 К – для М4. Предположительно, такая зависимость одинакова для поверхностно активных карликов и гигантов, по крайней мере, в спектральном диапазоне G-К звезд. Исходя из этого можно предположить, что природа пятен на всех типах звезд одинакова. В настоящей работе относительный вклад пятна и фотосферы в поток от данной площадки рассчитывался с помощью интерполяции данных, отмеченных на представленном графике.



Рисунок 13. (Berdyugina S. V., 2005) Зависимость разности температур пятна и фотосферы от температуры фотосферы звезд. Квадратами обозначены гиганты, кружками – карлики. Черными линиями соединены данные для тени и полутени одной звезды. Обведенными кругами обозначены тень и полутень Солнца. Синей линией обозначена интерполяция полиномом второго порядка.

4.4.2 Время жизни

Для определения времени жизни пятен необходимы длительные наблюдения. В статье (Hall & Henry, 1994) приведен анализ нескольких десятков пятен и сделаны следующие выводы, дополненные позднее (Strassmeier, Starspots, 2009):

- Время жизни относительно маленьких пятен пропорционально их размеру, что согласуется со свойствами солнечных пятен
- Время жизни пятен на звездах двойных систем больше, чем на одиночных
- Время жизни относительно крупных пятен может быть связано с величиной сдвига дифференциального вращения звезды
- Сохраняющийся в течение нескольких лет характерный минимум кривой блеска говорит о способности крупных пятен, независимо от наличия дифференциального вращения, существовать длительное время. Эти большие пятна могут

становиться центрами активности, формируя таким образом активные долготы.

4.4.3 Активные долготы

Десятилетия наблюдений звезд типа RS CVn показывают, что сохранение крупных пятен на прежнем месте возможно в течение нескольких лет. Обнаружено, что положение таких активных долгот может согласоваться с линией центров в случае двойных систем. В статье (Berdyugina & Tuominen, 1998) показано, что:

- На звездах типа RS CVn возможно постоянное существование активных долгот
- Активные долготы могут перемещаться по поверхности звезд
- Активные долготы часто отстоят друг от друга на 180° по долготе
- Активные долготы могут иметь разный уровень активности
- Регулярно наблюдается эффект переключения доминирующей роли в активности с одной долготы на другую (flip-flop effect)

Схожие долготные активности наблюдаются и на звездах типа FK Com, а также на высокоактивных звездах-кандидатах в молодое Солнце.

4.4.4 Дифференциальное вращение

Дифференциальное вращение звезд – это зависимость угловой скорости вращения пятна от его широты (Reinhold & Gizon, 2015). Оно играет важную роль в генерации магнитного поля в конвективной зоне звезд. Представим его в виде математического выражения:

 $\Omega = \Omega_0 - \Delta \Omega \sin^2 \varphi,$

где φ – это широта пятна, Ω_0 – скорость вращения на экваторе, $\Delta \Omega$ – разность в скорости вращения между экватором и полюсом. По ней можно определить величину дифференциального сдвига. $\frac{2\pi}{\Lambda \Omega}$ – время, необходимое

пятну на экваторе для того, чтобы «догнать» полярное пятно. Также часто используется параметр α , называемый относительным сдвигом:

$$\alpha = \frac{\Delta \alpha}{\Omega_0}$$
, для Солнца $\alpha = 0.2$

На практике, ввиду отсутствия данных о широтах пятен, соответствующих найденным периодам вращения, величину ΔΩ оценивают по следующей формуле:

$$\Delta \Omega = 2\pi \left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2}\right),$$

где P_1 и P_2 – вычисленные периоды вращения двух пятен.

Длительные фотометрические исследования запятненных звезд показывают сезонные изменения детектируемого периода, что говорит в пользу дифференциального вращения и широтного дрейфа пятен (Reinhold & Gizon, 2015). Наблюдается следующая закономерность: медленно вращающиеся звезды имеют большую амплитуду переменности периода. Но для большей части звезд сдвиг $\Delta\Omega$ меньше, чем на Солнце. Многолетние наблюдения показывают синусоидальную переменность периода вращения, что указывает на циклы активности солнечного типа. Однако следует помнить, что вычисляемый сдвиг $\Delta\Omega$ является лишь нижней границей. Он определяется по пятнам, находящимся на неизвестных широтах, и вероятность того, что эти широты экваториальная и полярная – мала.

4.4.5 Переменность

Молодые быстровращающиеся звезды имеют высокий средний уровень активности и малую циклическую переменность. Звезды среднего

возраста (1-2 млрд. лет для $1M_{sun}$) имеют умеренный уровень активности и нерегулярную циклическую переменность. Звезды солнечного возраста и старше имеют медленное вращение, низкую активность и явную циклическую переменность.

Для молодых звезд также обнаружена анти-корреляция между фотосферной и хромосферной активностью. Это означает, что в момент максимума поверхностной активности звезды становятся слабее, в то время как у старых звезд, включая Солнце, в максимуме активности наблюдается повышение яркости. Это может означать эволюционное перемещение звезд из группы пятенно-активных к хромосферно-активным со временем.

Сравнение активности современного Солнца с активностью молодых звезд солнечного типа позволяет получить данные об эволюции солнечного динамо за время жизни на главной последовательности. Установлено, что:

- Уровень активности звезды падает с увеличением времени нахождения на главной последовательности и потерей углового момента
- Изменяется соотношение между пятенной и хромосферной активностью
- У молодых звезд обнаружено явное не осесимметричное поле, ослабевающее на звездах солнечного возраста и существующее совместно с сильной осесимметричной компонентой

4.4.6 Эффект переключения долгот

Активные долготы живут долго, но сами активные области, из которых они состоят, могут менять свой размер и эволюционировать. Этим могут быть вызваны сезонные изменения переменности звезд. В то время

как одна долгота уменьшает свою активность, вторая наоборот увеличивает. Таким образом, происходит переключение активности с одного полушария на другое. В зарубежной литературе такой эффект называется «flip-flop effect». Впервые это явление было обнаружено на звездах типа FK Com. Изучение длительной переменности других звезд показало, что такие переключения повторяются регулярно и являются основой еще одной циклической активности (Рисунок 14).



Рисунок 14. Доплеровские карты звезды типа RS CVn II Ред в полярных координатах (Berdyugina S. V., 2005). Хорошо видно, как происходило переключение долгот в 1997-1998 годах.

Отношение частот пятенного цикла активности и цикла переключения долгот, вероятно, отличается для двойных и одиночных звезд. Для звезд типа RS CVn, имеющих оба цикла активности, замечено, что период цикла переключения долгот в два раза дольше пятенного периода активности. Для молодых карликов цикл переключения долгот в 3-4 раза короче пятенного. На Солнце эффект переключения долгот составляет приблизительно треть 11-летнего пятенного цикла, что согласуется с вычислениями для молодых солнц. Разница между длительностью цикла переключения долгот в южном и северном полушариях Солнца значительна. Она составляет 3.8 года для северного полушария и 3.65 года для южного. Именно это различие в периодичности северных и южных событий вызывает осцилляции в вековом масштабе.

5 Результаты анализа фотометрических данных

5.1 Поверхностная активность

5.1.1 Температура

На полученной зависимости уровня запятненности от температуры видно, что в среднем параметр S для скопления Ясли не меняется, в то время как для звезд более молодого скопления Плеяды наблюдается нисходящий тренд на температурах выше 5000 К (Рисунок 15). Отчетливо заметен разброс активности для равных температур, уже объяснявшийся в предыдущих главах. Его предполагаемая причина – отсутствие данных о наклонении звезд, цикличность их активности и более всего отсутствие информации об уровне блеска звезд при отсутствии пятен.



Рисунок 15. Зависимость запятненности от эффективной температуры для скоплений Плеяды и Ясли.

5.1.2 Macca

Согласно рисунку 16, количество звезд малых масс, доступных для анализа, весьма велико. Также прослеживается нисходящий тренд в активности звезд Плеяд больших масс, в то время как меньшая активность объектов из Яслей остается приблизительно постоянной для всех масс. Разброс уровней активности звезд Плеяд и Яслей малых масс существенно отличается: диапазон значений параметра S Плеяд шире. Заметно, что на приведенном графике основная часть звезд более молодого скопления Плеяды находится над звездами Яслей. Это свидетельствует об эволюции поверхностной активности звезд различных масс с возрастом.





Зависимость параметра S от периода вращения хорошо иллюстрирует эффективность механизмов торможения звезд со временем (Рисунок 17). Так, на графике видно, что звезды Плеяд не имеют периодов

вращения больше 10 дней, в то время как более старое скопление Ясли включает в себя как быстро вращающиеся звезды, так и уже существенно затормозившиеся, период вращения которых достигает приблизительно 40 дней.



Рисунок 17. Зависимость запятненности от периода вращения звезд для скоплений Плеяды и Ясли.

5.1.4 Звезды солнечных масс

Важным для понимания эволюции Солнца является изучение звезд солнечных масс разных возрастов. Здесь представлена выборка звезд, отличающихся от Солнца по массе не более чем на 0.05 *M*_{sun}. Сравнение характеристик таких звезд проливает свет на эволюцию Солнца в активности и вращении со временем. Следует учитывать, что использованное число звезд - 30 из Плеяд и 45 из Яслей, статистически существенно, и, вероятно, частично устраняет неточности, связанные с незнанием угла наклонения, фазы цикла активности и, более всего,

отсутствием информации о блеске незапятненной звезды. Хорошо видна тенденция к снижению уровня запятненности звезд солнечных масс с возрастом (Рисунок 18). Также очевидна и тенденция к увеличению периода вращения, хотя разброс периодов для звезд одного скопления все еще остается велик (Рисунок 19). Для обозначения вращения Солнца взят период на экваторе – 25 дней. Вычисленные величины среднего уровня запятненности и периода приведены в Таблица 1.



Рисунок 18. Зависимость уровня запятненности от возраста для звезд околосолнечных масс скоплений Ясли и Плеяды. Также на график нанесен диапазон изменения запятненности Солнца (обозначен зеленым цветом).



Рисунок 19. Зависимость уровня запятненности от периода вращения звезд скоплений Плеяды и Ясли. Черным обозначены средние величины запятнености и периода с ошибками. Зеленым цветом обозначены данные для Солнца.

Таблица 1. Сравнение запятненности и периодов вращения звезд солнечных масс скоплений Плеяды и Ясли с параметрами современного Солнца.

Параметр	Плеяды	Ясли	Солнце	
Возраст, млн. лет	125	650	4600	
S – Запятненность	0.0302	0.0145	0.002-0.007	
Ошибка S	0.0024	0.0013	-	
Р – Период (дни)	4.3779	8.4587	25	
Ошибка Р (дни)	0.3566	0.3394	-	

5.1.5 Эволюция звезд разных масс.

В каждом из рассматриваемых скоплений Плеяды и Ясли содержится порядка 700 звезд. Это дает возможность усреднить параметр

S в небольших интервалах по массе и таким образом нивелировать неточности оценок поверхностной активности звезд. Мы произвели вычисление среднего значения параметра S для звезд двух скоплений разного возраста с шагом 0.1 M_{sun} и оценили ошибки (Рисунок 20). Численные данные представлены в Таблица 4 в приложении. Видно, что уровень запятненности скопления Ясли остается постоянным, в то время как поверхностная активность звезд Плеяд, которые моложе звезд Яслей на 500 млн. лет, для малых масс существенно выше. Также для Плеяд, начиная с 0.8 M_{sun} , наблюдается уменьшение запятненности.



Рисунок 20. Средний уровень запятненности скоплений Плеяды и Ясли по массам с шагом 0.1 Msun.

Ниже приведен график разности уровней запятненности двух скоплений (Рисунок 21). Наблюдается тенденция к уменьшению разницы между поверхностной активностью молодых и более старых звезд с ростом массы. Нисходящий тренд на графике для масс больше солнечной частично может объясняться статистической неточностью ввиду малого количества таких звезд.



Рисунок 21. Разность средних уровней запятненности звезд скоплений Плеяды и Ясли по массам.

5.2 Карлики

Нами была сделана попытка выделения объектов из числа маломассивных звезд (масса менее 0.3 M_{sun}) скопления Ясли для последующего определения параметра дифференциального вращения. Эти объекты представляют особый интерес, поскольку считается, что звезды с массой менее предельной в 0.3 M_{sun} , являются полностью конвективными. Изучение таких объектов необходимо для понимания, как происходит генерация магнитных полей у звезд с таким внутренним строением.

Для этой цели для каждой звезды были построены следующие диаграммы: кривая блеска, периодограмма Ломба-Скаргла, окрестность главного максимума периодограммы шириной 0.4 дня, фазовая кривая блеска с определенным из периодограммы периодом. Использовалясь вычислительная программа, написанная на языке IDL, применялись стандартные программы из библиотек работы с FITS файлами, построения периодограмм (программа LNP-TEST из библиотек IDL) и другие. Результат классификации 351 звезды из группы быстро вращающихся карликов приведен в Таблица 2. У трети звезд на периодограмме наблюдается чрезмерная зашумленность. Фазовая кривая блеска с периодом, определенным по максимуму периодограммы в большинстве

показывает слабую переменность. У других звезд на периодограмме присутствуют до пяти визуально хорошо разрешимых пиков с шумами до 0.1 в относительных единицах. Присутствие в спектре мощности хорошо выраженных пиков на половинном фотометрическом периоде вращения звезды обычно объясняется, как проявление двух ярко выраженных сопоставимых по величине активных областей на противоположных полушариях звезды. Кроме того, наличие нескольких пиков может служить указанием на двойственность звезд (каждый из компонент обладает своим периодом вращения и, дополнительно, например, появляются пики на половинных периодах).

Отметим, что детектированию половинного периода, ошибочно взятого в качестве основного, может приводить к заниженной оценке величины периода.

Для более детального исследования была выбрана группа из 249 звезд с двумя и более хорошо разрешимыми пиками на периодограмме. Как оказалось, исследование свойств дифференциального вращения для объектов по наблюдениям с миссией К2 телескопа Кеплер представляется сложной залачей вследствие достаточно больших погрешностей наблюдаемого материала (худшее гидирование по сравнений с 4х летним основных наблюдений). Вероятно, периодом наша система автоматизированной обработки данных К2 не представляет возможности полностью устранить систематические погрешности (скачки, повышение уровня шумов и пр.). Пока мы можем указать лишь две звезды с предположительно детектированным дифференциальным вращением – EPIC 211781646 и EPIC 211946732 (Таблица 3). Тем не менее, на примере 2 объектов мы представляем попытку оценки параметра ΔΩ. Можно интерпретировать происхождение пиков на периодограмме наличием пятен (или групп пятен), расположенных на различных широтах звезды,

которая обладает дифференциальным вращением. Такое объяснение использовалось в предыдущих исследованиях довольно часто. При этом переменности блеска изменения периодов могут соответствовать изменениям и эволюции (появлению и исчезновению) активных областей, лежащих на разных широтах на поверхности звезды. Если взять значения соответствующих периодов, двум доминирующим пикам на периодограммах - Р1 и Р2, то, согласно (Reinhold & Gizon, 2015), можно выполнить оценку параметра дифференциального вращения звезды величины ΔΩ. Указанные в Таблица 3 величины приводятся как оценки и могут рассматриваться в качестве минимальных, поскольку мы не знаем, на какой широте расположены активные области, вызывающие вращательную модуляцию блеска звезд.

На Рисунок 22 представлено сопоставление данных для рассмотренных нами 2 карликов с данными из каталога (Reinhold & Gizon, 2015). В каталоге содержатся данные о $\Delta\Omega$ для более горячих объектов, звезды с температурами менее 3200 К в нем отсутствуют. Найденные нами величины $\Delta\Omega$ сопоставимы с более горячими объектами, обладающими заметным дифференциальным вращением.

Очевидно, что для того чтобы увеличить число объектов, для которых будут проведены оценки параметра $\Delta\Omega$, требуется повысить качество обработки данных (фильтрация, снятие трендов).

Предполагается, что результаты выполненной классификации 351 карлика будут в дальнейшем использованы при выборе объектов для последующего детального изучения.

Таблица 2. Зрительная классификация карликов. В качестве иллюстраций приведены периодограммы Ломба-Скаргла для звезд-представителей каждой группы.

		Количест	
Параметр	Иллюстрация	во	
		объектов	
Всего объектов		351	
Высокий уровень шумов	1.0 0.8 ✓ 0.4 0.2 0.0 0.048 0.128 0.208 0.288 0.368 0.448 Penod. day	102	
Основной период вращения меньше 4 дней	10 08 08 08 02 02 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	235	
Основной период вращения больше 4 дней	1.0 0.8 0.05 0.2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	14	
На периодограмме есть половинный период (пятна на противоположных долготах)	1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0 0 0 0 0 0	120	
На периодограмме есть один четко выраженный крупный пик	1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	87	



Таблица 3. Данные для звезд с предположительно детектированным дифференциальным периодом.



Главный пик периодограммы	0.8 0.8 0.4 0.2 0.0 0.94 1.10 1.26 1.42 1.58 1.74 Period, day	1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0 1.20 1.36 1.52 1.68 1.84 2.00 Period, day			
Фазовая кривая блеска	1.02 1.01 1.00 0.99 0.98 0.0 0.4 0.8 1.2 1.6 2.0 Phase	1.02 1.01 1.00 0.99 0.98 0.0 0.4 0.8 1.2 1.6 2.0 Phase			
Основной период, дни	1.34	1.60			
Вторичный период, дни	1.39	1.65			
$\Delta \Omega$	0.17	0.12			



Рисунок 22. Зависимость ΔΩ от эффективной температуры. Синими точками отмечены данные из (Reinhold & Gizon, 2015), красными – полученные в данной работе.

6 Выводы

В работе представлены результаты анализа фотометрических данных для скопления Ясли, полученных в ходе наблюдений с космическим телескопом Кеплер (миссия К2). Рассмотрены методы и источники погрешностей определения параметра запятненности звезд S.

На примере скоплений Ясли и Плеяды, получены свидетельства эволюции активности звезд со временем. Показано, что средний уровень запятненности скопления Ясли возрастом 650 млн лет, существенно ниже среднего уровня запятненности скопления Плеяды возрастом 125 млн лет. Показано, что с увеличением массы звезд изменение поверхностной активности уменьшается.

Проведено сопоставление средних уровней активности звезд солнечных масс скоплений Ясли и Плеяды с запятненностью современного Солнца. Для таких звезд установлено замедление вращения и уменьшение активности с возрастом.

Проведена визуальная классификация спектров мощности 351 объекта из скопления Ясли. По соответствующим периодограммам найдено, что треть звезд, вероятно, обладает сложной пятенной структурой, или на поверхности таких звезд присутствует эволюция пятен со временем.

Обнаружено 120 звезд с предположительно детектированным эффектом наличия двух активных долгот в противоположных полушариях.

В результате детального изучения М-звезд с двумя и более выраженными пиками периодограммы обнаружено, что у 2 из них,

предположительно, имеется дифференциальное вращение. Для этих 2 звезд получены оценки параметра дифференциального вращения $\Delta \Omega$.

7 Список литературы

- Aigrain, S., Pont, F., & Zucker, S. (2012). A simple method to estimate radial velocity variations due to stellar activity using photometry. *MNRAS*, *419*.
- Berdyugina, S. V. (2005). Starspots: A Key to the Stellar Dynamo. LRSP, 2:1.
- Berdyugina, S., & Tuominen, I. (1998). Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars. *A&A*, *336:25*.
- Berdyugina, S., Pelt, J., & Tuominen, I. (2002). Magnetic activity in the young solar analog LQ Hydrae. I. Active longitudes and cycles. *A&A*, *394*.
- Catalano, S., & Rodono, M. (1967). Sulle variazioni della curva di luce del sistema RS CVn. *Mem SAIt, 38:345*.
- Chugainov, P. F. (1966). New microvariable HD 117555. IBVS, 172.
- Donati, J., Hebrard, E., Hussain, G., Moutou, C., Malo, L., Grankin, K., и др. (2015). Magnetic activity and hot Jupiters of young Suns: the weak-line T Tauri stars V819 Tau and V830 Tau. *MNRAS*, 453:4.
- Douglas, S., Agueros, M., Covey, K., & Kraus, A. (2017). Poking the Beehive from Space: K2 Rotation Periods for Praesepe. *ApJ*, 842:83.
- Hall, D., & Henry, G. (1994). The Law of Starspot Lifetimes. *IAPPP Commun.*, 55.
- Hoffmeister, C. (1965). Analyse der Lichtkurven von vier RWAurigae-Sternen. Veröff Sternwarte Sonneberg, 6:97.
- Kron, G. (1947). The probable detecting of surface spots on AR Lacertae B. *PASP*, 59:216.

- McQuillan, A., Mazeh, T., & Aigrain, S. (2014). Rotation Periods of 34,030 Kepler Main-sequence Stars: The Full Autocorrelation Sample. *ApJS*, 211:2.
- Messina, S., Guinan, E., & Lanza, A. (1999). Photospheric Magnetic Activity in a Proxy for the Young Sun: HD 134319. *Astrophys. Space Sci.*, 260.
- Reinhold, T., & Gizon, L. (2015). Rotation, differential rotation, and gyrochronology of active Kepler stars. *A&A*, *583:65*.
- Roettenbacher, R., Monnier, J., Korhonen, H., Harmon, R., Baron, F., Hackman, T., и др. (2017). Contemporaneous Imaging Comparisons of the Spotted Giant σ Geminorum Using Interferometric, Spectroscopic, and Photometric Data. *ApJ*, 849:2.
- Savanov, I. S., & Dmitrienko, E. S. (2017). Spots and activity of Pleiades stars from observations with the Kepler Space Telescope (K2). *ARep*, *61:11*.
- Savanov, I. S., & Strassmeier, K. G. (2008). Light-curve inversions with truncated least-squares principal components: Tests and application to HD 291095 = V1355 Orionis. AN, 329:4.
- Strassmeier, K. (2002). Doppler images of starspots. AN, 323:3/4.
- Strassmeier, K. (2009). Starspots. A&ARv, 17:3.
- Vogt, S. (1981). A method for unambiguous determination of starspot temperatures and areas - Application to II Pegasi, BY Draconis, and HD 209813. 250.
- Саванов, И. С. (2014). ПЯТНА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ. *АЖ*, *91:7*.

Саванов, И. С., & Дмитриенко, Е. С. (2017). ПЯТНА И АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД СКОПЛЕНИЯ ПЛЕЯДЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С КОСМИЧЕСКИМ ТЕЛЕСКОПОМ КЕПЛЕР (К2). *АЖ*, 94:11.

Приложение

Плеяды					Ясли				
${ m M}/M_{\odot}$	$\sigma({ m M}/M_{\odot}$)	\mathbf{S}	$\sigma(S)$	n	${ m M}/M_{\odot}$	$\sigma({ m M}/M_{\odot}$)	\mathbf{S}	$\pmb{\sigma}(S)$	n
0.165	0.003	0.064	0.004	92	0.169	0.001	0.015	0.001	144
0.239	0.002	0.052	0.002	190	0.241	0.003	0.012	0.001	135
0.344	0.003	0.067	0.008	115	0.352	0.004	0.013	0.002	55
0.438	0.003	0.048	0.003	81	0.441	0.004	0.017	0.002	53
0.549	0.004	0.055	0.004	47	0.561	0.004	0.014	0.002	68
0.655	0.003	0.056	0.004	62	0.641	0.004	0.015	0.001	54
0.750	0.004	0.062	0.005	31	0.751	0.005	0.011	0.001	24
0.839	0.005	0.047	0.006	29	0.837	0.005	0.012	0.002	30
0.946	0.005	0.038	0.005	30	0.944	0.006	0.011	0.001	26
1.032	0.005	0.026	0.003	19	1.031	0.004	0.016	0.002	33
1.146	0.009	0.018	0.002	19	1.157	0.006	0.014	0.004	24
1.249	0.004	0.009	0.002	17	1.238	0.005	0.012	0.001	12
1.357	0.011	0.002	0.001	6	1.353	0.012	0.012	0.002	11
1.460	-	0.002	-	1	1.444	0.013	0.011	0.003	5
1.510	-	0.002	-	1	-	-	-	-	-

Таблица 4. Вычисление средних значений массы и параметра запятненности, а также погрешностей этих величин для звезд скоплений Плеяды и Ясли.