

УДК 524.3-56:524.3-17

HD 4915: ЗВЕЗДА ПЕРЕД НАЧАЛОМ МАУНДЕРОВСКОГО МИНИМУМА АКТИВНОСТИ

© 2023 И. С. Саванов¹, Е. С. Дмитриенко², С. В. Карпов^{3,4,5},
Н. В. Ляпсина³, Г. М. Бескин^{3,4}, А. В. Бирюков^{6,4,7},
А. Г. Гутаев^{3,4}, Е. А. Иванов^{3,8}, А. В. Перков⁸, В. В. Сасюк⁴

¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия¹

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, Москва, 119234 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁴Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

⁵Центральноевропейский институт космологии и фундаментальной физики, Институт физики, Чешская академия наук, Прага, 18221 Республика Чехия

⁶Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

⁷Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000 Россия

⁸АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», Москва, 111024 Россия

Поступила в редакцию 7 февраля 2023 года; после доработки 15 февраля 2023 года;
принята к публикации 16 февраля 2023 года

По имеющимся фотометрическим данным, охватывающим почти 8000 суток (21.9 лет) наблюдений яркого G5 V карлика, звезды солнечного типа HD 4915, нами проведено изучение проявлений ее активности, вероятно переходящей в состояние, аналогичное минимуму Маундера. Для оценки длительности возможных циклов активности звезды использованы три независимых набора данных. Получены свидетельства изменения блеска HD 4915, в том числе и на интервале, во время которого имело место уменьшение переменности ее хромосферной активности. На основе построенного спектра мощности для блеска объекта можно предположить существование возможных циклов порядка 1640 и 630 суток (4.5 и 1.7 лет), которые могут быть сопоставлены с оценкой цикла хромосферной активности в 4–4.2 года, существенно меньшей длительности цикла магнитной активности Солнца, что является отличительной особенностью HD 4915. По фотометрическим наблюдениям звезды из обзора *Kamogata Wide-field Survey*, включая данные измерений после 2018 г., когда она могла бы входить в фазу активности, аналогичную минимуму Маундера, получены указания на возможные циклы в 450, 1260 и 2000 суток (1.23, 3.5 и 5.5 лет) и сделан вывод о присутствии циклических изменений блеска при нахождении HD 4915 в этом предполагаемом состоянии пониженной активности. Проведено обсуждение вероятной оценки периода вращения звезды. Рассмотрены имеющиеся в архиве TESS данные для HD 4915 в четырех сетах наблюдений и установлено, что они не пригодны для определения периода ее вращения.

Ключевые слова: *звезды: активные* — *звезды: отдельные: HD 4915*

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее хорошо изученная звезда — наше Солнце — пережила период, известный как минимум Маундера (1645–1715 гг.), в течение которого ее активность была очень низкой и, возможно, постоянной, а не периодической. По подсчетам Маундера, в названный период наблюдалось всего несколько десятков солнечных пятен вместо

обычных десятков тысяч. При этом подавляющее большинство пятен возникало в южном полушарии Солнца. Падение солнечной активности в указанный Маундером период было подтверждено анализом содержания углерода-14, а также некоторых других изотопов в ледниках и деревьях. Такой анализ позволил выявить 18 минимумов активности Солнца за последние 8000 лет, включая минимум Шперера (1450–1540 гг.) и минимум Дальтона (1790–1820 гг.).

¹E-mail: igs231@mail.ru

Обнаружение других звезд, демонстрирующих исчезновение циклической активности, существенно затруднено из-за отсутствия долгосрочных наблюдений. Имеющиеся данные охватывают самое большее несколько десятилетий, в то время как наше Солнце изучалось и наблюдалось на протяжении веков (Egeland et al., 2017). Однако изучение хромосферной звездной активности обеспечивает возможность продолжения поиска кандидатов — звезд, находящихся в минимуме, аналогичном минимуму Маундера (далее ММ — Maunder minimum). Мы будем их называть ММ-звездами.

Мониторинг хромосферной активности начал осуществляться в обсерватории Mount Wilson в ходе реализации НК-проекта (Duncan et al., 1991) В качестве индикатора активности рассматривались данные об излучении в эмиссионных ядрах линий Ca II H и K (длины волн 3968 Å и 3934 Å соответственно). Успех программы привел к проведению аналогичных исследований для изучения хромосферной активности большего количества объектов. Число звезд, возможных кандидатов в объекты с ММ-активностью сравнительно невелико. К ним, например, следует отнести — HD 3651, HD 4915, HD 140538 (см. подробнее в работе Shah et al. (2018)). Baum et al. (2022) изучили поведение хромосферной активности у 59 солнцеподобных звезд за несколько десятилетий и представили результаты измерений в виде временных рядов. Эти ряды включают в себя 35-летние наблюдения хромосферной активности звезд в обсерватории Mount Wilson (в течение 1966–2001 гг.), которые дополнены наблюдениями, начатыми в 1996 г. в рамках программы поиска планет CPS — California Planet Search¹. Были рассмотрены данные для 29 звезд с циклами активности, проведены анализ и моделирование временных рядов, получены оценки периодов цикличности каждого из изученных объектов.

По итогам исследования в качестве возможного кандидата в ММ-звезды была предложена HD 166620. В цитируемых статьях Shah et al. (2018) и Baum et al. (2022) можно найти ссылки на публикации, посвященные проблеме изучения кандидатов в объекты с ММ-активностью.

Целью нашей работы является изучение проявлений активности одной из упомянутых выше звезд, HD 4915, по ее фотометрическим наблюдениям для сопоставления с результатами анализа хромосферной активности.

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ HD 4915

Звезда HD 4915 является ярким G5 V карликом солнечного типа, ее блеск составляет в фильтрах $B = 7^m643$, $V = 6^m972$, $R = 6^m604$. Согласно Shah et al. (2018), эффективная температура звезды равна 5658 K (она холоднее Солнца всего примерно на 100 K), ускорение силы тяжести $\lg g = 4.42$, масса $M/M_{\odot} = 0.89$ и радиус $R/R_{\odot} = 0.871$. HD 4915 отождествлена с источником Gaia EDR3 2525514785221197696, его параллакс составляет $\pi = 44.5912 \pm 0.0238$ mas. Возраст звезды по оценке из работы Shah et al. (2018) — 5.389 ± 1.243 млрд лет. Отметим, что перечисленные нами свойства объекта приводятся согласно данным, указанным в работах Gomes da Silva et al. (2021) и Shah et al. (2018). Изучение HD 4915 представляет несомненный интерес, поскольку она является близким ярким карликом солнечного типа и, согласно Shah et al. (2018), одним из немногих кандидатов в объекты, пригодных для исследований ММ-активности.

Оценка возможных циклов активности HD 4915 была проведена нами по трем независимым наборам данных. Во-первых, мы рассмотрели данные многолетнего обзора KWS² — Kamogata/Kiso/Kyoto Wide-field Survey (Maehara, 2014), которые включают длительную фазу постоянного уровня хромосферной активности, а также последующий за ним интервал времени. 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 анализировали только эти измерения). Всего было рассмотрено 888 оценок блеска звезды в этом фильтре. Они охватывают длительный интервал наблюдений в 4361 суток (11.9 лет) (HJD 2455548.9–2459909.9). Представленные на рис. 1a (светлые кружки) данные несомненно свидетельствуют об изменении блеска звезды в доступном нам интервале наблюдений, включая этапы, когда происходило уменьшение амплитуды переменности хромосферной активности.

Во-вторых, еще один набор данных о переменности блеска HD 4915 получен с Mini-MegaTORTORA (Beskin et al., 2017) — девятиканальной широкополосной оптической системой мониторинга с высоким временным разрешением, расположенной в САО РАН. В рамках систематических наблюдений за северным небом система получает глубокие обзорные изображения с экспозицией от 20 с до 60 с в белом свете, охватывая северное небо в среднем несколько раз за ночь. Изображения обрабатываются специальным пакетом

¹<http://www.exoplanets.org/cps.html>

²kws.cetus-net.org

программ, который, помимо стандартных шагов калибровки, определяет эффективную фотометрическую систему каждого кадра, а затем использует эту информацию для определения $(B - V)$ -цвета каждой звезды и повторной калибровки измерений с использованием фильтра Johnson V (Karpov et al., 2018). Данные для HD 4915 были получены из архива Mini-MegaTORTORA, они подверглись процедуре отбора для исключения измерений с погрешностями фотометрической калибровки. В итоге осталось 223 измерения блеска звезды в фильтре V в интервале HJD 2457308.8–2459594.6 длительностью 2285 суток (6.3 лет). Они хорошо согласуются с измерениями блеска в фильтре V из обзора KWS и также указывают на изменение его уровня в различные сезоны наблюдений.

Наконец, в-третьих, мы использовали данные для HD 4915 из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey³ (ASAS). Всего было рассмотрено 300 оценок блеска звезды в фильтре V в интервале HJD 2451913.5–2455166.7 длительностью 3253 суток (8.9 лет). По временному интервалу данные обзора ASAS не перекрываются с наблюдениями KWS и Mini-MegaTORTORA. Они были выполнены ранее и являются хорошим дополнением, увеличивая интервал наблюдений почти вдвое.

Таким образом, объединенный массив данных включил в себя наблюдения звезды на протяжении почти 8000 суток (21.9 лет). Это существенно больше, чем длительность наблюдений ее хромосферной активности, представленных в работе Shah et al. (2018), которые охватывают менее 12 лет.

Данные для полного массива наблюдений приведены на рис. 1. Медианное значение величины блеска звезды в фильтре V по всему ряду составило 6^m968 , а среднее — 6^m972 (оно совпадает с результатом Shah et al. (2018)). На рис. 1а горизонтальными линиями обозначены интервалы времени, когда звезда, согласно Shah et al. (2018), находилась в минимумах своей хромосферной активности.

На основе построенного спектра мощности для блеска HD 4915 можно предположить существование возможных циклов активности порядка 1640 и 630 суток (рис. 1б, вертикальные линии). Пунктирная линия соответствует сезонной (365^d) переменности, присутствующей в данных. Толстая сплошная вертикальная линия представляет цикл хромосферной активности длительностью около 4 лет, установленный в работе Shah et al. (2018). Было бы естественно определять продолжительность цикла хромосферной активности, как интервал времени между двумя минимумами или двумя

максимумами, но, к сожалению, имеющиеся в нашем распоряжении данные (см. рис. 2 в Shah et al. (2018)) не позволяют сделать это точно. В связи с этим приходится принимать оценку величины цикла, равной примерно четырем годам.

3. ХРОМОСФЕРНАЯ АКТИВНОСТЬ HD 4915

Хромосферная активность HD 4915 и многих других звезд была рассмотрена Butler et al. (2017) в ходе реализации программы поиска планет CPS со спектрографом Keck/High Resolution Echelle Spectrometer. Однако по мнению Shah et al. (2018), временной ряд индекса S , приведенный в работе Butler et al. (2017), не так явно свидетельствует о переходе звезды в состояние ММ. Для своего анализа Shah et al. (2018) использовали те же спектры HD 4915, полученные начиная с 2006 г., и заключили, что измерения S -индекса точно отражают ММ-стадию. Детальнее см. рис. 2 из работы Shah et al. (2018), где на верхней панели показан временной ряд S -индекса, а на нижней панели — соответствующие спектры ядра линии Ca II H.

Оригинальные исследования Butler et al. (2017) включают 60 измерений параметра S (рис. 2а). Построенный по ним спектр мощности указывает на цикличность изменений с величиной P порядка 1530 суток (4.2 года). Эта оценка хорошо совпадает с результатом, полученным в работе Shah et al. (2018), не противоречит ему и указывает на характерное время цикла хромосферной активности около 4 лет. Следует иметь в виду, что оценки в работах Shah et al. (2018) и Butler et al. (2017) определены по данным, имеющим продолжительность измерений порядка двух времен цикла и, к тому же, форму, соответствующую затухающему колебанию. Напомним, что HD 4915 является звездой солнечного типа, но установленная для нее величина продолжительности цикла около четырех лет существенно меньше цикла магнитной активности Солнца. При этом (см. ниже) узкие линии в спектре звезды приводят к выводу о значительной величине периода вращения, возможно даже близкому к солнечному.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование проявлений магнитной активности HD 4915 представляет большой интерес, поскольку оно тесно связано с обсуждением способов идентификации кандидатов в объекты, входящих в фазу активности, аналогичную ММ. В работе Shah et al. (2018) обсуждалось, что за последние несколько десятилетий предпринимались многочисленные попытки установить критерии для таких кандидатов с использованием анализа их S -индексов. Однако применение этих критериев

³www.astrouw.edu.pl/asas

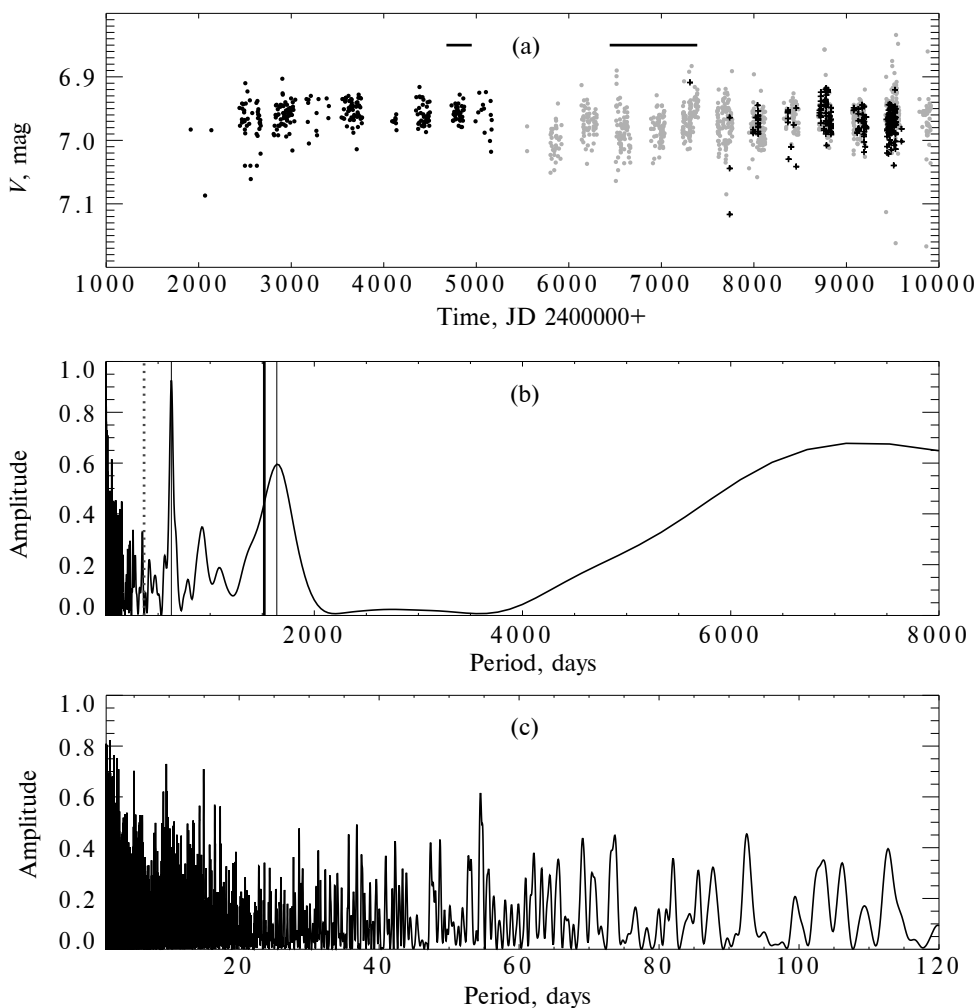


Рис. 1. Фотометрические наблюдения HD 4915. Панель (a) — данные многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) — серые символы, Mini-MegaTORTORA — крестики и All Sky Automated Survey — точки. Горизонтальными линиями обозначены интервалы времени, когда звезда, согласно Shah et al. (2018), находилась в минимумах своей хромосферной активности. Панель (b) — спектр мощности переменности блеска. Вертикальные линии соответствуют циклам 1640 и 630 суток, пунктирная линия соответствует 365^d сезонной переменности, присутствующей в данных. Толстая сплошная вертикальная линия представляет цикл хромосферной активности длительностью около 4 лет. Панель (c) — спектр мощности для интервала периодов 10–120 дней.

сталкивается с очевидной трудностью — у нас нет непосредственно сопоставимых данных о хромосферной активности Солнца во время его пребывания в фазе ММ. Как указали Saar and Testa (2012), для того, чтобы самым надежным способом охарактеризовать звезду как ММ-объект, следует представить наблюдения ее входа в длительный период (по крайней мере, больший, чем величина его типичного цикла) постоянной или низкой циклической активности и перехода из него в нормальный цикл. В качестве альтернативы мы могли бы также дать такую характеристику, наблюдая переход звезды в обычное циклическое состояние из аномально низкого. Открытие истинного аналога звезды в стадии ММ помогло бы нам понять поведение магнитного поля нашего Солнца во время

его ММ и значительно облегчило бы поиск других таких аналогов.

Отметим основные выводы, которые можно сделать по итогам исследования звезды HD 4915. Прежде всего следует подчеркнуть, что ее активность на самом деле может и не иметь один хорошо выраженный цикл, как у Солнца. Действительно, авторы Butler et al. (2017) и Shah et al. (2018) пришли к выводу о существовании четырехлетнего цикла, исходя из предположения, что рассматриваемые ими данные отражают максимум первого частичного цикла и что, по-видимому, в интервал наблюдений попадает около двух полных циклов различной морфологии. Однако известно, что многие звезды с периодами цикла около 4–5 лет или более демонстрируют стохастическое или многопериодическое поведение, которое может быть при-

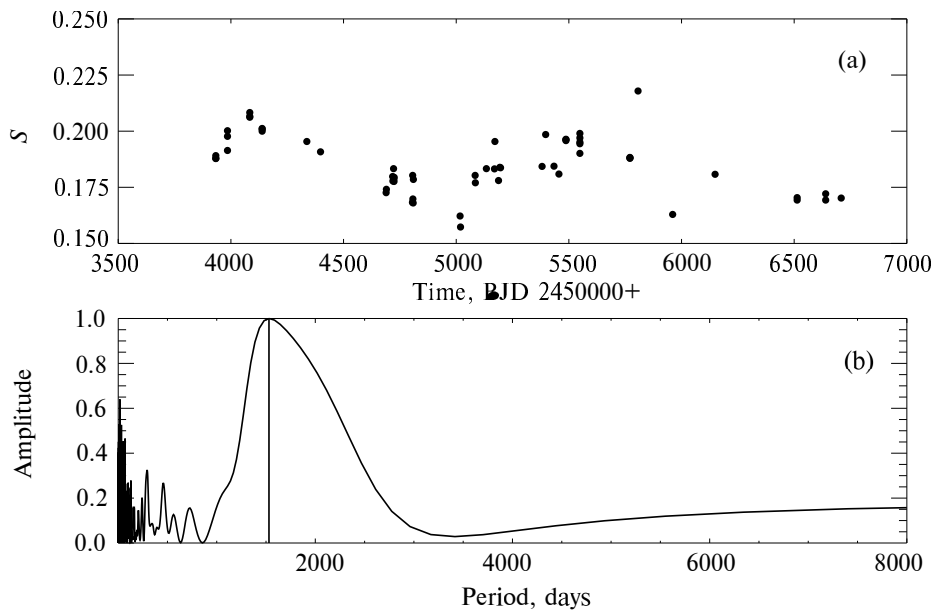


Рис. 2. Панель (а) — индекс S по измерениям Butler et al. (2017). Панель (б) — спектр мощности для этих данных, вертикальные линии соответствует циклу активности 1530 суток (4.2 года).

сущее и HD 4915. Очевидна необходимость будущих наблюдений для того, чтобы установить свойства ее магнитной активности. Крайне желательны перспективные наблюдения за индикаторами хромосферной и корональной активности звезды (линии излучения H и K Ca II и рентгеновское излучение), по меньшей мере, в течение нескольких циклов активности, поскольку есть убедительные указания на то, что после 2020 года HD 4915 может входить в состояние ММ.

В литературе нет сведений о проявлениях хромосферной активности звезды после 2018 года. Однако имеющиеся в нашем распоряжении фотометрические данные, полученные для нее в ходе многолетнего KWS-обзора, включают интервал наблюдений, начавшийся после 2018 г., то есть когда звезда могла бы входить в фазу ММ. На рис. 3 представлены однородные данные о блеске HD 4915 в фильтре V только по наблюдениям обзора. Они, предположительно, характеризуют сохраняющиеся циклические изменения активности объекта. Спектр мощности, построенный по этим данным, указывает на возможные циклы в 450, 1260 и 2000 суток (1.23, 3.5 и 5.5 лет). Представляется важным результатом, касающийся не только самих величин циклов, но и обнаружения самого существования циклическости в интервале времени, когда звезда могла бы находиться в состоянии ММ. На рис. 3с представлен спектр мощности для интервала периодов от 10 до 100 суток, который, в принципе, мог бы указать на возможный период вращения звезды. Линии в спектре HD 4915 узкие, по оценке Shah et al. (2018) значе-

ние $v \sin i = 1.4 \text{ км с}^{-1}$, что для принятой величины радиуса (также из Shah et al. (2018)) приводит к величине периода вращения звезды порядка 30 суток. На рассматриваемом спектре мощности имеются пики в областях, соответствующих периодам около 15 суток, набор расщепленных пиков в диапазоне 30–40 дней с максимальным примерно для 34 суток и отдельные пики, например, для 57 и 90 суток. Требуются дальнейшие наблюдения, чтобы установить истинное согласие пика около 34 суток с возможной величиной периода вращения звезды P .

Отметим, что при величине P порядка нескольких десятков суток наблюдения с космической миссией TESS вряд ли могут быть полезны вследствие наличия долговременных трендов в фотометрических рядах и последующей обработки перед помещением в архив данных.

Для HD 4915 в архиве TESS имеются данные четырех сетов наблюдений: 3, 30, 42 и 43. Наша обработка была аналогична проводимой в случае измерений для других объектов из архива космического телескопа Кеплер и из архива наблюдений миссии TESS (см., например, Savanov (2021)). Качество редуцированных наблюдений оказалось невысоким, имеются значительные пробелы в данных, очевидно, что в архивных данных был удален долговременный тренд. Пики, имеющиеся на полученных спектрах мощности, не пригодны для оценок периода вращения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Число звезд, которые могут быть отнесены к кандидатам в ММ-объекты, составляет единицы.

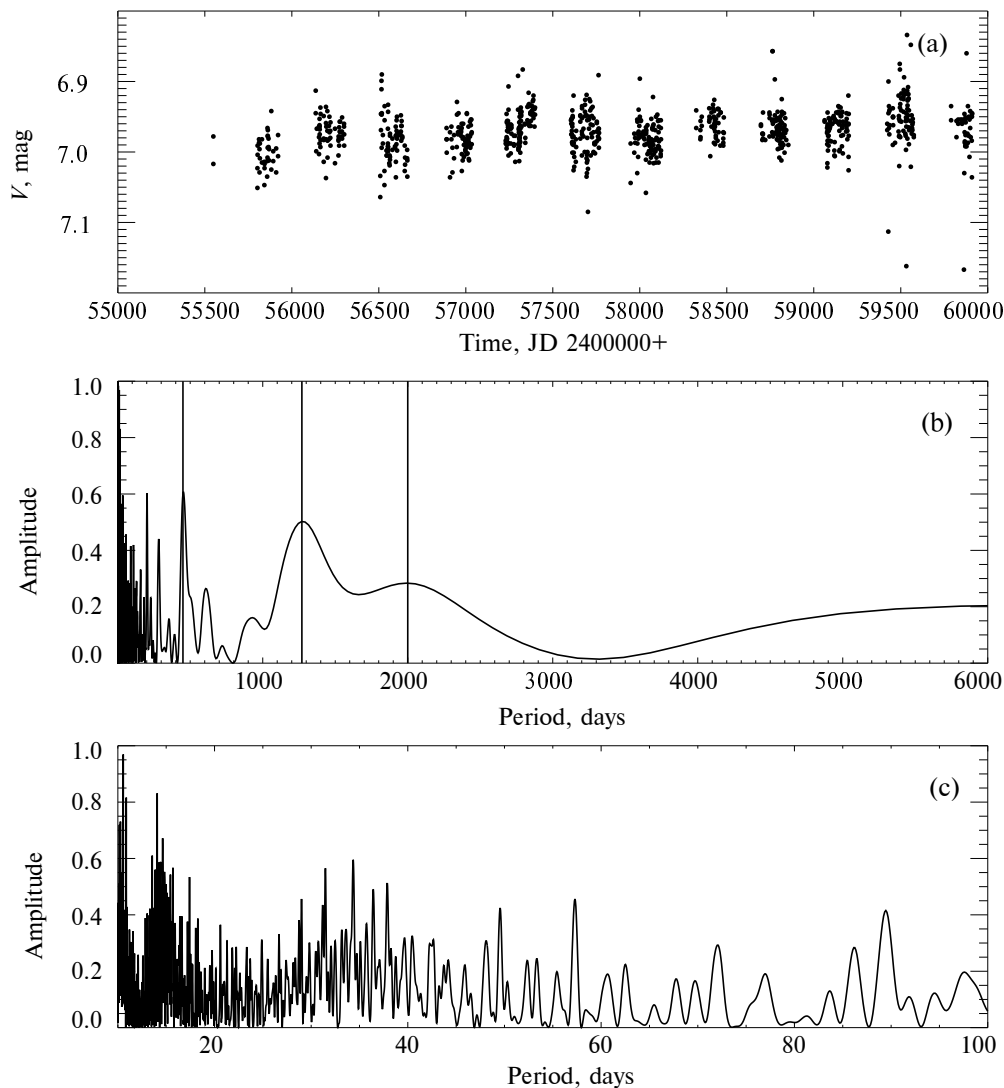


Рис. 3. Панель (a) — фотометрические наблюдения HD 4915 по данным обзора KWS. Панель (b) — спектр мощности для этих данных, вертикальные линии соответствуют циклам активности 450, 1260 и 2000 суток (1.23, 3.5 и 5.5 лет соответственно). Панель (c) — спектр мощности для интервала периодов 10–100 суток.

Цель нашего исследования — изучение проявлений активности одной из таких звезд (HD 4915) по имеющимся фотометрическим наблюдениям. Эта звезда является ярким G5 V карликом солнечного типа, что представляет особый интерес с точки зрения сравнения ее активности с солнечной.

Оценка возможных циклов активности HD 4915 была проведена нами по трем независимым наборам данных. Полученные данные (их объединенный массив включал в себя наблюдения звезды на протяжении почти 8000 суток (21.9 лет)) несомненно свидетельствуют об изменении блеска звезды, в том числе на этапах, когда происходило уменьшение амплитуды переменности хромосферной активности. На основе построенного спектра мощности для блеска объекта можно предположить существование возможных циклов активности порядка

1640 и 630 суток (4.5 и 1.7 лет), которые могут быть сопоставлены с оценкой цикла хромосферной активности (4–4.2 года). Найденная для звезды величина продолжительности цикла около 4 лет существенно меньше длительности цикла магнитной активности Солнца, что является отличительной особенностью HD 4915.

По фотометрическим наблюдениям звезды, полученным в ходе обзора Kamogata Wide-field Survey, включающим интервал времени после 2018 г., то есть когда звезда могла бы входить в фазу ММ, установлены возможные циклы в 450, 1260 и 2000 суток (1.23, 3.5 и 5.5 лет). Исходя из этого, сделан вывод о присутствии циклических изменений в интервале времени, когда HD 4915 могла бы находиться в состоянии ММ.

По имеющимся данным не представляется воз-

можно получить достоверные величины периода вращения звезды. Наша предварительная оценка основана на наличии в спектре мощности пика около 34 суток. Рассмотренные нами данные для HD 4915 в четырех сетях наблюдений (3, 30, 42 и 43) из архива TESS для оценок периода вращения не пригодны.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена 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.

HD 4915: at the Beginning of Maunder Minimum of Activity

I. S. Savanov¹, E. S. Dmitrienko², S. V. Karpov^{3, 4, 5}, N. V. Lyapsina³, G. M. Beskin^{3, 4}, A. V. Biryukov^{2, 4, 6}, A. G. Gutaev^{3, 4}, E. A. Ivanov^{3, 7}, A. V. Perkov⁷, V. V. Sasyuk⁵

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

²Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, 119234 Russia ³Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

⁴Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

⁵Central European Institute for Cosmology and Fundamental Physics, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, 18221 Czech Republic

⁶National Research University “Higher School of Economics”, Moscow, 101000 Russia

⁷Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Moscow, 111024 Russia

Based on the available photometric data spanning almost 8000 days (21.9 years) of observations of a bright G5 V dwarf, solar-type star HD 4915, we carried out a study of the manifestations of its activity, probably transitioning to a state similar to the Maunder Minimum. To estimate the duration of the possible activity cycles of the star, we used three independent data sets. We obtained evidence of HD 4915 light variations, including the interval of time corresponding to a decrease in its chromospheric activity variations. Based on the constructed power spectrum, we can suggest the existence of possible cycles of the order of 1640 and 630 days (4.5 and 1.7 years) for the object’s brightness, which are comparable with the chromospheric activity cycle estimate of 4–4.2 years, significantly shorter than the duration of the magnetic activity cycle of the Sun, which is a distinguishing feature of HD 4915. Using photometric observations of the star from Kamogata Wide-field Survey, including data from the measurements taken after 2018, when it could have been starting an activity phase similar to the Maunder Minimum, we obtained indications of possible 450, 1260 and 2000 day cycles (1.23, 3.5 and 5.5 years) and made a conclusion about the presence of cyclic light variations during this supposed lower activity state of HD 4915. We discuss the probable estimate of the star’s rotation period. A consideration of the HD 4915 data available in the TESS archive for four observing sets led us to conclude that they are unsuitable for determining its rotation period.

Keywords: *stars: activity—stars: individual: HD 4915*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. C. Baum, J. T. Wright, J. K. Luhn, and H. Isaacson, *Astron. J.* **163** (4), 183 (2022).
2. G. M. Beskin, S. V. Karpov, A. V. Biryukov, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (1), 81 (2017).
3. R. P. Butler, S. S. Vogt, G. Laughlin, et al., *Astron. J.* **153** (5), article id. 208 (2017).
4. D. K. Duncan, A. H. Vaughan, O. C. Wilson, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **76**, 383 (1991).
5. R. Egeland, W. Soon, S. Baliunas, et al., *Astrophys. J.* **835** (1), article id. 25 (2017).
6. J. Gomes da Silva, N. C. Santos, V. Adibekyan, et al., *Astron. and Astrophys.* **646**, id. A77 (2021).
7. S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, et al., *Astronomische Nachrichten* **339** (5), 375 (2018).
8. H. Maehara, *J. Space Sci. Informatics Japan*, **3**, 119 (2014).
9. S. H. Saar and P. Testa, *Proc. IAU Symp.*, No. 286, 335 (2012).
10. I. S. Savanov, *Astrophysics* **64** (2), 178 (2021).
11. S. P. Shah, J. T. Wright, H. Isaacson, et al., *Astrophys. J.* **863** (2), article id. L26 (2018).