

DOI: 10.54503/0571-7132-2024.67.2-151

ПРОЯВЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ K2V КАРЛИКА HD 189733 С ЭКЗОПЛАНЕТОЙ ТИПА ГОРЯЧИЙ ЮПИТЕР

И.С.САВАНОВ

Поступила 10 апреля 2024

Принята к печати 10 июня 2024

Представлены результаты анализа проявлений активности карлика спектрального класса K2V HD 189733, обладающего одной из наиболее хорошо изученных экзопланет типа горячий Юпитер. Учет активности звезды существенно усложняет анализ характеристик планеты (в частности, холодные пятна на поверхности звезды вносят дополнительный сигнал в соотношение между глубиной транзита и размером планеты и препятствуют точным определениям радиуса планеты). Проанализированы фотометрические данные для HD 189733 из архива миссии TESS и сделаны заключения о значениях величины периода вращения P_{rot} звезды, которые по нашей оценке составили 12.5 и 11.3 сут для секторов 41 и 54, соответственно. Их сопоставление с выполненными ранее оценками по результатам фотометрических наземных наблюдений позволяет предположить, что имеющиеся различия в определениях величины P_{rot} связаны с тем, что в разные моменты наблюдений доминирующими являлись пятна, расположенные на различных широтах на поверхности дифференциально вращающейся звезды. По данным TESS амплитуда переменности блеска HD 189733 составляет 1.6 и 0.9% от уровня среднего блеска звезды (для секторов 41 и 54, соответственно). По стандартной методике были оценены величины параметра запятненности звезды (2.0 и 1.2% от площади поверхности звезды) и получены величины площади запятненной поверхности A звезды в абсолютной мере (9200 м.д.п. и 5400 м.д.п. для секторов 41 и 54, соответственно). По 771 оценке блеска звезды в фильтре V, представленной в обзоре Kamogata Wide-field Survey, был проведен анализ проявлений долговременной активности HD 189733 и найдены указания на существование возможных циклов активности продолжительностью в 1140 и 4220 сут (3.1 и 11.6 лет, соответственно). Из анализа литературных данных сделан вывод о том, что уровень хромосферной активности HD 189733 превосходит средние величины, характерные для других холодных карликов с аналогичными значениями показателя цвета ($B - V$) и выше солнечного значения. Сделано заключение, что HD 189733 обладает умеренной (или немного выше средней) активностью, присущей аналогичным карликам спектрального класса K, но, тем не менее, требующей при моделировании тщательного учета свойств и эволюции планеты, обращающейся вокруг этой звезды, вне зависимости от того, проводятся ли оценки по упрощенной методике или по точному магнитогидродинамическому моделированию. Также следует принять во внимание, что активность звезды является переменной со временем (на шкале времени, сопоставимой с величиной P_{rot}) и требует оценок, выполняемых одновременно с основными исследованиями атмосферы экзопланеты.

Ключевые слова: *звезды; активность; планетные системы; атмосферы экзопланет*

1. Введение. На сегодняшний день HD 189733 b принадлежит к числу наиболее хорошо изученных экзопланет типа горячий Юпитер [1], благодаря результатам многочисленных наблюдений (как с Земли, так и из космоса)

и теоретическим моделям, построенным для исследования ее атмосферы, влияния родительской звезды и окружающей экзопланеты среды. Обзор результатов многочисленных кампаний по наблюдению транзитов HD 189733 b с использованием уникальных возможностей космического телескопа Хаббла, а также современных оценок параметров звезды и планеты, можно найти, например, в [2-4]. Обзор наземных фотометрических наблюдений транзитов HD 189733 b (в том числе высокоточных измерений, полученных в течение шести лет (2016-2021гг.)) представлен в [2,3].

Особое внимание, уделяемое многими исследовательскими группами к данной системе, связано с тем, что для HD 189733 проводились высокоточные измерения глубины транзитов на многих длинах волн в диапазоне от 0.3 до 24 мкм. Такие измерения позволяют получить представление о структуре и составе атмосферы экзопланеты HD 189733 b. Однако анализ усложняется необходимостью учета проявления активности HD 189733, у которой пятна на поверхности вносят дополнительный сигнал в соотношение между глубиной транзита и размером планеты. Эти проблемы обсуждаются в многочисленных работах (см., например, [4,5]). Очевидно, что простое сравнение данных о прохождении планеты в различных диапазонах длин волн неправомерно, и для получения глобальной оценки спектра пропускания от ультрафиолетового до ИК - диапазонов требуется детальный комбинированный анализ всех наборов данных с учетом проявления активности звезды.

HD 189733 является умеренно активным карликом спектрального класса K2V с холодными пятнами на поверхности, которые модулируют общий блеск звезды на протяжении 12-дневного периода вращения звезды [5]. Амплитуда модуляции блеска HD 189733 в видимом диапазоне может составлять величину порядка 1-2% [2,6]. Как указывалось, наличие звездных пятен нужно учитывать как при расчете трансмиссионного спектра экзопланеты, так и при анализе глубин кривых транзитов. Вопрос о проявлениях пятенной активности звезды остается актуальным и по настоящее время. Например, авторы исследования [5] обратились к нему на основе анализа данных наблюдений миссий HST и TESS.

В настоящей работе представлены наши результаты изучения проявлений активности звезды HD 189733 по имеющимся данным архива космической миссии TESS.

2. Звезда планетной системы - HD 189733. Основные сведения о параметрах HD 189733 можно найти в табл.1 [2] (перечисленные и используемые нами ниже свойства звезды приводятся согласно этим данным).

Общепринято (см., например, [2]), что эффективная температура звезды равна 5050 ± 20 K, ускорение силы тяжести $\log g = 4.563 \pm 0.021$, радиус

$R/R_{\odot} = 0.765 \pm 0.019$, светимость $L/L_{\odot} = 0.355 \pm 0.014$ и масса $M/M_{\odot} = 0.812 \pm 0.041$. Возраст звезды оценивается в 1.2 млрд. лет, она существенно моложе Солнца.

В архиве TESS для HD 189733 имеются данные двух сетов наблюдений - сектора 41 (23 июля 2021г. - 20 августа 2021г.) и сектора 54 (9 июля 2022г. - 5 августа 2022г.). Обработка кривых блеска была аналогична проводимой ранее в случае измерений для других объектов из архивов космического телескопа Кеплер и миссии TESS (см., например, [7]).

Кривые блеска звезды, характеризующиеся переменностью, вызванной вращательной модуляцией вследствие наличия холодных пятен на поверхности, представлены на рис.1. Два сета наблюдений были выполнены с интервалом примерно в 1 год. За это время амплитуды и формы кривых блеска претерпели значительные изменения. Более того, каждый сет по продолжительности примерно соответствует двум периодам вращения звезды, и в каждом случае можно сделать заключение о переменности кривых блеска на временах порядка P_{rot} .

На построенных нами спектрах мощности (средние диаграммы на рис.1) имеются характерные широкие пики, соответствующие величинам периода вращения P_{rot} звезды 12.5 и 11.3 сут для секторов 41 и 54, соответственно. Первые исследования вращения HD 189733 указали на то, что, вероятно, величина P_{rot} лежит в интервале от 11 до 13 сут (их обзор и ссылки см. в [6]). Авторы [6] получили более точную оценку $P_{rot} = 11.953 \pm 0.009$ сут, которая была

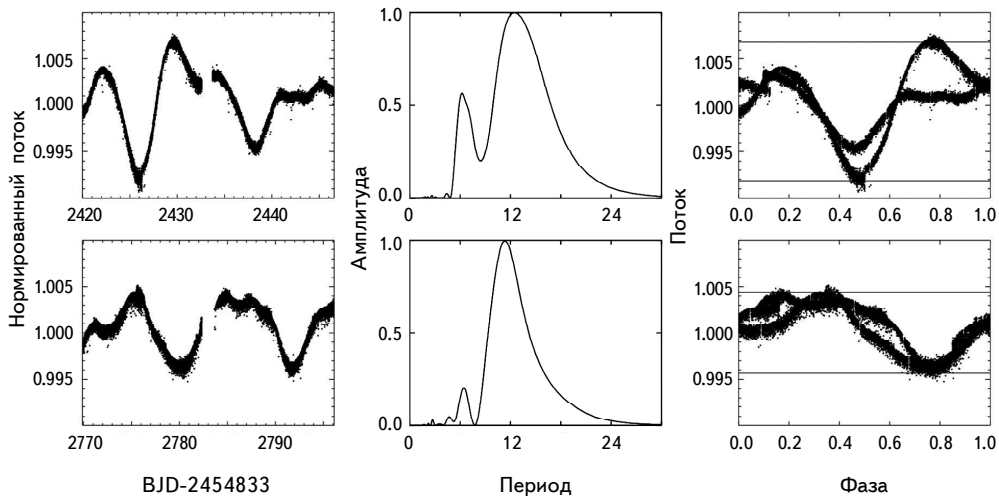


Рис.1. Слева - кривые блеска для HD 189733, в центре - спектры мощности переменности блеска, справа - фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 41 и 54.

установлена по 314 оценкам блеска HD 189733 в интервале от октября 2005 по июль 2007гг. с T10 0.8-м автоматизированным телескопом APT в Fairborn Observatory. Анализ более продолжительного ряда наблюдений (6 лет) с тем же инструментом [3] привел к заключению о величине $P_{rot} = 11.86$ сут, практически совпадающим с результатом из [6]. По выполненным позднее наблюдениям HD 189733 с телескопом T10 APT в 2017г. стало возможным получить оценку $P_{rot} = 12.25 \pm 0.15$ сут [2]. Наконец, анализируя данные миссии TESS, авторы [5] приводят оценку величины периода вращения звезды 11.4 сут.

Наблюдения двух транзитов HD 189733 b были выполнены со спектрографом ESPRESSO 11 и 31 августа 2021г. [8]. Полученные результаты продемонстрировали высокую точность определения лучевых скоростей, наблюдаемых во время транзита. Кроме того, по данным ESPRESSO высокого разрешения был успешно восстановлен трансмиссионный спектр HD 189733 b. Авторы [8] установили, что период экваториального вращения звезды составляет 11.45 ± 0.09 сут, а близкого к полярному - 14.9 ± 2 сут, т.е. впервые нашли указания на дифференциальный характер вращения.

На рис.2 (вверху) представлен спектр мощности для объединенных данных для секторов 41 и 54. Вертикальными линиями отмечены величины P_{rot} , представленные в предыдущих фотометрических исследованиях (см. выше) и найденная нами величина $P_{rot} = 11.80$ сут, которая совпадает с оценками [3,6], установленными по продолжительным наземным наблюдениям. На нижней диаграмме представлены фазовые кривые, полученные при свертке с упомя-

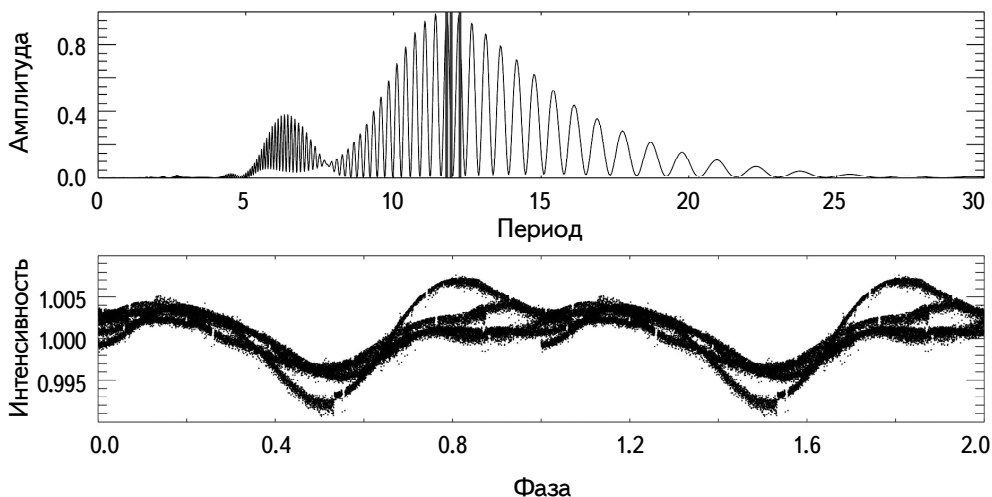


Рис.2. Вверху - спектр мощности для объединенных данных для секторов 41 и 54. Вертикальными линиями отмечены величины P_{rot} , представленные в предыдущих фотометрических исследованиях (см. текст), и найденная нами величина $P_{rot} = 11.80$ сут. На нижней диаграмме представлены фазовые кривые для $P_{rot} = 11.80$ сут.

нутым выше значением *Prot*.

Таким образом, выполненный нами анализ и результаты предыдущих исследований позволяют предположить, что имеющиеся различия в определениях величины *Prot* связаны с тем, что в разные моменты наблюдений доминирующими являются пятна, расположенные на различных широтах на поверхности дифференциально вращающейся звезды.

Амплитуда переменности блеска составляет 1.6 и 0.9% от уровня среднего блеска звезды (для секторов 41 и 54, соответственно). По стандартной методике нами были оценены величины параметра запятненности звезды, которые достигают 2.0 и 1.2% от площади поверхности звезды. Принимая оценку радиуса звезды $R = 0.765 \pm 0.019$ радиусов Солнца из [2], можно получить величину площади поверхности запятненности *A* звезды в абсолютной мере (в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.). На Солнце средние по размерам пятна имеют площадь 10–200 м.д.п. (детали см. в [9]). Площадь пятен на поверхности HD 189733 составляет величину порядка 9200 м.д.п. и 5400 м.д.п. (для секторов 41 и 54, соответственно). По этим оценкам запятненность звезды становится сопоставимой с максимальной запятненностью Солнца. Так, например, общая площадь солнечных пятен для Гринвичской группы солнечных пятен 14886 по наблюдениям 8 апреля 1947г. составила 6132 м.д.п. [10]. Сравнение с запятненностью звезд других спектральных классов, в том числе К, можно найти в [11].

3. *Циклы активности.* По данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) (<http://kws.cetus-net.org>) нами был проведен анализ проявлений долговременной активности HD 189733. В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах V и Ic. В первую очередь мы провели анализ данных для фильтра V, обладающих более длительным интервалом наблюдений в 4486 сут (12.3 лет) (HJD 2455700 – 2460186). Была рассмотрена 771 оценка блеска звезды в фильтре V. Представленные на рис.3 (вверху) данные свидетельствуют о присутствии цикличности в изменении ее блеска. На основе построенного спектра мощности для блеска HD 189733 можно предположить существование возможных циклов активности 1140 сут и 4220 сут (3.1 и 11.6 лет, соответственно) (средняя диаграмма). Вертикальной светлой линией представлен период, соответствующий годичной переменности.

4. *Хромосферная активность HD 189733.* Согласно результатам наблюдений HD 189733 со спектрографом HARPS [12], величины параметра хромосферной активности *S* звезды находятся в интервале 0.461–0.508, а соответствующие им величины параметра хромосферной активности $\log R'_{HK}$ – в диапазоне от –4.55 до –4.50. При этом, для HD 189733 авторы [12] обнаружили избыточное поглощение в линиях CaII H и K во время транзитов,

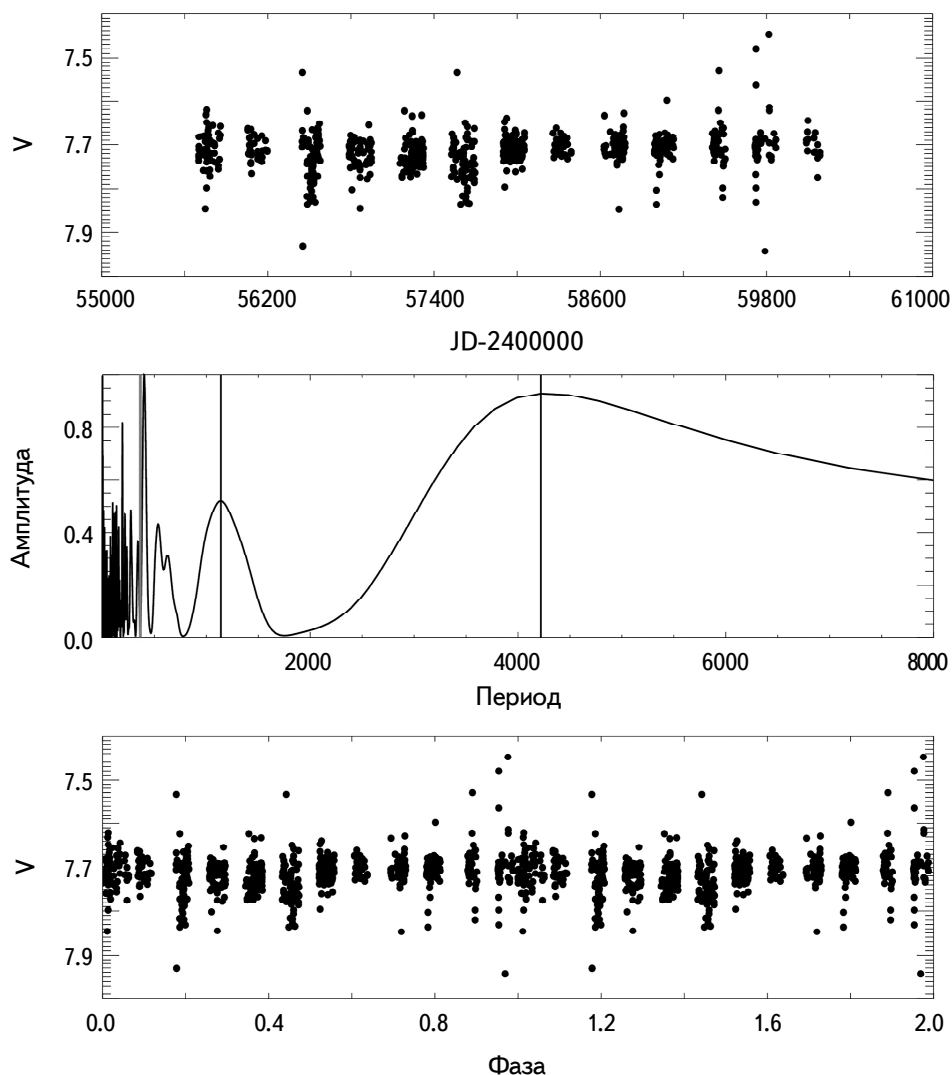


Рис.3. Верхняя панель - фотометрические наблюдения HD 189733 в фильтре V по данным обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS). Средняя панель - спектр мощности для этих данных, вертикальные линии относятся к циклам активности 1140 сут и 4220 сут (3.1 и 11.6 лет, соответственно). Светлая линия - пик, соответствующий сезонному (около 365 сут) периоду. Внизу - фазовая диаграмма для цикла в 4220 сут.

а также избыточное поглощение в линии Na . Они изучили поведение временных рядов параметров каждой линии во время трех транзитов и обнаружили, что спектральные детали, соответствующие избыточному поглощению, находятся в звездной системе отсчета. Таким образом, они пришли к предположению, что хромосфера HD 189733 является основным источником

избыточного транзитного поглощения и ответственна за его переменный характер.

На рис.4 приводится диаграмма зависимости параметра $\log R'_{HK}$ от показателя цвета ($B - V$). Черным кружком отмечены данные для HD 189733 ($\log R'_{HK} = (-4.55, -4.50)$), светлыми - данные каталога [13]. Горизонтальная линия соответствует значению параметра $\log R'_{HK}$ для Солнца в спокойном состоянии. Можно сделать вывод о том, что уровень хромосферной активности HD 189733 превосходит среднюю величину, характерную для других холодных карликов с аналогичными значениями показателя цвета ($B - V$) и выше солнечного: для Солнца - $\log R'_{HK} = -5.021$ [13].

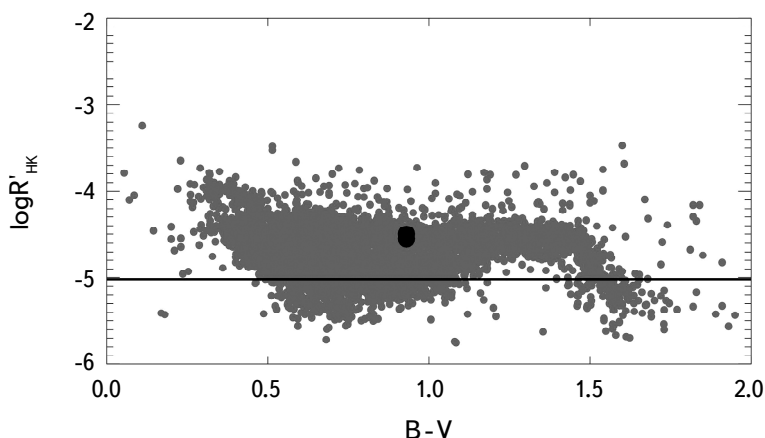


Рис.4. Диаграмма $\log R'_{HK}$ - показатель цвета ($B - V$). Темный символ - данные для HD 189733, светлые символы - данные каталога [13], горизонтальная линия соответствует значению параметра $\log R'_{HK}$ для Солнца в спокойном состоянии (см. текст).

5. Заключение. В статье представлены результаты анализа проявлений активности HD 189733, обладающей одной из наиболее хорошо изученных экзопланет типа горячий Юпитер. Активная природа звезды была отмечена в статьях многочисленных исследований. Ее учет существенно усложняет соответствующий анализ характеристик планеты. Так, например, анализ проявлений активности является необходимым для определения запятненности HD 189733, холодные пятна на поверхности которой вносят дополнительный вклад в соотношение между глубиной транзита и размером планеты и препятствуют точным определениям радиуса планеты.

Нами были проанализированы данные для HD 189733 из архива космической миссии TESS и сделаны заключения о величинах периода вращения звезды P_{rot} , которые по нашей оценке составили 12.5 и 11.3 сут для секторов 41 и 54, соответственно. Их сопоставление с выполненными ранее оценками

по результатам фотометрических наземных наблюдений позволяет предположить, что имеющиеся различия в приводимых в литературе определениях величины P_{rot} связаны с тем, что в разные моменты наблюдений доминирующими являлись пятна, расположенные на различных широтах на поверхности дифференциально вращающейся звезды (указания на дифференциальный характер вращения были получены по наблюдениям со спектрографом ESPRESSO).

По данным TESS, амплитуда переменности блеска HD 189733 составляет 1.6 и 0.9% от уровня среднего блеска звезды (для секторов 41 и 54, соответственно). По стандартной методике нами были оценены величины параметра запятненности звезды, которые достигают 2.0 и 1.2% от площади поверхности звезды и получены величины площади запятненной поверхности A звезды в абсолютной мере, которые составили 9200 м.д.п. и 5400 м.д.п. (для секторов 41 и 54, соответственно) и уже становятся сопоставимыми с данными о максимальной запятненности Солнца.

По 771 оценке блеска звезды в фильтре V , представленной в обзоре Kamogata Wide-field Survey, был проведен анализ проявлений долговременной активности HD 189733 и найдены указания на существование циклов активности продолжительностью в 1140 и 4220 сут (3.1 и 11.6 лет, соответственно).

По литературным данным сделан вывод о том, что уровень хромосферной активности HD 189733 превосходит среднюю величину, характерную для других холодных карликов с аналогичными значениями показателя цвета ($B - V$), и выше солнечной. Можно заключить, что HD 189733 обладает умеренной (или немного выше средней) активностью, характерной для аналогичных карликов спектрального класса K , но тем не менее, требующей при моделировании тщательного учета свойств и эволюции планеты, обращающейся вокруг этой звезды, вне зависимости от того, проводятся ли оценки по упрощенной методике (например, аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии) или по точному магнитогидродинамическому моделированию [14]. К числу возникающих при этом усложняющих обстоятельств, следует отнести тот факт, что активность звезды является переменной и требует оценок, выполняемых одновременно с основными исследованиями атмосферы экзопланеты.

Исследование выполнено в рамках проекта "Исследование звезд с экзопланетами" по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение N 075-15-2019-1875, 075-15-2022-1109).

ACTIVITY OF THE HOT JUPITER PLANET
HOSTING K2V DWARF HD 189733

I.S.SAVANOV

The results of the analysis of activity of the K dwarf HD 189733, which has one of the most well-studied exoplanets of the hot Jupiter type, are presented. Stellar activity significantly complicates the analysis of the characteristics of the planet (in particular, cool spots on the surface of the star add an additional signal to the ratio between the depth of transit and the size of the planet and prevent accurate determination of the radius of the planet). We analyzed photometric data for HD 189733 from the TESS mission archive and made conclusions about the values of the rotation period P_{rot} of the star which is about 12.5 and 11.3 days for sectors 41 and 54, respectively. The comparison with previously performed estimates based on the results of photometric ground-based observations suggests that the differences in the values of P_{rot} are due to the fact that during observations cool spots were located at different latitudes on the surface of a differentially rotating star. According to TESS data the amplitude of the brightness variability of HD 189733 is 1.6 and 0.9% of the average brightness level of the star (for sectors 41 and 54, respectively). According to the standard methodology we estimated the values of the star's spottedness parameter (2.0 and 1.2% of the surface area of the star) and obtained the values of the spotted surface area of the star in absolute measure (9200 MSH and 5400 MSH for sectors 41 and 54, respectively). According to 771 estimates of the brightness of the star in the V filter presented in the Kamogata Wide-field Survey the long-term activity of HD 189733 was analyzed and indications were found for the existence of possible activity cycles of 1140 and 4220 days (3.1 and 11.6 years). According to the literature data it is concluded that the level of chromospheric activity of HD 189733 exceeds the average values typical for other cool dwarfs with similar values of the color index ($B - V$) and is above the solar value. It is concluded that HD 189733 has a moderate (or slightly above average) activity characteristic of similar dwarfs of spectral class K, but nevertheless requiring consideration when modeling the properties and evolution of a planet orbiting this star regardless of whether estimates are carried out using a simplified methodology or accurate magnetohydrodynamic modeling. It should also be taken into account that the activity of a star is variable over time (on a time scale comparable to the value of P_{rot}) and requires estimates performed simultaneously with the main studies of the exoplanet's atmosphere.

Keywords: *stars: activity: spots: photometry: variability: planetary systems: exoplanet atmospheres*

ЛИТЕРАТУРА

1. *I.S.Savanov, V.I.Shematovich*, *Astrophys. Bull.*, **76**, 450, 2021.
2. *A.Leonardo Dos Santos et al.*, *Astron. J.*, **166**, 89, 2023.
3. *F.Pont et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **432**, 2917, 2013.
4. *E.Cristo, E.E.Borges, N.C.Santos et al.*, *Astron. Astrophys.*, **682**, A28, 2024.
5. *I.S.Narrett, B.V.Rackham, J. de Wit*, *Astron. J.*, **167**, 107, 2024.
6. *G.W.Henry, J.N.Winn*, *Astron. J.*, **135**, 68, 2008.
7. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, *Astron. Lett.*, **46**, 177, 2020.
8. *E.Cristo, E.E.Borges, N.C.Santos et al.*, *Astron. Astrophys.*, **682**, A28, 2024.
9. *Y.A.Nagovitsyn, A.A.Pevtsov*, *Astrophys. J.*, **906**, 27, 2021.
10. *H.W.Newton*, *Vistas in Astronomy*, **1**, 666, 1955.
11. *I.S.Savanov*, *Astrophysics*, **62**, 177, 2019.
12. *J.R.Barnes, C.A.Haswell, D.Staab et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **462**, 1012, 2016.
13. *S.B.Saikia, C.J.Marvin, S.V.Jeffers et al.*, *Astron. Astrophys.*, **616**, A108, 2018.
14. *E.S.Kalinicheva, V.I.Shematovich, I.S.Savanov*, *Astron. Rep.*, **66**, 1318, 2022.