

УДК 524.3-17+524.3-56

АКТИВНОСТЬ G-КАРЛИКА HD 284521 (K2-370) И АТМОСФЕРНЫЕ ПОТЕРИ ЕГО ЭКЗОПЛАНЕТЫ

© 2025 И. С. Саванов^{1*}¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 РоссияПоступила в редакцию 21 января 2025 года; после доработки 26 февраля 2025 года;
принята к публикации 27 февраля 2025 года

Представлены результаты анализа проявлений активности хромосферно-активного карлика солнечного типа HD 284521, обладающего планетой типа субнептун. По данным миссий Кеплер и TESS выполнены оценки периода вращения звезды ($P_{\text{rot}} = 13\text{--}14$ суток) и рассмотрена эволюция холодных пятен на ее поверхности. Получены оценки площадей этих пятен, которые составили по данным миссии Кеплер около 3.2% и по TESS-наблюдениям порядка 2.3, 1.2, 2.3 и 2.5% от площади ее поверхности. По данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) и данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey (ASAS) найдена величина цикла долговременной активности звезды, которая составила около 3800 суток (10.4 года). Длительность цикла сопоставима с величиной, характерной для Солнца, однако HD 284521 вращается примерно в два раза быстрее. Результаты анализа измерений индекса S , характеризующего хромосферную активность звезды, также указывают на наличие долгопериодической переменности. Полученные результаты изучения активности звезды были использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты HD 284521 b. Была применена аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. По 135 оценкам параметра S были выполнены расчеты потери вещества атмосферой HD 284521 b в течение интервала в 1886 дней (примерно пять лет). Величины потери вещества ($\lg M_{\text{loss}}$) атмосферы планеты HD 284521 b находятся в интервале от 9.8 до 10.3, медианное значение равно 10.2. Высокая величина потери вещества атмосферы этой планеты связана со значительным потоком XUV-фотонов, обусловленным высокой активностью звезды солнечного типа. Изучение планетной системы HD 284521 является продолжением серии наших исследований планетных систем, в которых центральной звездой является аналог Солнца.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — звезды: активность — звезды: маломассивные — экзопланеты — звезды: отдельные: HD 284521 (K2-370)*

1. ВВЕДЕНИЕ

Sozzetti et al. (2024) представили результаты исследования планеты типа субнептун K2-370 b, обращающейся с периодом 2.14 суток вокруг хромосферно-активного карлика солнечного типа HD 284521 с эффективной температурой 5662 ± 44 К. Анализ выполнен на основе обширного наблюдательного материала: фотометрических данных миссий TESS и CHEOPS, а также измерений лучевых скоростей со спектрографами HARPS-N и HARPS. Установлено, что планета имеет радиус $2.67 \pm 0.05 R_{\oplus}$, массу $11.1 \pm 1.4 M_{\oplus}$ и при равновесной температуре $T_{\text{eq}} = 1480$ К среди планет типа субнептун K2-370 b является второй по величине T_{eq} для объектов с высокоточным определением их массы. Орбита планеты скорее круговая, хотя Sozzetti et al. (2024) рассмотрели

вероятность того, что параметр $e = 0.31^{+0.04}_{-0.06}$, но отказались этого предположения. Из анализа возможных моделей образования и эволюции планеты в работе Sozzetti et al. (2024) был сделан вывод, что планета при ее плотности $3.2 \pm 0.4 \text{ г см}^{-3}$ либо сохраняет существенную (2% по массе) богатую водородом атмосферу, либо обладает высокой долей (40%) водяной массы.

В разделе 2 настоящей работы представлены результаты анализа проявлений активности HD 284521. В разделе 3 полученные результаты использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты HD 284521 b.

2. ВРАЩЕНИЕ И АКТИВНОСТЬ HD 284521

Основные данные о звезде HD 284521 (K2-370, EPIC 210797580, TIC 456945304) и ее планете приводятся в Sozzetti et al. (2024). Согласно

*E-mail: igs231@mail.ru

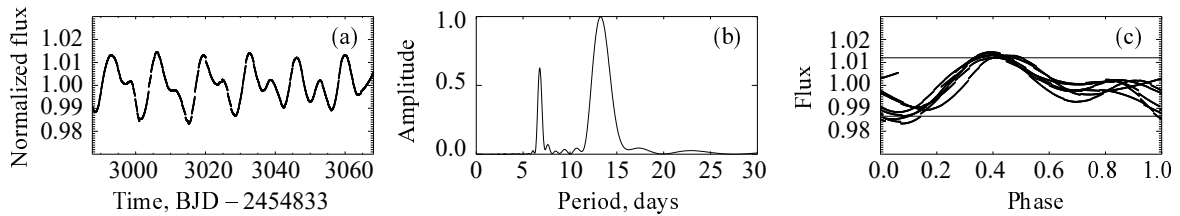


Рис. 1. Панель (a) — кривая блеска HD 284521, панель (b) — спектр мощности переменности блеска, панель (c) — фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в кампании 13.

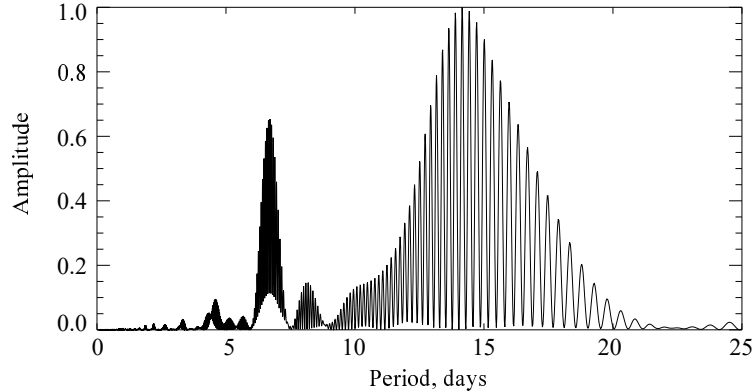


Рис. 2. Спектр мощности по объединенным данным всех секторов наблюдений HD 284521 из архива миссии TESS.

данным статьи, эффективная температура звезды равна $T_{\text{eff}} = 5662 \pm 44$ K, логарифм ускорения силы тяжести $\lg g = 4.48 \pm 0.08$, радиус $R/R_{\odot} = 0.945 \pm 0.08$, масса $M/M_{\odot} = 0.962 \pm 0.04$. Возраст, полученный по сопоставлению с изохронами, равен 4.9 ± 2.3 млрд лет, а по гирохронологической зависимости — 1.4 ± 0.4 млрд лет. Сравнительно быстрое вращение и наличие значительной хромосферной активности (см. ниже) скорее всего свидетельствуют в пользу второй оценки и указывают на то, что HD 284521 является достаточно молодым активным объектом (моложе и активнее Солнца). Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 144150720342734208 с параллаксом $\pi = 7.0955 \pm 0.0199$ mas.

Sozzetti et al. (2024) выполнили углубленный анализ кривых блеска из архивов миссий Кеплер и TESS. На спектре мощности, построенном авторами по объединенным данным этих миссий (см. рис. 5, Sozzetti et al., 2024), имеется доминирующий пик, соответствующий периоду в 13.45 суток.

HD 284521 (K2-370) наблюдался миссией K2 во время кампании 13 с 8 марта по 27 мая 2017 года. Наблюдение за объектом осуществлялось в режиме мониторинга со временем интегрирования 29.4 мин (3605 наблюдений за 79.6 суток).

На построенном нами спектре мощности имеется доминирующий пик, соответствующий периоду

вращения $P_{\text{rot}} = 13^{\text{d}}3 \pm 1^{\text{d}}5$ (погрешность величины определена по полуширине пика). Форма фазовой кривой блеска (см. рис. 1) меняется. Вероятно, в рассматриваемом интервале наблюдений на поверхности звезды существовали две активные области, обе претерпевали эволюционные изменения: более значительная область ослабевала, менее — усиливалась.

Анализ фотометрических данных был проведен с помощью модифицированной программы *activity* (Savanov, 2018), при этом площадь поверхности звезды, занимаемая пятнами, оценивалась по упрощенной методике. По нашей оценке, площадь пятен на поверхности звезды составила примерно 3.2% от площади ее поверхности, что при радиусе звезды $R/R_{\odot} = 0.945$ составляет около 24 000 миллионов долей солнечной полусферы (м.д.п.).

В архиве миссии TESS содержатся результаты наблюдений HD 284521 в четырех секторах, они подробно рассмотрены Sozzetti et al. (2024) (данные не являются непрерывными). Как правило, поиск периодичности (сопоставимой с продолжительностью наблюдений в секторе) при малой амплитуде переменности блеска, отсутствии непрерывности ряда, трудности снятия долговременных инструментальных трендов и прочих факторах не позволяет говорить о достоверных высокоточных оценках величины P_{rot} .

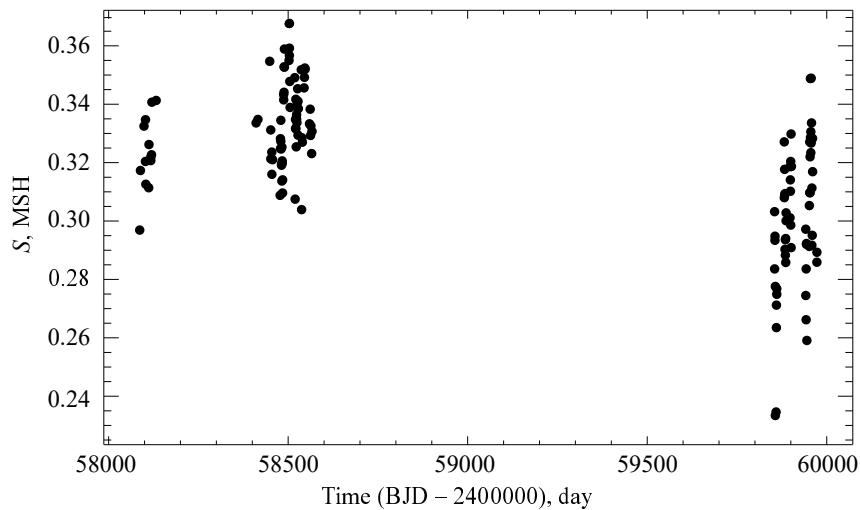


Рис. 3. Изменения индекса хромосферной активности S со временем.

На спектре мощности по объединенным данным всех секторов наблюдений (рис. 2) имеется набор расщепленных пиков, среди них доминируют пики, соответствующие интервалу P_{rot} от 13.9 до 14.4 суток, с максимальным значением при $P_{\text{rot}} = 14.1$. Различия в найденных нами по данным миссий Кеплер и TESS величинах P_{rot} не превышают пределы ошибок измерений, однако следует отметить, что эти различия могут быть обусловлены эволюцией пятен (холодных областей), прежде всего изменением их широты на поверхности звезды, обладающей дифференциальным вращением. Как и в случае анализа данных из архива миссии Кеплер, мы нашли, что площадь пятен на поверхности звезды составила порядка 2.3, 1.2, 2.3 и 2.5% от площади ее поверхности, что равно 19 000, 9900, 19 000 и 20 800 м.д.п. для секторов 43, 44, 70 и 71 соответственно. Можно заключить, что в течение интервала наблюдений пятенная активность звезды вначале убывала, а затем стала возрастать. Момент минимума активности не был зарегистрирован, он, вероятно, произошел в период между временами наблюдений в секторах 44 и 70.

Sozzetti et al. (2024) сделали вывод о том, что уровень хромосферной активности HD 284521 превосходит величины, характерные для других звезд солнечного типа с аналогичными величинами показателя цвета ($B - V$). Кроме того, этот уровень выше солнечного: средняя величина параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ для HD 284521 равна -4.49 ± 0.03 (для Солнца $\lg R'_{\text{HK}} = -5.021$, см. Вого Saikia et al., 2018).

Наше внимание привлекли данные об измерениях параметра хромосферной активности S , выполненные Sozzetti et al. (2024). Всего было опубликовано 135 величин параметра, которые, несомненно, указывают на наличие переменности (рис. 3).

Вероятно, характерное время цикла превосходит длительность интервала наблюдений (2000 суток).

По данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS)¹ мы проанализировали проявления активности HD 284521. В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтре V , которые проводились в течение длительного интервала времени 5134 суток (11.1 лет) (HJD 2455535–2460669). Всего было рассмотрено 1022 оценки блеска звезды в фильтре V . Представленные на рис. 4а данные несомненно указывают на присутствие долговременной переменности в изменении блеска объекта, сопоставимой с длительностью интервала наблюдений. На основе построенного спектра мощности для блеска HD 284521 можно предположить существование возможного цикла активности порядка 3800 суток (10.4 года) (см. рис. 4б). На рис. 4 вертикальная светлая линия указывает на периодичность годичного характера, темная вертикальная линия — на цикл продолжительностью 3800 сут. Длительность цикла сопоставима с величиной, характерной для Солнца, однако отметим, что HD 284521 вращается примерно в два раза быстрее.

Независимая оценка возможных величин P_{cycl} для HD 284521 была проведена по данным из архива наблюдений обзора ASAS. Всего рассмотрено 826 оценок блеска звезды в фильтре V . Представленные на рис. 5а данные свидетельствуют о возможном присутствии цикличности в изменении блеска звезды. Не исключено, что длительность этого цикла (широкий пик) составляет более 3000 суток и превосходит длительность интервала наблюдений.

¹<http://kws.cetus-net.org>

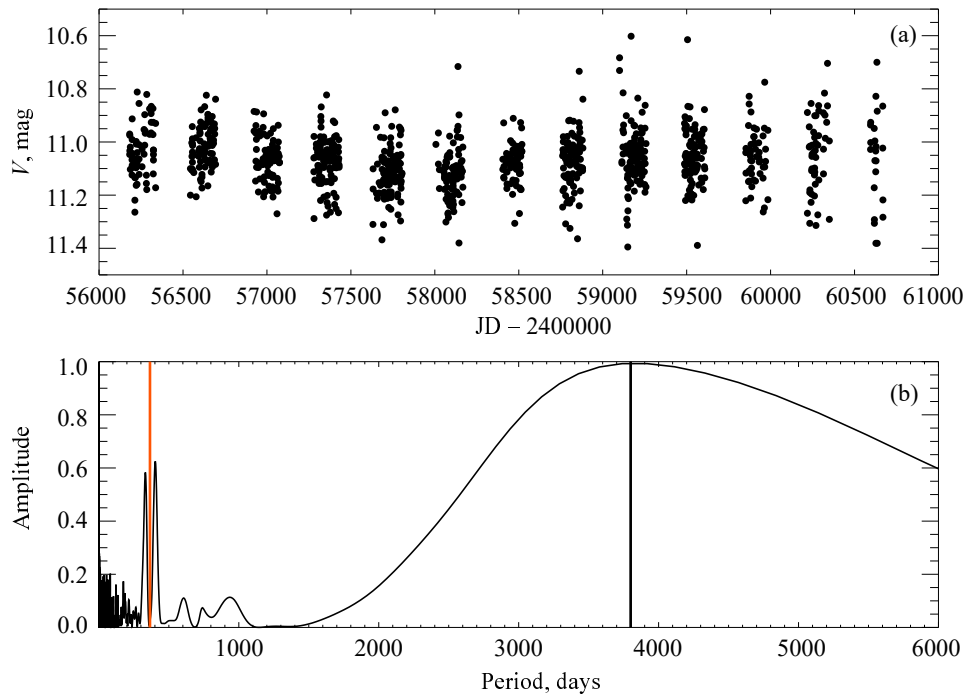


Рис. 4. Панель (a) — блеск HD 284521 в фильтре V по данным обзора KWS; панель (b) — спектр мощности для интервала 1–6000 суток. Вертикальная светлая линия указывает на периодичность годового характера, темная вертикальная линия — на цикл продолжительностью 3800 сут.

Таким образом, можно заключить, что результаты анализа переменности блеска звезды и измерений индекса S , характеризующего ее хромосферную активность (несмотря на их сравнительную немногочисленность), указывают на наличие их долгопериодической переменности.

3. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТЫ HD 284521 b

Основные данные о планете HD 284521 b приведены в Таблице 2 (см. Sozzetti et al., 2024). Эти данные и сведения о родительской звезде и ее активности были использованы нами при оценке величины оттока вещества из атмосферы планеты.

Для подсчета потери вещества атмосферой планеты M_{loss} (без детального моделирования процессов в системе «звезда–планета») нами была применена аппроксимационная формула (см., например, Erkaev et al., 2007; Koskinen et al., 2022), часто рассматриваемая как модель потери атмосферы с ограничением по энергии. В ней предполагается, что поток жесткого УФ-излучения поглощается в тонком слое радиуса R_{XUV} с оптической толщиной для звездных XUV-фотонов, равной единице, а также включен учет приливного эффекта. Подробности использования данной формулы можно найти во многих литературных источниках, в том числе в двух указанных выше, а также в Kalinicheva et al. (2022) и Savanov and Shematovich (2021).

Для оценки величины потока XUV-фотонов (F_{XUV}) нами были использованы аналитические зависимости, полученные в Sreejith et al. (2020) и связывающие величины F_{XUV} и параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ для звезд спектральных классов от F до M. Как указывалось выше, HD 284521 является активной, умеренно быстровращающейся звездой с возрастом, скорее всего, менее 2–3 млрд лет. Однако следует иметь в виду, что в настоящее время у нас нет точных сведений о полной циклической переменности хромосферной активности звезды. Это может приводить к различиям в оценках величин $\lg R'_{\text{HK}}$. В связи с этим мы использовали все имеющиеся оценки параметра S (и вычисленные по ним значения величин $\lg R'_{\text{HK}}$) для установления возможных изменений параметра M_{loss} в ходе цикла активности. Перевод величин параметра S (см. Таблицы A1 и A2 Приложения к статье Sozzetti et al., 2024) в индексы $\lg R'_{\text{HK}}$ был осуществлен по общепринятым методикам (см. подробности процедуры и обсуждение в работе Borgo Saikia et al., 2018).

На рис. 6а представлен график изменений величин потери вещества атмосферы планеты b со временем. Поскольку в наших расчетах варьировались оценки величины F_{XUV} , то вполне естественно, что по характеру циклического изменения величины M_{loss} повторяют зависимость индекса хромосферной активности. Справа на рисун-

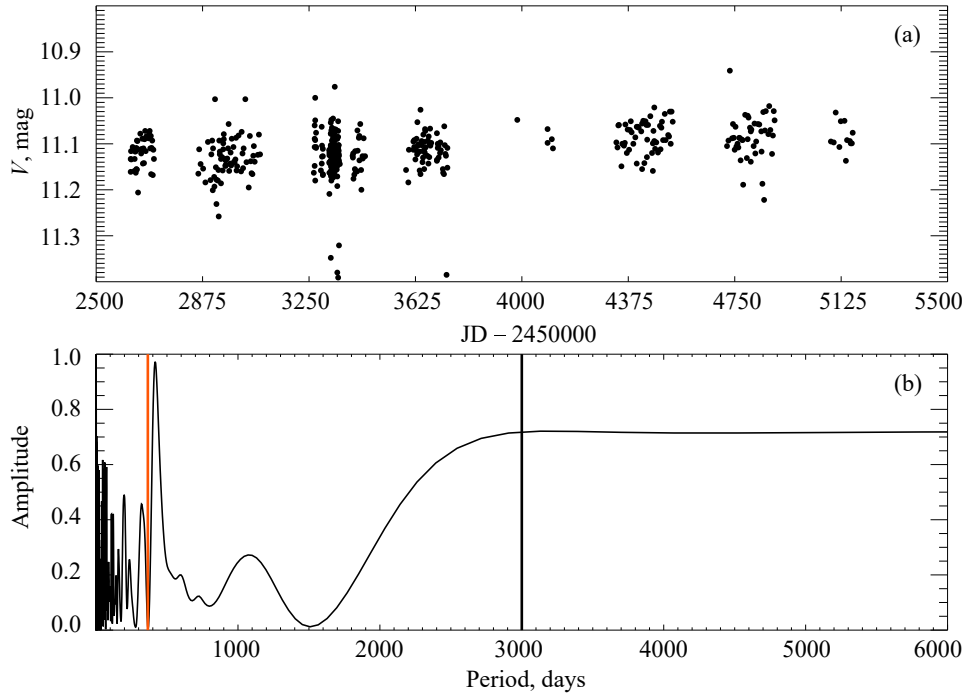


Рис. 5. Панель (a) — блеск HD 284521 в фильтре V по данным обзора All Sky Automated Survey. Панель (b) — спектр мощности для диапазонов периодов 1–6000 сут. Вертикальная светлая линия указывает на периодичность годовичного характера, темная вертикальная линия — на цикл продолжительностью 3000 суток.

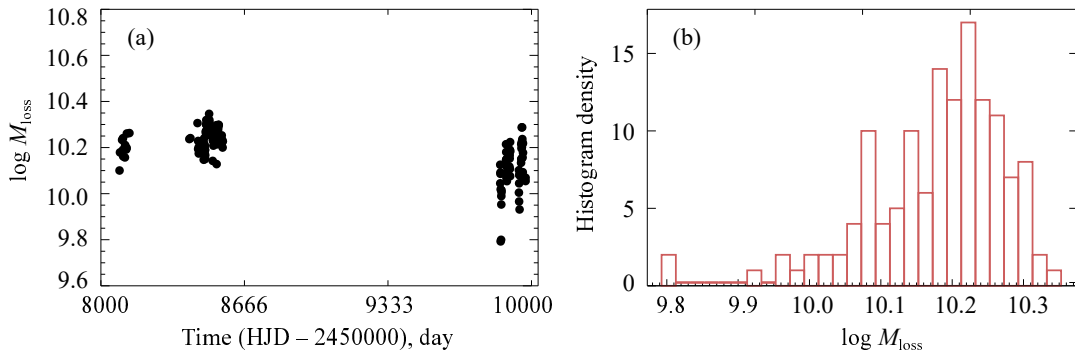


Рис. 6. Панель (a) — потеря вещества атмосферы планеты HD 284521 b со временем; панель (b) — гистограмма для оценок потери вещества атмосферы планеты HD 284521 b.

ке представлена гистограмма для оценок потери вещества атмосферы. Величины оттока вещества из атмосферы планеты HD 284521 b в основном лежат в интервале $\lg M_{\text{loss}}$ от 9.8 до 10.3, медианное значение равно 10.20. Высокая величина потери вещества атмосферы этой планеты (см., например, данные Foster et al., 2022), вероятнее всего, связана со значительной величиной потока XUV-фотонов, обусловленной высокой активностью звезды солнечного типа. Даже при условии использования аппроксимационной формулы, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии, можно получить ответ на вопрос об изменениях

величин M_{loss} в случае вариации уровня долговременной активности звезды.

В исследовании Sozzetti et al. (2024) для рассматриваемой экзопланеты приводится оценка величины M_{loss} , составляющая $(3.5 \pm 1.0) \times 10^{10} \text{ г с}^{-1}$. Эта величина примерно в два раза выше, чем полученная нами оценка. Различие может быть обусловлено тем, что авторами Sozzetti et al. (2024) применялась аппроксимационная модель Kubyshkina et al. (2018), а не модель потери атмосферы с ограничением по энергии, но, вероятно, в большей степени тем, что ими было использовано завышенное значение величины

потока XUV-фотонов, соответствующее более молодой звезде с возрастом 1.4 ± 0.4 млрд лет.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части статьи представлены результаты анализа проявлений активности хромосферно-активного карлика солнечного типа HD 284521.

По данным миссий Кеплер и TESS нами выполнены оценки периода вращения звезды (P_{rot} составляет величину 13–14 суток) и высказано предположение о возможной эволюции пятен (холодных областей) на ее поверхности. Были получены оценки площадей холодных пятен на поверхности HD 284521, которые составили около 24 000 м.д.п. по данным миссии Кеплер и порядка 19 000, 9900, 19 000 и 20 800 м.д.п. для наблюдений миссии TESS.

По результатам многолетнего обзора KWS и данным из архива наблюдений обзора ASAS нами был выполнен анализ проявлений активности HD 284521. Цикл долговременной активности звезды составляет величину порядка 3800 суток (10.4 лет). Длительность цикла сопоставима с характерной для Солнца величиной, но вращается HD 284521 примерно в два раза быстрее. Результаты анализа переменности блеска объекта и измерений индекса S , характеризующего хромосферную активность звезды, указывают на наличие долгопериодической переменности.

Во второй части работы полученные результаты изучения активности звезды использованы для оценки потери вещества атмосферой планеты HD 284521 b. Была применена аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Оценки величины потока XUV-фотонов установлены по аналитической зависимости, связывающей F_{XUV} и параметр $\lg R'_{\text{HK}}$ для звезд спектральных классов F–M. По 135 оценкам S -параметра мы сделали расчеты потери вещества атмосферой HD 284521 b в течение 1886 дней (примерно пяти лет). Для планеты HD 284521 b численное значение попадает в интервал $\lg M_{\text{loss}} = 9.8\text{--}10.3$, медианное значение равно 10.2. Существенная величина потери вещества атмосферой этой планеты обусловлена значительным XUV-поток, исходящим от активной звезды солнечного типа.

Изучение планетной системы HD 284521 является продолжением серии наших исследований планетных систем, в которых центральной звездой является объект, похожий на Солнце. К настоящему времени эта серия содержит порядка десяти публикаций; обзорная работа готовится к печати. Приведем основные выводы из трех статей, вышедших в последние годы.

Рассмотрены свойства планетной системы TOI-784, в которой землеподобная планета обращается около малоактивной звезды солнечного типа (Savonov, 2024). Возраст системы, согласно эмпирическим гирохронологическим соотношениям, равен 7.8 ± 3.4 млрд лет. Оценка величины периода вращения звезды составляет $P_{\text{rot}}/\sin i = 41^{\text{d}}7 \pm 11^{\text{d}}4$. Радиус планеты TOI-784 b равен $1.93 R_{\oplus}$, масса — $9.67 M_{\oplus}$, ее средняя плотность — 7.4 г см^{-3} (планета является каменной). Оценка потери вещества атмосферой планеты TOI-784 b была получена по аппроксимационной формуле, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии; потеря вещества атмосферы планеты составляет $4.7 \times 10^8 \text{ г с}^{-1}$. Сравнительно низкая величина потери вещества атмосферой планеты, несмотря на высокую эффективную температуру атмосферы звезды и близость планеты к звезде, возможно, связана с низким уровнем активности звезды.

Представлены результаты анализа проявлений активности молодого аналога Солнца, звезды HD 109833, и выполнены оценки потери вещества атмосфер двух ее планет (Savonov, 2023a). Вероятно, HD 109833 принадлежит ассоциации Lower Centaurus Crux (LCC) с возрастом 27 ± 3 млн лет, однако не исключено, что звезда лишь пространственно связана с ассоциацией и может быть старше, хотя в любом случае ее возраст не превосходит 100–200 млн лет. По данным архива TESS для HD 109833 установлена величина периода вращения звезды ($P = 5^{\text{d}}08 \pm 0^{\text{d}}30$), амплитуда переменности блеска (около 0.6% от уровня среднего блеска звезды). Оценены площади пятен на ее поверхности, которые превосходят максимальную площадь пятен на Солнце и составляют величины 15 200–17 700 м.д.п., и установлен цикл активности звезды длительностью порядка 1950 дней (5.3 года).

Обе планеты в системе звезды HD 109833 — HD 109833 b и c — характеризуются как субнептуны с радиусами $2.9 R_{\oplus}$ и $2.6 R_{\oplus}$, с периодами 9.2 и 13.9 суток соответственно. Найдены величины потери вещества атмосферами планет. Обе рассматриваемые нами экзопланеты попадают в область на диаграмме « $M-R$ », в которой популяции каменных и богатых летучими веществами экзопланет перекрываются и не дают возможности провести однозначную оценку их масс. Расчеты были выполнены для двух случаев — каменных экзопланет и экзопланет, богатых летучими веществами. Массы экзопланет HD 109833 b и c составили соответственно $34.9 M_{\oplus}$ и $24 M_{\oplus}$ для каменных экзопланет и $9.3 M_{\oplus}$ и $7.8 M_{\oplus}$ для экзопланет, богатых летучими веществами. Диапазоны изменений параметра $\dot{M}$ для HD 109833 b и c лежат

в интервалах от 9.60×10^7 до $1.38 \times 10^{10} \text{ гс}^{-1}$ и от 4.56×10^7 до $5.28 \times 10^9 \text{ гс}^{-1}$ соответственно. Найденные высокие значения темпа оттока вещества могут являться следствием достаточно высокого уровня потока XUV-фотонов от звезды солнечного типа (аналога молодого активного Солнца), а также достаточно близкого расположения планет от родительской звезды.

В статье Savanov (2023b) на основе данных миссии TESS нами было проведено исследование фотометрической переменности блеска TOI 837 — молодой звезды класса F–G с экзопланетой — члена южного скопления IC 2602. Исходя из принадлежности к скоплению IC 2602, возраст звезды и планеты оценивается равным 35 млн лет. Найдено, что планета имеет орбитальный период 8.3 суток и размеры немного меньше Юпитера (радиус планеты составляет 0.77 радиусов Юпитера), а величина $M_p \sin i$ менее чем 1.20 массы Юпитера. Площадь холодных пятен на поверхности TOI 837 составляет от 21 600 до 37 700 м.д.п. и существенно превосходит площадь пятен на Солнце. Оценки получены при значениях эффективной температуры звезды 6047 К и радиуса $1.022 R_\odot$. Исследованы проявления вспышечной активности TOI 837 за интервал наблюдений в четырех секторах с космической миссией TESS и рассмотрены две наиболее достоверные зарегистрированные вспышки. Энергии вспышек составляют 1.2×10^{35} и 2.1×10^{35} эрг, а вероятная величина массы сопутствующего явления коронального выброса массы может достигать $10^{21.4}$ г. Наиболее вероятная величина цикла активности TOI 837 составляет 1500 суток (4.1 года).

Случай системы HD 284521 интересен тем, что, как уже указывалось в разделе 1, состав экзопланеты можно было бы характеризовать как соответствующий почти стопроцентному водному миру без богатой H_2 атмосферы или массивной каменной планете, окруженной оболочкой, в которой преобладает H_2 и масса которой составляет около 2% массы планеты. Масса и радиус планеты также соответствуют определению планеты с облучаемым океаном, со значительной массовой долей воды (около 40%) в состоянии сверхкритического пара и, следовательно, с атмосферой, в которой преобладает H_2O . Дальнейшие исследования позволяют сделать более определенные заключения о природе этой интересной экзопланеты и сделать выбор в пользу одного из перечисленных вариантов ее строения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Boro Saikia, C. J. Marvin, S. V. Jeffers, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A108 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201629518
2. N. V. Erkaev, Y. N. Kulikov, H. Lammer, et al., *Astron. and Astrophys.* **472** (1), 329 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20066929
3. G. Foster, K. Poppenhaeger, N. Ilic, and A. Schwöpe, *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A23 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202141097
4. E. S. Kalinicheva, V. I. Shematovich, and I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **66** (12), 1318 (2022). DOI:10.1134/S1063772922110087
5. T. T. Koskinen, P. Lavvas, C. Huang, et al., *Astrophys. J.* **929** (1), id. 52 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac4f45
6. D. Kubyshkina, L. Fossati, N. V. Erkaev, et al., *Astrophys. J.* **866** (2), article id. L18 (2018). DOI:10.3847/2041-8213/aac586
7. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **62** (11), 814 (2018). DOI:10.1134/S1063772918110057
8. I. S. Savanov, *Astronomy Letters* **49** (9), 516 (2023a). DOI:10.1134/S1063773723090049
9. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **67** (7), 719 (2023b). DOI:10.1134/S1063772923070089
10. I. S. Savanov, *Astrophysics* **67** (1), 48 (2024). DOI:10.1007/s10511-024-09815-4
11. I. S. Savanov and V. I. Shematovich, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 450 (2021). DOI:10.1134/S199034132104012X
12. A. Sozzetti, M. Damasso, J. Fernández Fernández, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **535** (1), 531 (2024). DOI:10.1093/mnras/stae2323
13. A. G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, et al., *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A67 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202039167

Activity of G Dwarf HD 284521 (K2-370) and Atmospheric Losses of Its Exoplanet**I. S. Savanov¹**¹Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

An analysis of the activity evidence of the chromospherically active solar-type dwarf HD 284521, which has a sub-Neptune-type planet, is presented. Based on the data from the Kepler and TESS missions, the stellar rotation period was estimated ($P_{\text{rot}} = 13\text{--}14$ days) and the evolution of cold spots on its surface was examined. Estimates of the areas of these spots were obtained, which, according to the data from the Kepler mission, equaled about 3.2% and, according to TESS observations, about 2.3, 1.2, 2.3, and 2.5% of its surface area. Based on the data from the long-term Kamogata Wide-field Survey (KWS) and data from the All Sky Automated Survey (ASAS) observation archive, the value of the star's long-term activity cycle was found to be about 3800 days (10.4 yrs). The cycle length is comparable to that of the Sun, but HD 284521 rotates about twice as fast as the Sun. An analysis of measurements of the S index characterizing the chromospheric activity of the star also indicates the presence of a long-period variability. The results obtained from studying the stellar activity were used to estimate the loss of atmospheric matter from the planet HD 284521 b. An approximation formula corresponding to the energy-constrained atmospheric loss model was applied. Based on 135 estimates of the S parameter, the matter loss from the atmosphere of HD 284521 b over an interval of 1886 days (approximately five years) was calculated. The matter losses ($\log M_{\text{loss}}$) of the atmosphere of the planet HD 284521 b are in the range of 9.8 to 10.3 with a median value of 10.2. The high amount of matter loss from the atmosphere of this planet is due to a significant flux of XUV photons caused by the high activity of the solar-type star. The study of the planetary system HD 284521 continues our series of studies of planetary systems, in which the central star is an analog of the Sun.

Keywords: *methods: data analysis—stars: activity—stars: low-mass—exoplanets—stars: individual HD 284521 (K2-370)*