

АКТИВНОСТЬ МОЛОДОГО АНАЛОГА СОЛНЦА ЗВЕЗДЫ HD 109833 И ОЦЕНКИ ПОТЕРИ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕР ДВУХ ЕЕ ПЛАНЕТ

© 2023 г. И. С. Саванов^{1*}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.07.2023 г.

После доработки 14.09.2023 г.; принята к публикации 14.09.2023 г.

Представлены результаты анализа проявлений активности молодого аналога Солнца звезды HD 109833 и выполнены оценки потери вещества атмосфер двух ее планет. Вероятно, HD 109833 принадлежит ассоциации Lower Centaurus Crux (LCC) с возрастом 27 ± 3 млн лет, но 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 $P = 5.08 \pm 0.30$ сут, амплитуда переменности блеска (около 0.6% от уровня среднего блеска звезды) и оценены площади пятен на ее поверхности, которые превосходят максимальную площадь пятен на Солнце и составляют величины 15 200–17 700 м.д.п. По данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey установлен цикл активности звезды длительностью около 1950 сут (5.3 года). Обе планеты в системе звезды HD 109833 характеризуются как суб-нептуны с радиусами 2.9 и 2.6 R_{\oplus} , с периодами 9.2 и 13.9 сут. По аппроксимационной формуле, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии, найдены величины потери вещества атмосферами планет. Для оценки потока XUV -фотонов применялись аналитические зависимости, связывающие величины потока и параметр $\log R'_{HK}$, и сведения о распределении этих величин для звезд спектрального класса G, согласно которым имеются два хорошо выраженных пика с максимумами для величин порядка -5.0 dex у малоактивных звезд и -4.5 dex — у активных. Кроме того, было использовано соотношение, связывающее поток от звезды в рентгеновском диапазоне с величиной $\log F_{XUV}$. Найденная величина сопоставима с оценкой, полученной при применении параметра $\log R'_{HK}$ для активных звезд и превосходит ее в 4 раза. Обе рассматриваемые нами экзопланеты HD 109833 b и c 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 и 24 M_{\oplus} для каменных экзопланет и 9.3 и 7.8 M_{\oplus} для экзопланет, богатых летучими веществами. Представлены результаты расчетов величин потери вещества атмосфер планетами HD 109833 b и c при изменении параметров, связанных с оценками масс планет и падающего на планеты потока УФ-излучения. Диапазоны изменений параметра \dot{M} для HD 109833 b и c лежат в интервалах от 9.60×10^7 до 1.38×10^{10} г/с и от 4.56×10^7 до 5.28×10^9 г/с 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.

Ключевые слова: активность молодого аналога Солнца, звезды HD 109833.

DOI: 10.31857/S0320010823090048, EDN: OHKBNF

ВВЕДЕНИЕ

Вуд и др. (2023) установили характеристики открытой ими близлежащей (около 85 пк) популяции звезд Lower Centaurus Crux (LCC) с возрастом порядка 27 ± 3 млн лет, первоначально идентифицированной при поиске звезд, сопутствующих

по пространственной скорости транзитной системе TESS TIC 360630575 (HD 109833; TOI 1097). Авторы установили члены ассоциации, используя данные о кинематике из архива Gaia, информацию о показателях цвета и периодах вращения кандидатов. Оценки возраста объектов подтверждались сопоставлениями с изохронами, данными гирохронологии, определениями содержания лития Li. Хо-

*Электронный адрес: igs231@mail.ru

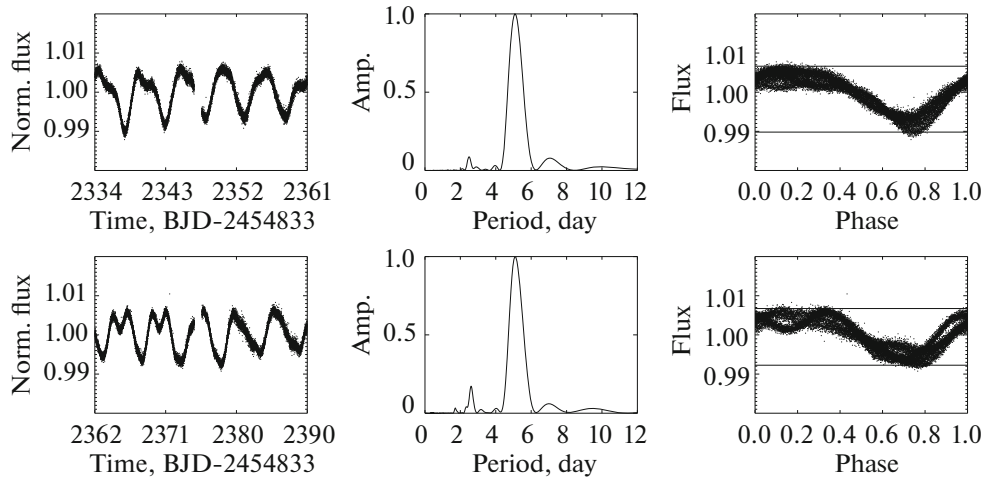


Рис. 1. Слева — кривые блеска для HD 109833, в центре — спектры мощности переменности блеска, справа — фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 38 и 39.

тя ассоциация находится вблизи других известных популяций LCC, было обнаружено, что она старше любой ранее найденной подгруппы LCC (10–16 млн лет) и отличается как по положению, так и по скорости. Вуд и др. (2023) идентифицировали вторую планету-кандидата по наличию транзитов на кривой блеска звезды. HD 109833 b и c войдут в небольшую, но растущую выборку экзопланет с возрастом менее 100 млн лет. HD 109833 имеет период вращения и содержание Li, указывающие на молодой возраст (около 100 млн лет), но после детального сопоставления с характеристиками других объектов Вуд и др. (2023) не отвергают возможность того, что HD 109833 является молодой звездой поля, случайно расположенной поблизости от популяции LCC.

В первой части настоящей работы представлены результаты анализа проявлений активности HD 109833. Во второй — полученные результаты использованы для оценки потери вещества атмосферы планет HD 109833 b и c.

ПРОЯВЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ HD 109833

Выполненный Вуд и др. (2023) анализ позволил уточнить основные параметры (масса, радиус, светимость и пр.) HD 109833 и охарактеризовать свойства планет HD 109833 b и c. Внутренняя планета, HD 109833 b, обращается по орбите с периодом 9.2 сут. По оценке Вуд и др. (2023) радиус планеты $R_b = 2.9 R_{\oplus}$. Кандидат на внешнюю планету, HD 109833 c, имеет орбитальный период 13.9 сут, радиус $2.6 R_{\oplus}$. Расстояния от звезды до планет составляют 19.9 и $29.4 R_{\odot}$.

Интересно, что обе планеты имеют радиусы, присущие более старым объектам, в то время как

большинство молодых (менее 100 млн лет) транзитных планет ближе по свойствам к объектам пустыни суб-сатурнов (sub-Saturn desert), которые имеют радиусы $4\text{--}10 R_{\oplus}$.

Согласно Вуд и др. (2023), эффективная температура звезды равна 5881 ± 50 K, логарифм ускорения силы тяжести $\log g = 4.45 \pm 0.10$, радиус $R/R_{\odot} = 1.00 \pm 0.04$, светимость $L/L_{\odot} = 1.18 \pm 0.08$ и масса $M/M_{\odot} = 1.08 \pm 0.05$. По данным Вуд и др. (2023, табл. 3) возраст HD 109833 равен 27 ± 3 млн лет, при этом не исключено, что звезда может быть старше, но в любом случае с возрастом, не превосходящим 100–200 млн лет. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 5838450865699668736, его параллакс составляет $\pi(mas) = 12.5686 \pm 0.0118$.

Для HD 109833 в архиве TESS имеются данные двух сетов наблюдений (сектора 38 и 39). Наша обработка была аналогична проводимой ранее в случае измерений для других объектов из архива космического телескопа Кеплер и из архива наблюдений миссии TESS (см., например, Саванов, 2021). На рис. 1 представлены кривые блеска HD 109833, соответствующие спектры мощности и фазовые диаграммы. Хорошо заметна периодическая модуляция блеска, обладающая заметной переменностью амплитуды. К концу 39 сета наблюдений звезда несколько уменьшила свою активность. На шкале времени порядка длительности периода вращения (5 сут, см. ниже), форма фазовой кривой и глубина минимумов претерпевали изменения.

На построенном нами спектре мощности переменности блеска звезды по объединенным данным двух последовательных секторов наблюдений

(37 830 точек) имеется характерный пик, соответствующий величине периода вращения звезды $P = 5.08 \pm 0.30$ сут (погрешность оценена по полуширине пика, пик широкий). Вуд и др. (2023) приводят совпадающую с полученной нами величину периода вращения HD 109833 — 5.111 ± 0.51 сут.

Амплитуда переменности блеска составляет около 0.6% от уровня среднего блеска звезды. По стандартной методике (Саванов, 2021) нами были оценены величины параметра запятненности HD 109833, которые достигают 1.8–2.1% от площади поверхности звезды. Принимая оценку радиуса звезды $R = 1.00 \pm 0.04$ радиусов Солнца из Вуд и др. (2023), можно получить величину A площади запятненной поверхности 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. Наговицын, Певцов, 2021). Площадь пятен на поверхности HD 109833 многократно превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и составляет величину порядка 15 200–17 700 м.д.п.

Оценка возможных долговременных циклов активности HD 109833 была проведена по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey (www.astrouw.edu.pl/asas). Всего было рассмотрено 1295 оценок блеска звезды в фильтре V . Представленные на рис. 2 (вверху) данные свидетельствуют о возможном присутствии цикличности в изменении блеска звезды. На основе построенного спектра мощности для HD 109833 можно предположить существование цикла активности величиной около 1950 сут (5.3 года) (рис. 2, нижняя диаграмма).

ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕР HD 109833 b и c

Обе планеты звезды HD 109833 характеризуются в Вуд и др. (2023) как суб-нептуны с радиусами $2.9 R_{\oplus}$ и $2.6 R_{\oplus}$, с периодами 9.2 и 13.9 сут, которые вероятно свидетельствуют о возможном резонансе 3 : 2 в системе.

Несмотря на то что за последние 5 лет наблюдаемая выборка молодых планет резко возросла (см., например, Ньютон и др., 2023), по-прежнему, число планет моложе 200 млн лет еще не достаточно велико, кроме того, известно мало мультипланетных систем такого возраста. Интересно, что обе планеты HD 109833 b и c имеют радиусы, сравнимые с более старыми планетами, в то время как большинство молодых (менее 100 млн лет) транзитных планет на диаграммах радиус–период лежат в пустыне суб-сатурнов ($4\text{--}10 R_{\oplus}$). Даже если мы примем, что звезда старше и имеет возраст

100–200 млн лет, все равно большинство планет этого возраста все еще имеют большие радиусы (раздуты) по сравнению со своими более старыми аналогами (Ньютон и др., 2023). Возможно, небольшие размеры планет HD 109833 b и c могут быть вызваны более интенсивным фотоиспарением их атмосфер под воздействием высокоэнергетического излучения звезды.

Для подсчета потери вещества атмосферами планет (без детального моделирования процессов в системе звезда–планета) нами была использована аппроксимационная формула (см., например, Коскинен и др., 2022; Еркаев и др., 2007), часто называемая в литературе как модель потери атмосферы с ограничением по энергии. В этой модели предполагается, что поток жесткого УФ-излучения поглощается в тонком слое радиуса R_{XUV} , где оптическая толщина для звездных XUV -фотонов равна единице, а также включен учет приливного эффекта:

$$\dot{M} = \frac{\epsilon_{XUV} \pi F_{XUV} R_p R_{XUV}^2}{GM_p K_{\text{tide}}(\xi)}, \quad (1)$$

где ϵ_{XUV} — параметр эффективности нагрева ($\epsilon_{XUV} = 0.2 \pm 0.1$ для мини-нептунов и суперземель); G — гравитационная постоянная; F_{XUV} — поток XUV -фотонов; R_p — радиус планеты; M_p — масса планеты; R_{XUV} — радиус поглощения XUV -фотонов; $K_{\text{tide}}(\xi)$ — приливный параметр. Подробности использования соотношения (1) можно найти во многих литературных источниках, в том числе в Коскинен и др. (2022), Еркаев и др. (2007), Калининцева и др. (2022) и Саванов, Шематович (2021).

На основе данных об экзопланетах, основанных на надежных и максимально точных измерениях масс и радиусов транзитных планет с массой до $120 M_{\oplus}$, Отеги и др. (2020) построили диаграмму масса–радиус ($M - R$) и установили, что на ней присутствуют две различные популяции, соответствующие каменистым и богатым летучими веществами экзопланетам, которые перекрываются как по массам, так и по радиусам. Популяция скалистых экзопланет демонстрирует относительно небольшие изменения плотности и по массе не превосходит $25 M_{\oplus}$, что, возможно, указывает на максимальную массу ядра, которое может быть сформировано. Линия, соответствующая составу H_2O , разделяет две популяции. Отеги и др. (2020) представили два новых эмпирических соотношения $M - R$, основанных на рассмотренных ими популяциях. Особый интерес представляет область перехода от каменистых экзопланет к экзопланетам, богатым летучими веществами, которая соответствует диапазону масс $5\text{--}25 M_{\oplus}$ и диапазону радиусов $2\text{--}3 R_{\oplus}$. Отметим, что обе рассматриваемые

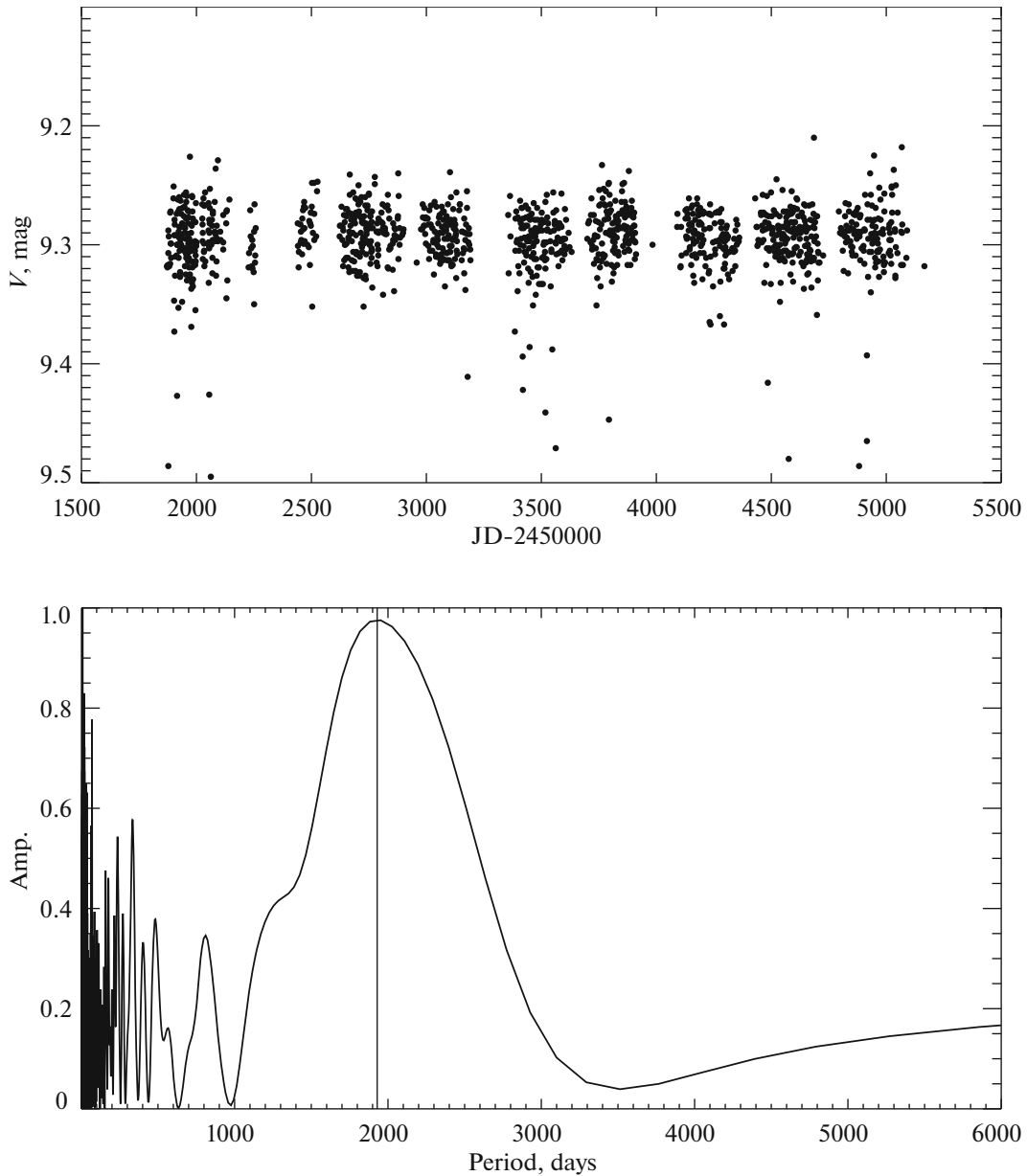


Рис. 2. Вверху — кривая блеска HD 109833 по данным из архива наблюдений All Sky Automated Survey. Внизу — спектр мощности для диапазона периодов 1–6000 сут. Вертикальной линией отмечен цикл продолжительностью 1950 сут (5.3 года).

нами экзопланеты HD 109833 b и c попадают именно в эту область, что приводит к неоднозначной оценке их масс. Требуется дальнейшие наблюдения для установления более детального статуса этих экзопланет и их параметров. На данном этапе мы выполнили расчеты по формуле (1) для двух случаев экзопланет (каменистых и богатых летучими веществами). Массы экзопланет HD 109833 b и c составили соответственно 34.9 и $24 M_{\oplus}$, если планеты являются каменными, и 9.3 и $7.8 M_{\oplus}$, если это экзопланеты, богатые летучими веществами (см. также табл. 1).

Для оценки массы планет нами были использованы эмпирические соотношения $M-R$, представленные в Отеги и др. (2020). Сопоставление аналогичных соотношений, полученных другими исследователями, можно найти в Отеги и др. (2020). Для того чтобы выяснить, как могут измениться оценки масс планет при переходе к другим калибровкам, например, представленной в статье Зенг и др. (2016), мы выполнили дополнительные вычисления. Зенг и др. (2016) привели соотношение, связывающее $M-R$ для планет, в зависимости от параметра, характеризующего структуру планеты —

Таблица 1

$\log R'_{HK}$	R_{pl}/R_{\oplus}	M_{pl}/M_{\oplus}	\dot{M} , г/с	F_{XUV} , эрг/с
Планета b				
-4.50	2.888	34.9(a)	8.56×10^8	9.24×10^{28}
-5.00	2.888	34.9(a)	9.60×10^7	1.04×10^{28}
-4.50	2.888	9.3(b)	3.33×10^9	9.24×10^{28}
-5.00	2.888	9.3(b)	3.74×10^8	1.04×10^{28}
-	2.888	34.9(a)	3.54×10^9	3.82×10^{29}
-	2.888	9.3(b)	1.38×10^{10}	3.82×10^{29}
-4.50	2.888	4.2(c)	7.61×10^9	9.24×10^{28}
-5.00	2.888	4.2(c)	8.54×10^8	1.04×10^{28}
-	2.888	4.2(c)	7.61×10^9	3.82×10^{29}
Планета c				
-4.50	2.59	24.0(a)	4.07×10^8	9.24×10^{28}
-5.00	2.59	24.0(a)	4.56×10^7	1.04×10^{28}
-4.50	2.59	7.8(b)	1.28×10^9	9.24×10^{28}
-5.00	2.59	7.8(b)	1.43×10^8	1.04×10^{28}
-	2.59	24.0(a)	1.68×10^9	3.82×10^{29}
-	2.59	7.8(b)	5.28×10^9	3.82×10^{29}
-4.50	2.59	3.6(c)	2.80×10^9	9.24×10^{28}
-5.00	2.59	3.6(c)	3.14×10^8	1.04×10^{28}
-	2.59	3.6(c)	1.16×10^{10}	3.82×10^{29}

Примечание. Каменистые (a) и богатые летучими веществами (b) экзопланеты согласно Отеги и др. (2020), (c) — согласно Зенг и др. (2016).

доли массы ядра. Принимая, как и в Зенг и др. (2016), величину этого параметра, равной 0.26, мы установили массы экзопланет b и c. Они составили соответственно 4.2 и 3.6 масс Земли (меньше чем по эмпирическим соотношениям Отеги и др., 2020, табл. 1), что очевидно (см. формулу (1)) приводит к большим величинам оттока вещества.

Для вычислений по формуле (1) требуются оценки величины потока XUV -фотонов F_{XUV} . Для этой цели нами были применены два подхода. Во-первых, были использованы аналитические зависимости, полученные в Стрехит и др. (2020) и связывающие величины F_{XUV} потока и параметра $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M. Поскольку данные о величине $\log R'_{HK}$

для HD 109833 в литературе отсутствуют, мы использовали данные Гомез да Силва (2021) о распределении величин этого параметра для звезд солнечного типа. Согласно Гомез да Силва (2021), распределение $\log R'_{HK}$ для звезд спектрального класса G имеет два хорошо выраженных пика с максимумами для величин порядка -5.0 dex у малоактивных звезд и -4.5 dex — у активных. Скорее всего, рассматриваемая нами звезда вследствие своей молодости обладает величиной параметра $\log R'_{HK}$, характерной для активных звезд, тем не менее мы выполнили расчеты для двух значений этого параметра (табл. 1). Отметим, что о высокой активности звезды свидетельствуют и ее быстрое вращение, и уровень рентгеновского излучения (см. ниже).

Согласно Стрехит и др. (2020) нами были получены оценки величины $\log(F_{XUV}/F_{bol})$ и величины потока XUV -фотонов, они представлены в табл. 1. Следует отметить, что в дополнение ко всему неучтенная циклическая переменность хромосферной активности звезды также может приводить к разбросу в оценках величины $\log R'_{HK}$.

Во-вторых, для определения величины потока XUV -фотонов F_{XUV} нами было применено предложенное Санч-Форкада и др. (2022) соотношение, связывающее поток от звезды в рентгеновском диапазоне с величиной $\log F_{XUV}$. Оценку величины рентгеновской светимости HD 109833 $\log L_X = 29.07$ можно найти в Вуд и др. (2023). Соответствующая величина потока XUV -фотонов составила 3.82×10^{29} эрг/с, она сопоставима с оценкой, полученной при применении параметра $\log R'_{HK}$ для активных звезд и превосходит ее в 4 раза. Отметим, что оценки соответствующих потоков, выполненные ранее с использованием параметра $\log R'_{HK}$ для активных и малоактивных звезд, различаются более чем в 9 раз (табл. 1).

В табл. 1 представлены результаты расчетов по соотношению (1) величин потери вещества атмосфер планетами HD 109833 b и c при изменении параметров, связанных с оценками масс планет и падающего на планеты потока УФ-излучения. Диапазоны изменений параметра \dot{M} для HD 109833 b и c лежат в интервалах от 9.60×10^7 г/с до 1.38×10^{10} г/с и от 4.56×10^7 г/с до 5.28×10^9 г/с, соответственно. Данные табл. 1 позволяют проводить сопоставления полученных оценок \dot{M} в зависимости от вариаций принятых параметров.

Как и следовало ожидать, максимальные значения \dot{M} достигаются в случаях, когда планеты b и c рассматриваются как богатые летучими веществами, а оценка величины потока XUV -фотонов — наибольшей. Напротив, минимальные значения \dot{M}

были получены для каменных планет и низкого значения оценки параметра $\log R'_{HK}$. Однако, вероятно, оценка $\log R'_{HK} = -5.00$ является заниженной и не соответствует реальному уровню активности звезды.

Полученные оценки наглядно демонстрируют, как погрешности определений параметров планеты, независимо от того, используются ли они в приближенных аппроксимационных оценочных вычислениях или при точном моделировании, влияют на окончательный результат. Найденные высокие значения темпа оттока вещества могут являться следствием достаточно высокого уровня потока XUV -фотонов от звезды солнечного типа, а также близкого расположения планет от родительской звезды. Учет влияния приливного параметра $K_{\text{tide}}(\xi)$ (его величина меняется от 0.90 до 0.96) также приводит к более высокому значению оценки темпа оттока.

Наконец, как выше указывалось, обе рассматриваемые нами экзопланеты HD 109833 b и c 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. Детальный статус этих экзопланет и их параметров требует уточнения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящей статье представлены результаты анализа проявлений активности HD 109833 и выполнены оценки потери вещества атмосфер двух ее планет. Звезда солнечного типа HD 109833 (спектральный класс G3V, $V = 9^m.31$) расположена от нас на расстоянии около 80 пк. Согласно Вуд и др. (2023), если HD 109833 принадлежит ассоциации Lower Centaurus Crux (LCC), то ее возраст равен 27 ± 3 млн лет, но 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.

Для HD 109833 в архиве TESS имеются данные двух сетов наблюдений (38 и 39), по которым нами была установлена величина периода вращения звезды $P = 5.08 \pm 0.30$ сут. Амплитуда переменности блеска составляет около 0.6% от уровня среднего блеска звезды. По стандартной методике нами были оценены площади пятен на поверхности HD 109833, которые превосходят максимальную площадь пятен на Солнце и составляют 15 200–17 700 м.д.п. Оценка долговременных циклов активности HD 109833 была проведена по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey (www.astrouw.edu.pl.asas). Установлен цикл активности длительностью около 1950 сут (5.3 года).

Обе планеты в системе звезды HD 109833 характеризуются как суб-нептуны с радиусами 2.9 и $2.6R_{\oplus}$, с периодами 9.2 и 13.9 сут. Для подсчета потери вещества атмосферами планет в нашем исследовании использовалась аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Для оценки величины потока XUV -фотонов применялись аналитические зависимости, связывающие величины потока и параметр $\log R'_{HK}$. Поскольку данные о величине $\log R'_{HK}$ для HD 109833 в литературе отсутствуют, мы использовали сведения о распределении этих величин для звезд спектрального класса G, согласно которым оно имеет два хорошо выраженных пика с максимумами для величин порядка -5.0 dex у малоактивных звезд и -4.5 dex — у активных. Оценки соответствующих потоков, выполненные по $\log R'_{HK}$ для активных и малоактивных звезд, различаются более чем в 9 раз.

Кроме того, для определения величины потока XUV -фотонов F_{XUV} было использовано соотношение, связывающее поток от звезды в рентгеновском диапазоне с величиной $\log F_{XUV}$. Найденная величина сопоставима с оценкой, полученной при применении параметра $\log R'_{HK}$ в случае активных звезд, и превосходит ее в 4 раза.

Обе рассматриваемые нами экзопланеты HD 109833 b и c 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 и $24 M_{\oplus}$ для каменных экзопланет и 9.3 и $7.8 M_{\oplus}$ для экзопланет, богатых летучими веществами.

В табл. 1 представлены результаты расчетов величин потери вещества атмосфер планетами HD 109833 b и c при изменении параметров, связанных с оценками масс планет и падающего на планеты потока УФ-излучения. Диапазоны изменений параметра \dot{M} для HD 109833 b и c лежат в интервалах от 9.60×10^7 г/с до 1.38×10^{10} г/с и от 4.56×10^7 г/с до 5.28×10^9 г/с 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 довольно близкого расположения планет от родительской звезды.

Исследование выполнено 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, 075-15-2022-1109).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуд и др. (M.L. Wood, A.W. Mann, M.G. Barber, J.L. Bush, A.L. Kraus, B.M. Tofflemire, et al.), *Astron. J.* **165**, 85 (2023).
2. Гомез да Силва и др. (J. Gomes da Silva, N.C. Santos, V. Adibekyan, S.G. Sousa, T.L. Campante, P. Figueira, et al.), *Astron. Astrophys.* **646**, A77 (2021).
3. Еркаев и др. (N.V. Erkaev, Y.N. Kulikov, H. Lammer, F. Selsis, D. Langmayr, G.F. Jaritz, et al.), *Astron. Astrophys.* **472**, 329 (2007).
4. Зенг и др. (L. Zeng, D.D. Sasselov, and S.B. Jacobsen), *Astrophys. J.* **819**, 127 (2016).
5. Калиничева и др. (E.S. Kalinicheva, V.I. Shematovich, and I.S. Savanov), *Astron. Rep.* **66**, 1318 (2022).
6. Коскинен и др. (T.T. Koskinen, P. Lavvas, C. Huang, G. Bergsten, R.B. Fernandes, and M.E. Young), *Astrophys. J.* **929**, 52 (2022).
7. Наговицин, Певцов (Y.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys. J.* **906**, 27 (2021).
8. Ньютон и др. (E.R. Newton, R. Rampalli, A.L. Kraus, A.W. Mann, J.L. Curtis, A. Vanderburg, et al.), *Astron. J.* **165**, 136 (2023).
9. Отеги и др. (J.F. Otegi, F. Bouchy, and R. Helled), *Astron. Astrophys.* **634**, A43 (2020).
<https://www.doi.org/10.1051/0004-6361/201936482>
10. Саванов (I.S. Savanov), *Astrophysics* **64**, 178 (2021).
<https://www.doi.org/10.1007/s10511-021-09679-y>
11. Саванов, Шематович (I.S. Savanov and V.I. Shematovich), *Astrophys. Bull.* **76**, 450 (2021).
12. Санч-Форкада и др. (J. Sanz-Forcada, M. López-Puertas, L. Nortmann, and M. Lampón), *Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, 138.
<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7561725>
13. Стрехит и др. (A.G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, K. France, and S. Ambily), *Astron. Astrophys.* **644**, A67 (2020).