

УДК 524.3-17+524.3-56

ОЦЕНКИ ПОТЕРИ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕР ДВУХ ПЛАНЕТ МОЛОДОГО АНАЛОГА СОЛНЦА HD 109833

© 2025 И. С. Саванов^{1*}¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 26 марта 2025 года; после доработки 21 мая 2025 года; принята к публикации 31 мая 2025 года

Представлены результаты дальнейшего изучения планетной системы HD 109833, центральной звездой в которой является молодой активный аналог Солнца, предположительно принадлежащий к ассоциации Lower Centaurus Crux (27 ± 3 млн лет). По данным отсканированных фотопластинок проекта Digital Access to a Sky Century@Harvard (данные для HD 109833 охватывают интервал наблюдений длительностью в 100 лет) была сделана дополнительная попытка исследования циклов активности звезды. С учетом всех неопределенностей следует признать, что представленные нами оценки P_{cycl} (включая полученную ранее по данным ASAS-3, $P_{\text{cycl}} = 5.3$ года) находятся на грани достоверности. По измерениям параметра хромосферной активности $\lg R'_{HK}$ для HD 109833, приведенным в новой версии базы данных HARP SRV, и соотношению, связывающему параметр хромосферной активности с величиной $\lg F_{XUV}$, установлена величина потока XUV фотонов (2.0×10^{29} эрг с^{-1}). Рассматриваемые экзопланеты HD 109833 b и c оказываются на диаграмме «масса–радиус» в области с двумя различными популяциями, которые перекрываются как по массам, так и по радиусам. Одна соответствует каменистым, другая — богатым летучими веществами экзопланетам. В работе представлены результаты расчетов величин потери вещества атмосфер \dot{M} планетами HD 109833 b и c по моделям потери атмосферы с ограничением по энергии (модель с ОЭ) и по гидродинамической аппроксимации (ГА) при различных оценках масс планет. Приведены также величины отношений \dot{M} результатов расчетов по моделям с ОЭ и ГА (Ratio) и значения параметра Джинса Λ . Высказано предположение, что расчеты с моделью ГА для случая каменистых планет приводят к существенно заниженным оценкам параметра \dot{M} (эта модель становится неприменимой для столь высоких величин параметра Λ). Наши результаты достаточно хорошо согласуются с данными Foster и др., полученными в 2022 году, характеризующими общее поведение \dot{M} , и находятся в пределах разброса величин этого параметра.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — звезды: активность — звезды: маломассивные — экзопланеты*

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья продолжает исследование, начатое в работе Sаванов (2023), и представляет результаты изучения проявления активности молодой звезды солнечного типа HD 109833, а также оценки потерь вещества атмосфер планетами HD 109833 b и c.

При поиске звезд, сопутствующих транзитной системе TESS TIC 360630575 (HD 109833; TOI 1097) по пространственной скорости, Wood et al. (2023) обнаружили и исследовали популяцию звезд Lower Centaurus Crux (LCC) с возрастом порядка 27 ± 3 млн лет, расположенную от нас на расстоянии около 85 пк. Планеты HD 109833 b и c вошли в небольшую выборку экзопланет

с возрастом менее 100 млн лет. Сама звезда HD 109833 имеет период вращения и содержание лития, указывающие на молодой возраст (около 100 млн лет), тем не менее после детального сопоставления с характеристиками других объектов Wood et al. (2023) не отвергают возможность того, что HD 109833 является молодой звездой поля, случайно расположенной поблизости от популяции LCC. Основные данные о звезде HD 109833 и ее планетах из работы Wood et al. (2023) приведены в таблице 1.

Особенностью планетной системы HD 109833 является то, 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 субсатурнов (sub-Saturn desert) с радиусами $4\text{--}10 R_{\oplus}$ (см. обсуждение в Wood et al., 2023).

*E-mail: igs231@mail.ru

Таблица 1. Параметры HD 109833 и ее планет

Параметр	Значение	Параметр	Значение	
			Планета b	Планета c
T_{eff} , К	5881 ± 50			
$\lg g$	4.45 ± 0.10	P_{pl} , day	9.2	13.9
R/R_{\odot}	1.00 ± 0.04	R_{pl}/R_{\oplus}	2.9	2.6
L/L_{\odot}	1.18 ± 0.08	a_{pl}/R_{*}	19.9	29.4
M/M_{\odot}	1.08 ± 0.05			

В этой работе мы приводим новые результаты анализа проявлений долговременной активности HD 109833 и новые оценки потерь вещества атмосфер планет HD 109833 b и c.

2. ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ HD 109833

По данным двух сетов наблюдений (38 и 39) из архива TESS были определены величины периода вращения звезды ($P = 5.08 \pm 0.30$ суток) и амплитуды переменности блеска (около 0.6%) (см. Savanov, 2023). Также были оценены площади пятен на поверхности HD 109833, которые превосходят максимальную площадь пятен на Солнце и составляют 15 200–17 700 м.д.п.

В работе Savanov (2023) приведена оценка возможных долговременных циклов активности HD 109833 по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey (ASAS)¹. Было рассмотрено 1295 оценок блеска звезды в V-фильтре и сделано заключение о возможном существовании цикла активности величиной порядка 1950 сут. (5.3 года).

Исследование циклов активности звезды было продолжено по данным отсканированных фотопластинок проекта Digital Access to a Sky Century@Harvard (DASCH), которые предоставляют возможность анализа долговременной активности звезды на продолжительном временном интервале. Имеющиеся в архиве данные для HD 109833 охватывают интервал наблюдений длительностью в 100 лет (1889.4–1989.6 гг.) (рис. 1). Всего нами было рассмотрено 3935 измерений блеска звезды в системе, близкой к фотометрической в фильтре B. К сожалению, имеется пробел в данных в интервале с 1955 по 1970 год, данные после 1970 года немногочисленны. На основе построенного спектра мощности для блеска HD 109833 можно предположить существование длительных циклов активности: $P_{\text{cycl}} \sim 19\,400$ сут. (53.2 года) и 5700 сут. (15.6 года) (см. рис. 1b). С

учетом всех неопределенностей следует отметить, что, вероятнее всего, представленная нами ранее оценка ($P_{\text{cycl}} = 5.3$ года) указывает не на величину цикла активности (она отсутствует в результатах анализа данных DASCH), а на продолжительность интервала наблюдений. А в целом надо признать, что найденные оценки P_{cycl} находятся на грани достоверности и не являются надежными. Выполненный нами анализ не дает ответа на вопрос о циклах активности звезды, поэтому в будущем потребуются новые работы в этом направлении.

3. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ HD 109833 b и c

Планеты b и c звезды HD 109833 характеризуются Wood et al. (2023) как субнептуны с соответствующими радиусами $2.9 R_{\oplus}$ и $2.6 R_{\oplus}$, с периодами 9.2 и 13.9 суток, что, вероятно, свидетельствует о возможном резонансе 3 : 2 в системе.

Как указывали Otegi et al. (2020), на диаграмме « $M-R$ » («масса–радиус») можно выделить две различные популяции экзопланет: 1) каменистые и 2) богатые летучими веществами, которые перекрываются как по массам, так и по радиусам. Разделяет их линия, соответствующая экзопланетам, состав которых определяется H_2O . Особый интерес представляет область перехода от каменистых экзопланет к экзопланетам, богатым летучими веществами — в диапазонах масс $5-25 M_{\oplus}$ и радиусов $2-3 R_{\oplus}$. Обе рассматриваемые экзопланеты попадают в эту область. Данное обстоятельство приводит к неоднозначной оценке их масс.

По этой причине в работе Savanov (2023) были выполнены расчеты потери вещества атмосферами планет для обоих случаев. Если экзопланеты HD 109833 b и c являются каменистыми, согласно расчетам, их массы равны соответственно $34.9 M_{\oplus}$ и $24 M_{\oplus}$, и примерно втрое меньше, а именно, $9.3 M_{\oplus}$ и $7.8 M_{\oplus}$, если эти экзопланеты богаты летучими веществами. Кроме того, в работе Savanov (2023) мы провели дополнительные вычисления на основании соотношений Zeng et al. (2016), которые связывают « $M-R$ » для планет, в зависимости

¹www.astrouw.edu.pl.asas

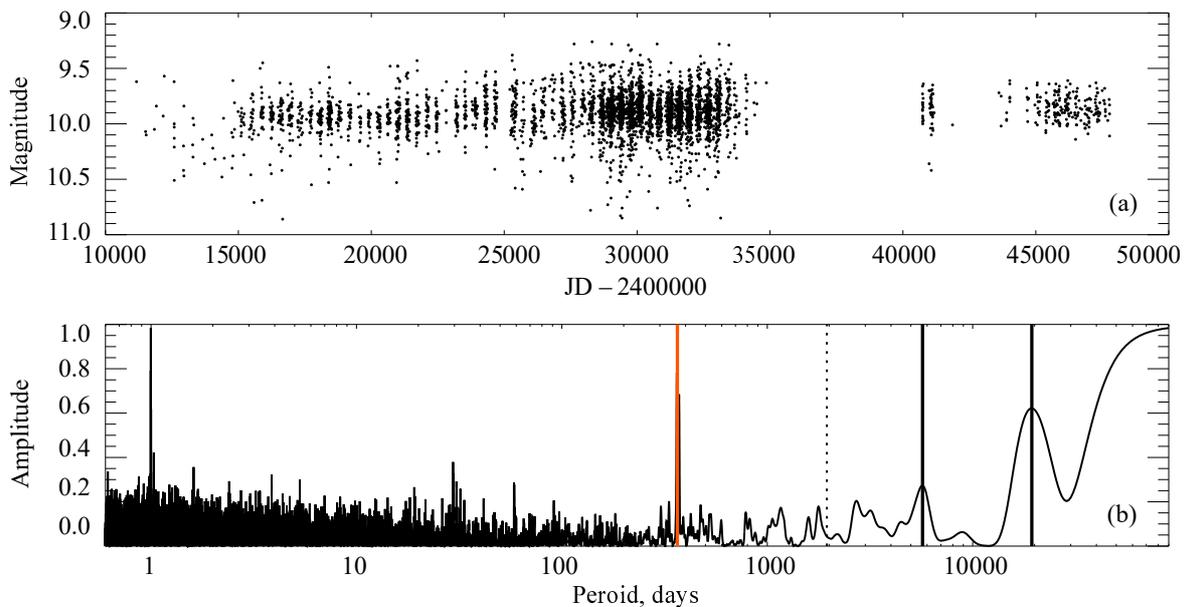


Рис. 1. Панель (а) — кривая блеска HD 109833 по данным проекта Digital Access to a Sky Century@Harvard (DASCH). Панель (б) — спектр мощности для диапазона периодов 1–80 000 сут. Обращают на себя внимание пики, указывающие на циклы с характерными временами около 19 400 сут. (53.2 года) и 5700 сут. (15.6 лет). Вертикальная пунктирная линия соответствует циклу в 5.3 года (1950 сут.), установленному в Savanov (2023) по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey. Вертикальной красной линией на панели (б) также отмечен пик, соответствующий годовому периоду. Хорошо заметен пик, соответствующий суточной скважности наблюдений (см. текст).

от параметра, характеризующего структуру планеты, — доли массы ядра, и установили, что в этом случае массы экзопланет b и c составляют $4.2 M_{\oplus}$ и $3.6 M_{\oplus}$ соответственно.

Первоначально для подсчета потери вещества атмосферами планет HD 109833 b и c (без детального моделирования процессов в системе «звезда–планета») Savanov (2023) использовал аппроксимационную формулу, часто называемую в литературе моделью потери атмосферы с ограничением по энергии (см., например, Erkaev et al., 2007; Savanov and Shematovich, 2021; Kalinicheva et al., 2022; Koskinen et al., 2022).

Для вычислений по этой формуле требуются оценки величины потока XUV-фотонов (F_{XUV}). Чтобы их получить, Savanov (2023) применил два подхода. В первом были использованы аналитические зависимости из работы Sreejith et al. (2020), связывающие величины F_{XUV} и параметра $\lg R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M. Поскольку данные о величине $\lg R'_{HK}$ для HD 109833 на момент проведения наших первых исследований в литературе отсутствовали, мы использовали данные Gomes da Silva et al. (2021) о распределении величин этого параметра для звезд солнечного типа. Согласно Gomes da Silva et al. (2021) распределение $\lg R'_{HK}$ 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. Во втором подходе для определения величины потока XUV-фотонов было использовано предложенное Sanz-Forcada et al. (2022) соотношение, связывающее поток от звезды в рентгеновском диапазоне с величиной $\lg F_{XUV}$.

В настоящее время стали доступны результаты, представленные Perdelwitz et al. (2024), которые содержат новую версию базы данных HARP SRV, включающую в общей сложности 252 615 измерений лучевых скоростей для 5239 звезд. База данных основана на 77% всех общедоступных спектров HARPS и на сегодняшний день является крупнейшим общедоступным архивом высокоточных (с точностью около 1 m s^{-1}) измерений лучевых скоростей и крупнейшей подборкой измерений $\lg R'_{HK}$. Более того, новые данные Perdelwitz et al. (2024) содержат конкретные измерения параметра хромосферной активности $\lg R'_{HK}$ для исследуемой звезды, который составляет -4.319 . Напомним, что ранее в Savanov (2023) вычисления проводились для величин потока XUV-фотонов, соответствующих значениям -4.50 и -5.00 .

На рис. 2а представлена диаграмма « $T_{\text{eff}} - \lg R'_{HK}$ » для 5239 звезд из Perdelwitz et al. (2024). Хорошо заметны последовательности и группировки, образуемые объектами с различным уровнем хромосферной активности. Аналогично

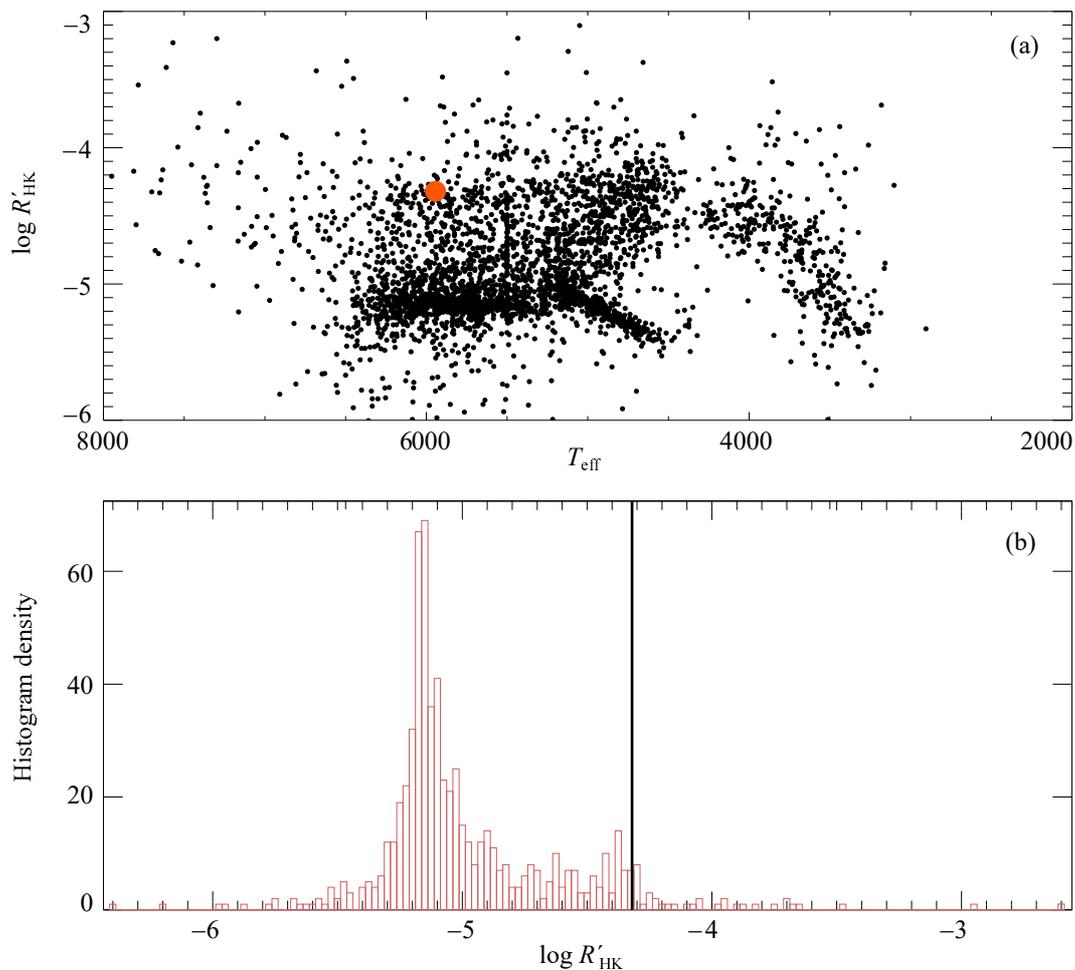


Рис. 2. Панель (a) — диаграмма « $T_{\text{eff}} - \lg R'_{\text{HK}}$ » для 5239 звезд из Perdelwitz et al. (2024). Положение HD 109833 отмечено на диаграмме красным кружком. Панель (b) — гистограмма распределений величин $\lg R'_{\text{HK}}$ для звезд солнечного типа. Положение HD 109833 отмечено вертикальной линией (см. пояснения в тексте).

предложенному в Gomes da Silva et al. (2021), можно заключить, что распределение $\lg R'_{\text{HK}}$ для звезд спектрального класса G имеет два выраженных пика: максимумы находятся около -5.15 dex у малоактивных звезд и -4.37 dex у активных (рис. 2b). Можно предположить, что активность этой звезды даже немного превосходит среднюю величину для активных звезд солнечного типа.

Вероятно, для звезд спектрального класса K распределение параметра может носить трехкомпонентный характер (см. об этом более подробно в Gomes da Silva et al., 2021). К сожалению, немногочисленность имеющихся данных из Perdelwitz et al. (2024), на которых, возможно, сказывается эффект наблюдательной селекции, не позволяет прояснить вопрос о многокомпонентности распределения величин $\lg R'_{\text{HK}}$ для звезд спектрального класса M.

По соотношению, связывающему поток от звезды в рентгеновском диапазоне с величиной

$\lg F_{\text{XUV}}$, было установлено (Savanov, 2023): соответствующая величина потока XUV-фотонов составляет 3.82×10^{29} эрг с^{-1} , что сопоставимо с оценкой, полученной при применении параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ для активных звезд, и превосходит ее в четыре раза. Отметим, что оценки соответствующих потоков, выполненные в Savanov (2023) для активных и малоактивных звезд, различаются более чем в девять раз. В настоящей работе было получено, что при параметре $\lg R'_{\text{HK}} = -4.32$ величина потока XUV-фотонов составляет 2.0×10^{29} эрг с^{-1} и лишь в два раза меньше величины оценки по калибровке для рентгеновского излучения. Это значение величины потока XUV-фотонов было принято при дальнейших расчетах.

В целом (см. Kubyshkina et al., 2018a), модель потери атмосферы с ограничением по энергии достаточно хорошо воспроизводит темпы убегания, полученные с помощью детального моделирования верхней атмосферы экзопланет, особенно для

Таблица 2. Результаты расчетов величин потери вещества атмосфер (\dot{M}) планетами HD 109833 b и HD 109833 c по модели потери атмосферы с ограничением по энергии (ОЭ) и по гидродинамической аппроксимации (ГА) при различных оценках масс планет. В столбцах: (1) и (2) — радиус и оценка массы планеты, (3) и (4) — \dot{M} по модели ОЭ и по ГА, (5) — отношение \dot{M}/\dot{M} , полученных по модели с ОЭ и по ГА, соответственно, (6) — параметр убегания Джинса Λ

R_{pl}/R_{\oplus}	M_{pl}/M_{\oplus}	\dot{M} , г с ⁻¹	\dot{M} , г с ⁻¹	Ratio	Λ
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Планета b					
2.888	34.9 ^{a)}	1.9×10^9	5.4×10^7	35.2	150.6
2.888	9.3 ^{b)}	7.3×10^9	4.8×10^9	1.5	40.1
2.888	4.21 ^{c)}	1.7×10^{10}	7.2×10^{10}	0.2	18.2
Планета c					
2.59	24.0 ^{a)}	8.9×10^8	2.9×10^7	30.7	140.0
2.59	7.8 ^{b)}	2.8×10^9	9.1×10^8	3.1	45.1
2.59	3.63 ^{c)}	6.1×10^9	9.4×10^9	0.6	21.2

Примечание: ^{a)} — для каменных и ^{b)} — для богатых летучими веществами экзопланет, согласно Otegi et al. (2020); ^{c)} — на основании соотношений из Zeng et al. (2016).

горячих газовых гигантов с атмосферами в гидродинамическом режиме, и позволяет использовать ее для изучения планетной эволюции и популяций экзопланет. Однако данное приближение может в ряде случаев существенно недооценивать величину темпа потери массы M_{loss} (обсуждение данных вопросов содержится, например, в работе Kubyshkina et al. (2018a)).

Эта ситуация может быть улучшена при разработке подхода (см. Kubyshkina et al., 2018a), предполагающего использование сетки гидродинамических моделей верхних атмосфер и установления темпа потери массы методом интерполяции между ячейками сетки. Так, например, в Kubyshkina et al. (2018b) представлена большая сетка гидродинамических моделей верхних атмосфер, вычисленных для параметров планет в диапазоне $1\text{--}39 M_{\oplus}$, а также метод интерполяции для получения модельных выходных параметров.

Гидродинамическая аппроксимация основана на сетке из почти 7000 одномерных гидродинамических моделей водородной верхней атмосферы для систем, удовлетворяющих следующим ограничениям: планета массой $1\text{--}39 M_{\oplus}$, радиусом $1\text{--}10 R_{\oplus}$, равновесной температурой $300\text{--}2000$ К, родительской звездой массой $0.4\text{--}1.3 M_{\odot}$, радиусом орбиты $0.002\text{--}1.3$ а.е. и светимостью в XUV-диапазоне около $10^{26}\text{--}5 \times 10^{30}$ эрг с⁻¹. Кроме того, существуют дополнительные ограничения (см. детали в Kubyshkina et al., 2018b), например, по величине параметра убегания Джинса ($\Lambda < 80$).

Данная аппроксимация задается выражением

$$\dot{M} = e^{\beta} F_{\text{XUV}}^{\alpha_1} d^{\alpha_2} R^{\alpha_3} \Lambda^{\zeta + \theta \ln d}, \quad (1)$$

где $\beta, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \zeta, \theta$ — вычисленные в Kubyshkina et al. (2018b) коэффициенты, выбираемые в зависимости от режима истечения оболочки, d — радиус орбиты в астрономических единицах, R — радиус планеты в радиусах Земли, Λ — джинсовский параметр системы.

В таблице 2 приведены результаты расчетов по модели потери атмосферы с ограничением по энергии (модель с ОЭ) и по гидродинамической аппроксимации (ГА) величин потери вещества атмосфер планетами HD 109833 b и c, а также величины параметра Джинса Λ при различных оценках масс планет. Диапазоны изменений параметра \dot{M} для HD 109833 b лежат в интервалах от 1.9×10^7 до 1.7×10^{10} г с⁻¹ (модель с ОЭ) и от 5.46×10^7 до 7.2×10^{10} г с⁻¹ (ГА), а для HD 109833 c — от 8.9×10^8 до 6.1×10^9 г с⁻¹ (модель с ОЭ) и от 2.9×10^7 до 9.4×10^9 г с⁻¹ (ГА).

Как можно видеть, для случая каменных планет расчеты с моделью ГА дают существенно заниженные оценки параметра \dot{M} . Вероятно, это обстоятельство связано с неприменимостью модели для столь высоких значений параметра Λ (140–150 по сравнению с предельной величиной порядка 80). В двух других случаях значения Ratio лежат в интервале 0.2–3, что согласуется с

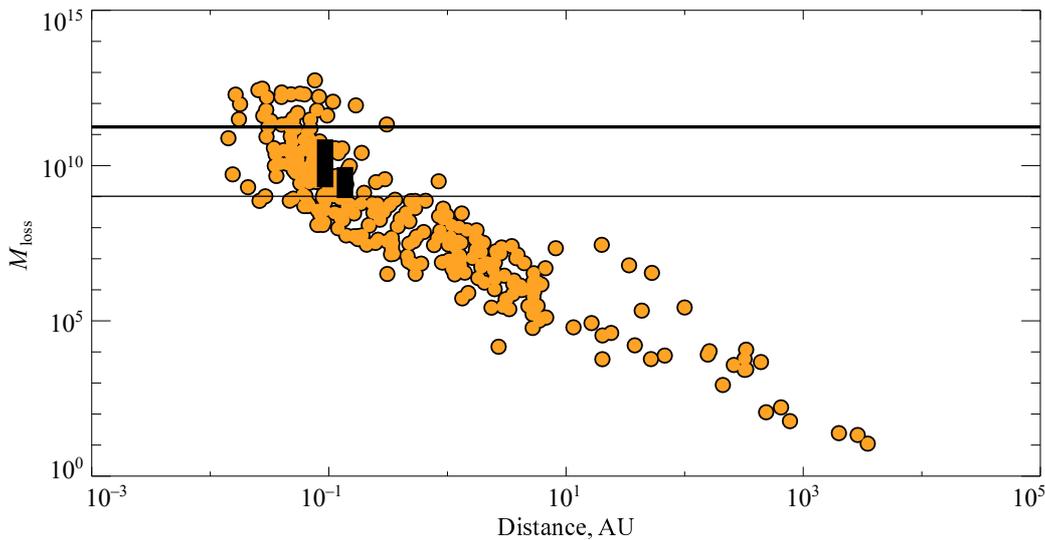


Рис. 3. Зависимость потери вещества атмосферами экзопланет от расстояния до звезды по данным Foster et al. (2022) (светлые кружки). Черные вертикальные прямоугольники — изменения величины M_{loss} для планет HD 109833 b и c. Уровни величин M_{loss} для горячего юпитера HD 189733 b и теплого непуна GJ 436 b обозначены толстой и тонкой горизонтальными линиями соответственно.

выводами Kubyshkina et al. (2018b) (см., например, рис. 3 в упомянутой статье).

На рис. 3 представлено сопоставление полученных нами данных о потере вещества атмосферами планет HD 109833 b и c с исследованиями Foster et al. (2022) (см. рис. 11 в упомянутой работе). Используя результаты новых измерений рентгеновской светимости звезд с планетными системами по данным миссии eROSITA, Foster et al. (2022) установили величины скорости потери вещества для 287 экзопланет. Черными вертикальными прямоугольниками на рис. 3 отмечены величины \dot{M} для планет HD 109833 b и c. Значения \dot{M} варьируются в пределах прямоугольников из-за неопределенности сведений о массах планет. Полученные нами данные достаточно хорошо согласуются с результатами, характеризующими общее поведение параметра \dot{M} , и находятся в пределах разброса величин параметра. Для сравнения на рис. 3 показаны уровни величин \dot{M} для горячего юпитера HD 189733 b и теплого непуна GJ 436 b (толстая и тонкая горизонтальные линии соответственно). Как и следовало ожидать, найденные нами значения ближе к величине темпа потери вещества для атмосферы теплого непуна, чем для горячего юпитера (превышают уровень \dot{M} для теплого непуна GJ 436 b, см. также пояснения в работе Kalinicheva et al., 2022).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение планетной системы HD 109833 является продолжением серии наших исследований

планетных систем, в которых центральной звездой является молодой активный аналог Солнца. Случай системы HD 109833 интересен тем, что, используя сведения о принадлежности звезды к популяции Lower Centaurus Crux, мы с большой достоверностью располагаем оценкой ее возраста (27 ± 3 млн лет). Кроме того, особенностью планет системы HD 109833 является то, что они имеют меньшие радиусы (присущие более старым объектам), чем большинство молодых экзопланет с возрастом менее 100 млн лет.

По данным отсканированных фотопластинок проекта Digital Access to a Sky Century@Harvard (имеющиеся в архиве данные для HD 109833 охватывают интервал наблюдений длительностью в 100 лет) была предпринята дополнительная попытка исследования циклов активности звезды. Для HD 109833 получены свидетельства о существовании длительных циклов активности P_{cycl} порядка 19 400 сут. (53.2 года) и 5700 сут. (15.6 лет). Однако с учетом всех неопределенностей следует отметить, что, вероятнее всего, представленные нами оценки P_{cycl} (включая полученную ранее по данным ASAS-3 $P_{\text{cycl}} = 5.3$ года) находятся на грани достоверности и не указывают на хорошо выраженную цикличность активности.

По соотношению, связывающему параметр хромосферной активности $\lg R'_{\text{HK}}$ с величиной $\lg F_{\text{XUV}}$, было установлено, что найденное значение потока XUV-фотонов составляет 2.0×10^{29} эрг с^{-1} и сопоставима с величиной оценки по калибровке для рентгеновского излучения.

Как указывалось Otegi et al. (2020), на диаграмме «масса–радиус» (« $M-R$ ») присутствуют две различные популяции, соответствующие каменистым и богатым летучими веществами экзопланетам, которые перекрываются как по массам, так и по радиусам (диапазон масс 5–25 M_{\oplus} и диапазон радиусов 2–3 R_{\oplus}). Рассматриваемые нами экзопланеты HD 109833 b и c попадают в эту область, что приводит к неоднозначной оценке их масс.

Представлены результаты расчетов величин потери вещества атмосфер (\dot{M}) планетами HD 109833 b и c по модели потери атмосферы с ограничением по энергии (модель с ОЭ) и по гидродинамической аппроксимации (ГА) при различных оценках масс планет. Расчеты с ГА-моделью для случая каменистых планет дают существенно заниженные оценки \dot{M} (эта модель становится неприменимой для столь высоких значений параметра Λ). В двух остальных случаях $\text{Ratio} = 0.2-3$, что согласуется с выводами из работы Kubyskhina et al. (2018b).

Полученные нами оценки достаточно хорошо согласуются с результатами, исследования Foster et al. (2022), характеризующими общее поведение параметра \dot{M} , и находятся в пределах разброса величин параметра. При этом найденные нами значения ближе к величине темпа потери вещества для атмосферы теплого непуна, чем для горячего юпитера (превышают уровень \dot{M} для теплого непуна GJ 436 b).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. V. Erkaev, Y. N. Kulikov, H. Lammer, et al., *Astron. and Astrophys.* **472** (1), 329 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20066929
2. G. Foster, K. Poppenhaeger, N. Ilic, and A. Schwöpe, *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A23 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202141097
3. J. Gomes da Silva, N. C. Santos, V. Adibekyan, et al., *Astron. and Astrophys.* **646**, id. A77 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039765
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. Kubyskhina, L. Fossati, N. V. Erkaev, et al., *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A151 (2018a). DOI:10.1051/0004-6361/201833737
7. D. Kubyskhina, L. Fossati, N. V. Erkaev, et al., *Astrophys. J.* **866** (2), article id. L18 (2018b). DOI:10.3847/2041-8213/aae586
8. J. F. Otegi, F. Bouchy, and R. Helled, *Astron. and Astrophys.* **634**, id. A43 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936482
9. V. Perdelwitz, T. Trifonov, J. T. Teklu, et al., *Astron. and Astrophys.* **683**, id. A125 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202348263
10. J. Sanz-Forcada, M. López-Puertas, L. Nortmann, and M. Lampón, in *Proc. 21st Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, Toulouse, France, 2022*, id. 138, online at <https://coolstars21.github.io/>.
11. I. S. Savanov, *Astronomy Letters* **49** (9), 516 (2023). DOI:10.1134/S1063773723090049
12. I. S. Savanov and V. I. Shematovich, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 450 (2021). DOI:10.1134/S199034132104012X
13. A. G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, et al., *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A67 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202039167
14. M. L. Wood, A. W. Mann, M. G. Barber, et al., *Astron. J.* **165** (3), id. 85 (2023). DOI:10.3847/1538-3881/aca8fc
15. L. Zeng, D. D. Sasselov, and S. B. Jacobsen, *Astrophys. J.* **819** (2), article id. 127 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/819/2/127

Estimates of Atmospheric Mass Loss for Two Planets of the Young Solar Analog HD 109833**I. S. Savanov¹**¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

We present the results of a further investigation of the planetary system HD 109833, whose central star is a young, active solar analog, presumably a member of the Lower Centaurus Crux association (age: 27 ± 3 Myr). Using digitized photographic plates from the Digital Access to a Sky Century@Harvard project (providing data on HD 109833 spanning a 100 year observation period) we made an additional attempt to study possible activity cycles of the star. Taking into account all uncertainties, it should be noted that the derived estimates of the activity cycle period P_{cycl} (including the earlier value obtained from ASAS-3 data, $P_{\text{cycl}} = 5.3$ years) are on the edge of statistical reliability. Based on measurements of the chromospheric activity index $\log R'_{HK}$ for HD 109833 from the updated HARP SRV database and its empirical relation with $\log F_{XUV}$, we estimated the XUV photon flux to be 2.0×10^{29} erg s⁻¹. The exoplanets HD 109833 b and c are located in the overlapping region of two distinct populations on the “mass–radius” diagram: rocky planets and planets rich in volatile compounds. We present calculations of atmospheric mass loss rates \dot{M} for HD 109833 b and c based on both the energy-limited escape model (EL) and the hydrodynamic approximation (HA), using different planetary mass estimates. We also provide the ratios of mass loss rates \dot{M} obtained from EL and HA models (Ratio), and the values of the Jeans parameter Λ . It is suggested that the HA model significantly underestimates \dot{M} in the case of rocky planets, rendering this model inapplicable for such high values of Λ . Our results are in reasonable agreement with those of Foster et al. (2022), which describe the general behavior of \dot{M} , and fall within the observed spread of this parameter.

Keywords: *methods: data analysis—stars: activity—stars: low-mass—exoplanets*