

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗДЫ TOI-1408 И ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРАМИ ЕЕ ЭКЗОПЛАНЕТ

© 2025 г. И. С. Саванов

Федеральное государственное бюджетное учреждение Российской академии наук Институт астрономии,
Москва, Россия

e-mail: isavanov@inasan.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.08.2024 г.

После доработки 20.09.2024 г.

Принята в печать 14.10.2024 г.

В статье рассмотрены свойства мультипланетной системы TOI-1408, состоящей из горячего Юпитера (планета (b), $(1.86 \pm 0.02) M_{\text{Jup}}$, $(2.4 \pm 0.5) R_{\text{Jup}}$) и субнептуна (планета (c), $(2.22 \pm 0.06) R_{\oplus}$, $(7.6 \pm 0.2) M_{\oplus}$), обращающихся вокруг звезды спектрального класса F. Также измерения лучевых скоростей свидетельствуют в пользу существования дополнительного небесного тела с периодом обращения несколько тысяч дней. Система TOI-1408 позволяет изучать процессы миграции планет типа горячий Юпитер в случаях, когда менее массивная планета (c) находится ближе к звезде, чем более массивная (b). По архивным измерениям блеска TOI-1408 (проект DASCH) мы сделали оценки величины возможной циклической долговременной переменности объекта (около $10\,500^d$). Анализ переменности блеска TOI-1408 по данным архива Kamogata Wide-field Survey (KWS) привел к обнаружению в спектре мощности пиков, соответствующих периоду вращения около 7.5^d , ранее найденному в работе [1]. Получены оценки величин оттока вещества из атмосфер планет, которые были установлены для двух значений параметра $\log R'_{\text{HK}}$ (-4.94 и -4.59), соответствующих максимумам бимодального распределения этого параметра для малоактивных и активных звезд спектрального класса F. Потеря вещества атмосферы планеты (b) (горячего Юпитера) может достигать $2.3 \times 10^{11} \text{ г/с}$, а субнептуна — планеты (c) — $2.7 \times 10^{10} \text{ г/с}$ для величины $\log R'_{\text{HK}} = -4.59$. Полученные нами данные достаточно хорошо согласуются с результатами для экзопланет соответствующих типов (в том числе для горячего Юпитера HD 189733 b и теплого Нептуна GJ 436 b).

Ключевые слова: экзопланеты, атмосферы, потеря вещества, активность, циклы

DOI: [10.31857/S0004629925010047](https://doi.org/10.31857/S0004629925010047), EDN: HLVHNY

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время внимание многих групп ученых стали привлекать многопланетные системы, являющиеся объектами с большим разнообразием происходящих в них явлений, важных для исследования межпланетных взаимодействий, формирования и миграции планет, сравнительной планетологии и др. (см. [2] и ссылки в [3]). Авторы [1] сообщили об изучении системы TOI-1408, содержащей планеты типа горячий Юпитер, субнептун и, возможно, третье тело (период обращения которого может быть порядка тысячи дней). Эта система, по мнению авторов [1], заслуживает особого интереса, поскольку ее наблюдения позволяют изучать процессы миграции планет, как горячих Юпитеров, так и субнептунов, например, в случаях, когда менее массивная планета (c) находится ближе к звезде, чем более массивная (b).

В нашей статье мы выполнили исследование проявлений активности звезды TOI-1408, а также

получили оценки величины возможного оттока вещества из атмосферы двух ее планет.

2. ПРОЯВЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ TOI-1408

Согласно работе [1] эффективная температура TOI-1408 (BD+72 969/TIC 364186197) равна $T_{\text{eff}} = 6117 \pm 31 \text{ K}$, ускорение силы тяжести $\log g = 4.10 \pm 0.06$, радиус $R/R_{\odot} = 1.53 \pm 0.02$ и масса $M/M_{\odot} = 1.31 \pm 0.01$. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 2275130045974715904, его параллакс составляет $\pi = 7.1641 \pm 0.0102 \text{ mas}$. TOI-1408 является достаточно яркой звездой спектрального класса F8, блеск в фильтре V составляет 9.27^m . В работе [1] были детально рассмотрены наблюдения TOI-1408 из архива космической миссии TESS. Данные были получены для 12 секторов и содержат 61 транзитов планеты (b) и 114 транзитов планеты (c). Авторы [1] также выполнили определение периода вращения звезды P , который составил $7.5^d \pm 0.62^d$. К сожале-

нию, данные архива TESS не позволяют сделать заключение о долговременной переменности звезды.

Мы провели независимый анализ переменности блеска TOI-1408 по данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS)¹. В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах V и Ic в интервале наблюдений в целом с августа 2017 г. по сентябрь 2021 г., (4 года), но фактически только в сезоны 2017–2018 гг. Мы проанализировали данные в фильтре V , всего было рассмотрено 317 оценок блеска. Представленные на рис. 1 (вверху) данные не могут дать ответ о присутствии цикличности в изменении блеска. На нижней диаграмме рис. 1 приведен спектр мощности для интервала 1–15 суток, включающего величину вероятного периода вращения P звезды. Наше внимание привлекли два пика, соответствующие величинам P около 7.5^d (подробнее см. в работе [1]).

Наше исследование циклов активности звезды было продолжено на основе данных отсканированных фотопластинонок проекта Digital Access to a Sky Century Harvard (DASCH) [4], которые предоставляют широкие возможности для анализа долговременной активности звезды на продолжительном временному интервале. Имеющиеся в архиве данные для TOI-1408 охватывают интервал наблюдений длительностью в 93 года (с 1896.8 г. по 1989.9 г.) (рис. 2). Всего нами было рассмотрено 4272 измерений блеска звезды в системе, близкой к фотометрической в фильтре B . К сожалению, несмотря на то что данные многочисленны, их разброс велик, точность в ряде случаев невысока и также имеется характер-

ный для DASCH пробел в данных в интервале с 1952 по 1967 г. Тем не менее на основе построенного спектра мощности для блеска TOI-1408 можно предположить существование длительного цикла активности P_{cycl} порядка $10\,500^d$ (28.8 лет) (см. рис. 2, нижняя диаграмма, вертикальная темная линия). На этом рисунке вертикальными светлыми линиями также отмечены пики, соответствующие годичному и месячному периодам. Также на рис. 2 вертикальной темной линией обозначено положение, соответствующее периоду вращения звезды, но никаких деталей в этой области не имеется.

Возраст системы был оценен в работе [1] и составил 2.7 ± 0.3 млрд лет. С учетом всех неопределенностей, можно сделать заключение, что, скорее всего, TOI-1408 не принадлежит к числу старых звезд и может обладать умеренной активностью.

Авторы работы [1] не приводят информацию об уровне хромосферной активности TOI-1408, поэтому мы выполнили оценку величины индекса $\log R'_{HK}$, необходимого в дальнейшем для определения величины оттока вещества из атмосферы экзопланеты косвенным образом. Мы использовали данные работы [5], касающиеся распределения величин этого параметра для звезд спектрального класса F. Согласно [5], для них распределение $\log R'_{HK}$ имеет два пика (возможно, первый из них раздвоен, но это раздвоение может быть и артефактом) с максимумами для величин порядка -4.94 dex (-4.83 dex) у малоактивных звезд и -4.59 dex у активных. Скорее всего, у рассматриваемой нами звезды величи-

¹ <http://kws.cetus-net.org>

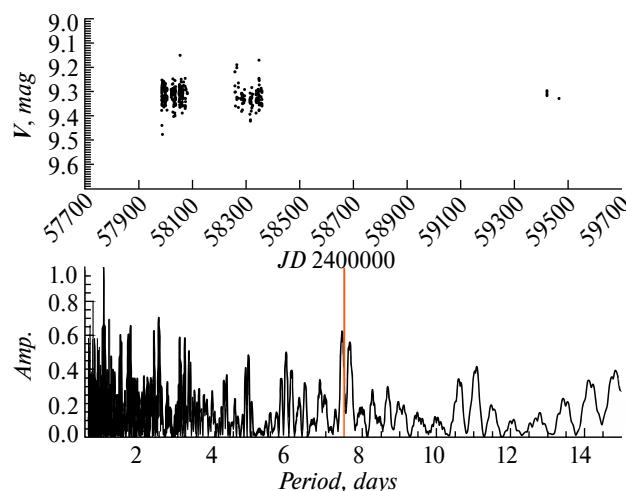


Рис. 1. Верхняя панель: фотометрические наблюдения TOI-1408 в фильтре V по данным обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS). Внизу — спектр мощности для интервала периодов 1–14 d . Вертикальная светлая (красная) линия соответствует величине периода вращения 7.5 суток

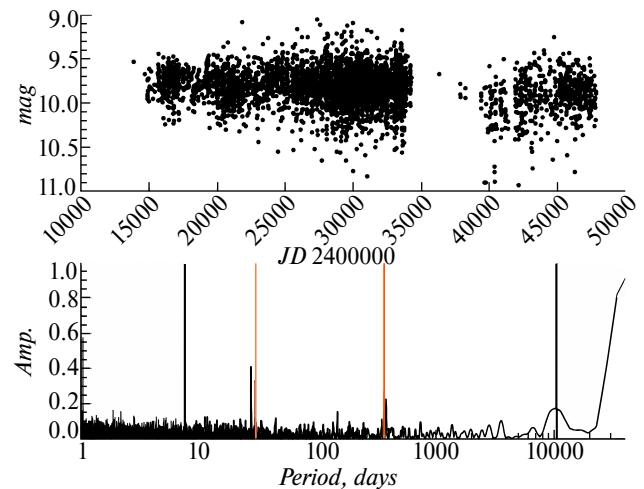


Рис. 2. Вверху — кривая блеска TOI-1408 по данным проекта Digital Access to a Sky Century@Harvard (DASCH) в 1896.8–1989.9 гг. Внизу — спектр мощности для диапазона периодов 1–14 000 d . Вертикальными темными линиями отмечены длительный цикл активности P_{cycl} порядка $10\,500^d$ (28.8 лет) и 7.5^d (возможное положение пика для P_{rot}). Вертикальными светлыми (красными) линиями отмечены пики, соответствующие положениям, близким к годичному и месячному периодам

на параметра $\log R'_{\text{HK}}$ характерна для малоактивных звезд, тем не менее мы выполнили расчеты для двух значений этого параметра.

3. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ TOI-1408

Как указывалось выше [1], TOI-1408 обладает двумя планетами: одной — типа горячий юпитер TOI-1408 b с параметрами: $P = 4.42^d$, $M = (1.86 \pm 0.02) M_{\text{Jup}}$, $R = (2.4 \pm 0.5) R_{\text{Jup}}$, и другой, TOI-1408 c — типа субнептуна с параметрами: $P = 2.17^d$, $R = (2.22 \pm 0.06) R_{\oplus}$ и массой $M = (7.6 \pm 0.2) M_{\oplus}$.

Для подсчета потери вещества атмосферами планет $M_{\text{loss}} (\dot{M})$ нами была использована аппроксимационная формула (см., напр., [7, 6]), соответствующая модели 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:

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

где ϵ_{XUV} — параметр эффективности нагрева ($\epsilon_{\text{XUV}} = 0.2 \pm 0.1$ для мининептунов 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 работах [7, 6, 8, 9].

Основные данные о планетах системы TOI-1408 нами были взяты из работы [1]. Для оценки величины F_{XUV} (потока XUV-фотонов) были использованы полученные в работе [10] аналитические зависимости, связывающие величину F_{XUV} и параметр $\log R'_{\text{HK}}$ для звезд спектральных классов от F до M. В таблице представлены результаты расчетов по соотношению (1) величин M_{loss} у планет TOI-1408 для принятых величин параметра $\log R'_{\text{HK}}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрены свойства мультипланетной системы TOI-1408, состоящей из горячего юпитера и субнептуна, обращающихся вокруг звезды спектрального класса F. Свойства планет тако-

Таблица. Результаты расчетов по соотношению (1) величин M_{loss} у планет TOI-1408

$\log R'_{\text{HK}}$	M_{loss}	
	Planet (b)	Planet (c)
-4.94	5.0E+10	5.8E+9
-4.59	2.3E+11	2.7E+10

вы: горячий юпитер, TOI-1408 b имеет период обращения $P = 4.42^d$, $M = (1.86 \pm 0.02) M_{\text{Jup}}$, $R = (2.4 \pm 0.5) R_{\text{Jup}}$, транзиты имеют V-образную форму. Радиус внутренней планеты (c) (субнептуна) составляет $(2.22 \pm 0.06) R_{\oplus}$, а масса $(7.6 \pm 0.2) M_{\oplus}$. Также измерения лучевых скоростей свидетельствуют в пользу существования дополнительного небесного тела с периодом обращения несколько тысяч дней. По мнению авторов работы [1] система TOI-1408 интересна, поскольку позволяет изучать процессы миграции планет типа горячий юпитер в случаях, когда менее массивная планета (c) находится ближе к звезде, чем более массивная (b). По архивным измерениям блеска TOI-1408 (проект DASCH) мы сделали оценки величины возможной циклической долговременной переменности объекта. Анализ переменности блеска TOI-1408 по данным Kamogata Wide-field Survey (KWS) указал на наличие в спектре мощности пиков, соответствующих величине P около 7.5^d , ранее найденного в работе [1].

Вычисления величины оттока вещества из атмосфер планет было проведено для двух значений параметра $\log R'_{\text{HK}}$ (-4.94 и -4.59), соответствующих максимумам бимодального распределения этого параметра для малоактивных и активных звезд спектрального класса F. Потеря вещества атмосферы планеты (b) (горячего юпитера) может достигать $2.3 \times 10^{11} \text{ г/с}$, а субнептуна — планеты (c) — $2.7 \times 10^{10} \text{ г/с}$ для величины $\log R'_{\text{HK}} = -4.59$.

На рис. 3 представлено сопоставление полученных нами данных о потере вещества атмосферами планет системы с результатами исследования [11] (см. рис. 11 в [11]). Авторы работы [11] опубликовали сведения о скорости потери вещества для 287 экзопланет на основе новых измерений рентгеновской светимости звезд с планетными системами по данным миссии eROSITA. Мы сопоставили наши результаты с данными из статьи [11], в том

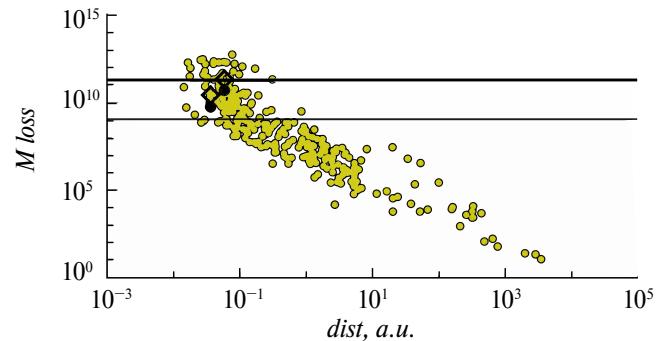


Рис. 3. Зависимость потери вещества атмосферами экзопланет от расстояния до звезды по данным [11] (светлые кружки). Темные кружки — величины M_{loss} для планет TOI-1408 при значениях параметра $\log R'_{\text{HK}} = -4.94$, ромбы — при $\log R'_{\text{HK}} = -4.59$. Уровни величин M_{loss} для горячего юпитера HD 189733 b и теплого нептуна GJ 436 b ограничены толстой и тонкой горизонтальными линиями соответственно

числе для горячего Юпитера HD 189733 b и теплого Нептуна GJ 436 b (уровни величин M_{loss} для них на рис. 3 ограничены толстой и тонкой горизонтальными линиями соответственно). Полученные нами данные достаточно хорошо согласуются с результатами, найденными для экзопланет соответствующих типов. Учитывая значительную величину возможного оттока вещества из атмосфер планет, TOI-1408 может быть включена в число приоритетных объектов для наблюдений с УФ космическим телескопом Спектр-УФ [12, 13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. Korth, P. Chaturvedi, H. Parviainen, I. Carleo, et al.*, *Astrophys. J. Letters* 971(2), id. L28 (2024).
2. *L.M. Weiss, G.W. Marcy, E.A. Petigura, B.J. Fulton, et al.*, *Astron. J.* 155(1), id. 48 (2018).
3. *I.S. Savanov*, *Astrophys. Bull.* 78(4), 588 (2023).
4. *J. Grindlay, S. Tang, E. Los, and M. Servillat*, *New Horizons in Time Domain Astronomy IAU Symp.* 285, 29 (2012).
5. *J. Gomes da Silva, N.C. Santos, V. Adibekyan, S.G. Sousa, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 646, id. A77 (2021).
6. *N.V. Erkaev, Yu.N. Kulikov, H. Lammer, F. Selsis, D. Langmayr, G.F. Jaritz, and H.K. Biernat*, *Astron. and Astrophys.* 472(1), 329 (2007).
7. *T.T. Koskinen, P. Lavvas, C. Huang, G. Bergsten, R.B. Fernandes, and M.E. Young*, *Astrophys. J.* 929(1), id. 52 (2022).
8. *E.S. Kalinicheva, V.I. Shematovich, and I.S. Savanov*, *Astron. Rep.* 66(12), 1318 (2022).
9. *I.S. Savanov and V.I. Shematovich*, *Astrophys. Bull.* 76(4), 450 (2021).
10. *A.G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, K. France, and S. Ambily*, *Astron. and Astrophys.* 644, id. A67 (2020).
11. *G. Foster, K. Poppenhaeger, N. Ilic, and A. Schwabe*, *Astron. and Astrophys.* 661, id. A23 (2022).
12. *B.M. Shustov, M.E. Sachkov, S.G. Sichevsky, A.S. Shugarov, et al.*, *INASAN Sci. Rep.* 5(5), 306 (2020).
13. *M. Sachkov, A.I. Gómez de Castro, B. Shustov, S. Sichevsky, and A. Shugarov*, *Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*, *Proc. SPIE* 12181, id. 121812S (2022).

ACTIVITY OF THE STAR TOI-1408 AND MASS LOSS BY THE ATMOSPHERES OF ITS EXOPLANETS

© 2025 I. S. Savanov

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: isavanov@inasan.rssi.ru

We consider the properties of the multiplanetary system TOI-1408, consisting of a hot Jupiter (planet (b), $(1.86 \pm 0.02) M_{\text{Jup}}$, $(2.4 \pm 0.5) R_{\text{Jup}}$) and a sub-neptune (planet (c), $(2.22 \pm 0.06) R_{\oplus}$, $(7.6 \pm 0.2) M_{\oplus}$) orbiting a star of spectral class F. Measurements of radial velocities indicate the existence of an additional celestial body with an orbital period of several thousand days. The TOI-1408 system makes it possible to study the migration processes of hot Jupiter-type planets in cases where a less massive planet (c) is closer to the star than a more massive one (b). Based on archival measurements of the TOI-1408 brightness (DASCH project), we made estimates of the length of the possible cyclic long-term variability of the object (equal to about 10 500 days). The analysis of the brightness variability of TOI-1408 according to the Kamogata Wide-field Survey (KWS) archive led to the detection of peaks in the power spectrum corresponding to a rotation period of about 7.5 days. Estimates of the mass loss of the planets' atmospheres were obtained, which were established for two values of the parameter $\log R'_{\text{HK}}$ (-4.94 and -4.59) corresponding to the maxima of the bimodal distribution of this parameter for low and high activity for stars of spectral class F. The mass loss of planet (b) (hot Jupiter) can reach 2.3×10^{11} g/s, and of the sub-neptune — planet (c) — 2.7×10^{10} g/s for the value $\log R'_{\text{HK}} = -4.59$. The obtained data are in good agreement with the results for exoplanets of the corresponding types (including for hot Jupiter HD 189733 b and warm Neptune GJ 436 b).

Keywords: exoplanets, atmospheres, mass loss, activity, cycles