

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗДЫ TOI-784 И ПОТЕРЯ АТМОСФЕРНОЙ МАССЫ ЕЕ ПЛАНЕТОЙ

И.С.САВАНОВ

Поступила 1 декабря 2023

Принята к печати 7 марта 2024

Рассмотрены свойства планетной системы TOI-784, в которой землеподобная планета обращается около малоактивной звезды солнечного типа. Архивные измерения блеска TOI-784 в V-фильтре из базы данных ASAS 4 не позволяют найти достоверные указания на переменность блеска вследствие вращения, а также на циклическую долговременную переменность объекта. Возможная оценка величины периода вращения звезды составляет $Prot/sini = 41.7 \pm 11.4$ сут. Возраст системы согласно эмпирическим гирохронологическим соотношениям равен 7.8 ± 3.4 млрд лет. Установлена средняя величина параметра хромосферной активности $\log R'_{HK} = -4.99$, которая соответствует уровню малоактивных звезд с аналогичными показателями цвета ($B - V$) и близка к солнечному. 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. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы планеты составляет $4.7 \cdot 10^8 \text{ г/с}$. Сравнительно низкая величина потери вещества атмосферой планеты, несмотря на высокую эффективную температуру атмосферы звезды и близость планеты к звезде, вероятно, связана с низким уровнем активности звезды.

Ключевые слова: *звезды: активность: пятна: фотометрия: переменность: планетные системы: атмосферы экзопланет*

1. *Введение.* Авторы [1] сообщили о подтверждении транзитной планеты-суперземли, обнаруженной с помощью космической миссии TESS, вращающейся вокруг звезды солнечного типа спектрального класса G HD 307842 (TOI-784). Период обращения планеты равен 2.8 сут, по измерениям лучевой скорости (RV) было установлено, что ее масса составляет $9.67 \pm (0.83 - 0.82) M_{\oplus}$. Также была открыта планета-кандидат на внешней орбите, которая, скорее всего, не является транзитной. Величина периода обращения планеты-кандидата составляет приблизительно от 20 до 63 сут, при этом соответствующие полуамплитуды RV, как ожидается, могут варьироваться от 3.2 до 5.4 м/с, а массы - от 12.6 до $31.1 M_{\oplus}$. Радиус планеты b (найденной методом транзитов) имеет значение $1.93 \pm (0.11 - 0.09) R_{\oplus}$, что приводит к средней плотности $7.4 \pm (1.4 - 1.2) \text{ г/см}^3$, в предположении, что TOI-784 b является каменной планетой. Согласно 1, на диаграмме "радиус - инсоляция планеты"

объект TOI-784 b расположен на краю так называемой "долины радиуса".

Интерес к планетной системе TOI-784 обусловлен тем, что в ней землеподобная планета обращается около звезды солнечного типа, которая по предварительным оценкам [1], является достаточно малоактивной. Отметим, что исследования большинства звезд, проведенные нами ранее (см. [2-4]), как правило, выполнялись для систем с достаточно высокой активностью родительской звезды.

2. Проявления активности TOI-784. Согласно [1], эффективная температура звезды равна 5558 ± 100 К, ускорение силы тяжести $\log g = 4.48 \pm 0.10$, радиус $R/R_{\odot} = 0.907 \pm 0.017$, светимость $L/L_{\odot} = 0.119 \pm 0.013$ и масса $M/M_{\odot} = 0.91 \pm 0.10$. Объект TOI-784 отождествлен с источником Gaia EDR3 5251941573573934080, его параллакс составляет π (mas) = 15.4833 ± 0.0108 .

Авторы [1] рассмотрели 963 архивных измерения блеска TOI-784 в V-фильтре по базе данных ASAS 4 (начиная с 21 декабря 2000г. по 3 декабря 2009г.). По принятой авторами методике были отобраны 883 величины, отнесенные к классам А и В, которые представляют измерения самого высокого качества. Результаты выполненного авторами [1] периодограммного анализа показаны на рис.1. Был сделан вывод об отсутствии переменности блеска вследствие вращения, который позволяет предположить, что TOI-784, вероятно, является малоактивной звездой, на поверхности которой в эпоху наблюдений пятна практически отсутствовали. Отметим, что данные, представленные на рис.1, также указывают на отсутствие циклической долговременной переменности объекта.

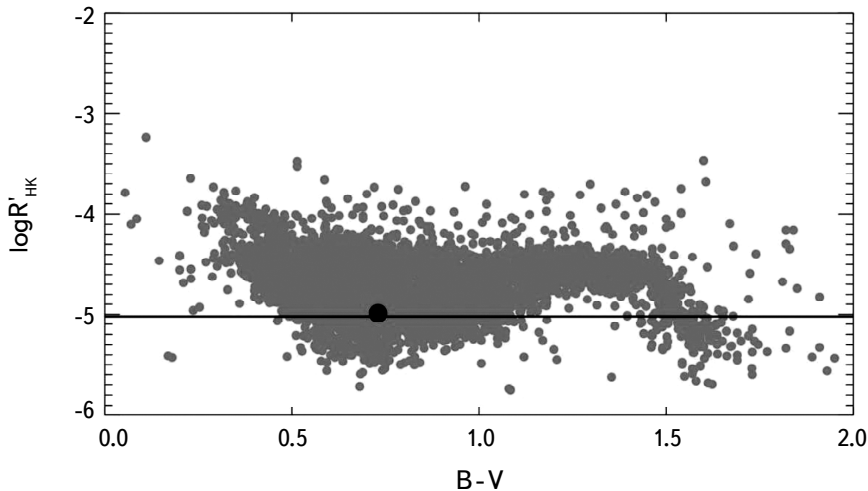


Рис.1. Диаграмма $\log R'_{HK}$ - показатель цвета ($B - V$). Темный символ соответствует TOI-784, светлые символы - данные каталога [5], горизонтальная линия - соответствует значению параметра $\log R'_{HK}$ для Солнца в спокойном состоянии (см. текст).

Используя оценки радиуса звезды и оцененной по спектральным наблюдениям скорости вращения $v \sin i$, авторы [1] привели определение величины возможного периода вращения звезды, который равен $Prot/\sin i = 41.7 \pm 11.4$ сут. Возраст системы был оценен в [1] с помощью эмпирических гирохронологических соотношений и составил 7.8 ± 3.4 млрд лет. Можно сделать заключение, что, скорее всего, TOI-784 принадлежит к числу звезд солнечного типа, достаточно старых и малоактивных.

По спектрам, полученным с Planet Finder Spectrograph (PFS) спектрографом 6.5-метрового телескопа Magellan II Clay, авторы [1] определили значения показателя звездной активности параметра S_{HK} , измеренного по линиям CaII H и K (было рассмотрено 13 спектрограмм, содержащих указанные линии). К сожалению, малое число измерений не могло дать информацию о возможной циклической активности (или какой-либо переменности вообще). В конечном итоге в [1] было получено, что средняя величина параметра $\log R'_{HK}$ равна -4.99.

На рис.1 приведена диаграмма $\log R'_{HK}$ - показатель цвета ($B - V$). Светлые символы - данные каталога [5], а темный кружок - TOI-784. Горизонтальная линия соответствует значению параметра $\log R'_{HK}$ для Солнца в спокойном состоянии. Можно сделать вывод о том, что уровень хромосферной активности TOI-784 близок к характерному для малоактивных звезд с аналогичными показателями цвета ($B - V$), при этом сам уровень практически совпадает с солнечным (для Солнца $\log R'_{HK} = -5.021$, см. в [5]).

Представляется интересным сопоставить данные о величине $\log R'_{HK}$ для TOI-784 из [1] с результатами из [6] о распределении величин этого параметра для звезд спектрального класса G. Согласно [6] это распределение имеет два или, возможно, три пика с максимумами для величин порядка -5.00 dex у малоактивных звезд и -4.50 dex - у активных. Доля активных G карликов составляет около 20 процентов. TOI-784 принадлежит к малоактивным звездам спектрального класса G, число которых по данным [6] достигает ~80 процентов в их выборке.

Результаты о величине параметра $\log R'_{HK}$ и активности TOI-784 из [1] требуют дальнейшего уточнения, не исключено, что звезда является либо действительно крайне малоактивной, либо находится в состоянии своей пониженной активности (сведения о возможной циклической переменности хромосферной активности звезды, которая может сказаться на результатах проводимых нами оценок, отсутствуют).

3. *Потеря вещества атмосферы TOI-784 b.* Как указывалось выше, TOI-784 b является планетой типа суперземля с массой порядка $M = 9.67 M_{\oplus}$ и большой полуосью орбиты 0.038 а.е. Согласно [1] экзопланета предположительно может содержать в оболочке небольшое количество летучих

веществ с тяжелыми молекулами, такими как H_2O или CO_2 вместо H/He . Ответ на вопрос о присутствии у планеты остаточной H/He оболочки не ясен. Однако, если планета все же с течением времени теряет свою атмосферу, то для подсчета такой потери без детального моделирования системы можно попробовать использовать аппроксимационную формулу (см., например, [7,8]), обычно называемую, 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, и включен учет приливного эффекта:

$$\frac{dM_p}{dt} \approx \frac{\varepsilon_{XUV} \pi F_{XUV} R_p R_{XUV}^2}{GM_p K_{tide}(\xi)}, \quad (1)$$

где ε_{XUV} - параметр эффективности нагрева ($\varepsilon_{XUV} = 0.2 \pm 0.1$ для миниплутонов и супер-земель); G - гравитационная постоянная; F_{XUV} - поток XUV-фотонов; R_p - радиус планеты; M_p - масса планеты; R_{XUV} - радиус поглощения XUV-фотонов; $K_{tide}(\xi)$ - приливный параметр. Подробности использования соотношения (1) можно найти во многих литературных источниках, в том числе в [7-9].

Основные данные о планете TOI-784 *b* были взяты из [1]. Для вычислений по формуле (1) нужны оценки величины - (потока XUV-фотонов). Для этой цели нами были использованы аналитические зависимости, полученные в [10], связывающие величину F_{XUV} потока и параметр $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M. Как указывалось в [1], TOI-784 является достаточно малоактивной звездой солнечного типа (см. выше). Расчеты по соотношению (1) показали, что потеря вещества атмосферы составляет значение $4.7 \cdot 10^8$ г/с для величины $\log R'_{HK} = -4.99$. Сравнительно низкая величина потери вещества атмосферы планеты, несмотря на высокую эффективную температуру атмосферы звезды (спектрального класса G) и близость планеты к звезде, вероятно, связана с низким уровнем активности звезды (величина потока XUV-фотонов равна $7.8 \cdot 10^{27}$ эрг/с).

4. **Заключение.** Рассмотрены свойства планетной системы TOI-784, в которой землеподобная планета обращается около малоактивной звезды солнечного типа. По архивным измерениям блеска TOI-784 в V-фильтре из базы данных ASAS 4 авторы [1] сделали выводы об отсутствии переменности блеска вследствие вращения, а также об отсутствии циклической долговременной переменности объекта. Согласно [1], возможная величина периода вращения звезды составляет $Prot/sini = 41.7 \pm 11.4$ сут. Возраст системы согласно эмпирическим гирохронологическим соотношениям равен 7.8 ± 3.4 млрд лет. В [1] была получена средняя величина параметра хромосферной

активности $\log R'_{HK} = -4.99$. Она соответствует уровню, характерному для малоактивных звезд с аналогичными показателями цвета ($B - V$) и при этом практически совпадает с солнечным (для Солнца $\log R'_{HK} = -5.021$).

Свойства планеты b и второго предполагаемого кандидата системы TOI-784 приведены в табл.8 в [1]. Радиус планеты b равен $1.93 R_{\oplus}$, масса - $9.67 M_{\oplus}$, ее средняя плотность - 7.4 г/см^3 (планета является каменной). Результаты из [1] были использованы для оценки потери вещества атмосферой планеты TOI-784 b. В нашем исследовании была применена аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Для вычислений по указанной формуле оценки величины F_{XUV} - (поток XUV-фотонов) были установлены по аналитической зависимости, связывающей F_{XUV} и параметр $\log R'_{HK}$. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы составляет $4.7 \cdot 10^8 \text{ г/с}$.

Авторы [1] вычислили показатели трансмиссионной спектроскопии (TSM) и эмиссионной спектроскопии (ESM) для планеты TOI-784 b, используя уравнения (1) и (4) из [11]. Полученные значения TSM и ESM равны 36.2 и 6.8, соответственно. Они находятся ниже порогового значения, рекомендованного в [11] для целей высококачественных исследований атмосфер планет с радиусом $1.5 - 10 R_{\oplus}$, например, с космическим телескопом Джеймса Уэбба (JWST). Тем не менее, лишь последующие наблюдения высокой точности могли бы дать возможность установить, что планета сохранила небольшой остаток первичной атмосферы. При этом не исключается (см. в [1]), что планета TOI-784 b может содержать небольшое количество летучих веществ с тяжелыми молекулами, такими как H_2O или CO_2 . Наконец, отметим, что авторы [1] также нашли в системе планету-кандидата, выявленную в результате проведенных наблюдений RV. Точность оценки параметров второй планеты невысока - периоды ее обращения могут варьироваться от 20 до 63 сут, а масса от 12 до $31 M_{\oplus}$. С учетом того, что минимальная масса велика, кандидат, вероятно, является планетой типа нептун.

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

Учреждение Российской академии наук, Институт астрономии РАН,
Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

ACTIVITY OF TOI-784 AND MASS LOSS OF ITS PLANET ATMOSPHERE

I.S.SAVANOV

The properties of the TOI-784 planetary system in which a super-Earth planet orbits a low-activity solar-type star are considered. According to archival measurements of the TOI-784 in V-filter from the ASAS 4 database the brightness variability due to rotation as well as the cyclic long-term variability of the object were not established. A possible estimate of the rotation period of the star is $Prot/sini = 41.7 \pm 11.4$ days. The age of the system according to empirical gyrochronological relation is 7.8 ± 3.4 Gyr. The average value of the chromospheric activity parameter $\log R'_{HK} = -4.99$ has been established, it corresponds to the level of low-activity stars with similar color index ($B - V$) and is close to the solar one. The radius of the planet TOI-784 b is $1.93 R_{\oplus}$, the mass is $9.67 M_{\oplus}$, its average density is 7.4 g/cm^3 (the planet is rocky). The estimation of the mass loss by the atmosphere of the planet TOI-784 b was obtained by the approximation formula corresponding to the energy-limited model. Calculations have shown that the mass loss value is $4.7 \cdot 10^8 \text{ g/s}$. The relatively low value of mass loss by the planet's atmosphere, despite the high effective temperature of the star's atmosphere and the proximity of the planet to the star is probably due to the low level of star activity.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. X.Hua, S.X.Wang, J.K.Teske *et al.*, *Astron. J.*, **166**, 32, 2023.
2. I.S.Savanov, *Astron. Lett.*, **49**, 000, 2023.
3. I.S.Savanov, *Astron. Rep.*, **67**, 719, 2023.
4. I.S.Savanov, *Astron. Lett.*, **48**, 267, 2022.
5. S. Boro Saikia, C.J.Marvin, S.V.Jeffers *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **616**, A108, 2018.
6. J. Gomes da Silva, N.C.Santos, V.Adibekyan *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **646**, A77, 2021.
7. T.T.Koskinen, P.Lavvas, M.Huang *et al.*, *Astrophys. J.*, **929**, 52, 2022.
8. N.V.Erkaev, Yu.N.Kulikov, H.Lammer *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **472**, 329, 2007.
9. E.S.Kalinicheva, V.I.Shematovich, I.S. Savanov, *Astron. Rep.*, **66**, 1319, 2022.
10. A.G.Sreejith, L.Fossati, A.Youngblood *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **644**, A67, 2020.
11. E.M.-R.Kempton, J.L.Bean, D.R.Louie *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **130**, 114401, 2018.