

DOI: 10.54503/0571-7132-2025.68.2-169

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗДЫ TIC 88785435 И ПОТЕРЯ МАССЫ АТМОСФЕРЫ ЕЕ ПЛАНЕТЫ

И.С.САВАНОВ

Поступила 21 февраля 2025

Принята к печати 4 июня 2025

Рассмотрены проявления активности молодой звезды спектрального класса K7V TIC 88785435, а также получены оценки величины возможного оттока вещества из атмосферы ее экзопланеты. TIC 88785435 является членом подгруппы ϕ Lyr с возрастом 9.9-17.7 млн лет, возраст самой звезды равен 16.0 ± 1.6 млн лет. Анализ данных наблюдений миссии TESS показал, что запятанность поверхности звезды составляет 6.3 и 10.5% от видимой площади ее поверхности или в абсолютной величине - 43000 и 71300 м.д.п. для наблюдений TESS в секторах 38 и 65, соответственно. Для наиболее достоверной вспышки была измерена излученная энергия - $1.03 \cdot 10^{33}$ эрг. Планета TIC 88785435 b относится к типу супер-нептунов, она обращается по орбите с периодом 10.51 сут, ее радиус составляет $R_b = 5.03 R_{\oplus}$, а масса $M_b = 20.0 M_{\oplus}$ (по нашей оценке с использованием эмпирических соотношений для $M - R$). Согласно выполненным расчетам по модели потери атмосферы с ограничением по энергии для TIC 88785435 b, было найдено, что в зависимости от уровня активности звезды, величина оттока вещества атмосферы экзопланеты может находиться в интервале $2.7 \cdot 10^8$ г/с - $1.7 \cdot 10^9$ г/с.

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

1. *Введение.* В статье [1] сообщается об обнаружении планетной системы TIC 88785435, принадлежащей области Upper-Centaurus Lupus (UCL) в ассоциации Scorpius-Centaurus OB (Sco-Cen). Являясь одной из крупнейших близлежащих областей звездообразования, Sco-Cen включает в себя идеальный набор объектов для поиска молодых транзитных планет, которые имеют достоверно определенный возраст и образовались в сходных условиях.

Область Sco-Cen принято подразделять на три отдельные подгруппы в зависимости от их галактических координат: Upper Scorpius (USco), Upper Centaurus-Lupus (UCL) и Lower Centaurus-Crux (LCC) с возрастом от 8 до 11 млн лет (первая из них) и от 15 до 20 млн лет (вторая и третья). Однако точность этого деления уже давно является предметом многочисленных исследований, поскольку члены каждой группы демонстрируют широкий возрастной разброс (см. более подробное обсуждение в [1]). TIC 88785435 рассматривается как член подгруппы ϕ Lyr (возраст 9.9-17.7 млн лет), лежащей внутри границ области UCL. Планетная система TIC 88785435 состоит из

звезды спектрального класса K7V и экзопланеты - супер-нептуна.

Изучение свойств планет моложе 50-100 млн лет помогает протестировать различные модели формирования и эволюции планет. На физические и химические свойства формирующихся планет могут влиять как продолжающийся процесс выпадения планетоземалей, так и магнитная активность центральной молодой звезды (выражающаяся в ее избыточном УФ, рентгеновском излучении, а также в корональных выбросах), которая может изменять физические свойства атмосфер близких планет и даже приводить к полному разрушению этих атмосфер. Очевидно, что механизмы формирования и эволюции, ответственные за создание планет, демонстрируют свои самые быстрые проявления в первые несколько сотен миллионов лет после образования планетных систем. Результаты выявления и изучения статистических свойств планетных систем в близлежащих молодых скоплениях, областях звездообразования и ассоциаций OB, а также движущихся групп звезд, можно найти в публикациях сотрудничества типа - поиск "зодиакальных экзопланет во времени (ZEIT)", TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets (THYME) и др. (см., например, [1]).

В этой статье приводятся результаты исследования проявлений активности молодой звезды TIC 88785435, а также оценки величины возможного оттока вещества из атмосферы ее планеты.

2. *Проявления активности TIC 88785435.* Согласно [1], эффективная температура TIC 88785435 (UCAC4 296-080560, 2MASS J14570814-3052476) равна 3998 ± 95 K, радиус $R/R_{\odot} = 0.911 \pm 0.038$ и масса $M/M_{\odot} =$

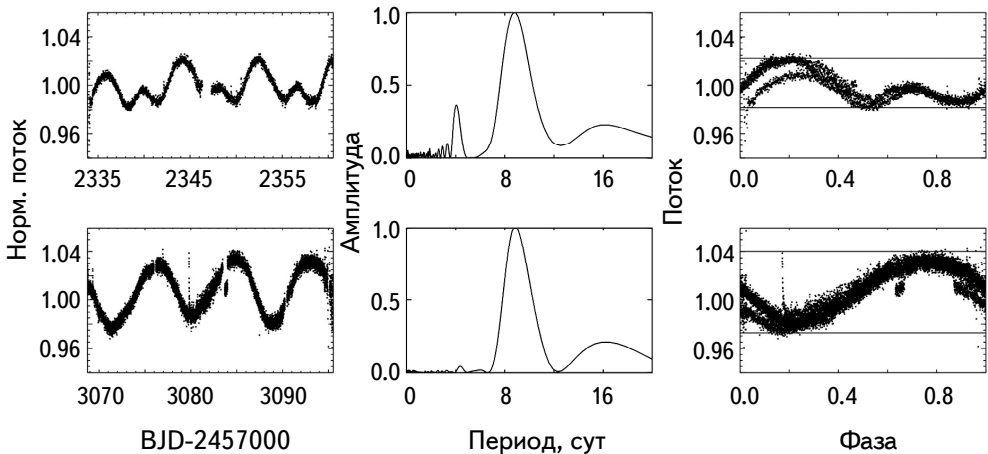


Рис.1. Слева - кривые блеска TIC 88785435, в центре - спектры мощности переменности блеска, справа - фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 38 и 65.

$= 0.724 \pm 0.017$. Объект TIC 88785435 отождествлен с источником Gaia EDR3 6205812887538362624, его параллакс составляет π (mas) $= 8.1908 \pm 0.0153$.

Нами были проанализированы наблюдения TIC 88785435 из архива космической миссии TESS. Данные были получены для двух секторов - 38 и 65 (рис.1). Была отмечена переменность блеска, характерная для проявлений вращательной модуляции. Форма кривой блеска для секторов 38 и 65 различается. В первом случае на кривой присутствуют два минимума, во втором - один, но большей глубины. Имеющиеся пики на спектрах мощности соответствуют периодам вращения 8.7 и 8.9 сут (в [1] приводится близкая величина 8.49 ± 0.50 сут). При этом, на спектре мощности для данных сектора 38 имеется пик в диапазоне, соответствующем половинному фотометрическому периоду вращения звезды, что может свидетельствовать о присутствии на поверхности звезды двух активных областей, отстоящих друг от друга примерно на 180 градусов.

Данные наблюдений миссии TESS позволяют сделать заключения о запятненности поверхности звезды. Такой анализ был проведен с помощью модифицированной программы *activity* [2]. Используя применяемый нами ранее подход, установлено, что доля поверхности TIC 88785435, занимаемая пятнами, равна 6.3 и 10.5% от видимой площади поверхности звезды, что при принятой из [1] величине радиуса звезды составляет в абсолютной величине A (выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) 43000 и 71300 м.д.п. для секторов 38 и 65, соответственно. По нашей оценке площадь пятен на поверхности TIC 88785435 значительно превосходит величину A , характерную для Солнца [3].

TIC 88785435 можно отнести к числу объектов с планетными системами, у которых были открыты вспышки (см. рис.1 и рис.2). На рис.2 приводится

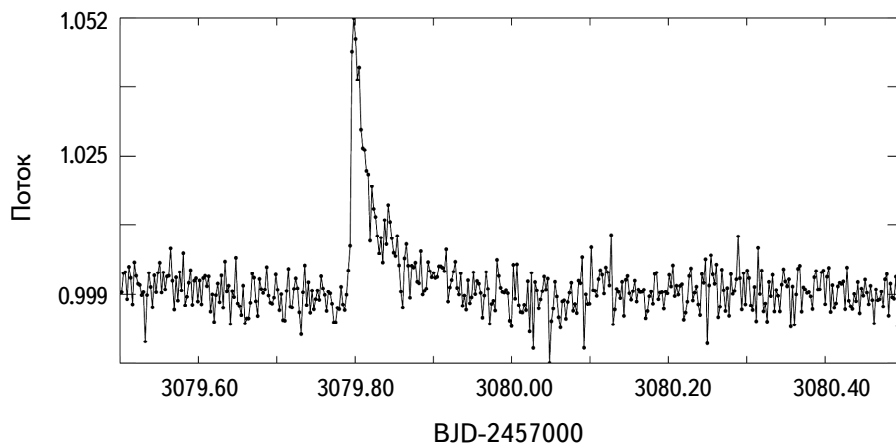


Рис.2. Фрагмент кривой блеска TIC 88785435, содержащий вспышку (см. текст).

фрагмент кривой со вспышкой, которая обладает структурой, характерной для вспышек звезд позднего спектрального класса - резкий подъем, пик, стадия затухания. Мы ограничимся рассмотрением только этой, наиболее достоверной, вспышки, которая позволит дать представление о свойствах вспышечной активности TIC 88785435. Продолжительность вспышки равна примерно 0.10 - 0.15 сут. Энергия излучения вспышки была вычислена по стандартной методике, принятой при анализе вспышечной активности звезд по наблюдениям с космическим телескопом Кеплер или миссией TESS (см. в [4,5]). Данная методика уже неоднократно использовалась для определений энергии вспышек звезд по наблюдениям миссии TESS с учетом изменения полосы пропускания для этой космической миссии - см., например, описание в [6]. Как и в [6], нами принималось, что вспышка характеризуется чернотельным излучением. Измеренная относительная энергия вспышки RE составила 103 с. Вычисленная по формулам из [6] энергия, излученная во вспышке, оказалась равной - $1.03 \cdot 10^{33}$ эрг. Наличие дефектов и качество наблюдательного материала не позволяют с надежностью регистрировать более слабые вспышки (меньших энергий).

Авторы [7] привели сведения о вспышечной активности звезд с планетными системами по наблюдениям телескопа Кеплер и миссии TESS. Зависимость величин энергии вспышек звезд от их эффективных температур представлена на рис.3, на этой же диаграмме нанесен полученный нами результат для TIC 88785435. Имеется достаточно хорошее согласие в результатах об энергии вспышек для TIC 88785435 и звезд с планетными системами из [6], имеющих сопоставимые эффективные температуры.

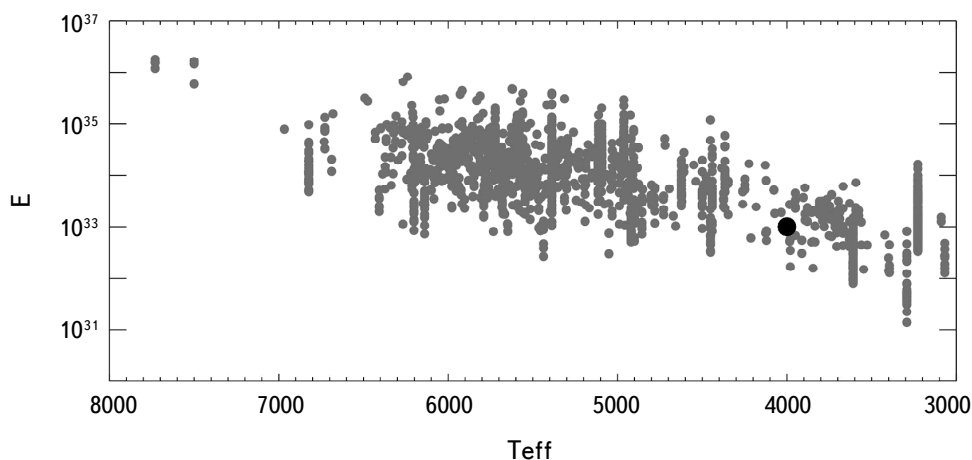


Рис.3. Зависимость величин энергии вспышек E от эффективных температур звезд. Светлые кружки - данные [7] для звезд с планетными системами. Крупный темный кружок - данные для TIC 88785435.

Возраст системы был оценен в [1], он составил 16.0 ± 1.6 млн лет. Можно сделать заключение, что ТИС 88785435 принадлежит к числу сверхмолодых и активных звезд. К сожалению, авторы [1] не приводят информацию об уровне хромосферной активности ТИС 88785435. Оценку величины индекса $\log R'_{HK}$, необходимого нам в дальнейшем для определения величины оттока вещества из атмосферы экзопланеты (см. ниже), мы выполнили косвенным образом. Отметим, что согласно результатам из [8], распределения величин параметра хромосферной активности для звезд спектрального класса G-K также могут иметь два (или, возможно, даже три) пика для K звезд. Скорее всего, звезда может обладать высокой активностью, попадая в группу активных звезд (минимальные значения параметра $\log R'_{HK}$). Тем не менее, дальнейшие вычисления мы проводили, принимая три значения параметра $\log R'_{HK}$ (-4.94, -4.74 и -4.52), соответствующих максимумам распределений для K карликов (см. табл.6 в [8]). Сведения о циклической переменности хромосферной активности звезды отсутствуют.

3. Потеря вещества атмосферы ТИС 88785435 b. Как указывалось в [1], ТИС 88785435 b является планетой типа супер-нептун с радиусом $R = 5.03 \pm 0.21 R_{\oplus}$ и большой полуосью орбиты 0.08432 ± 0.00068 а.е. Равновесная температура экзопланеты равна 635 ± 16 К.

Для оценки массы ТИС 88785435 b нами было использовано эмпирическое соотношение M - R , представленное в [9], которое было получено на основе тщательно отобранной выборки из 1053 подтвержденных экзопланет. Авторы [9] привели эмпирические соотношения между параметрами: массы, радиусы и температуры экзопланет (M - R - T). Авторы [9] предложили модель, в которой режим скалистых планет соответствует соотношению $M \approx R^{0.34 \pm 0.01}$, в то время как для планет типа нептун $M \approx R^{0.55 \pm 0.02}$. Для планет типа юпитер соотношение имеет более сложный вид $M \approx R^{0.00 \pm 0.01} T_{eq}^{0.35 \pm 0.02}$, где T_{eq} - равновесная температура планеты. Также они показали, что для планет типа нептун может быть использовано более простое соотношение (см. формулу (5) в [9]) $R/R_{\oplus} = k(M/M_{\oplus})^{\beta}$. В этом случае параметры $k = 0.53 \pm 0.05$ и $\beta = 0.68 \pm 0.02$. Применяя это соотношение, мы смогли получить массу ТИС 88785435 b, которая составляет $20 M_{\oplus}$.

Экзопланета типа горячего непуна с течением времени может терять свою гелиево-водородную атмосферу. Для подсчета потери вещества M_{loss} (dM_p/dt) (без детального моделирования процессов в системе звезда - планета) в нашем исследовании использовалась часто применяемая аппроксимационная формула [10,11], известная, 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. Подробности использования соотношения (1) можно найти во многих литературных источниках, в том числе в [9-12].

Для оценки величины F_{XUV} - (потока XUV - фотонов) были использованы аналитические зависимости, полученные в [13] и связывающие величину F_{XUV} потока и параметр $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M. Расчеты показали, что величины потери вещества атмосферы составляют $2.7 \cdot 10^8$ г/с, $6.4 \cdot 10^8$ г/с и $1.7 \cdot 10^9$ г/с для величин $\log R'_{HK} = -4.94$, -4.74 и 4.52 .

4. Заключение. В статье приведены результаты исследования проявлений активности молодой звезды TIC 88785435 спектрального класса K7V, а также оценки величины возможного оттока вещества из атмосферы ее планеты. TIC 88785435 является членом подгруппы ϕ Lyr с возрастом 9.9-17.7 млн лет, возраст самой звезды составляет 16.0 ± 1.6 млн лет. По данным наблюдений миссии TESS нами сделано заключение о запятненности поверхности звезды. Доля поверхности TIC 88785435, занимаемая пятнами, равна 6.3 и 10.5% от видимой площади ее поверхности. При принятой величине радиуса звезды, она составляет (в абсолютной величине, выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) 43000 и 71300 м.д.п. для наблюдений TESS в секторах 38 и 65, соответственно. Рассмотрены свойства вспышечной активности TIC 88785435. Для наиболее достоверного события была измерена относительная энергия вспышки, которая составила 103 с. Излученная во вспышке энергия оказалась равной $1.03 \cdot 10^{33}$ эрг.

Планета TIC 88785435 b относится к типу супер-нептунов, она вращается по орбите с периодом 10.51 сут и имеет равновесную температуру $T_{eq,b} = 635 \pm 16$ К. Радиус планеты $R_b = 5.03 R_{\oplus}$, а масса $M_b = 20.0 M_{\oplus}$ (получено нами по эмпирическому соотношению для $M-R$ из [9]). По выполненным нами расчетам по модели потери атмосферы с ограничением по энергии для TIC 88785435 b было найдено, что в зависимости от уровня активности звезды, величина оттока вещества атмосферы экзопланеты может находиться в интервале $2.7 \cdot 10^8$ г/с - $1.7 \cdot 10^9$ г/с.

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 TIC 88785435 AND MASS LOSS OF ITS PLANET ATMOSPHERE

I.S.SAVANOV

We investigate the activity of a young K7V star TIC 88785435 and estimate the mass loss from the atmosphere of its exoplanet. TIC 88785435 is a member of the ϕ Lup subgroup with an age of 9.9-17.7 million years. The age of the star itself is 16.0 ± 1.6 million years. According to the analysis of the observations of the TESS mission we estimate the spottedness of the star's surface, which is equal to 6.3 and 10.5% of the surface area of the star, or in absolute values 43000 and 71300 MSH for TESS observations in sectors 38 and 65 respectively. For the most reliable flare, the energy emitted in the flare was measured as $1.03 \cdot 10^{33}$ erg. The planet TIC 88785435 b belongs to the super-neptune type, it orbits with a period of 10.51 days, its radius is $R_b = 5.03 R_{\oplus}$, and its mass $M_b = 20.0 M_{\oplus}$ (according to our estimate, using the empirical relations for $M - R$). On the base of the calculations performed using the energy-limited atmospheric loss model for TIC 88785435 b, it was found that depending on the star's activity level the amount of atmospheric mass loss from the exoplanet can be in the range of $2.7 \cdot 10^8$ g/s - $1.7 \cdot 10^9$ g/s.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *S.Vach, G.Zhou, A.W.Mann et al.*, arXiv:2502.00576. doi:10.48550/arXiv.2502.00576.
2. *I.S.Savanov*, Astron. Rep., **62**, 814, 2018.
3. *Y.A.Nagovitsyn, A.A.Osipova*, Astron. Lett., **49**, 421, 2023.
4. *S.Okamoto, Y.Notsu, H.Maehara et al.*, Astrophys. J., **906**, 72, 2021.
5. *Z.-L.Tu, M.Yang, H.-F.Wang, F.Y.Wang*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **253**, 35, 2021.
6. *M.N.Gunther, Z.Zhan, S.Seager et al.*, Astron. J., **159**, 60, 2020.
7. *T.Su, L. Yun Zhang, L.Long et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **261**, 26, 2022.
8. *J.Gomes da Silva, N.C.Santos, V.Adibekyan et al.*, Astron. Astrophys., **646**, A77, 2021.
9. *K.Edmondson, J.Norris, E.Kerins*, arXiv:2310.16733, 2023, doi:10.48550/arXiv.2310.16733.

10. *T.T.Koskinen, P.Lavvas, C.Huang et al.*, *Astrophys. J.*, **929**, 52, 2022.
11. *N.V.Erkaev, Yu.N.Kulikov, H.Lammer et al.*, *Astron. Astrophys.*, **472**, 329, 2007.
12. *E.S.Kalinicheva, V.I.Shematovich, I.S.Savanov*, *Astron. Rep.*, **66**, 1319, 2022.
13. *A.G.Sreejith, L.Fossati, A.Youngblood et al.*, *Astron. Astrophys.*, **644**, A67, 2020.