

ПОТЕРЯ МАССЫ АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТЫ TOI-1442 c

Е.С.ДМИТРИЕНКО¹, И.С.САВАНОВ²

Поступила 18 января 2024

Принята к печати 7 марта 2024

Рассмотрены свойства планетной системы TOI-1422, в которой две планеты типа нептун вращаются вокруг малоактивной звезды солнечного типа около 5 млрд лет. Ранее нами был проведен анализ проявлений активности звезды TOI-1422, найдены указания на существование возможных циклов активности и рассмотрены оценки величины периода P вращения звезды. Внутренняя планета TOI-1422 b относится к типу горячих нептонов, она вращается по орбите с периодом около 13 сут и имеет равновесную температуру $T_{eq,b} = 867$ К. По выполненным расчетам по модели потери атмосферы с ограничением по энергии для TOI-1422 b была найдена величина оттока вещества атмосферы $9.4 \cdot 10^8$ г/с. Внешняя планета системы TOI-1422 c также может рассматриваться как горячий нептун, она имеет орбитальный период 29.3 сут, ее минимальная масса, $M_c \sin i$, составляет $11.1 M_{\oplus}$, а равновесная температура $T_{eq,c} = 661$ К. Для оценки радиуса TOI-1422 c нами было использовано эмпирическое соотношение $M-R$. Найдено, что потеря вещества атмосферы планеты TOI-1422 c составляет $7.8 \cdot 10^7$ г/с и, с учетом погрешностей ее параметров, она может находиться в диапазоне от $6.1 \cdot 10^7$ г/с до $9.7 \cdot 10^7$ г/с.

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

1. **Введение.** Планеты типа нептун представляют собой один из основных типов экзопланет и обладают химико-физическими характеристиками, находящимися между каменистыми планетами и планетами - газовыми гигантами (см., например, [1]). Авторы [2] исследовали экзопланету - кандидата TOI-1422 b, транзиты которой были обнаружены космическим телескопом TESS с целью подтверждения ее планетарной природы и нахождения ее свойств. В [2] были представлены результаты дополнительных наблюдений этой звезды с помощью спектрографа HARPS-N в течение 1.5 лет для более точного определения изменений ее лучевой скорости. Выполненный анализ позволил уточнить основные параметры объекта и охарактеризовать свойства планеты TOI-1422 b. Кроме того, были высказаны предположения о наличии на более удаленной орбите второй планеты TOI-1422 c с массой нептона, которая не была обнаружена на кривых блеска TESS (вероятно, она не является транзитной). Внутренняя планета, TOI-1422 b, обращается по орбите с периодом 12.9972 ± 0.0006 сут и имеет равновесную температуру $T_{eq,b} = 867 \pm 17$ К. По оценке [2] радиус планеты

$Rb = 3.96(+0.13, -0.11)R_{\oplus}$, масса $Mb = 9.0(+2.3, -2.0)M_{\oplus}$, т.е. планету можно отнести к типу горячих непунов. Авторы [2] предположили, что у этой планеты существует обширная газовая оболочка, окружающая ядро с массой около 10% - 25% от общей массы планеты. Кандидат на внешнюю планету, TOI-1422 c, имеет орбитальный период $29.29(+0.21, -0.20)$ сут. Его минимальная масса, $Mc \sin i$, составляет $11.1(+2.6, -2.3)M_{\oplus}$, равновесная температура $T_{eq,c} = 661 \pm 13$ К и, следовательно, в случае подтверждения, он может рассматриваться как еще один горячий нептун. Отсутствие полного набора необходимых данных для планеты TOI-1422 c не позволило нам в [3] получить сведения о потере вещества ее атмосферой.

В настоящей работе мы рассмотрим данные о новых соотношениях и калибровках для масс и радиусов экзопланет и используем полученные результаты для оценки потери вещества атмосферы планеты TOI-1422 c.

2. Основные свойства и проявления активности TOI-1422. Как и в нашем исследовании [3], основные параметры TOI-1422 были взяты из [2]. Ее эффективная температура составляет 5840 ± 62 К, логарифм ускорения силы тяжести $\log g = 4.41 \pm 0.11$, радиус $R/R_{\odot} = 1.019 \pm 0.14$, светимость $L/L_{\odot} = 1.116 \pm 0.037$, масса $M/M_{\odot} = 0.981 \pm 0.06$. Звезда достаточно старая, ее возраст равен 5.1 ± 3.9 млрд лет. Параллакс TOI-1422 (источник Gaia EDR3 1920333449169516288) составляет π (mas) = 6.4418 ± 0.0138 .

По данным многолетнего фотометрического обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) (наблюдения в фильтрах V и Ic) нами был проведен анализ проявлений активности TOI-1422 в [3]. На основе построенных спектров мощности для блеска TOI-1422 найдены указания на существование возможных циклов активности 1650 - 1680 сут (фильтры V и Ic) и 2450 сут (фильтр V). По литературным оценкам для TOI-1422 следует ожидать, что период P вращения звезды лежит в интервале $27(+19, -8)$ сут. Отметим, что на построенном спектре мощности [3] в интервал, характеризующий вероятный период вращения звезды, попадает набор пиков, среди которых доминирующим является пик для $P = 32$ сут (наблюдения в фильтре V).

Как указывалось в [2], TOI-1422 является достаточно старой звездой с возрастом около 5 млрд лет. По оценке [2], величина показателя звездной хромосферной активности звезды индекса $\log R'_{HK}$, измеренного по линиям CaII H и K в спектрах, полученных с HARPS-N, равна -4.95 ± 0.03 . Это значение в целом согласуется с предположением [2] о том, что звезда сопоставима по возрасту с Солнцем и ее активность лишь немного выше солнечной (для Солнца $\log R'_{HK} = -5.021$ [4]). Однако, следует иметь в виду, что пока мы не располагаем точными сведениями о циклической переменности хромосферной активности звезды, которые могут приводить к разбросу в

оценках величин $\log R'_{HK}$. При этом возможно, что наблюдения TOI-1422 могли быть выполнены, когда звезда находилась в минимуме своей хромосферной активности.

3. *Потеря вещества атмосферы TOI-1422 c.* Ранее в [3] мы выполнили исследование TOI-1422 b. Согласно [2,3], она является планетой типа нептун с массой порядка $M = 9 M_{\oplus}$ и большой полуосью орбиты 0.108 а.е. По оценке [2] плотность TOI-1422 b составляет около 0.8 г/см^3 , она близка к плотности Сатурна и ниже, чем у большинства экзопланет в этом диапазоне масс. Планета расположена ближе к верхнему левому углу диаграммы масса-радиус, что, согласно [2], делает ее очень похожей на экзопланеты Kepler-36 c и Kepler-11 e. TOI-1422 b может обладать обширной газовой оболочкой, окружающей массивное ядро. Ожидается [2], что массовая доля этой оболочки составит около 10-25% от общей массы планеты, если только ранее часть ее атмосферы не была унесена звездным ветром. Природа этой обширной оболочки требует дальнейшего изучения, скорее всего, методами транзитной спектроскопии. Экзопланета типа горячего нептона с течением времени может терять свою гелиево-водородную атмосферу. Для подсчета потери вещества $M_{\text{loss}}(dM_p/dt)$ (без детального моделирования процессов в системе звезда - планета) в нашем исследовании [3] использовалась часто применяемая аппроксимационная формула (см., например, [5,6]), обычно называемая в литературе, как модель потери атмосферы с ограничением по энергии.

В этой модели предполагается, что поток жесткого UV-излучения поглощается в тонком слое радиуса R_{XUV} , где оптическая толщина для звездных XUV-фотонов равна единице и включен учет приливного эффекта:

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

где ε_{XUV} - параметр эффективности нагрева ($\varepsilon_{XUV} = 0.2 \pm 0.1$ для мини-нептунов 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; $K_{\text{tide}}(\xi)$ - приливный параметр. Подробности использования соотношения (1) можно найти во многих литературных источниках, в том числе в [5-7].

Внешняя планета системы, TOI-1422 c, имеет орбитальный период 29.29 (+0.21, -0.20) сут, ее минимальная масса, $M_c \sin i$, составляет $11.1 (+2.6, -2.3) M_{\oplus}$, а равновесная температура $T_{eq,c} = 661 \pm 13 \text{ K}$ и, таким образом, она также может рассматриваться как горячий нептун. Для оценки радиуса TOI-1422 c нами было использовано эмпирическое соотношение $M - R$,

представленное в [8], которое было получено на основе тщательно отобранной выборки из 1053 подтвержденных экзопланет из архива NASA Exoplanet. В [8] приводятся эмпирические степенные соотношения между параметрами - масса, радиус и температура экзопланет ($M-R-T$). Авторы [8] предполагают наличие трех различных режимов соотношений для $M-R$, которые не являются непрерывными. Наиболее удачная модель включает соотношения $M-R-T$, в которых имеются разрывы для зависимости у каменных планет и ледяных гигантов (нептунов), нептуны и газовые гиганты (юпитеры) разделены разрывом массы при $M = 115 \pm 19 M_{\oplus}$. Показано, что 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 юпитеров соотношение имеет более сложный вид $M \approx R^{0.00 \pm 0.01} Teq^{0.35 \pm 0.02}$, где Teq - равновесная температура планеты. Это означает, что в случае обнаруженных к настоящему времени планет типа юпитера, вероятно, только равновесная температура обеспечивает надежную оценку массы.

Кроме того, в [8] было показано, что для планет типа нептун может быть использовано более простое соотношение (см. (5) в [8]) вида $R/R_{\oplus} = k(M/M_{\oplus})^{\beta}$. В этом случае параметры $k = 0.53 \pm 0.05$ и $\beta = 0.68 \pm 0.02$. Применяя это соотношение, мы смогли получить, что радиус TOI-1422 c составляет $(2.72 \pm 0.40) R_{\oplus}$.

Для вычислений по формуле (1) нужны оценки величины F_{XUV} - (потока XUV-фотонов). Для этой цели, как и ранее в [3], нами были использованы аналитические зависимости, полученные в [9] и связывающие величину F_{XUV} потока и параметр $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M. Величина потока XUV-фотонов равна $1.3 \cdot 10^{28}$ эрг/с. Как указывалось в [3], TOI-1422 является достаточно малоактивной звездой солнечного типа (см. также выше). Расчеты по соотношению (1) показали, что потеря вещества атмосферы составляет $7.8 \cdot 10^7$ г/с для величины $\log R'_{HK} = -4.95$. Отметим, что с учетом погрешностей параметров планеты, приведенных в [2] и полученных нами выше, величина оттока вещества для атмосферы планеты c может находиться в диапазоне от $6.1 \cdot 10^7$ г/с до $9.7 \cdot 10^7$ г/с.

Ранее выполненные нами расчеты по соотношению (1) для атмосферы TOI-1422 b показали, что потеря ею вещества равна $9.4 \cdot 10^8$ г/с. Она значительно меньше, чем у планеты c. Сравнительно низкая величина потери вещества атмосферы планеты TOI-1422 c, несмотря на высокую эффективную температуру атмосферы звезды (спектрального класса G), относительную близость планеты к звезде (напомним, что расстояния до планет составляют всего 0.108 а.е. и 0.185 а.е.), вероятно, связана с большей ее удаленностью от родительской звезды, по сравнению с планетой b, а также ее меньшим

радиусом. Если поместить планету TOI-1422 c на расстояние от родительской звезды, соответствующее планете b, то можно получить, что в таком случае величина M_{loss} составит $2.4 \cdot 10^8$ г/с, т.е. почти в 4 раза меньше, чем установлено для TOI-1422 b.

Наконец, следует иметь в виду следующий источник неопределенности в величине M_{loss} - при оценках оттока вещества для планеты TOI-1422 b нами были использованы данные о радиусе и массе из [2], а для планеты c - ее масса взята согласно [2], а радиус - по статистической зависимости из [8]. Как указывалось, планета TOI-1422 b может обладать обширной газовой оболочкой, окружающей массивное ядро. Ее радиус, установленный в [2], превосходит статистическую оценку для планет с аналогичной массой, по соотношениям из [8] радиус должен составлять $2.4 R_{\oplus}$. При такой величине радиуса планеты b отток вещества из ее атмосферы окажется всего $1.9 \cdot 10^8$ г/с и будет, хотя и больше, но уже сопоставим с величиной M_{loss} для планеты c.

4. Заключение. Рассмотрены свойства планетной системы TOI-1422, в которой две планеты типа нептун обращаются около малоактивной звезды солнечного типа. По данным многолетнего фотометрического обзора *Kamogata Wide-field Survey* (KWS) нами в [3] был проведен анализ проявлений активности TOI-1422 и найдены указания на существование возможных циклов активности 1650 - 1680 сут (фильтры V и Ic) и 2450 сут (фильтр V). Вероятно, период P вращения звезды лежит в интервале 27 (+19, -8) сут. TOI-1422 является достаточно старой звездой с возрастом около 5 млрд лет. Величина показателя ее хромосферной активности индекса $\log R'_{HK}$, измеренного по линиям CaII H и K в спектрах, полученных с HARPS-N, равна -4.95.

Внутренняя планета TOI-1422 b относится к типу горячих нептун, она обращается по орбите с периодом около 13 сут и имеет равновесную температуру $T_{eq,b} = 867$ К. Радиус планеты $R_b = 3.96 R_{\oplus}$, а масса $M_b = 9.0 M_{\oplus}$. По выполненным нами расчетам по модели потери атмосферы с ограничением по энергии для TOI-1422 b была найдена величина оттока вещества атмосферы $9.4 \cdot 10^8$ г/с. Внешняя планета системы, TOI-1422 c, имеет орбитальный период 29.3 сут, ее минимальная масса, $M_c \sin i$, составляет $11.1 M_{\oplus}$, а равновесная температура $T_{eq,c} = 661$ К. Она также может рассматриваться как горячий нептун. Для оценки радиуса TOI-1422 c нами были использованы эмпирические соотношения для $M-R$, представленные в [8]. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы планеты c составляет $7.8 \cdot 10^7$ г/с и, с учетом погрешностей параметров планеты, она может находиться в диапазоне от $6.1 \cdot 10^7$ г/с до $9.7 \cdot 10^7$ 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).

¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга,
Москва, Россия, e-mail: issesd@rambler.ru

² Учреждение Российской академии наук, Институт астрономии РАН,
Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

MASS LOSS OF THE ATMOSPHERE OF THE PLANET TOI-1442 c

E.S.DMITRIENKO¹, I. S. SAVANOV²

The properties of the TOI-1422 planetary system in which two neptune-type planets orbit around of low-activity solar-type star with the age of about 5 billion years are considered. Earlier we analyzed the activity of the star TOI-1422 and found indications of the existence of possible cycles of activity and considered estimates of the rotation period of the star. The inner planet TOI-1422 b belongs to the type of hot neptunes with a period of about 13 days and an equilibrium temperature of $T_{eq,b} = 867$ K. According to our calculations based on the energy-limited atmospheric loss model for TOI-1422 b mass of atmospheric outflow was found to be $9.4 \cdot 10^8$ g/s. The outer planet TOI-1422 c can also be considered as a hot neptune with orbital period of 29.3 days, minimum mass $M_c \sin i$ is $11.1 M_{\oplus}$ and the equilibrium temperature is $T_{eq,c} = 661$ K. For the radius estimations of TOI-1422 c we used the empirical $M-R$ ratio. It was found that the loss of matter in the atmosphere of planet TOI-1422 c is $7.8 \cdot 10^7$ g/s and, taking into account the errors in the planet's parameters, it can range from $6.1 \cdot 10^7$ g/s to $9.7 \cdot 10^7$ g/s.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *I.S.Savanov, V.I.Shematovich*, *Astrophys. Bull.*, **76**, 450, 2021.
2. *L.Naponiello, L.Mancini, M.Damasso et al.*, *Astron. Astrophys.*, **667**, A8, 2022.
3. *I.S.Savanov*, *Astron. Rep.*, **67**, 719, 2023.
4. *D.Lorenzo-Oliveira, F.C.Freitas, J.Mel'endez et al.*, *Astron. Astrophys.*, **619**, A73, 2018.
5. *T.T.Koskinen, P.Lavvas, M.Huang et al.*, *Astrophys. J.*, **929**, 52, 2022.
6. *N.V.Erkaev, Yu.N.Kulikov, H.Lammer et al.*, *Astron. Astrophys.*, **472**, 329, 2007.
7. *E.S.Kalinicheva, V.I.Shematovich, I.S.Savanov*, *Astron. Rep.*, **66**, 1319, 2022.
8. *K.Edmondson, J.Norris, E.Kerins*, arXiv:2310.16733, 2023. doi:10.48550/arXiv.2310.16733.
9. *A.G.Sreejith, L.Fossati, A.Youngblood et al.*, *Astron. Astrophys.*, **644**, A67, 2020.