

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗДЫ СОЛНЕЧНОГО ТИПА TOI-1422 И ОЦЕНКИ ПОТЕРИ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТЫ TOI-1422b

© 2023 г. И. С. Саванов^{1,*}

¹ Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: isavanov@inasan.ru

Поступила в редакцию 25.03.2023 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Представлены результаты анализа проявлений активности звезды солнечного типа G2 V TOI-1422 и выполнены оценки потери вещества атмосферы планеты TOI-1422b. Планету можно отнести к типу горячих нептун, т.е., по сравнению с другими экзопланетами аналогичного диапазона масс, ожидается, что планета обладает обширной газовой оболочкой. По данным многолетнего фотометрического обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) был проведен анализ проявлений активности TOI-1422 и высказано предположение о существовании возможных циклов активности 1650–1680^d и 2450^d. Вероятная величина периода вращения P звезды лежит в интервале 27_{-8}^{+19} сут, наблюдения обзора KWS в фильтре V указывают на наиболее возможное значение для периода $P = 32^d$. Величина потери вещества атмосферой планеты установлена по аппроксимационной формуле, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Для оценки величины потока XUV-фотонов были использованы аналитические зависимости, связывающие величины потока и параметр $\log R'_{\text{HK}}$. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы TOI-1422b составляет $\dot{M} = 9.4 \times 10^8$ г/с, с учетом существующих погрешностей определений параметров атмосферы планеты она лежит в интервале от 6.8×10^8 до 1.4×10^9 г/с, а с учетом неопределенности величины индекса хромосферной активности – от 8.3×10^8 до 1.1×10^9 г/с.

Ключевые слова: экзопланеты, потеря вещества

DOI: 10.31857/S0004629923070083, EDN: NDVRFB

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. Изучение таких экзопланет является актуальным для понимания как механизмов их формирования, так и моделей их эволюции [1]. Напониелло и др. [2] исследовали кандидата в экзопланеты объект TOI-1422b, транзиты которой были обнаружены космическим телескопом TESS, с основной целью подтверждения ее планетарной природы и нахождения ее свойств. Родительская звезда солнечного типа TOI-1422 (спектральный класс G2 V, $V = 10.6^m$) расположена от нас на расстоянии 155 пк.

В работе [2] были проведены дополнительные наблюдения TOI-1422 с помощью спектрографа HARPS-N в течение 1.5 лет для более точного определения изменений его лучевой скорости (RV), которые были проанализированы совмест-

но с фотометрией TESS и результатами других наблюдений (включая изображения с высоким пространственным разрешением). Выполненный анализ позволил уточнить основные параметры (масса, радиус, светимость и пр.) TOI-1422 и охарактеризовать свойства TOI-1422b, а также высказать предположения о наличии планеты TOI-1422c с массой Нептуна на более удаленной орбите, которая не была обнаружена на кривых блеска TESS. Внутренняя планета, TOI-1422b, 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 $R_b = 3.96_{-0.11}^{+0.13} R_{\oplus}$, масса $M_b = 9.0_{-2.0}^{+2.3} M_{\oplus}$ и, следовательно, плотность $\rho_b = 0.795_{-0.235}^{+0.290}$ г/см³, т.е. планету можно отнести к типу горячих нептун. По сравнению с другими экзопланетами аналогичного диапазона масс, TOI-1422b является одной из наиболее “раздутых”, Напониелло и др. [2] ожидают, что у этой планеты будет обширная газовая оболочка, окружающая ядро с массовой до-

лей около 10–25% от общей массы планеты. Кандидат на внешнюю планету, TOI-1422c, имеет орбитальный период $29.29^{+0.21}_{-0.20}$ сут, его минимальная масса, $M_c \sin i$, составляет $11.1^{+2.6}_{-2.3} M_{\oplus}$, равновесная температура $T_{eq,c} = 661 \pm 13$ К и, следовательно, в случае подтверждения его типа, он может рассматриваться как еще один горячий нептун.

В первой части настоящей работы представлены результаты анализа проявлений активности TOI-1422. Во второй – полученные результаты использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты TOI-1422b.

2. ПРОЯВЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ TOI-1422

Согласно результатам работы [2], эффективная температура звезды равна 5840 ± 62 К, логарифм ускорения силы тяжести $\log g = 4.41 \pm 0.11$, радиус $R/R_{\odot} = 1.019 \pm 0.14$, светимость $L/L_{\odot} = 1.116 \pm 0.037$ и масса $M/M_{\odot} = 0.981 \pm 0.06$. Возраст TOI-1422 равен 5.1 ± 3.9 млрд. лет. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 192 0333 4491 6951 6288, его параллакс составляет $\pi = 6.4418 \pm 0.0138$ mas.

По данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS)¹ мы проанализировали проявления активности TOI-1422. В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах V и Ic , в первую очередь мы провели анализ данных для фильтра V , обладающих более длительным интервалом наблюдений, 4142 сут (11.3 лет) (HJD 245 5777.3–9919.9). Всего было рассмотрено 1355 оценок блеска звезды в фильтре V . Представленные на рис. 1 (вверху) данные несомненно свидетельствуют о присутствии цикличности в изменении ее блеска. На основе построенного спектра мощности для блеска TOI-1422 можно предположить существование возможных циклов активности 1650^d и 2450^d (средняя диаграмма). Вертикальными пунктирными линиями представлены периоды, соответствующие годичной и удвоенной годичной переменности. На нижней диаграмме рис. 1 приведен спектр мощности для интервала периодов $1–140^d$, включающего величину вероятного периода вращения звезды. По оценке Напониелло и др. [2] для TOI-1422 следует ожидать, что период вращения P звезды лежит в интервале 27^{+19}_{-8} сут. На нижней диаграмме рис. 1 указанный интервал выделен вертикальными тонкими пунктирными линиями, а возможная величина P – толстой пунктирной линией. Штриховая линия соответствует максимальному

по амплитуде пика в рассматриваемом интервале ($P = 32^d$).

Менее многочисленными являются данные о блеске объекта в фильтре Ic . Всего имеется 1170 оценок блеска звезды в этом фильтре. Представленные на рис. 2 (вверху) данные несомненно свидетельствуют о присутствии изменения ее блеска в рассматриваемом интервале времени. Можно предположить наличие возможных циклов активности порядка 1680^d и 4600^d (последний вряд ли является реальным, его величина сопоставима с длительностью интервала наблюдений) (рис. 2, средняя диаграмма), и переменности на шкале времени порядка $1–140^d$ (рис. 2, нижняя диаграмма). В интервале времени, характеризующем вероятный период вращения звезды, можно указать на набор пиков, среди которых отсутствует доминирующий. Проявлений деталей, указывающих на $P = 27^d$ или 32^d , не найдено. Фотометрические наблюдения TOI-1422 также проводились в 2004, 2006 и 2007 г. во время исследований по программе WASP transit-search [3]. В общей сложности было получено более 20000 фотометрических оценок на протяжении нескольких периодов наблюдений общей длительностью 120 сут за год. Напониелло и др. [2] провели поиск наличия в наблюдательных данных проявлений вращательной модуляции, но не обнаружили значимой периодичности в диапазоне между 1 и 100^d . Кривая блеска TESS также не показывает модуляции, подтверждая достаточно магнитно спокойное поведение звезды в течение интервала $\sim 100^d$.

3. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ TOI-1422B

Как указывалось выше, TOI-1422b является планетой типа нептун с массой порядка $M = 9M_{\oplus}$ и большой полуосью орбиты 0.108 а.е. По оценке Напониелло и др. [2] плотность TOI-1422b составляет около 0.8 г/см³, 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 [2], рис. 12, что делает ее очень похожей на экзопланеты Kepler-36c и Kepler-11e. Согласно [2], TOI-1422b может обладать обширной газовой оболочкой, окружающей массивное ядро. Ожидается, что массовая доля этой оболочки составит около 10–25% от общей массы планеты, если только ранее часть атмосферы не была унесена звездным ветром. Природа этой обширной оболочки требует дальнейшего изучения, скорее всего по наблюдениям с JWST. Экзопланета типа горячего нептона с течением времени теряет свою гелиево-водородную атмосферу. Для подсчета та-

¹ <http://kws.cetus-net.org>

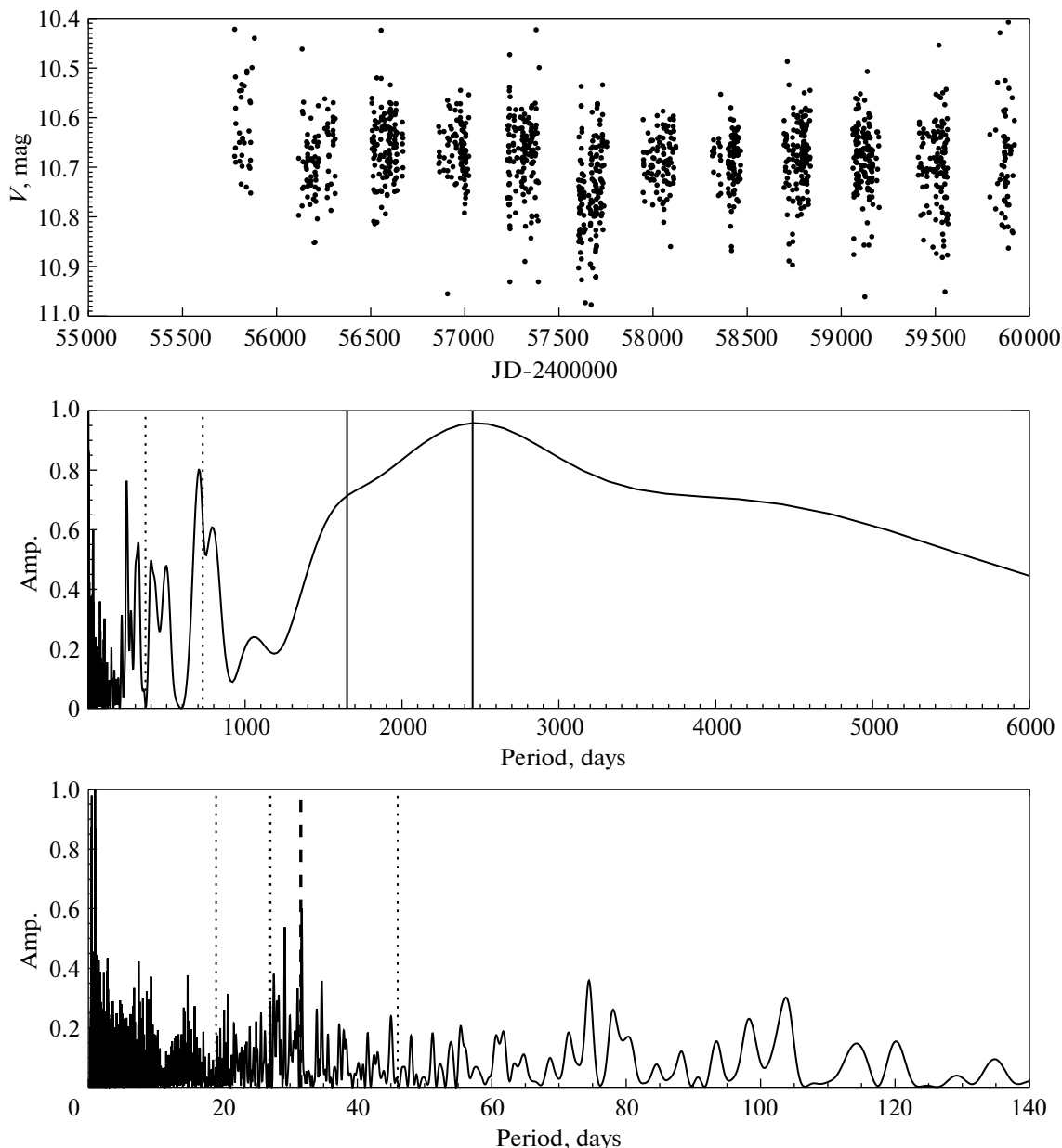


Рис. 1. Верхняя панель: фотометрические наблюдения TOI-1422 в фильтре V по данным обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS). Средняя панель: спектр мощности для этих данных, вертикальные линии относятся к циклам активности 1650^d и 2450^d (4.5 и 6.7 лет, соответственно). Пунктирные линии – пики, соответствующие сезонному (около 356^d) и удвоенному сезонному периодам. Внизу – спектр мощности для интервала периодов 10–140^d. Интервал возможных величин периода вращения P выделен тонкими пунктирными линиями, а сама возможная величина P – толстой пунктирной линией. Штриховая линия соответствует максимальному по амплитуде пику для $P = 32^d$ в рассматриваемом интервале.

кой потери (без детального моделирования процессов в системе звезда–планета) в нашем исследовании использовалась аппроксимационная формула (см., напр., [4, 5]), обычно называемая в литературе моделью 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:

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

где ϵ_{XUV} – параметр эффективности нагрева ($\epsilon_{XUV} = 0.2 \pm 0.1$ для мини-нептунов и супер-зе-

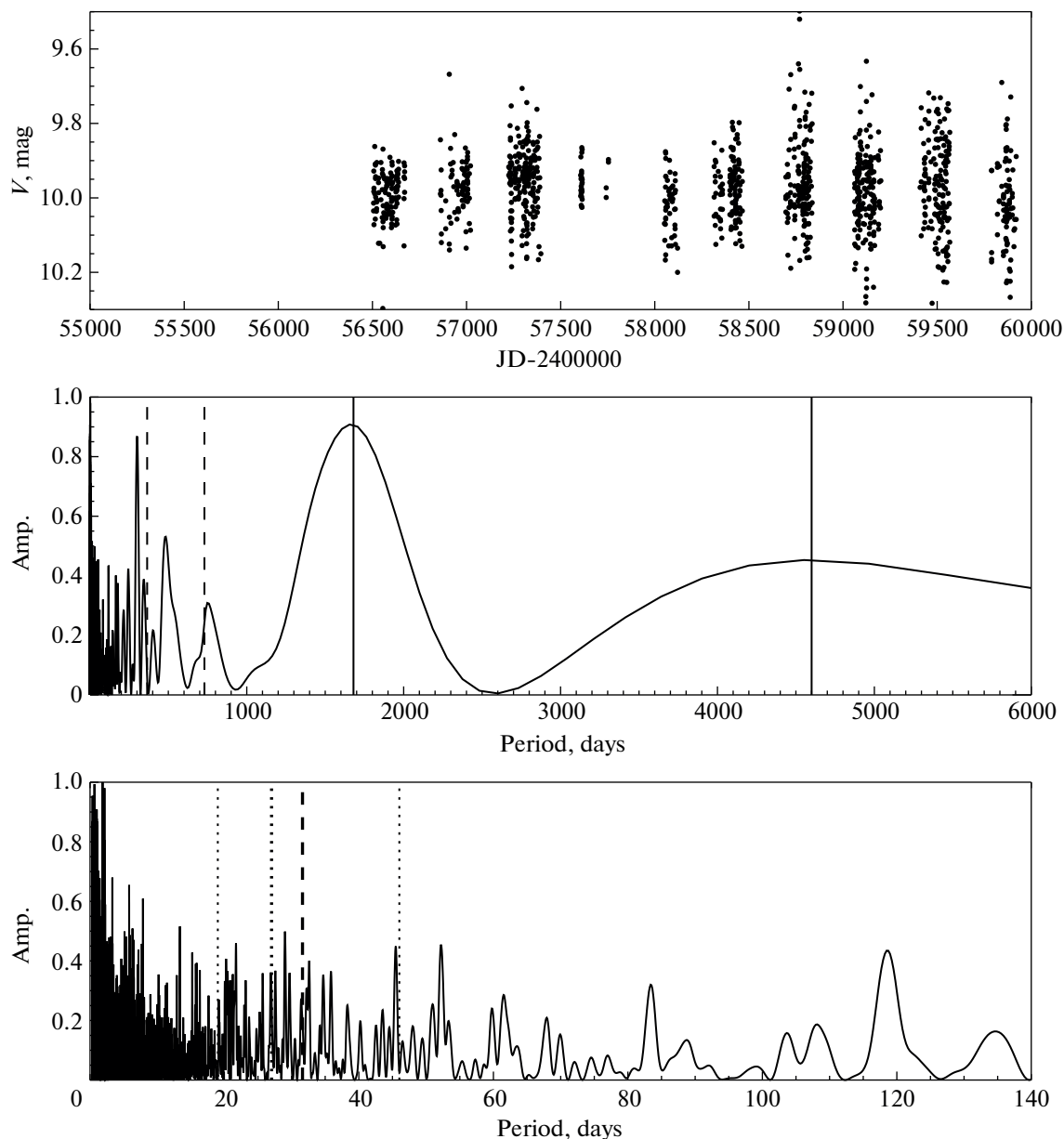


Рис. 2. Верхняя панель: фотометрические наблюдения TOI-1422 в фильтре I_c по данным обзора KWS. Средняя панель: спектр мощности для этих данных, вертикальные линии относятся к циклам активности 1680^d и 4600^d (4.6 и 12.6 лет, соответственно). Пунктирные линии – пики, соответствующие сезонному (около 356^d) и удвоенному сезонному периодам. Внизу – спектр мощности для интервала периодов $10\text{--}140^d$. Интервал возможных величин периода вращения P выделен тонкими пунктирными линиями, а сама возможная величина P – толстой пунктирной линией. Штриховая линия соответствует периоду $P = 32^d$ в рассматриваемом интервале (см. рис. 1).

мель); 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 [1, 4–6].

Основные данные о планете TOI-1422b были взяты из работы [2]. Для вычислений по фор-

муле (1) требуются оценки величины потока XUV-фотонов F_{XUV} . Для этой цели мы использовали аналитические зависимости, полученные в работе [7] и связывающие величины F_{XUV} потока и параметра $\log R'_{\text{HK}}$ для звезд спектральных классов от F до M. Как указывалось в [2], TOI-1422b является достаточно старой звездой с возрастом около 5 млрд. лет. Напониелло и др. [2] нашли, что величина показателя звездной хромосферной

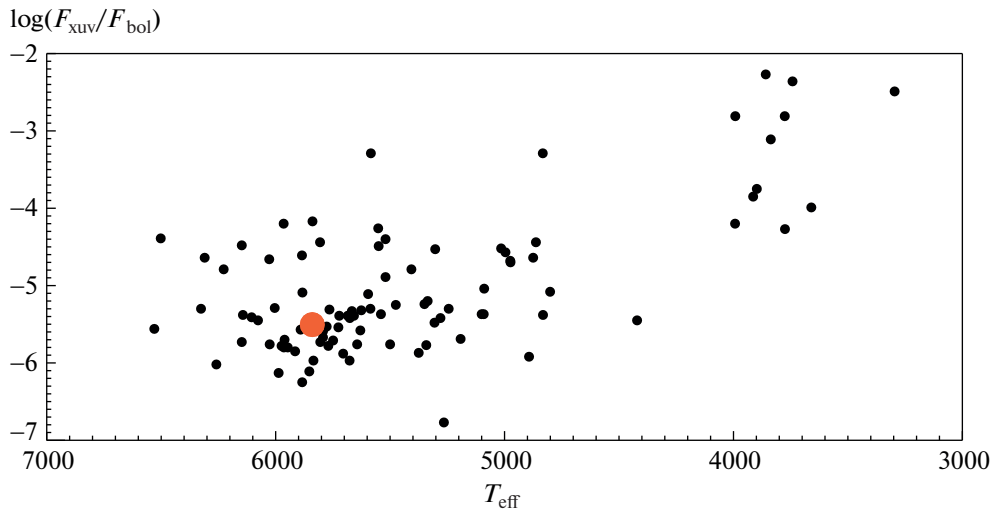


Рис. 3. Зависимость величин $\log(F_{XUV}/F_{bol})$ для объектов из работы [7] от их эффективной температуры. Светлый кружок — данные для TOI-1422.

активности звезды индекса $\log R'_{HK}$, измеренного ими по линиям Ca II H и K в полученных ими спектрах HARPS-N, равна -4.95 ± 0.03 . Это значение в целом согласуется с предположением Напониелло и др. [2] о том, что звезда сопоставима по возрасту с Солнцем, а ее активность лишь немного выше солнечной (для Солнца $\log R'_{HK} = -5.021$ [8]). Согласно [7] мы получили ранее оценку величины $\log(F_{XUV}/F_{bol})$, она представлена на рис. 3 вместе с данными для других объектов, рассмотренными в [7], табл. 1. Величина потока XUV-фотонов составила 4.6×10^{15} эрг/(см² с). Расчеты по соотношению (1) показали, что потеря вещества атмосферы планеты TOI-1422b для величины $\log R'_{HK} = -4.95$ составляет 9.4×10^8 г/с. Величина приливного параметра $K_{tide}(\xi) = 0.88$. В расчетах были использованы величины параметров атмосферы согласно данным [2], табл. 2 ($M_p = 9M_{\oplus}$, $R_p = 3.96R_{\oplus}$).

Следует иметь в виду, что пока в нашем распоряжении нет точных сведений о циклической переменности хромосферной активности звезды, которые могут приводить к разбросу в оценках величин $\log R'_{HK}$ и, как следствие, величин темпа потери вещества. При этом при величине неопределенности индекса $\log R'_{HK}$, равной 0.03, величина \dot{M} будет меняться от 8.3×10^8 до 1.1×10^9 г/с.

С другой стороны, принимая во внимание существующие погрешности определений параметров атмосферы TOI-1422b, можно найти, что величина темпа потери вещества лежит в интервале от 6.8×10^8 до 1.4×10^9 г/с. Полученные оценки различаются примерно в 2 раза, это наглядно демонстрирует, как погрешности определений па-

раметров планеты, независимо от того, используются ли они в приближенных аппроксимационных оценочных вычислениях (например, по формуле (1)) или при точном моделировании, влияют на окончательный результат. Высокое значение темпа оттока вещества является следствием достаточно высокого уровня потока XUV-фотонов от звезды солнечного типа, а также из-за достаточно близкого расположения планеты от родительской звезды (около 0.1 а.е.). Учет влияния приливного параметра $K_{tide}(\xi)$ также приводит к более высокому значению оценки темпа оттока.

Согласно [2], звезда обладает еще одним кандидатом в экзопланеты — TOI-1422c с орбитальным периодом 29.29^d и минимальной массой $M_c \sin i = 11.1 M_{\oplus}$. По оценке Напониелло и др., равновесная температура поверхности планеты близка к 660 K, и, в случае подтверждения наблюдательных данных, планета может быть классифицирована как горячий нептун. Отсутствие оценок параметров планеты TOI-1422c (например, радиуса) не позволяет в настоящее время выполнить изучение потери вещества ее атмосферы.

4. ВЫВОДЫ

В статье представлены результаты анализа проявлений активности звезды TOI-1422 и выполнены оценки потери вещества атмосферы планеты TOI-1422b. Звезда солнечного типа TOI-1422 (спектральный класс G2 V, $V = 10.6^m$) расположена от нас на расстоянии 155 пк. Планета TOI-1422b обращается по орбите с периодом около 13^d , радиус планеты R составляет $3.96R_{\oplus}$, а масса $9.0M_{\oplus}$. Планету можно отнести к типу го-

рячих нептоунов, по сравнению с другими экзопланетами аналогичного диапазона масс, ожидается, что у этой планеты будет обширная газовая оболочка. По данным многолетнего фотометрического обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) (наблюдения в фильтрах V и Ic) нами был проведен анализ проявлений активности TOI-1422. На основе построенных спектров мощности для блеска TOI-1422 можно предположить существование возможных циклов активности 1650–1680^d (фильтры V и Ic) и 2450^d (фильтр V). По литературным оценкам для TOI-1422 следует ожидать, что период вращения P звезды лежит в интервале 27⁺¹⁹₋₈ суток, однако на спектре мощности в интервал, характеризующий вероятный период вращения звезды, попадает набор пиков, среди которых возможно доминирующим является пик для $P = 32^d$ (наблюдения в фильтре V). Для подсчета потери вещества атмосферой планеты в нашем исследовании использовалась аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Для оценки величины потока XUV-фотонов применялись аналитические зависимости, связывающие величины потока и параметр $\log R'_{\text{HK}}$. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы TOI-1422b для величины $\log R'_{\text{HK}} = -4.95$ составляет 9.4×10^8 г/с. С учетом существующих погрешностей определений параметров атмосферы TOI-1422b можно найти, что величина темпа потери вещества лежит в интервале от 6.8×10^8 до 1.4×10^9 г/с, а с учетом неопределенности величины индекса хромосферной активности — от 8.3×10^8 до 1.1×10^9 г/с.

Полученные оценки различаются примерно в 2 раза и демонстрируют, как погрешности определений параметров планеты влияют на окончательный результат. Звезда обладает еще одним кандидатом в экзопланеты — TOI-1422c с орбитальным периодом 29.29^d и минимальной массой 11.1 масс Земли. Отсутствие других оценок ее параметров (например, радиуса) не позволяет в настоящее время выполнить изучение потери вещества ее атмосферы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *I. S. Savanov and V. I. Shematovich*, *Astrophys. Bull.* **76**, 450 (2021).
2. *L. Naponiello, L. Mancini, M. Damasso, A. S. Bonomo, A. Sozzetti, D. Nardiello, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **667**, id. A8 (2022).
3. *D. L. Pollacco, I. Skillen, A. Collier Cameron, D. J. Christian, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 1407 (2006).
4. *T. T. Koskinen, P. Lavvas, C. Huang, G. Bergsten, R. B. Fernandes, and M. E. Young*, *Astrophys. J.* **929**, id. 52 (2022).
5. *N. V. Erkaev, Y. N. Kulikov, H. Lammer, F. Selsis, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **472**, 329 (2007).
6. *E. S. Kalinicheva, V. I. Shematovich, and I. S. Savanov*, *Astron. Rep.* **66**, 1318 (2022).
7. *A. G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, K. France, and S. Ambily*, *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A67 (2020).
8. *D. Lorenzo-Oliveira, F. C. Freitas, J. Meléndez, M. Bedell, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A73 (2018).

THE ACTIVITY OF A SOLAR-TYPE STAR TOI-1422 AND MASS LOSS OF THE ATMOSPHERE OF THE PLANET TOI-1422b

I. S. Savanov^a

^a*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The results of the analysis of the activity of a solar type star G2V TOI-1422 are presented and estimates of the loss of atmospheric matter of the planet TOI-1422b are made. The planet can be attributed to the type of hot neptunes. Compared to other exoplanets of a similar mass range it is expected that the planet has an extensive gas envelope. According to the long-term photometric survey of Kamogata Wide-field Survey (KWS) the TOI-1422 activity was analyzed and the existence of possible activity cycles of 1650-1680 days and 2450 days was suggested. The probable value of the rotation period P of the star lies in the range of 27 (+19, -8) days, observations of the KWS survey in the V filter indicate the most possible value for $P = 32$ days. Mass loss of the planet's atmosphere is determined using an approximation formula corresponding to the model of atmospheric loss with an energy restriction. To estimate the flux of XUV photons analytical dependences were used linking the flux values and the parameter $\log R'_{\text{HK}}$. Calculations have shown that the mass loss of TOI-1422b is $\dot{M} = 9.4 \times 10^8$ g/s and taking into account the existing errors in determining the parameters of the atmosphere it lies in the range from 6.8×10^8 g/s to 1.4×10^9 g/s.

Keywords: exoplanets, mass loss