

DOI: 10.54503/0571-7132-2024.67.4-485

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗДЫ TOI-6255 И ПОТЕРЯ МАССЫ АТМОСФЕРЫ ЕЕ ПЛАНЕТЫ

И.С.САВАНОВ

Поступила 23 августа 2024

Принята к печати 6 декабря 2024

Рассмотрены свойства планетной системы TOI-6255, в которой землеподобная планета с ультракоротким орбитальным периодом (5.7 часов) обращается вокруг карлика спектрального класса М. По архивным измерениям блеска TOI-6255 сделаны выводы о переменности блеска вследствие вращения, а также циклической долговременной переменности объекта. Установлены возможные величины периода вращения P звезды, которые лежат в интервалах 64–74 сут и 78–92 сут и которые были сопоставлены с результатами литературных данных. Для двух значений параметра $\log R'_{HK}$ (–5.15 и –4.66), соответствующих максимумам бимодального распределения этого параметра для малоактивных и активных М карликов, вычислены величины оттока вещества из атмосферы планеты TOI-6255 b. Потеря вещества атмосферы планеты составляет $9.4 \cdot 10^9$ г/с для величины $\log R'_{HK} = -4.65$ и $1.1 \cdot 10^9$ г/с для величины $\log R'_{HK} = -5.15$. Оценены перспективы TOI-6255 b, как приоритетного объекта для будущих наблюдений и исследований.

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

1. *Введение.* Авторы [1] информировали об обнаружении землеподобной планеты TOI-6255 b с ультракоротким орбитальным периодом (5.7 час). По измерениям лучевой скорости (RV) было установлено, что ее масса составляет $1.44 \pm 0.14 M_{\oplus}$. Согласно [1], ультра-короткопериодические планеты (USP) являются планетами земной группы (численностью порядка сотни) с радиусами $R < 2 R_{\oplus}$, которые обращаются вокруг своих звезд менее чем за сутки. Чаше они встречаются у холодных звезд карликов, а частота их наличия у звезд солнечного типа мала (около 0.5%), но это обстоятельство, возможно, носит наблюдательный характер. По мнению авторов [1], сильное приливное воздействие возможно деформирует планету TOI-6255 b, приводя ее форму в трехосный эллипсоид с длинной осью, которая примерно на 10% длиннее короткой оси. Близкое расположение планеты также может являться аргументом для поиска магнитных взаимодействий звезды и планеты.

В данной статье исследованы проявления активности звезды TOI-6255, а также получены оценки величины возможного оттока вещества из атмосферы планеты.

2. *Проявления активности TOI-6255.* Согласно [1], эффективная температура TOI-6255 (GJ 4256, LHS 6394, TIC 261135533) равна 3421 ± 70 K, ускорение силы тяжести $\log g = 4.850 \pm 0.044$, радиус $R/R_{\odot} = 0.370 \pm 0.011$ и масса $M/M_{\odot} = 0.353 \pm 0.015$. Объект TOI-6255 отождествлен с источником Gaia EDR3 1956328333130770048, его параллакс составляет π (mas) = 49.0544 ± 0.0236 .

В данной статье как и в [1], рассмотрены наблюдения TOI-6255 из архива космической миссии TESS. Данные были получены для двух секторов - 16 и 56 (рис.1). Не было отмечено никаких проявлений переменности блеска, вызванных вращательной модуляцией. Имеющиеся пики на спектрах мощности вероятнее всего имеют либо инструментальное происхождение, либо являются артефактами. Диаграммы для фазовых кривых, построенные для периодов в 68 или 85 сут (см. ниже), представлены на правых панелях рисунка. Можно заключить, что данные наблюдений миссии TESS не позволяют сделать каких-либо предположений о величине периода вращения звезды P .

Авторы [1] отметили, что по данным анализа обзора WASP [2] было сделано заключение о присутствии на спектре мощности переменности блеска двух пиков, указывающих на медленное вращение звезды, возможно с периодом 68 или 85 сут.

Нами проведена независимая попытка определения периода вращения звезды по данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) (<http://kws.cetus-net.org>). В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах V и Ic в интервале наблюдений с августа 2012г. по август 2024г. Вначале

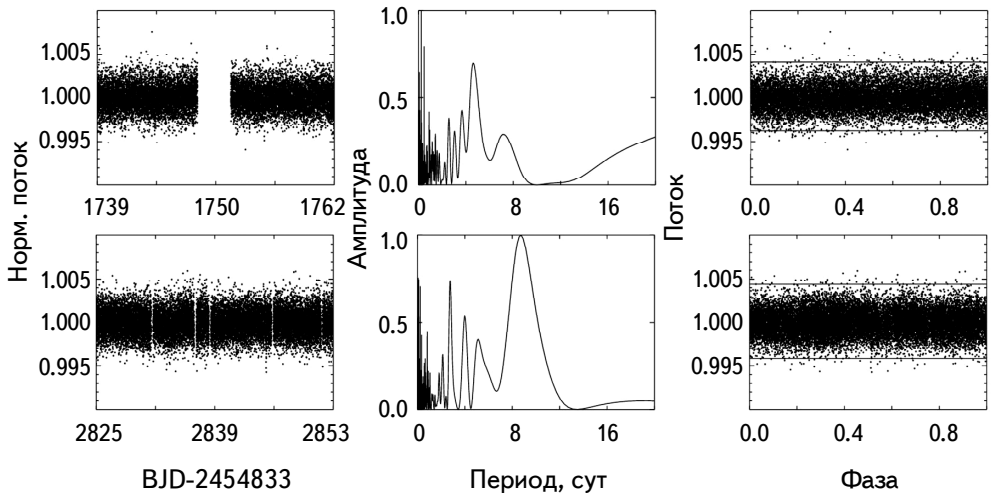


Рис.1. Слева - кривые блеска TOI-6255, в центре - спектры мощности переменности блеска, справа - фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 16 и 56.

проведен анализ данных для фильтра V, всего было рассмотрено 997 оценок блеска. Представленные на рис.2 (вверху) данные несомненно свидетельствуют о присутствии цикличности в изменении блеска. На основе построенного спектра мощности можно предположить существование возможных циклов активности 530 сут, 1000 сут и 2200 сут (возможно, они являются кратными,

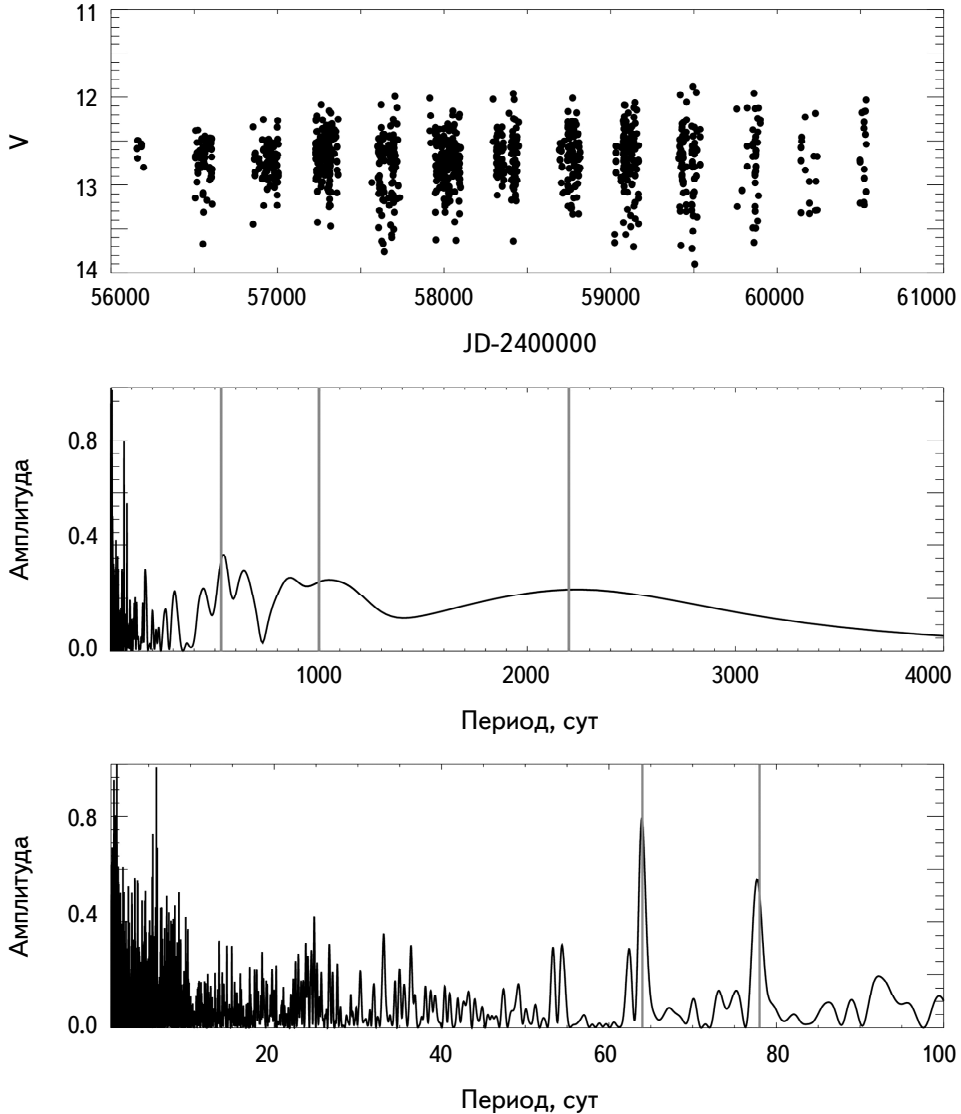


Рис.2. Верхняя панель - фотометрические наблюдения TOI-6255 в фильтре V по данным обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS). Средняя панель - спектр мощности для этих данных, вертикальные светлые линии относятся к циклам активности 530 сут и 2200 сут и 2200 сут. Внизу - спектр мощности для интервала периодов 1 - 100 сут. Вертикальные светлые линии соответствуют возможным величинам периода вращения P 64 сут и 78 сут.

средняя диаграмма). На нижней диаграмме рис.2 приведен спектр мощности для интервала периодов 1 - 100 сут, включающего величину вероятного периода вращения P звезды. Наше внимание привлекли два пика, соответствующие величинам P 64 сут и 78 сут. Как и в [1], остаются неизвестными причины появления и природа двух указанных пиков, точно не совпадающих с

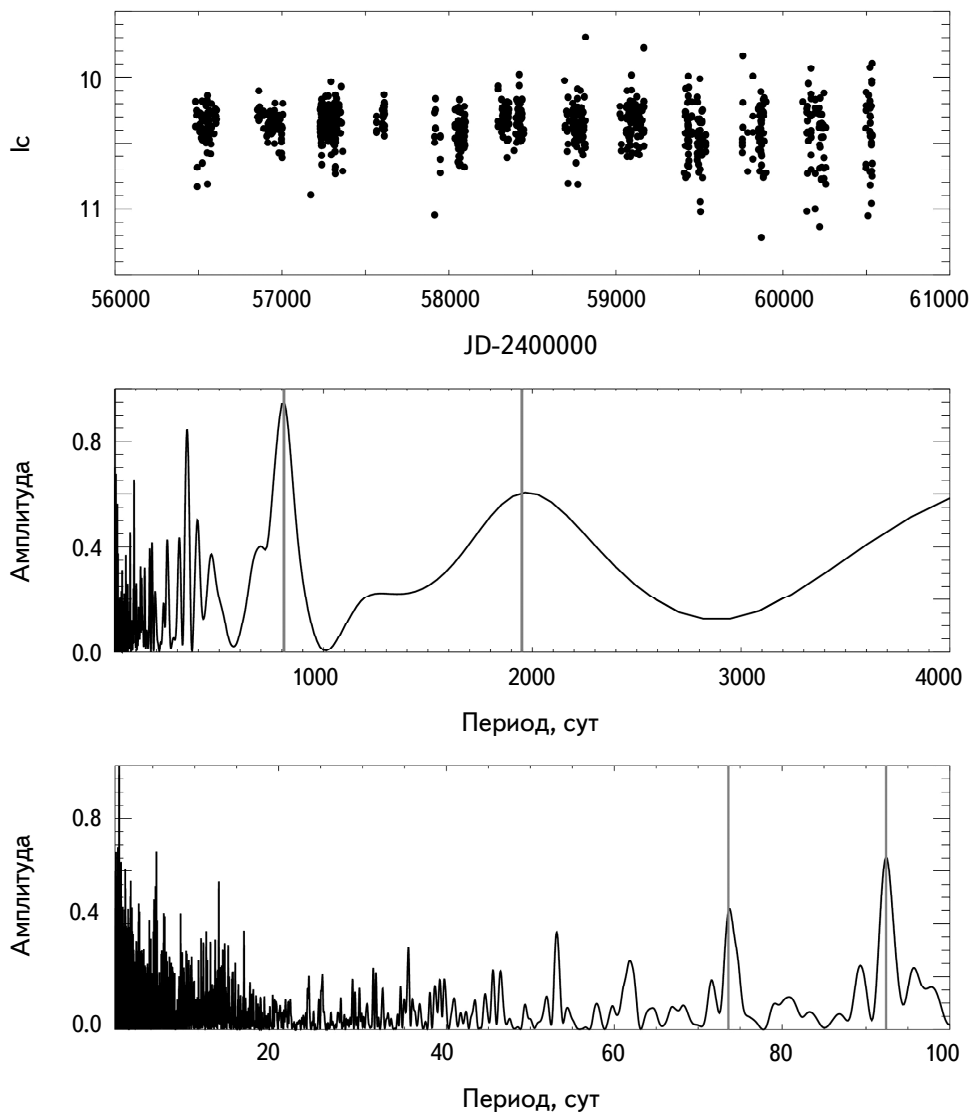


Рис.3. Верхняя панель - фотометрические наблюдения TOI-6255 в фильтре I_c по данным обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS). Средняя панель - спектр мощности для этих данных, вертикальные светлые линии относятся к циклам активности 810 сут и 1950 сут. Внизу - спектр мощности для интервала периодов 1 - 100 сут. Вертикальные светлые линии соответствуют возможным величинам периода вращения 74 сут и 92 сут.

результатами из 2, но близких к ним.

Проанализированы данные о блеске объекта в фильтре Ic. Всего имеется 924 оценки блеска звезды в этом фильтре. Представленные на рис.3 (вверху) данные могут дать возможность предположить наличие возможных циклов активности порядка 810 сут и 1950 сут (рис.3, средняя диаграмма) и переменности на шкале времени порядка 1 - 100 сут (рис.3, нижняя диаграмма). В интервале времени, характеризующем вероятный период вращения звезды, как и при анализе данных о блеске звезды в фильтре V, также можно указать на наличие двух пиков, соответствующих 74 сут и 92 сут.

Возраст системы был оценен в [1] с помощью эмпирических гирохронологических соотношений и составил 6 ± 2 млрд лет для принятых авторами величин P . С учетом всех неопределенностей, можно сделать заключение, что, скорее всего, TOI-6255 принадлежит к числу старых и малоактивных звезд.

К сожалению, авторы [1] не приводят информацию об уровне хромосферной активности TOI-6255. Оценка величины индекса $\log R'_{HK}$, необходимого нам в дальнейшем для определения величины оттока вещества из атмосферы экзопланеты, была выполнена косвенным образом. На основе данных для

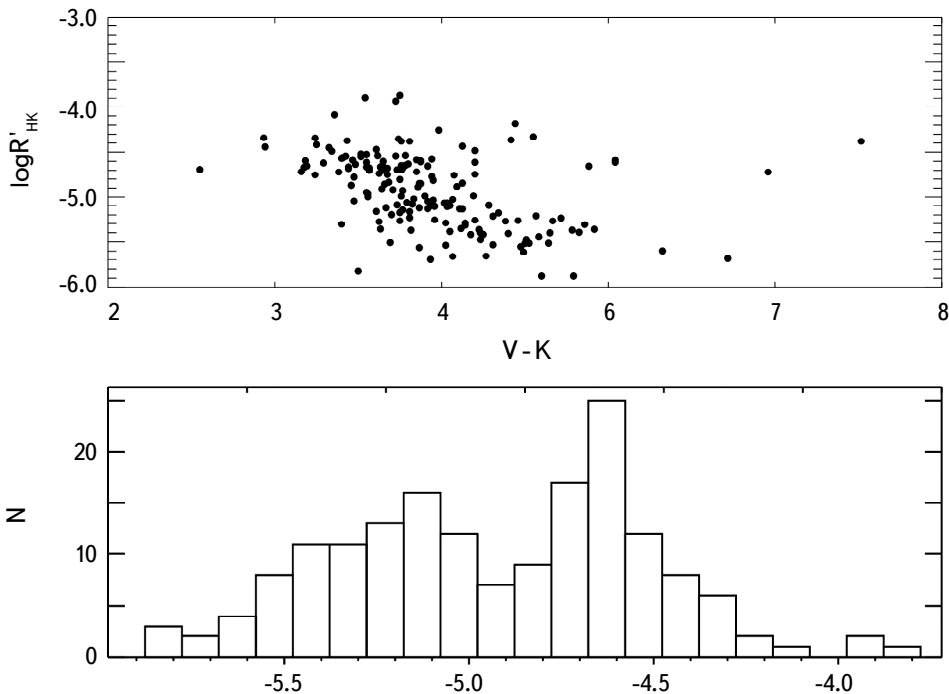


Рис.4. Вверху - зависимость параметра $\log R'_{HK}$ от показателя цвета ($V-K$), внизу - гистограмма распределений параметра $\log R'_{HK}$.

177 карликов спектрального класса М [3] была построена зависимость параметра $\log R'_{HK}$ от показателя цвета (V-K) (рис.4, вверх). Диаграмма указывает на возможное бимодальное распределение параметра (гистограмма приводится на том же рисунке внизу), а также на небольшую зависимость $\log R'_{HK}$ от (V-K) для каждой группы объектов. Для TOI-6255 показатель цвета (V-K) равен 4.^m68, и звезда, скорее всего, принадлежит к группе малоактивных М карликов, для которых индекс $\log R'_{HK}$ менее -5.00. Но вследствие неоднозначности, в принципе, звезда может обладать и более высокой активностью, попадая в группу активных звезд. С учетом этого, дальнейшие вычисления проводились, принимая два значения параметра $\log R'_{HK}$ (-5.15 и -4.66), соответствующих максимумам распределений для малоактивных и активных М карликов.

Отметим, что согласно результатам из [4], распределения величин параметра хромосферной активности для звезд спектрального класса G - K также могут иметь два или, даже возможно, три пика для G звезд.

Результаты о величине параметра $\log R'_{HK}$ TOI-6255 требуют дальнейшего уточнения, возможно звезда является либо действительно крайне малоактивной, либо находится в состоянии своей пониженной активности. Сведения о циклической переменности хромосферной активности звезды отсутствуют.

3. *Потеря вещества атмосферы TOI-784 b.* Как указывалось выше [1], TOI-6255 b является планетой типа суперземля с массой $M = 1.44 M_{\oplus}$ и большой полуосью орбиты 0.0017 а.е. Равновесная температура экзопланеты равна 1340 ± 60 К. Имея в своем распоряжении точные измерения массы и радиуса, авторы [1] высказали предположения о структуре и возможном составе TOI-6255 b. Вероятно, ультракороткопериодические планеты (USP) настолько сильно облучаются своими звездами, что их первичная H/He оболочка должна была быть полностью уничтожена интенсивной потерей вещества. Измеренные массы и радиусы USP планет (см., например, рис.4 в [1]) соответствуют предположению о том, что они лишены атмосфер и являются скалистыми планетами с землеподобным составом (примерно 30% Fe и 70% силикатных пород). Более детальное обсуждение возможных моделей применительно к TOI-6255 b можно найти в [1].

В [1] также было показано, что при величине периода вращения 5.7 ч, TOI-6255 b может быть подвержена существенной деформации. В принципе, при определенных условиях это может привести к форме транзита, отличающейся от стандартной для планеты сферической формы. Поскольку никакой асимметрии в транзитном сигнале в наблюдениях TESS не было обнаружено [1], планета TOI-6255 b, вероятно, не подвергается катастрофическому распаду. Процессы деформации не исключают возможности возникновения или поддержания вторичной атмосферы, о существовании которой могли бы

свидетельствовать дополнительные специальные наблюдения. В этом случае можно было бы выполнить оценки темпа оттока вещества из такой атмосферы (если она существует).

Для подсчета такой потери без детального моделирования системы можно попробовать использовать аппроксимационную формулу (см., например, [5,6]), обычно называемую 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:

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

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

Основные данные о планете TOI-6255 b были взяты из [1]. Для вычислений по формуле (1) оценки величины F_{XUV} (потока XUV-фотонов) были использованы аналитические зависимости, полученные в [8] и связывающие величину F_{XUV} потока и параметр $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M.

Расчеты по соотношению (1) показали, что потеря вещества атмосферы составляет $9.4 \cdot 10^9$ г/с для $\log R'_{HK} = -4.65$ и $1.1 \cdot 10^9$ г/с для $\log R'_{HK} = -5.15$, а величины потока XUV-фотонов равны $7.5 \cdot 10^{26}$ эрг/с и $8.45 \cdot 10^{25}$ эрг/с, соответственно.

Сравнительно высокая величина потери вещества атмосферы планеты, несмотря на низкую эффективную температуру (3421 К) атмосферы звезды спектрального класса M, обусловлена чрезвычайной близостью планеты к звезде (планета находится на расстоянии равном всего 3.1 радиусов звезды).

4. Заключение. Рассмотрены свойства планетной системы TOI-6255, в которой земледобная планета с ультракоротким орбитальным периодом обращается вокруг карлика спектрального класса M. По архивным измерениям блеска TOI-6255 сделаны выводы о циклической долговременной переменности объекта. Возможные величины периода вращения P звезды лежат в интервалах 64 - 74 сут и 78 - 92 сут. Ранее в [1] также было сделано заключение о присутствии на спектре мощности переменности блеска двух пиков, указывающих на медленное вращение звезды, возможно с периодом 68 или 85 сут. Причина наличия двух пиков остается необъясненной, тем не менее,

вероятно, TOI-6255 относится к числу медленновращающихся карликов. Оценены величины долговременных циклов активности звезды. Возраст системы был найден в [1] с помощью эмпирических гирохронологических соотношений и составил около 6 млрд лет.

Вычисления величины оттока вещества из атмосферы планеты были проведены для двух значений параметра $\log R'_{HK}$ (-5.15 и -4.66), соответствующих максимумам бимодального распределения этого параметра (для малоактивных и активных М карликов, соответственно). Потеря вещества атмосферы планеты составляет $9.4 \cdot 10^9$ г/с для величины $\log R'_{HK} = -4.65$ и $1.1 \cdot 10^9$ г/с для величины $\log R'_{HK} = -5.15$. Высокая величина оттока вещества в значительной мере обусловлена чрезвычайной близостью планеты к звезде.

Авторы [1] выполнили детальное исследование изменений фазовых кривых и вторичного затмения на кривой блеска по данным архива TESS. Несомненно, TOI-6255 b является приоритетным объектом для будущих исследований фазовой кривой с помощью телескопа JWST в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, поскольку любое изменение фазовой кривой звезды будет гораздо более заметным в инфракрасном диапазоне. Кроме того, требуются новые фотометрические наблюдения для уточнения формы транзитов, периода вращения звезды, а также изучения проявлений хромосферной активности звезды, включая установление ее цикличности. Учитывая значительную величину возможного оттока вещества из атмосферы планеты, TOI-6255 может быть включена в число приоритетных объектов для наблюдений с УФ космическим телескопом Спектр-УФ [9].

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-6255 AND MASS LOSS OF ITS PLANET ATMOSPHERE

I.S.SAVANOV

The properties of the TOI-6255 planetary system are considered, in which an Earth-like planet with an ultrashort orbital period (5.7 hours) orbits a dwarf star

of spectral class M. Based on archival measurements of TOI-6255 brightness variability due to rotation as well as the cyclic long-term variability of the object were established. The possible values of the rotation period P of the star lie in the intervals of 64-74 days and 78-92 days and were compared with the results of the literature data. For two values of the $\log R'_{HK}$ parameter (-5.15 and -4.66) corresponding to the maxima of the bimodal distribution of this parameter for low-activity and active M dwarfs the values of mass loss from the planet's atmosphere are calculated. Mass loss is $9.4 \cdot 10^9$ g/sec for $\log R'_{HK} = -4.65$ and $1.1 \cdot 10^9$ g/sec for $\log R'_{HK} = -5.15$. The prospects of TOI-6255 b as a priority object for future observations and research are assessed.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *F.Dai, A.W.Howard, S.Halverson et al.*, Astron. J., **168**, 101, 2024.
2. *D.L.Pollacco, I.Skillen, A.Collier Cameron et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **118**, 1407, 2006.
3. *N.Meunier, L.Mignon, M.Kretzschmar et al.*, Astron. Astrophys., **684**, A106, 2024.
4. *J.Gomes da Silva, N.C.Santos, V.Adibekyan et al.*, Astron. Astrophys., **646**, A77, 2021.
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. *A.G.Sreejith, L.Fossati, A.Youngblood et al.*, Astron. Astrophys., **644**, A67, 2020.
9. *B.Shustov, A.I.G'omez de Castro, M.Sachkov et al.*, Astrophys. Space Sci., **363**, 62, 2018.