

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.2-223

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗДЫ Gl 414A С ДВУМЯ ПЛАНЕТАМИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПОТЕРЮ МАССЫ АТМОСФЕРОЙ ПЛАНЕТЫ Gl 414A b

И.С.САВАНОВ

Поступила 29 января 2023

Принята к печати 22 мая 2023

Представлены результаты исследования проявлений активности карлика спектрального класса K7 Gl 414A с двумя планетами, одна из которых (планета Gl 414A b) при эксцентриситете $e = 0.45$ на протяжении большей части своей орбиты находится в пределах зоны обитаемости. Наш анализ показал, что наиболее достоверным определением периода вращения Gl 414A следует признать результаты анализа фотометрических наблюдений звезды, выполненных обзором Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT), указывающие на период ее вращения $P = 42$ сут. Однако по периодограммам, построенным по другим наблюдениям Gl 414A, наличие такого периода не подтверждается. Цикл долговременной активности звезды составляет величину порядка 3800 сут (10.4 лет). Полученные результаты изучения активности звезды использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты Gl 414A b по аппроксимационной формуле для модели потери атмосферы с ограничением по энергии. По 486 оценкам параметра S_{HK} были выполнены расчеты потери вещества атмосферой Gl 414A b в течение интервала в 5805 сут (15.9 лет). Величины этих потерь в основном лежат в интервале $\log(M_{\text{loss}})$ от 7.15 до 7.50, а медианное значение равно 7.30. При величине эксцентриситета 0.45 расстояние от центральной звезды до Gl 414A b варьируется в пределах от 0.13 до 0.34 а.е., для них получены оценки потери вещества атмосферы - $16.21 \cdot 10^7$ г/с и $2.37 \cdot 10^7$ г/с, соответственно.

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

1. *Введение.* Авторы [1] сообщили об открытии двух планет, вращающихся вокруг близкого ($D = 11.9$ пк) карлика Gl 414A спектрального класса K7. Gl 414A b является планетой типа суб-нептун с массой порядка $M \sin i = 7.60 M_{\oplus}$ и большой полуосью орбиты 0.23 а.е. Вторая планета, Gl 414A c, является объектом типа суб-сатурн с $M \sin i = 53.83 M_{\oplus}$ и большой полуосью 1.43 а.е. Для обнаружения планетной системы были использованы данные спектральных наблюдений Keck/HIRES и Automated Planet Finder at Lick Observatory, а также фотометрические данные обзора KELT. Авторы [1] получили оценки периода вращения звезды и долгосрочного цикла ее магнитной активности.

Звезда Gl 414A, известная как HD 97101A и HIP 54646A, является ярким K7V карликом, ее блеск составляет в фильтрах $B = 9^m.67$, $V = 8^m.864$, $R = 8^m.691$. Она имеет спутник HD 97101B - карлик спектрального класса

M2V с блеском $V=9^m.98$. Звезды образуют широкую пару с расстоянием в 408 а.е. (соответствующее угловое расстояние - 34.34 угл. с).

Интерес к планетной системе Gl 414A обусловлен тем, что при значении большой полуоси орбиты 0.23 а.е. и эксцентриситете 0.45 расстояние между Gl 414A b и звездой варьируется от 0.13 до 0.34 а.е., и на протяжении большей части своей орбиты планета будет находиться в пределах обитаемой зоны. Правда, следует принять во внимание, что планета имеет минимальную массу $7.6 M_{\oplus}$, которая, вероятно, указывает на наличие значительной оболочки, богатой летучими веществами. Возможно это обстоятельство понижает шансы на обитаемость. Равновесные температуры планет b и c составляют $T_{eq,b} = 308.6 \pm 33.5$ К и $T_{eq,c} = 124.7 \pm 13.5$ К, соответственно.

В первой части настоящей работы представлены результаты анализа проявлений активности Gl 414A. Во второй - полученные результаты использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты Gl 414A b.

2. Проявления активности Gl 414A. Согласно [1], эффективная температура звезды равна 4120 ± 109 К, ускорение силы тяжести $\log g = 4.65 \pm 0.04$, радиус $R/R_{\odot} = 0.680 \pm 0.14$, светимость $L/L_{\odot} = 0.119 \pm 0.013$ и масса $M/M_{\odot} = 0.650 \pm 0.08$. Возраст звезды равен 12.4 ± 5.2 млрд лет. Объект Gl 414A отождествлен с источником Gaia EDR3 732857558276385664, его параллакс составляет π (mas) = 84.1766 ± 0.0258 .

Как указывалось, звезда обладает спутником HD 97101B - карликом спектрального класса M2V с эффективной температурой 3663 ± 70 , радиусом $R/R_{\odot} = 0.548 \pm 0.017$, светимостью $L/L_{\odot} = 0.048 \pm 0.005$ и массой $M/M_{\odot} = 0.542 \pm 0.022$. По независимой оценке его возраст равен 11.2 ± 5.9 млрд лет. Отметим, что перечисленные нами свойства звезд приводятся согласно данным [1] (табл.1).

Авторы [1] провели анализ фотометрических наблюдений Gl 414A, выполненных в течение 6 лет обзором Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT). Построенный спектр мощности (рис.2 в [1]) указывает на наличие пика, соответствующего периоду вращения звезды $P=42$ сут. Согласно [1], вариации величины P от сезона к сезону могут составлять величину порядка 4 сут. По полученным спектрам Keck/HIRES авторы [1] определили значения показателя звездной активности параметра S_{HK} , измеренного по линиям CaII H и K и построили спектры мощности для величин S_{HK} . Был найден пик для периода, равного 75.4 сут, что примерно в два раза больше величины P . Комбинируя этот результат с результатом анализа данных о переменности лучевой скорости звезды, в [1] было сделано предположение о том, что величина периода вращения звезды составляет около 40 сут.

Кроме того, в [1] был сделан вывод о наличии переменности величин

S_{HK} с характерными временами 4554 и 2979 сут, что по мнению этих авторов соответствует цикличности в 3000 сут, найденной по данным для лучевой скорости.

На рис.1 представлены результаты независимого анализа данных для параметра S_{HK} , приведенного в табл.2 в [1]. Всего было использовано 486 оценок параметра S_{HK} . На построенном спектре мощности, в интервале периодов 1-100 сут, заметно выделяется пик, соответствующий величине периода прядка 76 сут. Как и указывалось в [1], имеется набор пиков в

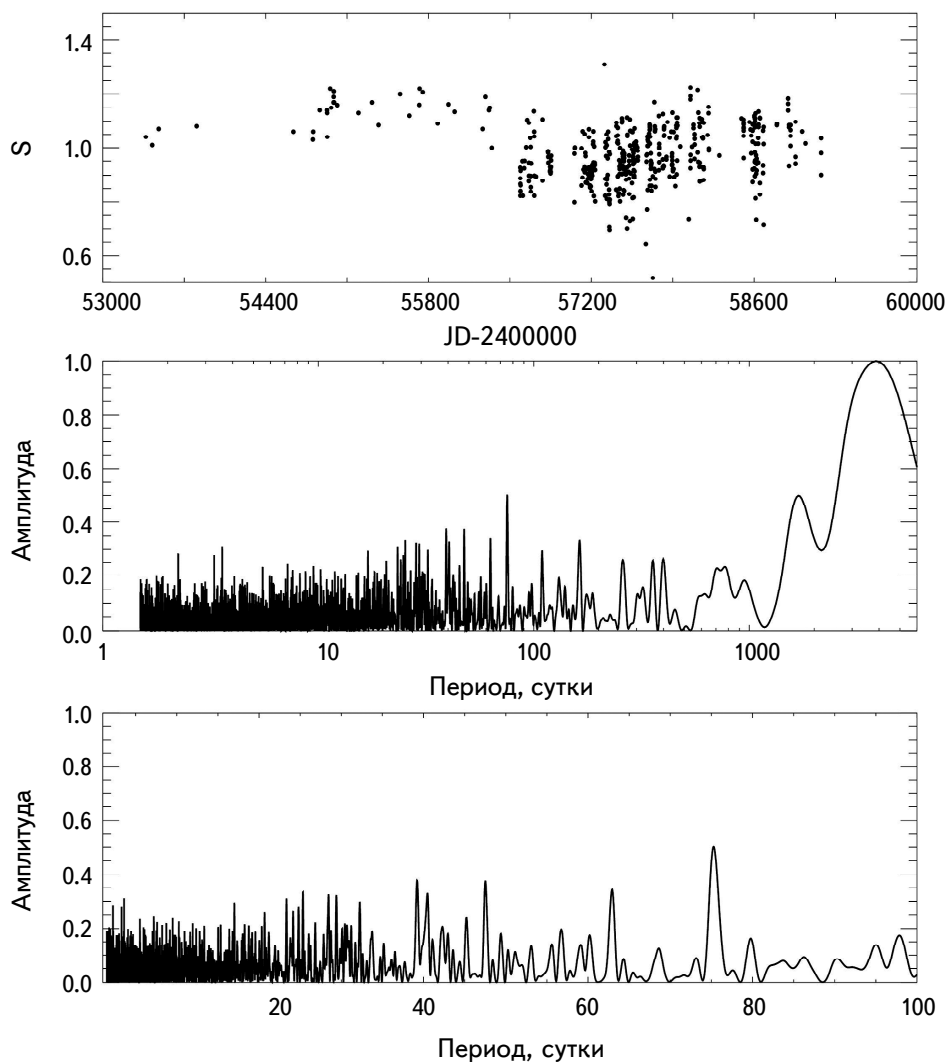


Рис.1. Вверху - данные для параметра S_{HK} из [1]; средняя панель - спектр мощности для интервала 1-6000 сут; нижняя панель - спектр мощности для интервала 10-100 сут. Ось абсцисс на средней панели дана в логарифмическом масштабе.

области около 40 сут. По нашему мнению, пики примерно такой же амплитуды имеются и для величин порядка 47 и 62 сут. Возможно имеет место цикличность с характерным временем в 3870 сут. Отметим, что эти результаты получены по объединенному массиву данных из [1].

По данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) [<http://kws.cetus-net.org>] нами была выполнена еще одна попытка проведения анализа проявлений активности GJ 414A. В обзоре представлены наблюдения звезды в

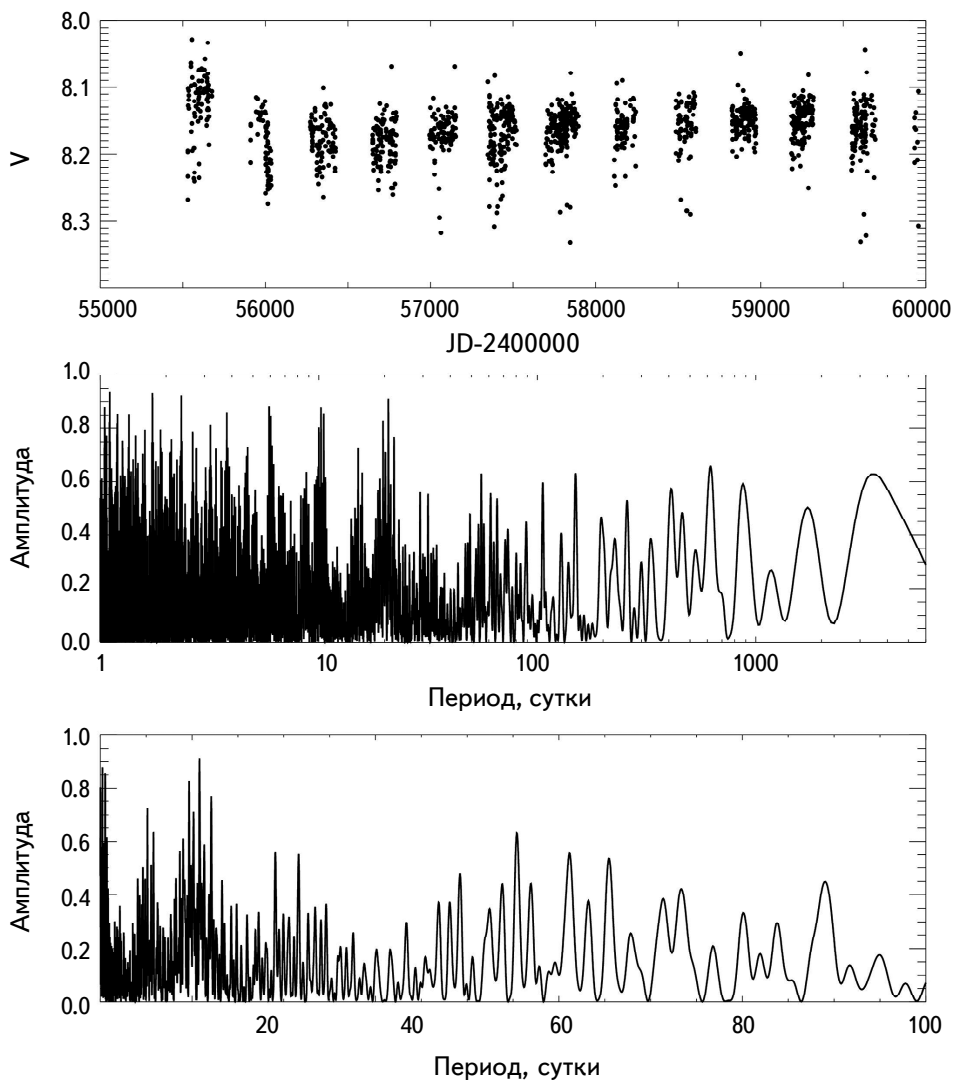


Рис.2. Вверху - блеск GJ 414A в фильтре V по данным обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS); средняя панель - спектр мощности для интервала 1-6000 сут; нижняя панель - спектр мощности для интервала 10-100 сут. Ось абсцисс на средней панели дана в логарифмическом масштабе.

фильтрах V и Ic, но мы ограничились только анализом данных для фильтра V, обладающих более длительным интервалом наблюдений в 4424 сут (12.1 лет) (HJD 2455530.332 - 2459955.290).

Всего были рассмотрены 1342 оценки блеска звезды в фильтре V. Представленные на рис.2 (вверху) данные несомненно свидетельствуют о присутствии цикличности в изменении ее блеска. На основе построенного спектра мощности для блеска G1 414A можно предположить существование возможных циклов активности более 3000 сут и переменности на шкале времени порядка 10 - 100 сут (вероятный период вращения звезды), (рис.2, нижняя диаграмма). Представляется возможным сопоставление результатов анализа переменности блеска звезды и измеренного индекса S_{HK} , характеризующего хромосферную активность звезды (рис.1 и 2). Циклы долговременной активности в обоих случаях составляют величину порядка 3800 сут (10.4 лет). В области 10 - 100 сут ситуация совершенно другая - на рис.2 отсутствуют пики в области 40 сут, но их можно видеть в областях около 47, 62 и 76 сут, а также имеется набор пиков в области 20 сут. Отметим, что ни в одном из рассматриваемых нами случаев нет такого ярко выраженного пика, как на рис.2 в [1], характеризующего период вращения звезды (42.48 сут).

В архиве TESS для G1 414A доступны только данные 22-го сета наблюдений. Наша обработка была аналогична проводимой ранее в случае измерений для других объектов из архивов космического телескопа Кеплер и миссии TESS (см., например, [2]). К сожалению, качество и продолжительность наблюдений не дают никакой возможности для установления периодической модуляции блеска объекта.

Таким образом, наиболее достоверным следует признать результаты анализа фотометрических наблюдений G1 414A, выполненных обзором Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT), указывающие на период вращения звезды $P=42$ сут. Отметим, однако, что на периодограммах, построенных по другим наблюдениям G1 414A, мы не видим пиков, соответствующих этому периоду. В отношении цикла долговременной активности можно с уверенностью заключить, что его длительность составляет около 3800 сут (10.4 лет).

3. Потеря вещества атмосферы G1 414A b. Как указывалось выше, G1 414A b является планетой типа суб-нептун с массой порядка $M \sin i = 7.60 M_{\oplus}$ и большой полуосью орбиты 0.23 а.е. Экзопланта типа суб-нептуна с течением времени теряет свою гелиево-водородную атмосферу. Для подсчета такой потери без детального моделирования системы в нашем исследовании использовалась аппроксимационная формула (см., например, [3,4]), обычно принятая в литературе, 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 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 [3-5].

Основные данные о планете Gl 414A b были взяты из [1]. Для вычислений по формуле (1) требуются оценки величины F_{XUV} (потока XUV-фотонов). Для этой цели нами были использованы аналитические зависимости, полученные в [6] и связывающие величину F_{XUV} потока и параметр $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M. Как указывалось в [1], Gl 414A является достаточно активной K-звездой. Авторы [1] отметили, что медианное значение параметра S_{HK} (показателя звездной активности, измеренного по линиям CaII H и K в полученных ими спектрах Keck/HIRES) составляет 0.98, а соответствующая ему величина $\log R'_{HK}$ равна -4.72. Эти значения в целом согласуются с данными [7], но, возможно, соответствуют несколько более низкому уровню активности, чем значения, указанные в [7], согласно которым $S_{HK} = 1.14$ и $\log R'_{HK} = -4.50$. Расхождения между $\log R'_{HK}$ из [7] и данными [1] возможно обусловлены различиями в методологии и калибровках, используемых для преобразования между S_{HK} и $\log R'_{HK}$. Следует иметь в виду также циклическую переменность хромосферной активности звезды (см. выше), также, возможно, приводящую к разбросу в оценках величин $\log R'_{HK}$.

Расчеты по соотношению (1) показали, что потеря вещества атмосферы меняется от значения $2.0 \cdot 10^7$ г/с для величины $\log R'_{HK} = -4.72$ до $5.23 \cdot 10^7$ г/с для $\log R'_{HK} = -4.50$, т.е. примерно в 2.6 раза. Согласно [1] хромосферная активность звезды обладает циклическими изменениями на шкале времени порядка 3000 сут. Располагая 486 оценками параметра S_{HK} , мы выполнили расчеты потери вещества атмосферой Gl 414A b в течение интервала в 5805 сут (15.9 лет). Для перевода величин S_{HK} в $\log R'_{HK}$ нами была использована калибровка из [8]. Параметры звезды ($T_{эфф}$ и показатель цвета ($B - V$)) были взяты из [1].

На рис.3 (вверху) представлен график изменений величин потери вещества атмосферы планеты b со временем. Поскольку в наших расчетах варьировались оценки величины F_{XUV} (потока XUV-фотонов), то вполне естественно, что по

характеру циклического изменения величины потери вещества повторяют зависимость индекса хромосферной активности. Внизу на рисунке представлена гистограмма для оценок потери вещества атмосферы. Величины потери вещества атмосферы планеты *b* в основном лежат в интервале $\log(M_{\text{loss}})$ от 7.15 до 7.50, медианное значение равно 7.30. Сравнительно низкая величина потери вещества атмосферы планеты *b*, прежде всего, вероятно связана со значительным ее удалением от звезды (большая полуось орбиты составляет 0.23 а.е.). Кроме того, подчеркнем, что мы посчитали достаточным использование аппроксимационной формулы, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии, поскольку нас интересовал ответ на вопрос об изменениях в потере вещества в случае вариации уровня долговременной активности звезды. Для планеты *c*, значительно удаленной от звезды (большая полуось орбиты равна 1.43 а.е. [1]) величина потери вещества атмосферы еще более низкая - порядка $5.23 \cdot 10^7$ г/с.

Согласно [1] зона обитаемости вокруг Gl 414A лежит в интервале от

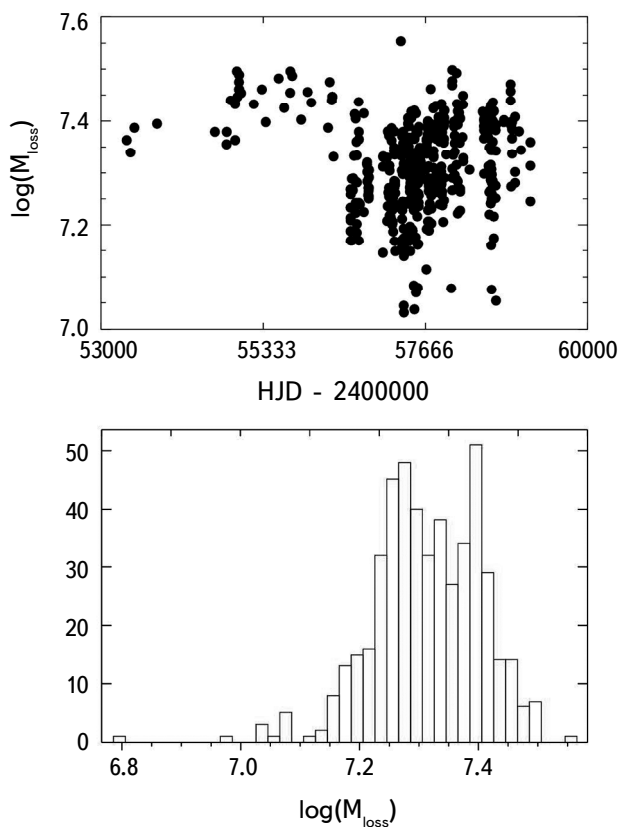


Рис.3. Вверху - потеря вещества атмосферы планеты *b* со временем; внизу - гистограмма для оценок потери вещества атмосферы планеты *b*.

0.37 а.е. до 0.70 а.е., однако более оптимистичная оценка величины внутренней границы составляет 0.21 а.е. Планета *c* лежит вне зоны обитаемости. Планета *b* частично заходит в зону обитаемости. Как было отмечено выше, расстояние от центральной звезды до Gl 414A *b* варьируется от 0.13 до 0.34 а.е., и на протяжении большей части своей орбиты планета находится в пределах этой обитаемой зоны. При этом, потеря вещества атмосферы планеты *b* составляет $5.23 \cdot 10^7$ г/с при величине $\log R'_{\text{HK}} = -4.50$ и для расстояния планеты от звезды, соответствующего величине большой полуоси 0.23 а.е. Для расстояний 0.13 а.е. и 0.34 а.е. потеря вещества атмосферы равна $16.21 \cdot 10^7$ г/с и $2.37 \cdot 10^7$ г/с, соответственно. Табл.1 содержит результаты численных оценок, полученных при варьировании параметров - активности звезды, расстоянии до планеты.

Таблица 1

ОЦЕНКИ ПОТЕРИ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ Gl 414A b

Параметр	Потеря вещества атмосферы планеты, г/с
$\log R'_{\text{HK}} = -4.72, a = 0.23 \text{ а.е.}$	$2.0 \cdot 10^7$
$\log R'_{\text{HK}} = -4.50, a = 0.23 \text{ а.е.}$	$5.23 \cdot 10^7$
$\log R'_{\text{HK}} = -4.50, a = 0.13 \text{ а.е.}$	$16.21 \cdot 10^7$
$\log R'_{\text{HK}} = -4.50, a = 0.34 \text{ а.е.}$	$2.37 \cdot 10^7$

4. *Заключение.* Представлены результаты анализа проявлений активности карлика спектрального класса K7 Gl 414A с двумя планетами. Звезда обладает спутником HD 97101B - карликом спектрального класса M2V. Отличительной особенностью планеты Gl 414A *b* является то, что при эксцентриситете $e=0.45$ на протяжении большей части своей орбиты планета находится в пределах зоны обитаемости. Наш анализ показал, что наиболее достоверным результатом определения периода вращения Gl 414A следует признать результаты анализа фотометрических наблюдений звезды, выполненных обзором Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT), указывающие на период вращения звезды $P=42$ сут. При этом, на периодограммах, построенных по другим наблюдениям Gl 414A, мы не видим пиков, соответствующих этому периоду. Цикл долговременной активности звезды составляет величину порядка 3800 сут (10.4 лет).

Полученные результаты изучения активности звезды использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты Gl 414A *b*. В данном 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 $\log R'_{\text{HK}}$ для звезд спектральных классов F–M. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы меняется от значения $2.0 \cdot 10^7$ г/с до $5.2 \cdot 10^7$ г/с в зависимости от принимаемой величины $\log R'_{\text{HK}}$. По 486 оценкам параметра S_{HK} были выполнены расчеты потери вещества атмосферой G1 414A b в течение интервала в 5805 сут (15.9 лет). Величины потери вещества атмосферы планеты b в основном лежат в интервале $\log(M_{\text{loss}})$ от 7.15 до 7.50, а медианное значение составляет 7.30. При величине эксцентриситета 0.45 расстояние от центральной звезды до G1 414A b варьируется от 0.13 до 0.34 а.е. Для этих расстояний получены оценки потери вещества атмосферы: $16.21 \cdot 10^7$ г/с и $2.37 \cdot 10^7$ г/с, соответственно.

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 и № 075-15-2022-1109).

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

THE ACTIVITY OF G1 414A WITH TWO PLANETS AND ITS EFFECT ON THE MASS LOSS OF THE PLANET G1 414A b ATMOSPHERE

I.S.SAVANOV

We present the results of the analysis of the manifestations of the activity of K7 dwarf G1 414A with two planets, one of which (planet G1 414A b) with an eccentricity of $e=0.45$ is located within the habitable zone for the most part of its orbit. Our analysis showed that the most reliable result of determining the rotation period of G1 414A should be obtained while the analysis of photometric observations of the star performed by the KELT survey, indicating the rotation period of the star $P=42$ days, which, however, is absent on periodograms constructed from other observations. The cycle of the long-term activity of the star is about 3800 days (10.4 years). The obtained results of stellar activity were used for the mass loss estimations of the atmosphere of the planet G1 414A b by an approximation formula for an energy-limited atmospheric loss model. On the base of 486 estimates of the parameter S_{HK} , calculations of mass loss from the atmosphere of G1 414A b were performed during the interval of 5805 days

(15.9 years). The values of mass loss from planet b atmosphere are mainly in the range $\log(M_{\text{loss}})$ from 7.15 to 7.50, the median value is 7.30. With an eccentricity of 0.45 the distance from the star to Gl 414A b varies from 0.13 to 0.34 AU, for these distances estimates of mass loss are equal to $16.21 \cdot 10^7$ g/s and $2.37 \cdot 10^7$ g/s, respectively.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. C.M.Dedrick, B.J.Fulton, H.A.Knutson *et al.*, Astron. J., **161**, 86, 2021.
2. I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko, Astron. Lett., **46**, 177, 2020.
3. T.T.Koskinen, P.Lavvas, M.Huang *et al.*, Astrophys. J., **929**, 52, 2022.
4. N.V.Erkaev, Yu.N.Kulikov, H.Lammer *et al.*, Astron. Astrophys., **472**, 329, 2007.
5. E.S.Kalinicheva, V.I.Shematovich, I.S.Savanov, Astron. Rep., **66**, 1319, 2022.
6. A.G.Sreejith, L.Fossati, A.Youngblood *et al.*, Astron. Astrophys., **644**, A67, 2020.
7. S. Boro Saikia, C.J.Marvin, S.V.Jeffers *et al.*, Astron. Astrophys., **616**, A108, 2018.
8. D.Lorenzo-Oliveira, F.C.Freitas, J.Melendez *et al.*, Astron. Astrophys., **619**, A73, 2018.