

УДК 524.6-13

## ОГРАНИЧЕНИЕ МАСС НЕСКОЛЬКИХ ТРАНЗИТНЫХ ПЛАНЕТ

© 2020 Д. Р. Гадельшин<sup>1\*</sup>, Г. Г. Валявин<sup>1,2,3</sup>, Бьён-Чол Ли<sup>4</sup>, Гуануй Чжонг<sup>4</sup>, Инву Хан<sup>4</sup>, Г. А. Галазутдинов<sup>5,6,1</sup>, В. Н. Аитов<sup>1</sup>, И. А. Якунин<sup>1,3</sup>, Т. Е. Бурлакова<sup>1</sup>, А. Ф. Валеев<sup>1</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия<sup>4</sup>Институт астрономии и космических исследований, Тэджон, 305-348 Корея<sup>5</sup>Институт астрономии, Северный католический университет, Антофагаста, 1270709 Chile<sup>6</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург, 196140 РоссияПоступила в редакцию 4 августа 2020 года; после доработки 17 сентября 2020 года;  
принята к публикации 17 сентября 2020 года

Представлены результаты измерений масс двух экзопланет и одного кандидата в экзопланеты: ранее подтверждённого нами кандидата в системе KOI-974, нового кандидата TESS в системе TOI-1797, а также известного горячего юпитера MASCARA-3b. Измерения выполнены при наблюдениях с помощью первой версии оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения 6-м телескопа БТА и с помощью спектрографа БОЕС Бохьонсанской астрономической обсерватории Корейского института космических исследований. Результаты измерений массы MASCARA-3b представлены с целью демонстрации работоспособности нового спектрографа БТА и в пределах ошибок не отличаются от измерений других авторов. Мы дали новую оценку верхнего предела массы KOI-974. В предположении круговой формы орбиты масса экзопланеты не превышает значения 0.16 массы Юпитера. Более сложные формы орбиты не просматриваются на уровне полуамплитуды лучевых скоростей более  $20 \text{ м с}^{-1}$ , в результате чего можно отнести эту экзопланету к категории нептун. Для планетного кандидата TOI-1797.01 выполнено всего четыре наблюдения, что не достаточно для его уверенной классификации. Между тем измерения лучевых скоростей кандидата по этим четырем наблюдениям исключают его звездную природу.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — планетные системы*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

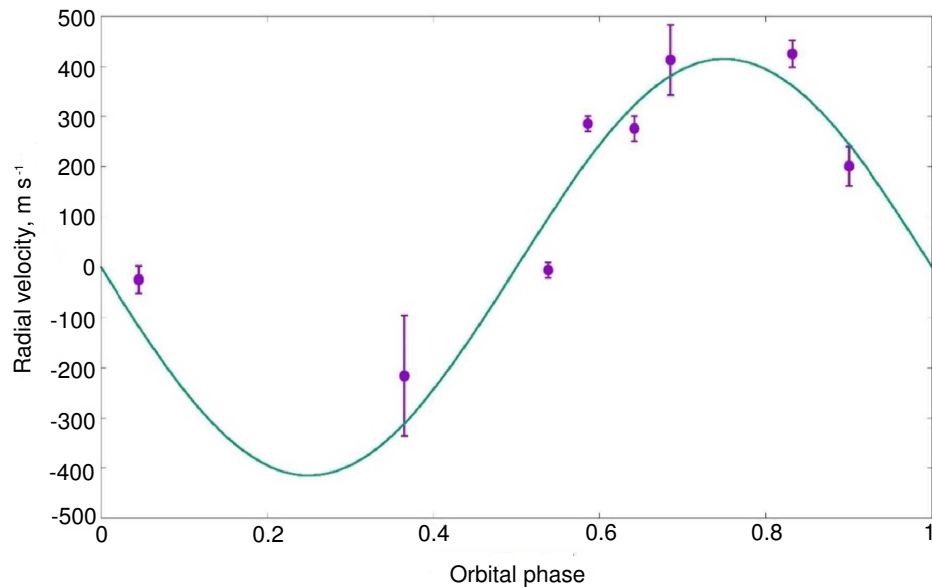
Мы представляем очередные результаты доплеровских наблюдений по проекту спектроскопического исследования экзопланет промежуточных масс и спектроскопическому подтверждению кандидатов в экзопланеты. Исследования проводятся с использованием недавно созданного оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения 6-м телескопа БТА (Valyavin et al. 2014; 2020) и с помощью спектрографа БОЕС Бохьонсанской астрономической обсерватории Корейского института космических исследований (Kim et al. 2007). Обоснование проведения исследований кратко описано в статье Gadelshin et al. (2017). В данной работе описываются и анализируются наблюдения двух экзопланет и одного нового кандидата в экзопланеты: MASCARA-3b (Rodriguez et al. 2019), KOI-974b и TOI-1797.01

соответственно. MASCARA-3b является хорошо изученным горячим юпитером (Rodriguez et al. 2019). Наблюдения этой экзопланеты выполнялись нами для проверки работоспособности нового спектрографа. Объект KOI-974b представляет собой планету (Gadelshin et al. 2017) размером немного меньше Нептуна, которая обращается вокруг F-субгиганта с периодом 53.5 суток. Кандидат TOI-1797.01, вероятно, также относится к мининептунам, но обращается вокруг солнцеподобной звезды с периодом около 3.65 суток (Akeson et al. 2013).

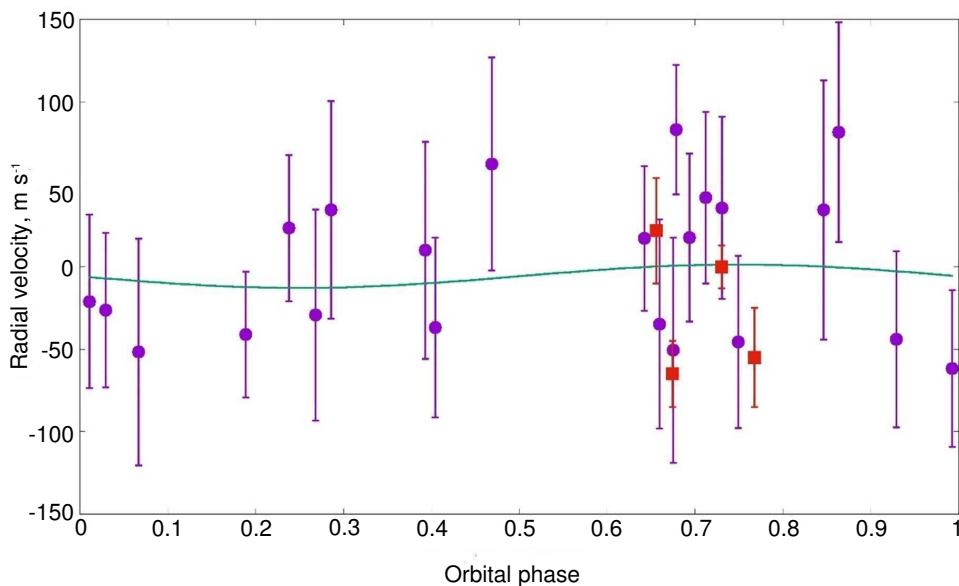
## 2. НАБЛЮДЕНИЯ, РЕДУКЦИЯ ДАННЫХ И ДОПЛЕРОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Новые наблюдения были выполнены с помощью спектрографа 1.8-м телескопа обсерватории Бохьонсан в Республике Корея (для KOI-974), а также с помощью оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения БТА

\*E-mail: gdamir-85@mail.ru



**Рис. 1.** Лучевая скорость звезды MASCARA-3, свернутая по фазе к орбитальному периоду планеты b. Фиолетовыми кружками показаны измерения с оптоволоконным спектрографом высокого разрешения БТА САО РАН. Зеленая линия — модельная кривая в предположении полуамплитуды лучевых скоростей  $415 \text{ м с}^{-1}$  (из статьи Hjorth et al. (2019)).



**Рис. 2.** Лучевая скорость KOI-974, свернутая по фазе к орбитальному периоду планеты b. Фиолетовыми кружками показаны измерения с помощью спектрографа 1.8-м телескопа обсерватории Бохьонсан, красными кружками — с оптоволоконным спектрографом высокого разрешения БТА САО РАН. Зеленая линия — модельная кривая в предположении полуамплитуды лучевых скоростей  $7 \text{ м с}^{-1}$ , вычисленная методом наименьших квадратов.

САО РАН в период с 2017 по 2020 гг. Журналы наблюдений и результатов измерений лучевых скоростей звезд этих и других экзопланет будут опубликованы нами в отдельной статье по завершении программы их наблюдений. Здесь же мы приводим промежуточные результаты, которые потенциально могут быть интересны другим исследователям этих экзопланет. Процесс наблюдений и методика изме-

рений лучевых скоростей родительских звезд экзопланет описаны в работе Burlakova et al. (2020).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

С началом эксплуатации оптоволоконного спектрографа высокого разрешения на БТА САО РАН в начале 2020 г. перед нами возникла

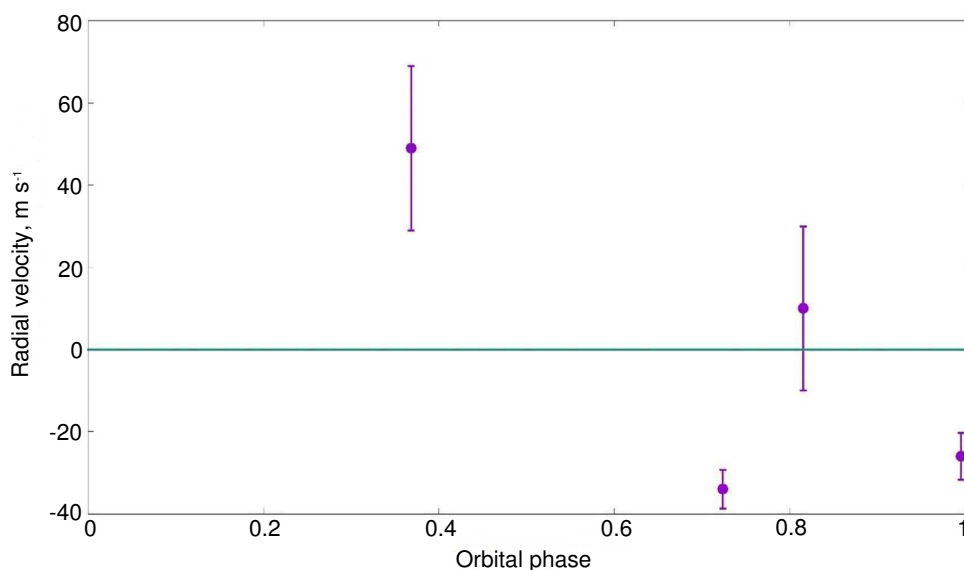


Рис. 3. Лучевая скорость TOI-1797, свернутая по фазе к орбитальному периоду кандидата 01. Фиолетовыми кружками показаны измерения с оптоволоконным спектрографом высокого разрешения БТА САО РАН.

задача проведения тестовых испытаний нового инструмента. Для этого мы выбрали массивный горячий юпитер MASCARA-3b, индуцирующий у своей звезды колебания лучевых скоростей с полуамплитудой больше  $400 \text{ м с}^{-1}$ , а также несколько меньших транзитных объектов у ярких звезд.

### 3.1. MASCARA-3 (KELT-24, HD 93148)

Открытие MASCARA-3b было опубликовано в июне 2019 г. двумя научными группами независимо друг от друга (Hjorth et al. 2019, Rodriguez et al. 2019). Этот очень массивный горячий юпитер с массой более  $4 M_{\text{Юп}}$  обращается вокруг звезды спектрального класса F7 ( $V = 8^{\text{m}3}$ ) с периодом 5.55 суток. Тест на переменность лучевых скоростей MASCARA-3b показал следующий результат: в пределах неточностей индивидуальных измерений (в среднем  $20\text{--}25 \text{ м с}^{-1}$ ) наши наблюдения полностью согласуются с данными из работ Hjorth et al. (2019), Rodriguez et al. (2019). Текущие результаты наших измерений показаны на рис. 1. Все эти и новые данные, которые мы планируем получить по MASCARA-3b на шкале ближайших двух лет, позволят нам уточнить физические параметры этой и других экзопланет на уровне, достаточном для объяснения их эволюционного статуса.

### 3.2. KOI-974

KOI-974b по размеру является мининептуном. Планета обращается вокруг субгиганта ( $V = 9^{\text{m}6}$ ) (Bellinger et al. 2019) с периодом 53.51 суток. Результаты наших измерений показаны на рис. 2.

Полученное из этих данных новое ограничение по массе ( $0.16 M_{\text{Юп}}$ ) в предположении круговой орбиты оставляет эту планету в категории нептунов.

### 3.3. TOI-1797 (HD 93963)

Планетный кандидат TOI-1797.01 обращается вокруг звезды спектрального класса G ( $V = 9^{\text{m}2}$ ) с периодом 3.65 суток и имеет размеры мининептуна (Akeson et al. 2013, Mugrauer and Michel 2020). В силу малого количества измерений лучевых скоростей (рис. 3), имеющихся на данный момент, мы не можем сильно ограничить массу кандидата. Однако мы считаем, что имеющихся четырех измерений с барями ошибок от  $4.7$  до  $20 \text{ м с}^{-1}$  достаточно для того, чтобы прийти к выводу о планетной природе кандидата.

## 4. ВЫВОДЫ

Новые доплеровские наблюдения были выполнены с помощью спектрографа 1.8-м телескопа обсерватории Бохьонсан в Республике Корея (для KOI-974), а также оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения БТА САО РАН. Для KOI-974b значительно улучшено ограничение амплитуды лучевых скоростей по сравнению с нашей первой работой: сейчас бар ошибок составляет в среднем около  $40 \text{ м с}^{-1}$ .

Для кандидата TOI-1797.01 всего было выполнено четыре измерения, приходящиеся на разные орбитальные фазы, но отличие лучевых скоростей родительской звезды от нулевых значений с барями

ошибок, которые составили от 4.7 до 20 мс<sup>-1</sup>, с большой вероятностью исключает непланетную природу транзитного объекта.

Для MASCARA-3b нами была прописана кривая лучевых скоростей на протяжении половины орбитальной фазы. Этот результат позволит нам получить первую оценку истинной массы экзопланеты, сделанную с помощью инструмента САО РАН.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке двух проектов Российского научного фонда (РНФ): наблюдения поддержаны проектом № 19-72-10023; анализ лучевых скоростей и оценки масс экзопланет выполнены за счет проекта № 19-72-00127 «Исследование транзитных экзопланет переходного размера». Компьютерная обработка данных выполнена за счет гранта Минобрнауки РФ № 13.1902.21.0039. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. L. Akeson, X. Chen, D. Ciardi, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **125** (930), 989 (2013).
2. E. P. Bellinger, S. Hekker, G. C. Angelou, et al., Astron. and Astrophys. **622**, 14 (2019).
3. T. E. Burlakova, G. G. Valyavin, V. N. Aitov, et al., Astrophysical Bulletin, 2020 (in press).
4. D. R. Gadelshin, G. G. Valyavin, M. V. Yushkin, et al., Astrophysical Bulletin **72**, 330 (2017).
5. M. Hjorth, S. Albrecht, G. J. J. Talens, et al., Astron. and Astrophys. **631**, 8 (2019).
6. K.-M. Kim, I. Han, G. G. Valyavin, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **119**, 1052 (2007).
7. M. Mugrauer and K.-U. Michel, arXiv:2009.12234 (2020).
8. J. E. Rodriguez, J. D. Eastman, G. Zhou, et al., Astron. J. **158**, 15 (2019).
9. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al. Astrophysical Bulletin **69**, 224 (2014).
10. G. G. Valyavin, F. A. Musaeu, A. V. Perkov, et al., Astrophysical Bulletin **75**, 191 (2020).

#### Mass Constraint of Several Transiting Planets

**D. R. Gadelshin<sup>1</sup>, G. G. Valyavin<sup>1, 2, 3</sup>, Byeong-Cheol Lee<sup>4</sup>, Gwanghui Jeong<sup>4</sup>, Han Inwoo<sup>4</sup>, G. A. Galazutdinov<sup>1, 5, 6</sup>, V. N. Aitov<sup>1</sup>, I. A. Yakunin<sup>1, 3</sup>, T. E. Burlakova<sup>1</sup>, and A. F. Valeev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

<sup>3</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

<sup>4</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, 305-348 Korea

<sup>5</sup>Instituto de Astronomia, Universidad Catolica del Norte, Antofagasta, 1270709 Chile

<sup>6</sup>Main (Pulkovo) Astronomical Observatory, St. Petersburg, 196140 Russia

We present the measurements of masses of two exoplanets and one exoplanet candidate: the candidate we earlier confirmed in the KOI-974 system, a new TESS candidate in the TOI-1797 system, and the well-known hot Jupiter MASCARA-3b. The observations were carried out using the first prototype of the high-resolution fiber-optic spectrograph of the 6-m BTA telescope, and with the BOES spectrograph of Bohyunsan Optical Astronomy Observatory of the Korea Astronomy and Space Science Institute. The MASCARA-3b mass estimates are presented to demonstrate the performance of the new BTA spectrograph and do not differ from the measurements of other authors within the errors. The KOI-974 mass estimate upper constraint is new. Assuming a circular orbit, the exoplanet mass does not exceed 0.16  $M_{\text{Jup}}$ . More complex orbital shapes are not visible at the radial velocity half-amplitude level of more than 20 мс<sup>-1</sup>, which classifies this exoplanet as the neptunes. Only four observations were obtained for the planetary candidate TOI-1797.01, which is insufficient for its confident classification. Meanwhile, the candidate's radial velocity values based on these four observations rule out its stellar nature.

Keywords: *methods: observational—planetary systems*