

УДК 520.84

НАБЛЮДЕНИЯ ПЕРЕМЕННОСТИ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД ПО СПЕКТРАМ, ПОЛУЧЕННЫМ С ОПТОВОЛОКОННЫМ СПЕКТРОГРАФОМ БТА В РЕЖИМЕ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2020 Т. Е. Бурлакова^{1*}, Г. Г. Валявин^{1,2,3}, В. Н. Аитов¹,
Г. А. Галазутдинов^{4,5,1,1}, А. Ф. Валеев¹, И. А. Якунин^{1,3}, Д. Р. Гадельшин¹,
В. Д. Бычков¹, А. В. Тавров⁶, А. Е. Иванова⁶, О. И. Кораблев⁶

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

⁴Институт астрономии, Северный католический университет, Антофагаста, 1270709 Chile

⁵Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург, 196140 Россия

⁶Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 августа 2020 года; после доработки 17 сентября 2020 года;
принята к публикации 17 сентября 2020 года

В настоящей работе представлены результаты наблюдений переменности лучевых скоростей звезд с экзопланетами. Наблюдения ряда звезд с характерными звездными величинами от 8^m54 до 10^m5 проводились с помощью нового оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения ($R = 35\,000\text{--}120\,000$), стационарно установленного на пяте фундамента 6-м телескопа БТА, в режиме спектральных разрешений от $R = 45\,000$ до $R = 65\,000$ с одновременной регистрацией калибровочного спектра торий-аргоновой лампы с полым катодом. Характерные точности измерений составили от нескольких единиц до нескольких десятков м с^{-1} . В перспективе торий-аргоновая лампа будет дополнена эталоном Фабри–Перо для достижения предельных точностей измерений лучевых скоростей звезд до 1 м с^{-1} .

Ключевые слова: техника: спектроскопия

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование внесолнечных планет различных типов является важнейшей научной задачей для построения теорий планетообразования и понимания эволюции планет. Двадцать пять лет, прошедшие с момента открытия первой экзопланеты (Mayor and Queloz 1995), продемонстрировали неполноту наших представлений о них, поскольку ранее наши знания были ограничены планетами только одной Солнечной системы. Внесолнечные планетные миры невероятно разнообразны по физическим свойствам — радиусам, массам, плотностям, химическому составу атмосфер и т.д., в том числе по тем свойствам, которые не наблюдаются у планет Солнечной системы (Fulton and Petigura 2018).

Подавляющее большинство экзопланет открыто фотометрическим методом наблюдения их транзитов по дискам родительских звезд (Akeson et al. 2013, Toledo-Adrón et al. 2020). Однако для подтверждения планетной природы кандидатов, открытых этим методом, необходимы дополнительные исследования. Одним из главных способов подтверждения присутствия планеты в системе является метод доплеровской спектроскопии высокого спектрального разрешения, с помощью которого возможно прямое определение массы объекта, проходящего на фоне диска его родительской звезды. Для этой цели создано целое поколение высокоточных спектрографов высокого спектрального разрешения, позволяющих измерять переменность лучевых скоростей звезд с точностями до одного м с^{-1} и менее (González Hernández et al. 2018). Подобный спектрограф создается и в Специальной астрофизической обсерватории Рос-

*E-mail: tbur@sao.ru

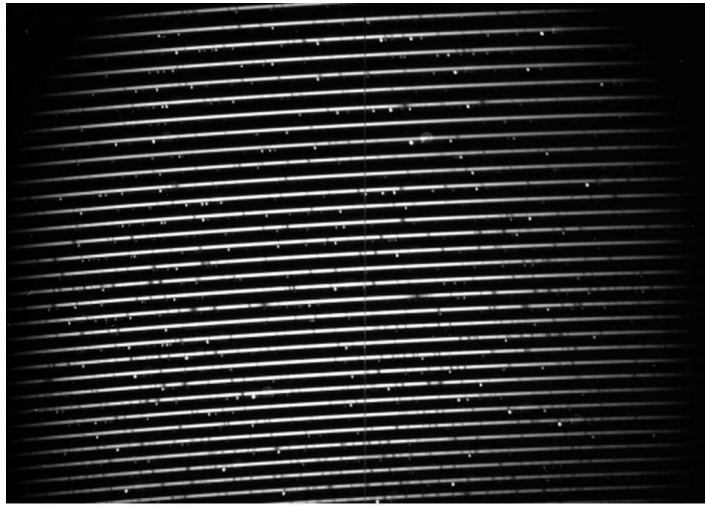


Рис. 1. Изображение эшелле-спектра звезды HD 93148: $m_V = 8.3$, $\text{exp} = 6$ мин., $R = 50\,000$, $S/N_{\text{peak}} \sim 80$. Узкие эмиссии в соседних спектральных порядках — спектр торий-аргоновой лампы.

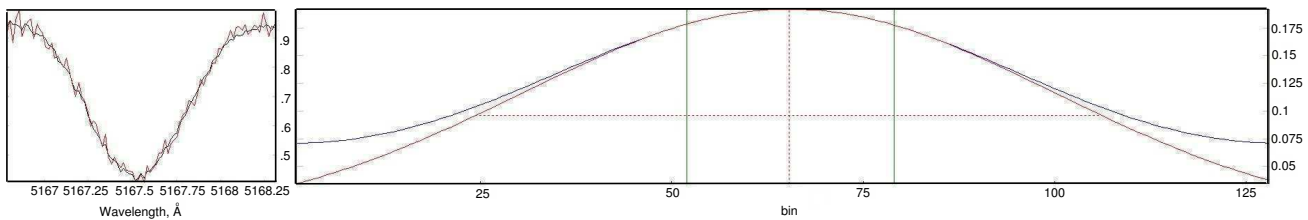


Рис. 2. Пример кросс-корреляционной функции (справа) в результате кросс-корреляции спектральной линии (слева) в двух разнесенных во времени спектрах родительской звезды MASCARA-3b.

сийской академии наук (САО РАН) (Valyavin et al. 2014; 2015). В настоящее время наш новый инструмент, установленный на 6-м телескопе БТА, проходит тестовые испытания в реальных наблюдениях звезд с экзопланетами. В этой статье мы приводим первые результаты такого исследования.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕДУКЦИЯ ДАННЫХ

Оптоволоконный спектрограф, на котором были выполнены наблюдения, представляет собой эшелле-спектрограф высокого спектрального разрешения ($R = 35\,000$ – $100\,000$), стационарно установленный на пяти фундамента БТА. Различные режимы спектральных разрешений достигаются с использованием оптоволокон с разными размерами ядер. Краткое описание спектрографа дано в работе Valyavin et al. (2020). Полное описание будет представлено нами позже в отдельной статье, где будут показаны все его конструктивные особенности и режимы наблюдений. В настоящей работе спектрограф использовался в режиме спектральных разрешений от $R = 45\,000$ до $R = 65\,000$ в диапазоне длин волн от 4300 до 6400 Å. Кроме спектров исследуемых звезд инструмент одновременно регистрирует калибровочный спектр

торий-аргоновой лампы с полым катодом. Такая конфигурация позволяет контролировать механические нестабильности, возникающие в спектральном тракте из-за температурных флуктуаций, либо иных причин.

На рис. 1 приведено изображение эшелле-спектра звезды HD 93148, полученное со спектрографом. Каждый спектральный порядок состоит из двух разнесенных в пространстве строб, на одном из которых представлен спектр звезды, на другом — спектр торий-аргоновой лампы. Обработка такого изображения стандартным методом сводится к получению двух экстрагированных спектров, полученных на одном изображении: спектров звезды и торий-аргоновой лампы (спектра сравнения). Одновременные измерения лучевых скоростей по спектральным линиям звезды и спектра сравнения, проведенные по всему ряду наблюдений той или иной звезды, дают возможность оценить амплитуду доплеровской переменности лучевой скорости звезды, исправленную за механическую нестабильность прибора, которая контролируется спектром сравнения.

Лучевые скорости спектральных линий измерялись с помощью пакета программ DECH1 мето-

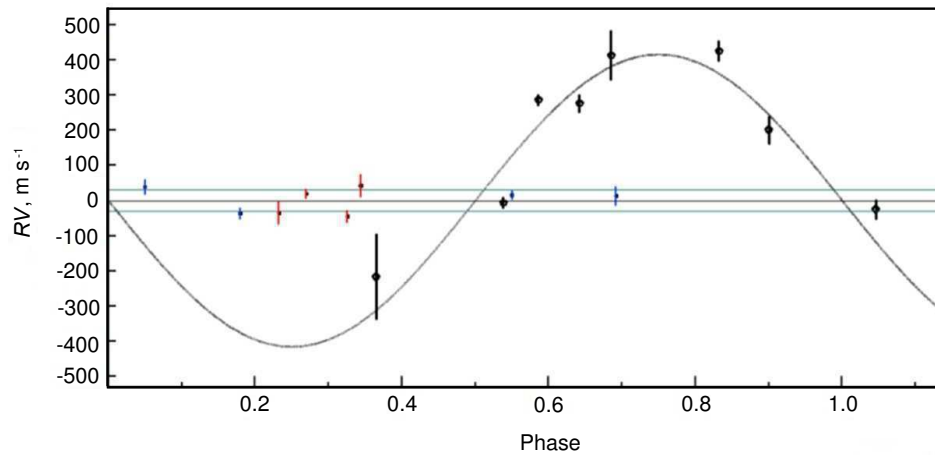


Рис. 3. Результаты измерений переменности лучевых скоростей звезд с экзопланетами.

дом одномерной кросс-корреляции по алгоритму, основанному на преобразовании Фурье, предложенному в работе Topcu and Davis (1979). Ошибка измерения оценивалась способом, подобным тому, что представлен в системе обработки астрономических данных IRAF с учетом модификации алгоритма, предложенной в статье Verschueren and David (1999). Метод основан на аппроксимации главного пика корреляционной функции полиномом второго порядка с последующей оценкой интенсивности и ширины пика на половине его интенсивности (см. рис. 2). Благодаря тому, что в качестве спектра-шаблона мы использовали один из спектров звезды, оценка ошибки свободна от нежелательных эффектов, обусловленных несовпадением шаблона и исследуемого спектра. Финальный результат и ассоциированная с ним неточность лучевой скорости по тому или иному спектру получались усреднением всех единичных измерений лучевых скоростей по индивидуальным линиям, взвешенным по статистическим весам этих измерений. В качестве статистических весов приняты квадраты обратных величин ошибок индивидуальных измерений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пробные спектроскопические наблюдения нескольких звезд солнечного типа с экзопланетами были проведены на новом спектрографе 6-м телескопа в апреле–июне 2020 г. Целью наблюдений было тестирование инструмента для выяснения характерных точностей измерения лучевых скоростей звезд по их спектрам. В настоящей статье приводятся результаты наблюдения звезды MASCARA-3 (HD 93148), на орбите которой недавно была обнаружена массивная планета, вызывающая колебания лучевых скоростей родителя с полуамплитудой более 400 мс^{-1} , а также KOI-974 и TOI-1797 (HD 93963), которые

являются родительскими звездами экзопланет промежуточных и малых масс с амплитудами переменности лучевых скоростей менее 30 мс^{-1} . Журналы наблюдений с результатами измерений лучевых скоростей звезд будут представлены нами позже по окончании программы мониторинга этих объектов. В данной статье мы ограничиваемся общей иллюстрацией результатов, достигнутых со спектрографом.

Результаты исследования представлены на рис. 3, где сплошной линией изображена кривая изменения лучевой скорости известной экзопланеты MASCARA-3b. Черными кружками с черточками обозначены результаты измерения лучевой скорости этой экзопланеты и ассоциированные бары ошибок по нашим наблюдениям. Символами других цветов обозначены результаты измерений лучевых скоростей других звезд солнечного типа, не показавших каких-либо значимых изменений их лучевых скоростей. Точности измерения лучевых скоростей звезд зависят от их спектрального класса, яркости и условий наблюдений и варьируются от 4.7 до 20 мс^{-1} для звезд солнечного типа. Неточности в наблюдаемых значениях лучевых скоростей MASCARA-3 традиционно выше в силу того, что эта звезда относится к несколько более раннему спектральному типу, чем солнцеподобные звезды класса G.

4. ВЫВОДЫ

В САО РАН впервые проведены высокоточные наблюдения переменности лучевых скоростей звезд с экзопланетами. Они были выполнены с помощью нового оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения на 6-м телескопе БТА. Для стационарных звезд солнечного типа характерные точности единичных измерений

составляют от 4.7 до 20 мс⁻¹ в зависимости от погодных условий и яркости той или иной звезды.

В настоящее время предельная точность измерения лучевых скоростей со спектрографом (4–5 мс⁻¹) ограничивается спектральным разрешением $R = 65\,000$, неполным спектральным диапазоном вследствие использования временной проекционной камеры (подробности см. в работе Valyavin et al. (2020)) и эталоном для калибровки по длинам волн. С заменой проекционной камеры на штатную (ориентировочно в 2021 г.) и с введением в практику спектральных наблюдений эталона Фабри–Перо для получения интерференционного спектра гребенки опорных частот предельная точность будет доведена примерно до 1 мс⁻¹.

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 выполнены 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. B. J. Fulton and E. A. Petigura, *Astron. J.* **156** (6), 264 (2018).
3. J. I. González Hernández, F. Pepe, P. Molaro, and N. Santos, in *Handbook of Exoplanets* (Springer Int. Publ. AG, 2018), id. 157.
4. M. Mayor and D. Queloz, *Nature*, 378 (6555), 355 (1995).
5. B. Toledo-Padrón, C. Lovis, A. Suárez Mascareño, et al., *Astron. and Astrophys.* **641**, id. A92 (2020).
6. J. Tonry and M. Davis, *Astron. J.* **84**, 1511 (1979).
7. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
8. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 305 (2015).
9. G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75**, 191 (2020).
10. W. Verschueren and M. David, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **136**, 591 (1999).

Observations of Radial Velocity Variability in Stars from the Spectra Obtained with the BTA Fiber-Fed Spectrograph in High Spectral Resolution Mode

T. E. Burlakova¹, G. G. Valyavin^{1,2,3}, V. N. Aitov¹, G. A. Galazutdinov^{1,4,5}, A. F. Valeev¹, I. A. Yakunin^{1,3}, V. D. Bychkov¹, A. V. Tavrov⁶, A. E. Ivanova⁶, O. I. Korabiev⁶, and J.-L. Bertaux⁶

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

³St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

⁴Instituto de Astronomia, Universidad Catolica del Norte, Antofagasta, 1270709 Chile

⁵Main (Pulkovo) Astronomical Observatory, St. Petersburg, 196140 Russia

⁶Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

We present the results of observations of radial velocity variability in stars with exoplanets. Observations of a number of stars with characteristic stellar magnitudes from 8^m54 to 10^m5 were carried out using a new high-resolution ($R = 35\,000$ – $120\,000$) fiber-fed spectrograph mounted at the foundation of the 6-m BTA telescope, in the mode of resolutions from $R = 45\,000$ to $R = 65\,000$ with a simultaneous registration of the calibration spectrum of a thorium–argon hollow-cathode lamp. The achieved characteristic measurement accuracies ranged from a few to several tens of мс⁻¹. In the future, the thorium–argon lamp will be supplemented with a Fabry–Perot etalon to reach the radial velocity measurement accuracy in stars up to 1 мс⁻¹.

Keywords: *techniques: spectroscopic*