

УДК 524.6:520.84

ЭКЗОПЛАНЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ КАНДИДАТОВ В ЭКЗОПЛАНЕТЫ, ОТКРЫТЫХ ТЕЛЕСКОПОМ «КЕПЛЕР»

© 2017 Д. Р. Гадельшин^{1*}, Г. Г. Валявин¹, М. В. Юшкин¹, Е. А. Семенко¹, Г. А. Галазутдинов^{2,3,1}, О. В. Марьева^{1,4}, А. Ф. Валеев¹, Бьенг-Чол Ли⁵

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

² Северный католический университет, Антофагаста, 1240000 Чили

³ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

⁴ Астрономический институт Академии наук Чехии, Ондржейов, 251 65 Республика Чехия

⁵ Институт астрономии и космических исследований, Тэджон, 305-348 Корея

Поступила в редакцию 10 июня 2017 года; принята в печать 26 июня 2017 года

В этой статье мы представляем результаты спектроскопического подтверждения кандидатов в экзопланеты из каталога космической миссии «Кеплер.» С помощью спектрографа НЭС 6-м российского телескопа БТА лучевые скорости родительских звезд объектов KOI-974.01, KOI-2687.01/02 и KOI-2706.01 проверены на доплеровскую переменность. Согласно полученным верхним пределам, KOI-2706.01 имеет массу существенно меньше 12 масс Юпитера, что прямо указывает на его планетную природу. Показано, что объекты KOI-2687.01 и KOI-2687.02, по данным фотометрии имеющие радиусы земного размера или размеры белого карлика, не могут быть белыми карликами, а значит и они являются экзопланетами. Анализ лучевых скоростей KOI-974, звезды класса F, показал заметную переменность на уровне полуамплитуды в 400 м с^{-1} , которая плохо коррелирует с фазой ее орбитального вращения. Это указывает на возможное присутствие в системе других массивных планет на внутренних или внешних по отношению к объекту KOI-974.01 орбитах, либо маломассивной звезды на дальней внешней орбите. Методом синтетических спектров для всех родительских звезд программы получены более точные оценки параметров атмосферы и радиусов, что, в свою очередь, позволило уточнить радиусы исследуемых кандидатов в экзопланеты.

Ключевые слова: *планетные системы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытие и изучение планет с различными орбитальными и физическими характеристиками представляет собой важнейшую научную задачу в контексте тестирования теорий планетообразования и понимания эволюции планет. Уникальные возможности как для массовых открытий экзопланет, так и для анализа их свойств — радиусов, масс, плотностей, химического состава атмосфер и т.д. — дает изучение транзитных планет. Большинство экзопланет в настоящее время открывается и исследуется именно методом фотометрических транзитов. Однако этот метод не обеспечивает стопроцентный успех в однозначном детектировании планет. Короткое на фоне длительности орбитального цикла падение блеска родительской звезды является необходимым, но не

достаточным условием для открытия транзитной планеты вследствие неоднозначной связи размера космического объекта с его массой. В частности, событие прохождения холодного белого карлика на фоне горячей родительской звезды может быть фотометрически идентично транзиту планеты земного радиуса. Более распространенным примером подобной неоднозначности является транзит звезд — коричневых карликов, которые практически неотличимы от планет размером с Юпитер. В таких случаях результативны другие методы анализа кандидатов в экзопланеты — в частности, спекл-интерферометрические (см., например, [1]) и метод лучевых скоростей [2]. В Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН, Россия) наблюдения по программе подтверждения кандидатов в экзопланеты, обнаруженных в ходе различных фотометрических обзоров и космических

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

миссий, проводятся с использованием, в основном, спекл-интерферометрической и спектральной аппаратуры 6-м телескопа БТА.

В настоящей статье представлены результаты изучения методом лучевых скоростей звёзд KOI-974, KOI-2687 и KOI-2706, предположительно имеющих транзитные планеты. Эти звёзды находятся в той области небесной сферы, которая была исследована космическим телескопом «Кеплер» в рамках его основной четырехлетней миссии. Накопление и обработка командой «Кеплера» огромного объёма фотометрических данных позволили открыть несколько тысяч планетных кандидатов [3], и большинство из них — автоматически, с помощью пакета компьютерных программ «Kepler pipeline» [4]. Сведения о кандидатах и их родительских звёздах доступны на сайте экзопланетного архива NASA¹.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Подтверждение обнаружения кандидатов в планеты представляет собой отдельный комплекс исследований, который проводится наземными средствами. Как упоминалось выше, затмевающее звезду тело может иметь непланетную природу. Помимо транзитов карликовых звезд за прохождение планеты (даже малого размера) по диску родительской звезды могут быть приняты: 1) частичные затмения в системе двойной звезды; 2) затмения в системе двойной звезды фона, находящейся на небольшом угловом расстоянии от более яркой звезды, при низком качестве изображений (poor seeing) или недостаточном разрешении наблюдательной аппаратуры. Кроме естественных причин имитацию транзитов могут вызывать различные процессы в приёмном устройстве. Как правило, подтверждение планетной природы транзитных кандидатов проводят после определения параметров родительских звёзд с наилучшей точностью, поиска их возможных звёздных компаньонов и учёта влияния последних на фотометрию.

В методике подтверждения можно выделить два независимых направления:

- исключение всех возможных явлений, которые могут имитировать прохождение планет по диску звёзд;
- оценки массы планеты с помощью метода лучевых скоростей или «тайминга» транзита, если кандидат находится в составе многопланетной плоской системы (см., например, [5] и ссылки там).

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

Иногда ограничиваются одним исследованием, например, проводится только статистическое исключение явлений, имитирующих транзит, без измерения масс кандидатов. Это вполне распространённая практика в случае кандидатов «Кеплера» [6].

Для исключения непланетной природы выбранных кандидатов мы накладываем ограничения на амплитуду колебаний, вызываемых околозвёздными спутниками, используя метод измерения лучевых скоростей. Спектральные наблюдения родительских звезд с максимально высоким разрешением проводятся на эшелле-спектрометре НЭС [7, 8], стационарно установленном в фокусе Нэсмит-2 6-м телескопа БТА САО РАН.

Мы считаем фотометрические данные «Кеплера», а также физические параметры звёзд, определенные командой «Кеплера» специально для создания каталога кандидатов [9], вполне надёжными. Тем не менее, используя полученные в ходе программы спектры высокого разрешения необходимого качества, мы определяем некоторые из этих параметров. В частности, получаем оценки ускорений свободного падения, эффективных температур и металличностей исследуемых родительских звёзд, что дает возможность уточнить физические параметры и самих кандидатов в экзопланеты.

3. ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ПРОГРАММЫ

При выборе объектов из каталога кандидатов «Кеплера» NASA мы руководствуемся следующими критериями:

- подобие Солнцу по таким физическим параметрам как масса, эффективная температура и размер;
- отсутствие звёзд-«соседей» на близких угловых расстояниях, вклад от излучения которых может усложнить задачу интерпретации природы объекта, вызывающего затмение;
- максимальная длительность непрерывных наблюдений «Кеплером» для исключения инструментальных и иных ошибок, благодаря чему создан огромный массив статистических данных по транзитам исследуемых кандидатов;
- наличие явно выраженных транзитных событий, повторяющихся с частотой не больше 100 земных суток, и имеющих глубины, соответствующие небольшим планетам (с радиусами меньше радиуса Урана, $4 R_{\oplus}$);
- отсутствие подтверждённого статуса транзитного кандидата;
- U-образная форма транзитов — «плоское дно» затмения говорит о том, что объект, экранирующий свет звезды, заходит на её диск целиком;

Таблица 1. Журнал наблюдений

| Date | Object | N_{exp} | T_{exp} , s | Seeing |
|-----------------|----------|------------------|----------------------|--------|
| Jul 13/14, 2016 | KOI-2706 | 3 | 2400 | 1''5 |
| Jul 13/14, 2016 | KOI-974 | 2 | 2400 | 1''5 |
| Jul 13/14, 2016 | KOI-2687 | 3 | 2400 | 1''5 |
| Aug 18/19, 2016 | KOI-2706 | 2 | 3600 | 1''5 |
| Aug 18/19, 2016 | KOI-974 | 2 | 3000 | 1''5 |
| Aug 18/19, 2016 | KOI-2687 | 2 | 3600 | 1''5 |
| Nov 12/13, 2016 | KOI-974 | 3 | 2400 | 1''5 |
| Nov 12/13, 2016 | KOI-2687 | 3 | 2700 | 1''5 |
| May 12/13, 2017 | KOI-974 | 2 | 2700 | 3'' |

- относительно высокая яркость объекта для достижения необходимой точности в определении лучевых скоростей при наблюдениях на спектрографе НЭС.

В данной работе представлены результаты наблюдений трех звезд из каталога планетных кандидатов:

- KOI-974, $m_{\text{кр}} = 9^{\text{m}}58$;
- KOI-2687, $m_{\text{кр}} = 10^{\text{m}}16$;
- KOI-2706, $m_{\text{кр}} = 10^{\text{m}}27$.

Блеск указан в звёздных величинах по «Кеплеру» — для солнцеподобных звёзд их значения очень близки к значениям в фильтре *V* системы Джонсона–Козинса.

Согласно работе [10], в радиусе 4'' вокруг выбранных звёзд отсутствуют какие-либо компаньоны, имеющие разность блеска с главной звездой меньше, чем 6^m.

4. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ МАТЕРИАЛА

Как уже упомянуто выше, исследования лучевых скоростей проводились с помощью спектрографа НЭС² [7, 8]. Инструмент представляет собой эшелле-спектрограф высокого спектрального разрешения ($R = 40\,000\text{--}60\,000$), стационарно установленный в фокусе N2 6-м телескопа САО РАН. Максимальное разрешение достигается с помощью трёхступенчатого резателя изображений [7]. Спектрограф одновременно покрывает весь видимый спектральный диапазон, является вполне эффективным для наблюдения звёзд заявленной яркости и обеспечивает достаточную точность измерения

²<http://www.sao.ru/hq/ssl/sdev/NES.html>

Таблица 2. Результаты измерений лучевых скоростей кандидатов в экзопланеты

| Object | JD | ϕ_1 | ϕ_2 | RV , km s ⁻¹ | $\sigma(RV)$, km s ⁻¹ |
|----------|-------------|----------|----------|------------------------------|--------------------------------------|
| KOI-974 | 2457583.435 | 0.170 | — | -21.38 | 0.12 |
| | 2457619.369 | 0.843 | — | -20.53 | 0.13 |
| | 2457619.498 | 0.846 | — | -21.01 | 0.12 |
| | 2457705.203 | 0.447 | — | -21.88 | 0.19 |
| KOI-2706 | 2457886.432 | 0.834 | — | -21.42 | 0.13 |
| | 2457583.290 | 0.410 | — | -36.71 | 0.19 |
| | 2457619.324 | 0.048 | — | -36.57 | 0.16 |
| KOI-2687 | 2457619.458 | 0.091 | — | -36.55 | 0.18 |
| | 2457583.454 | 0.150 | 0.0859 | +11.29 | 0.18 |
| | 2457619.409 | 0.093 | 0.4883 | +11.23 | 0.14 |
| | 2457619.538 | 0.169 | 0.5041 | +11.15 | 0.13 |
| | 2457705.297 | 0.121 | 0.0043 | +11.37 | 0.16 |

лучевых скоростей звёзд [11], чтобы решить поставленную в этой работе задачу.

Наблюдения проводились в течение четырёх ночей в 2016 и 2017 гг. Таблица 1 даёт краткую сводку по этим наблюдениям. Как можно видеть, погодные условия в целом были хорошими, кроме ночи 12/13 мая 2017 г., когда были получены спектры лишь для одного, самого яркого, кандидата.

Описание первичной редукции полученных данных приводится в работе [12]. Измерения лучевых скоростей по спектрам звёзд программы также проводились по стандартной схеме путем измерения индивидуальных спектральных линий, для каждой из которых измерялся её «центр тяжести.» Отбор и отождествление линий осуществлялись с помощью базы данных VALD [13, 14]. При этом выбирались только одиночные, наиболее симметричные, линии с остаточными интенсивностями более 40% в единицах континуума. Результаты индивидуальных измерений затем статистически усреднялись взвешиванием, предложенным в [15].

Затмевающие тела с размерами менее $4R_{\oplus}$ либо являются настоящими планетами, либо относятся к совершенно иному типу астрономических объектов — белым карликам (коричневым карликам или маломассивным звёздам в случае неправильного определения размеров родительских звёзд). Лучевые скорости, которые должны индуцировать объекты звёздных масс, являются достаточно большими, чтобы можно было

надёжно исключить их планетную природу (больше нескольких км с⁻¹ как минимум). Массы же планет могут быть недостаточными для того, чтобы при небольшом количестве измерений наводимые ими колебания лучевых скоростей можно было бы уверенно зарегистрировать на НЭС БТА [11].

По результатам проведенных наблюдений можно сделать первые выводы. В ходе анализа были получены индивидуальные оценки абсолютных лучевых скоростей кандидатов за каждую ночь. Характерная «внутренняя» точность измерения лучевых скоростей по сотням отобранных линий в каждом спектре составляла типичную величину примерно от 70 м с⁻¹ до 100–120 м с⁻¹. Между тем необходимость исправлять ошибки, накопленные из-за нестабильности спектрографа в течение наблюдательной ночи, потребовала от нас корректировки оценок лучевых скоростей с использованием поправок, привязанных к позиционным положениям теллурических линий в спектрах исследуемых звёзд. Это естественным образом внесло дополнительную статистическую ошибку в индивидуальные измерения, которые в исправленном виде приведены в таблице 2. В ней колонка «Object» представляет имя звезды-кандидата, «JD» — юлианская дата наблюдений, ϕ_1 и ϕ_2 — орбитальные фазы первого и второго (если есть) кандидатов планетного размера у данной звезды. Результаты исследования переменности лучевых скоростей звезд программы представлены также на рисунке, подробное рассмотрение которого следует ниже.

Параметры выбранных систем из каталога KOI (согласно последнему релизу данных DR25) даны в таблице 3. Как можно видеть, все кандидаты в экзопланеты имеют радиусы, сравнимые с земным. Поэтому отсутствие регистрации переменности лучевых скоростей на уровне представленных точностей их измерения позволяет дать положительное заключение в пользу планетной природы кандидатов.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализируя результаты измерений для каждого кандидата, мы исходили из того, что физические параметры их родительских звёзд, указанные в кеплеровском обзоре, верны. Между тем качество спектрального материала, полученного в ходе этой работы, оказалось вполне приемлемым для определения своих оценок некоторых из этих параметров. Это позволило нам провести независимую экспертизу кандидатов, которую мы представляем в разделе «Обсуждение результатов.»

Таблица 3. Параметры выбранных систем согласно каталогу KOI

| Candidate name | Orbital period, d | Radius, R_{\oplus} | T_o (JD) |
|----------------|----------------------------|---|---------------|
| KOI-974.01 | 53.5057611 ±0.0001596 | 2.52 ^{+0.16} _{-0.12} | 2455005.98304 |
| KOI-2687.01 | 1.716828304 ±0.00000941 | 0.74 ^{+0.012} _{-0.03} | 2454965.03204 |
| KOI-2687.02 | 8.16733851 ±0.0000602 | 1.03 ^{+0.015} _{-0.06} | 2454969.20356 |
| KOI-2706.01 | 3.09756897 ±0.00003169 | 1.75 ^{+0.07} _{-0.08} | 2454964.55889 |

5.1. KOI-974 (KIC 9414417)

Эта звезда с планетным кандидатом, вероятно, принадлежит Главной последовательности или же является субгигантом позднего F-класса. Ее радиус был оценен в $1.762^{+0.112}_{-0.084} R_{\odot}$, эффективная температура $T_{\text{eff}} = 6247^{+75}_{-69}$ К. На кривой блеска этой звезды наблюдаются транзитные события, имеющие одинаковую глубину и форму, отстоящие друг от друга на 53.51 суток, по-видимому, принадлежащие одному телу. Глубина затмения соответствует планете с радиусом $2.52 R_{\oplus}$. Параметры затмевающих тел указаны в таблице 3. Они были использованы для точного построения фазовой кривой и нанесения на неё значений лучевых скоростей.

Наблюдения KOI-974 на НЭС БТА проводились в течение четырех ночей: 13 июля, 18 августа, 12 ноября 2016 г. и 12 мая 2017 г. Всего для этой звезды получено девять спектров, часть из которых была усреднена внутри последовательных наблюдений одной ночи. В результате анализа этих спектров было получено пять устойчивых оценок лучевой скорости KOI-974 (таблица 2). Мы нашли (рисунок, панель (а)), что разброс лучевых скоростей у звезды составляет не более 400 м с⁻¹ в разные моменты времени. Причём в одну и ту же фазу кандидата KOI-974.01, 0.83–0.84, но в разные даты наблюдений значения лучевых скоростей звезды сильно различаются (бары ошибок даже не пересекаются). Вероятнее всего, разброс лучевых скоростей указывает на долгопериодический тренд, т.е. в системе может присутствовать дополнительное тело (или несколько тел) на широких орбитах.

Если отклонение 400 м с⁻¹ лучевой скорости родительской звезды вызывает KOI-974.01, то её масса должна быть равной около восьми масс

Юпитера. Однако размер планеты составляет всего 2.52 размера Земли, что при подобной массе привело бы к физически нереалистичной плотности. Соответственно, с большой долей вероятности мы подтверждаем планетную природу KOI-974.01 и высказываем предположение, что в системе имеется ещё по меньшей мере один невидимый спутник в случае, если данные «Кеплера» о физических характеристиках родительской звезды KOI-974 являются верными. Между тем в следующем разделе мы рассмотрим и другую интересную возможность.

5.2. KOI-2687 (KIC 7202957)

Родительская звезда, вероятно, относится к звездам Главной последовательности раннего G-класса. Её радиус был оценен в $0.902^{+0.138}_{-0.046} R_{\odot}$, эффективная температура $T_{\text{eff}} = 5808^{+105}_{-128}$ К. Фотометрическая кривая этой звезды демонстрирует два типа транзитных сигналов, за которые, по-видимому, ответственны два планетных кандидата, имеющих радиусы 0.74 и 1.03 R_{\oplus} . Их периоды соответственно составляют 1.72 и 8.17 суток. Отношение их периодов приблизительно равно 1:4.76 (или 4:19). Наличие сразу двух транзитных тел у одной звезды резко повышает вероятность их истинно планетной природы.

Мы наблюдали KOI-2687 на НЭС БТА в течение трех ночей: 13 июля, 18 августа, и 12 ноября 2016 года. Всего для этой звезды было получено восемь спектров высокого разрешения. Согласно полученным нами измерениям, разброс лучевых скоростей у KOI-2687 оказывается сравним с нулём (см. рисунок, панель (b): треугольниками изображены оценки лучевых скоростей первого кандидата, квадратами — второго). С большой вероятностью оба кандидата этой системы также являются настоящими планетами, поскольку отсутствие орбитальных возмущений лучевых скоростей от тел звёздных масс в этой системе мы исключаем полностью.

5.3. KOI-2706 (KIC 9697131)

Этот объект из каталога кандидатов [9], вероятно, является звездой-субгигантом позднего F- или раннего G-класса, радиус которой оценен в $1.885^{+0.075}_{-0.093} R_{\odot}$. Эффективная температура $T_{\text{eff}} = 6329^{+82}_{-76}$ К. В результате фотометрии у этой звезды по наблюдениям «Кеплера» обнаружен единственный транзитный сигнал, за который может нести ответственность планетный кандидат, имеющий период 3.1 суток. Его радиус оценивается в 1.75 R_{\oplus} .

Наблюдения KOI-2706 на НЭС БТА проводились в течение двух ночей: 13 июля и 18 августа

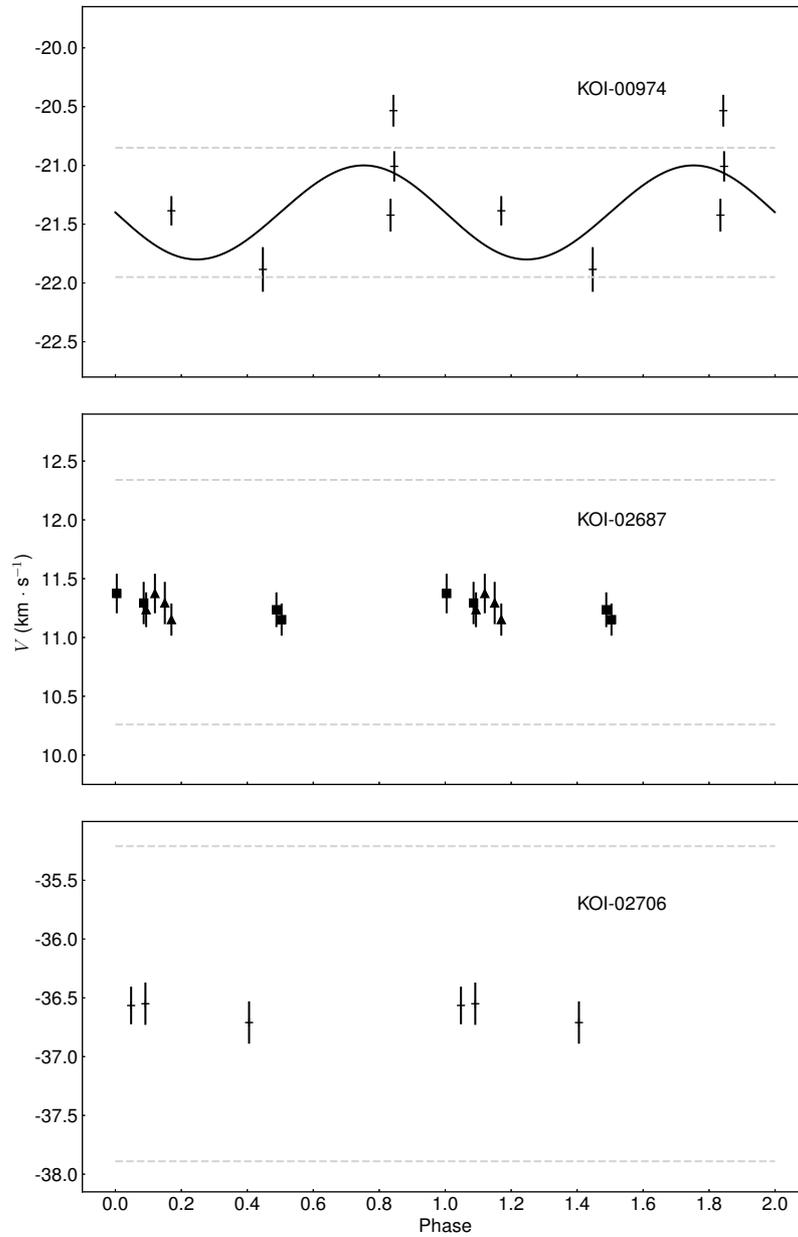
2016 г. Всего для этой звезды было получено пять спектров высокого разрешения, которые в рамках одной ночи были последовательно усреднены. Согласно нашим оценкам, разброс лучевых скоростей KOI-2706 также оказывается близок к нулю — в предположении круговой орбиты полуамплитуда лучевых скоростей не превышает 800 мс^{-1} . С большой долей вероятности кандидат KOI-2706.01 также является настоящей планетой.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы представили результаты исследования кандидатов в планеты KOI-974.01, KOI-2687.01/02 и KOI-2706.01. С помощью спектрографа НЭС 6-м российского телескопа БТА лучевые скорости родительских звезд этих объектов проверены на доплеровскую переменность. Согласно полученным верхним пределам, все изученные кандидаты не могут быть объектами звёздных масс, что подтверждает их планетную природу. И этот результат не зависит от того, насколько точно параметры родительских звёзд систем были определены командой «Кеплера.» Отметим, что интерпретация нашего результата в контексте вероятных размеров кандидатов в экзопланеты, в особенности кандидата KOI-974.01, зависит от точности измерения параметров звёзд. В ходе программы нами были получены спектры высокого разрешения родительских звёзд кандидатов. С целью уточнения их параметров мы предприняли модельный анализ спектров.

Параметры атмосфер звезд (эффективная температура T_{eff} , логарифм ускорения свободного падения $\lg g$ и микротурбулентная скорость v_{turb}) определялись из условия ионизационного равновесия для атомов нейтрального и ионизованного железа Fe I и Fe II. Для каждой звезды проведены измерения 100–150 линий Fe I и около 15 линий Fe II. Для расчетов использовался комплекс программ и моделей атмосфер ATLAS/WIDTH [16]. В результате нами были определены фундаментальные параметры для родительских звёзд программы (таблица 4).

Задачей настоящего исследования являлось не определение или уточнение физических параметров кандидатов, а подтверждение или опровержение их планетной природы путём наложения пределов на амплитуду лучевых скоростей их родительских звёзд с точностью от десятков до полутора сотен метров в секунду. Такой точности при небольшом количестве данных наблюдений должно быть достаточно для того, чтобы выделить и отбросить кандидаты звёздных масс. В будущем же по мере накопления наблюдательного материала для этих и других кандидатов мы планируем получить оценки



Переменность лучевых скоростей исследованных звёзд, найденная при наблюдениях с помощью спектрографа НЭС. Сплошная синусоидальная линия на панели (а) иллюстрирует результат моделирования орбитальной кривой с полуамплитудой 400 м с^{-1} . Пунктирными линиями показаны верхние пределы изменения лучевых скоростей, соответствующие экзопланете с пограничной массой 12 масс Юпитера при данных массах родительских звёзд и орбитальных периодах кандидатов.

Таблица 4. Параметры выбранных систем по нашим расчетам

| Object | T_{eff} , К | $\lg g$ | v_{turb} , km s^{-1} | [Fe/H] |
|----------|-------------------------|-----------------|---|-------------------|
| KOI-974 | 6171 ± 30 | 3.74 ± 0.03 | 1.5 | -0.197 ± 0.08 |
| KOI-2687 | 5815 ± 30 | 4.59 ± 0.03 | 1.0 | 0.003 ± 0.07 |
| KOI-2706 | 6177 ± 30 | 3.66 ± 0.03 | 1.5 | -0.007 ± 0.10 |

масс планет для уточнения их физических характеристик.

При общем согласии большинства рассчитанных нами параметров с параметрами, представленными для этих звёзд в каталоге KOI, значения ускорения свободного падения для двух звёзд (KOI-974 и KOI-2706) оказались заметно ниже. В свою очередь это означает, что эти две звезды не принадлежат главной последовательности, а являются субгигантами IV класса светимости. Подобный результат был получен в работе [17], авторы которой также определяют для KOI-974 IV класс светимости.

Учитывая значение $\lg g$, полученное в данном исследовании, мы можем утверждать, что радиусы изучаемых звезд больше, чем считалось в каталоге «Кеплера.» Это, в свою очередь, означает, что планетные кандидаты KOI-974.01 и KOI-2706.01 соответственно также оказываются крупнее, чем давали более ранние оценки. Т.е. в данном случае речь может идти в том числе и о планетах размером с Нептун (KOI-974). Тогда для кандидата KOI-974.01 детектирование изменения амплитуды лучевой скорости может быть связано с самим кандидатом, а не с другой планетой системой. Таким образом, мы считаем, что все четыре кандидата не являются объектами звёздных масс (более 12 масс Юпитера). Мы продолжим мониторинг лучевых скоростей этих систем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект N14-50-00043, направ-

ление «Экзопланеты»). Авторы также благодарят А. О. Граужанину за помощь в подготовке и редукции спектральных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Y. Burdanov, P. Benni, V. V. Krushinsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 3854 (2016).
2. L. Malavolta, L. Borsato, V. Granata, et al., *Astron. J.* **153**, 224 (2017).
3. J. D. Twicken, J. M. Jenkins, S. E. Seader, et al., *Astron. J.* **152**, 158 (2016).
4. J. M. Jenkins, D. A. Caldwell, H. Chandrasekaran, et al., *Astrophys. J.* **713**, L87 (2010).
5. E. Sokov, I. A. Sokova, V. V. Dyachenko, et al., *ASP Conf. Ser.*, **510**, 344 (2017).
6. T. D. Morton, S. T. Bryson, J. L. Coughlin, et al., *Astrophys. J.* **822**, 86 (2016).
7. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, Preprint №179, SAO RAS (Special Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2003).
8. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, *J. Optical Technology* **76**, 42 (2009).
9. S. Mathur, D. Huber, N. M. Batalha, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **229**, 30 (2017).
10. C. Baranec, C. Ziegler, N. M. Law, et al., *Astron. J.* **152**, 18 (2016).
11. V. E. Panchuk, D. S. Nasonov, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **64**, 286 (2009).
12. V. G. Yushkin and M. V. Klochkova, Preprint №206, SAO RAS (Special Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2005).
13. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **112**, 525 (1995).
14. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119 (1999).
15. D. N. Monin, S. N. Fabrika, and G. G. Valyavin, *Astron. and Astrophys.* **396**, 131 (2002).
16. R. Kurucz, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s Grid. CD-ROM № 13 (Smithsonian Astrophys. Obs., Cambridge, 1993).
17. J. Molenda-Żakowicz, S. G. Sousa, A. Frasca, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **434**, 1422 (2013).

Exoplanet Studies. Spectral Confirmation of Photometric Exoplanet Candidates Discovered by the “Kepler” Mission

D.R. Gadelshin, G.G. Valyavin, M.V. Yushkin, E.A. Semenko, G.A. Galazutdinov, O.V. Maryeva, A.F. Valeev, and Byeong-Cheol Lee

We present the results of spectroscopic confirmation of exoplanet candidates from the “Kepler” space mission catalog. We used the NES spectrometer of the 6-m Russian BTA telescope to investigate the Doppler variability of the radial velocities of the host stars of KOI-974.01, KOI-2687.01/02, and KOI-2706.01. According to the derived upper limits, KOI-2706.01 has a mass significantly smaller than 12 Jupiter masses, which directly indicates its planetary nature. We show that KOI-2687.01 and KOI-2687.02, which have Earth-size or white dwarf-size radii according to photometric data, cannot be white dwarfs, and are therefore exoplanets. Radial velocity analysis for KOI-974, an F-type star, has shown noticeable variations with a half-amplitude of 400 m s^{-1} , which correlate poorly with the phase of its orbital rotation. This can indicate a presence of other massive planets in the system, with orbits closer or farther from the host star than the orbit of KOI-974.01, or a low mass star in a distant outer orbit. Using the method of synthetic spectra, we obtained more accurate atmospheric parameter and radius estimates for all the program host stars, which, in turn, allowed us to refine the radii of the studied exoplanet candidates.

Keywords: *planetary systems*