

УДК 524.6

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТРАНЗИТА ПЛАНЕТЫ WASP-32B

© 2017 А. О. Граужанина^{1*}, Г. Г. Валявин¹, Д. Р. Гадельшин^{1**},
 Д. Н. Бакланова², С. И. Плачинда², К. А. Антонюк^{1,2}, Н. В. Пить²,
 Г. А. Галазутдинов^{3,4,1}, А. Ф. Валеев¹, Т. Е. Бурлакова¹, А. Ф. Холтыгин⁵

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, 298409 Россия

³Католический университет Севера, Антофагаста, Чили

⁴Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург, 196140 Россия

⁵Астрономический институт им. В. В. Соболева, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 13 октября 2016 года; принята в печать 12 января 2017 года

Приводятся первые результаты спектральных наблюдений транзитов экзопланет в САО РАН на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа БТА. У экзопланеты WASP-32b зафиксировано значительное изменение интенсивности и эквивалентной ширины спектральной линии $H\alpha$ в спектре родительской звезды в момент транзита. В транзите эквивалентная ширина линии на 8–10% больше, чем вне транзита. Остаточная интенсивность в ядре линии обнаруживает подобную тенденцию — в транзите линия на 10–15% глубже, чем вне его. Наблюдения с использованием длиннощелевого спектрографа Крымской астрофизической обсерватории на 2.6-м телескопе ЗТШ также детектировали транзитное событие в линии $H\alpha$, но с несколько меньшей амплитудой и формой, инвертированной по отношению к данным с 6-м телескопа. В то время как в наблюдениях на БТА линия $H\alpha$ становится глубже во время транзита, по наблюдениям на ЗТШ остаточная интенсивность линии $H\alpha$ во время транзита уменьшается. Обработка и анализ архивных данных наблюдений WASP-32b со спектрографом HARPS также подтверждают наличие модуляции линии $H\alpha$ в момент транзита. Данные наблюдений свидетельствуют о наличии у WASP-32b оболочки, заполняющей полость Роша планеты, и кометоподобного хвоста меняющейся геометрии и ориентации относительно наблюдателя. Эти изменения определяют разные глубины и формы спектральной линии $H\alpha$ во время транзитов.

Ключевые слова: планетные системы — планеты и спутники: индивидуальные: WASP-32b

1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее интересных задач современной астрофизики — спектральное исследование атмосфер транзитных экзопланет. Идея метода проста: в момент, когда по отношению к земному наблюдателю внесолнечная планета, имеющая атмосферу, пересекает диск родительской звезды (т.е. происходит транзитное событие), в спектре родительской звезды неизбежно появляются дополнительные линии поглощения от химических элементов атмосферы планеты. Вне транзита эти линии менее выражены и могут инвертироваться в слабые эмиссии или отсутствовать вовсе. Таким образом, получая спектры родительской звезды в транзите и вне его и вычитая их друг из друга, мож-

но детектировать те спектральные линии, которые принадлежат атмосфере экзопланеты.

Из-за малых контрастов интенсивности спектров атмосфер большинства экзопланет на фоне их родительских звезд реализация данного метода наземными наблюдательными средствами крайне сложна. Для планеты земного типа наблюдаемый контраст спектра атмосферы на фоне диска родительской звезды солнечного типа составит менее 10^{-8} . Выделить спектр такого низкого контраста на сегодняшний день и в обозримом будущем не представляется возможным даже с использованием самых крупных телескопов.

Между тем задачу детектирования атмосфер экзопланет можно пытаться решить для гигантских экзопланет юпитерианских размеров, имеющих короткие (2–3 дня) орбитальные периоды вращения. Эти планеты (т.н. «горячие юпитеры») могут в результате взаимодействия их атмосфер с ветрами

*E-mail: racwet@yandex.ru

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

и вспышками от их родительских звезд, а также в результате процессов испарения иметь весьма протяженные оболочки и даже кометоподобные хвосты [1]. Такие диффузные образования, являющиеся продолжением атмосфер горячих юпитеров, могут быть зарегистрированы.

В настоящей работе мы представляем первый результат спектроскопических наблюдений транзитов экзопланет, проводимых с использованием 6-м телескопа Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН), а именно: исследование транзита экзопланеты WASP-32b.

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ WASP-32B

Планета WASP-32b была обнаружена международной командой под руководством Р. F. L. Maxted [2] в рамках самого успешного наземного проекта современности по поиску транзитных экзопланет «SuperWASP» [3]. Родительская звезда, TYC 2-1155-1, является солнцеподобной звездой с умеренным блеском ($V = 11^m3$). Ее радиус составляет $1.11 R_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 6100$ К, металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.13$ [2]. Планета осуществляет движение практически по круговой орбите с периодом 2.72 суток и является типичным умеренно-массивным горячим юпитером. Масса WASP-32b равна $3.60 M_{\text{Jup}}$, радиус — $1.18 R_{\text{Jup}}$. В результате наблюдений транзита WASP-32b в фильтре J , проведенных на 2.1-м телескопе обсерватории Китт-Пик, был существенно уточнен период обращения планеты [4]. Полученное отношение радиуса планеты к радиусу звезды оказалось меньше соотношения из статьи об открытии [2]. Это может быть вызвано влиянием атмосферы горячего юпитера. Коллективом под руководством R. D. Brothwell с помощью эффекта Росситера–Маклафлина была измерена проекция на небесную сферу угла λ между нормалью планетной орбиты и осью вращения родительской звезды [5]. Он оказался равным $\lambda = -2^{\circ+17}_{-19}$. Это с большой вероятностью может означать «спокойный» характер миграции WASP-32b, при котором орбита планеты никогда не имела большого эксцентриситета и сильного наклона к плоскости экватора звезды.

3. НАБЛЮДЕНИЯ

Спектроскопические наблюдения транзита WASP-32b проводились в течение двух ночей с использованием Основного звездного спектрографа (ОЗСП) [6] 6-м телескопа САО РАН (28/29 августа 2015 г., время середины транзита

$22^{\text{h}}52^{\text{m}}$ UTC, длительность $2^{\text{h}}19^{\text{m}}5$) и спектрографа «длинная щель» [7, 8] 2.6-м телескопа ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории (КРАО) (27/28 октября 2015 г., время середины транзита $18^{\text{h}}19^{\text{m}}$ UTC). Основной целью наблюдений было детектирование переменности профилей спектральных линий $\text{H}\alpha$, $\text{FeI } \lambda 6678 \text{ \AA}$, области теллурических полос кислорода и воды в ходе транзита. Используемые инструменты обеспечивали наблюдения в режимах умеренного ($R = 15\,000$, ОЗСП) и низкого ($R = 1000$, «длинная щель») спектрального разрешения. В обоих сетях объект наблюдался несколько часов с короткими экспозициями (5–10 минут) как во время транзита, так и вне его. Эфемериды для расчета моментов транзита были взяты из исследования [2].

Помимо собственных нами были использованы архивные наблюдения транзита WASP-32b, проведенные на эшелюном спектрографе высокого спектрального разрешения HARPS [9] в период с 23 по 26 сентября 2011 года. Профиль линии $\text{H}\alpha$ из этих данных использовался как контрольный.

Основные шаги редукции спектров авторских наблюдений WASP-32b проводились по стандартной методике с использованием программных пакетов MIDAS (Munich Image Data Analysis System)¹. Подробное описание и специфика техники редукции данных, полученных со спектрографом ОЗСП, приведены в работе [10]. Данные наблюдений со спектрографом HARPS обрабатывались также по стандартной методике с использованием программных сред IRAF² и DECH³. Процедура построения стабильного континуума и нормировки на него была использована в том же виде, как это описано в [10] (только для одиночных линий спектра).

Одновременно со спектральными наблюдениями транзита WASP-32b на 2.6-м телескопе были однократно проведены фотометрические наблюдения в фильтре V на 1.25-м телескопе КРАО. Для редукции данных мы использовали стандартную методику, принятую в программе [11, 12].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты обработки линии $\text{H}\alpha$ в разные фазы орбитального движения WASP-32b проиллюстрированы на рис. 1. Переменность остаточной интенсивности в ядре линии видна невооруженным глазом, что оказалось для нас неожиданным результатом. В отдельных фазах пиковая разность между профилями, полученными в ходе транзита

¹<http://www.eso.org/sci/software/esomidas/>

²<http://iraf.noao.edu/>

³<http://www.gazinur.com/DECH-software.html>

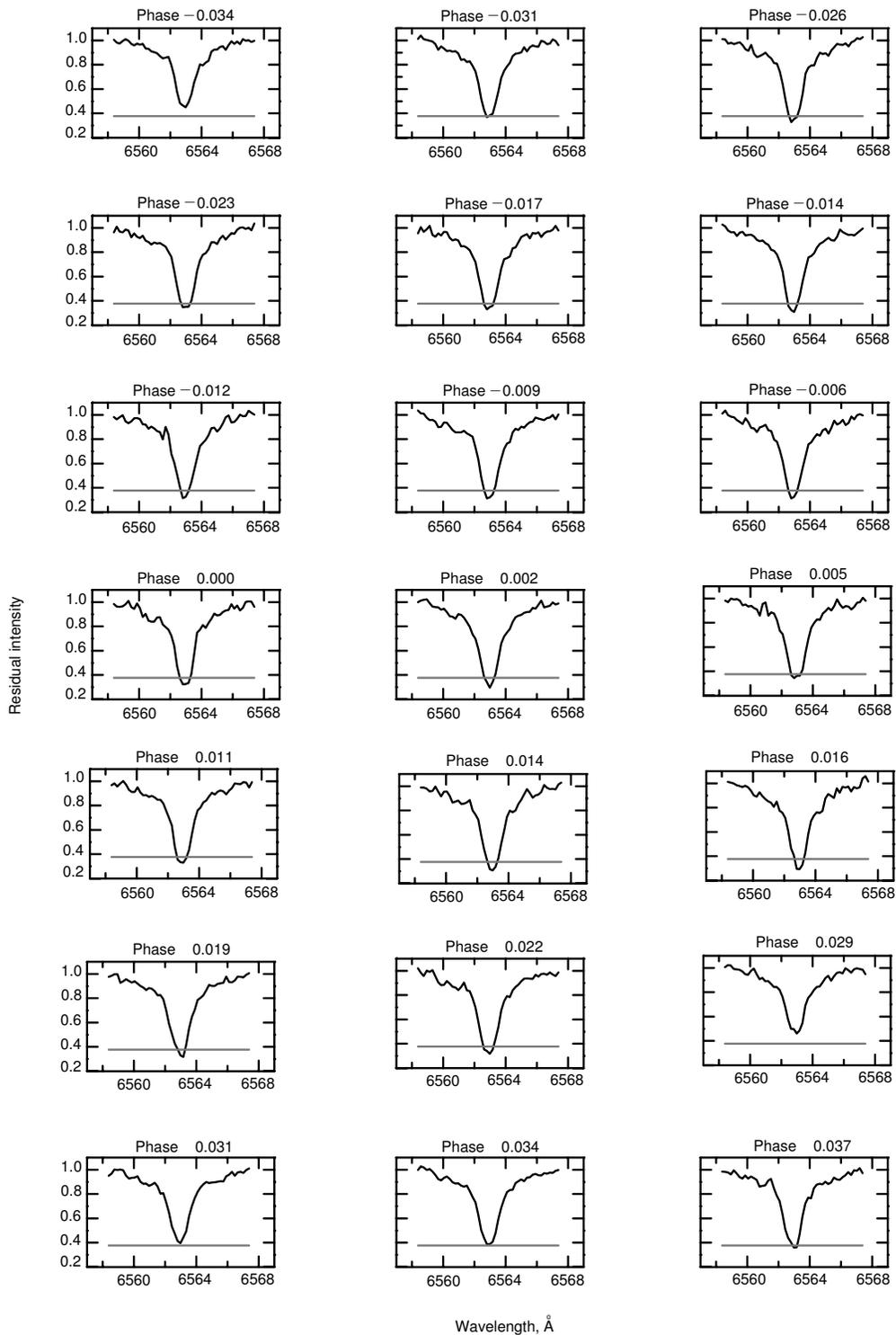


Рис. 1. Остаточные профили линии $H\alpha$ в разные моменты орбитальных фаз планеты в момент транзита и в непосредственной близости от него. Горизонтальной линией обозначен средний уровень остаточной интенсивности ядра линии $H\alpha$ по совокупности всех наблюдений на ОЗСП БТА.

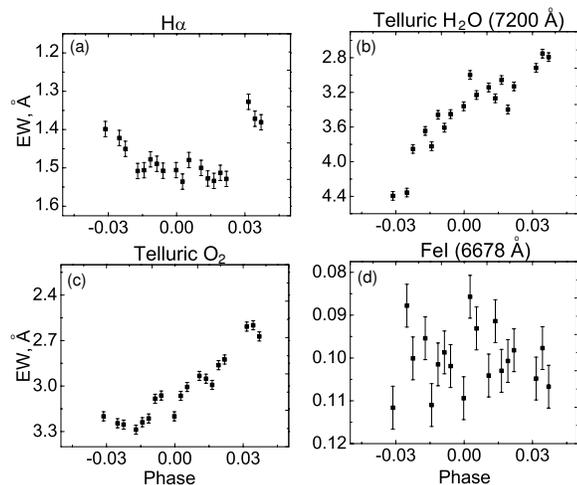


Рис. 2. Результаты наблюдений транзита WASP-32b по измерению эквивалентных ширин (EW) профиля линии $H\alpha$, линии железа FeI (6678 Å) и областей теллурических полос кислорода (6870–6950 Å) и воды (7200 Å).

и вне его, достигает 20%, оставаясь в среднем на характерном уровне 10–15%. Поведение полной эквивалентной ширины линии демонстрирует аналогичный результат (см. рис. 2a). В течение транзита (между значениями фаз примерно от -0.02 до 0.02) эквивалентная ширина линии незначительно увеличивается. Вне транзита эквивалентная ширина линии на 10% меньше. Такое поведение профиля линии $H\alpha$ наводит на мысль, что в полосе поглощения водорода мы регистрируем транзитное событие WASP-32b с большей амплитудой (в десять раз), чем транзит наблюдается в широких полосах (в частности, в фильтре V). Подобное поведение, если это не артефакт, прямо указывает на наличие у планеты протяженной оболочки. В разделе «Обсуждение результатов» мы приводим аргументы в пользу этого предположения.

В противоположность поведению линии $H\alpha$ в момент транзита, другие исследуемые спектральные особенности (линии железа FeI, 6678 Å, области теллурических полос кислорода и воды) не показывают ничего необычного (рис. 2). Видно ожидаемое монотонное уменьшение эквивалентных ширин теллурических полос воды и кислорода с уменьшением воздушной массы в процессе наблюдений, в течение которых объект подходил к верхней кульминации. Линия железа FeI спектра родительской звезды также не демонстрирует следов транзита. Все это свидетельствует о том, что транзит WASP-32b, зарегистрированный в области линии $H\alpha$, реален.

К сожалению, по техническим причинам не было возможности детально пронаблюдать момент вы-

хода планеты из транзита (на рис. 2 пространство в промежутке орбитальных фаз от 0.025 до 0.03). Поэтому мы продолжили наблюдения транзита WASP-32b со спектрографом «длинная щель» на 2.6-м телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории, а также обратились к архиву наблюдений спектрографа HARPS ESO. Обработанные данные наблюдений спектрального профиля линии $H\alpha$ с этими инструментами приведены на рис. 3. Фотометрические данные получены в ту же ночь, что и спектроскопические данные в режиме «длинная щель» на телескопе ЗТШ.

Сравнительный анализ всех данных позволил заключить, что изменения профиля спектральной линии $H\alpha$ во время транзита реальны и имеют ярко выраженные черты физической переменности. Интересной особенностью является относительно плавное поведение профиля линии $H\alpha$ в момент входа в транзит и скачкообразное поведение при выходе из него. Отличия же состоят, во-первых, в том, что в наблюдениях на ЗТШ форма транзита инвертирована по отношению к наблюдениям на ОЗСП БТА и HARPS ESO. Во-вторых, во всех трех случаях глубина транзита разная. Минимальная глубина наблюдалась на спектрографе HARPS (около 3%), в то время как в наблюдениях на ОЗСП БТА и в крымских наблюдениях эта величина доходила до 10%. Мы не исключаем, что в момент наблюдений на ЗТШ мог произойти какой-либо сбой или возникли проблемы с засветкой щели спектрографа в области орбитальной фазы 0.018 (до наступления выхода из транзита), из-за чего спектрограф скачком изменил свою инструментальную функцию. Однако повторение подобной тенденции при выходе из транзита при наблюдениях на спектрографе HARPS позволяет нам заключить, что транзит WASP-32b, зарегистрированный в наблюдениях на спектрографе ОЗСП БТА, реален.

Возвращаясь к инвертированной форме транзита по данным с ЗТШ, мы должны заметить, что даже если имел место инструментальный сбой спектрографа или телескопа, он произошел примерно за 10 минут до полного выхода из транзита (фаза 0.025). До этого момента было получено три полноценных спектра в промежутке фаз между 0.018 и 0.025. Они формируют группу с величинами эквивалентной ширины $H\alpha$ около 2.77 ± 0.08 . Все последующие наблюдения демонстрируют группу измерений со значением эквивалентной ширины 2.57 ± 0.15 . Если наше предположение об инструментальной природе инверсии верно, то результирующая разница в 8–9% и знак транзита полностью подтверждают данные с БТА.

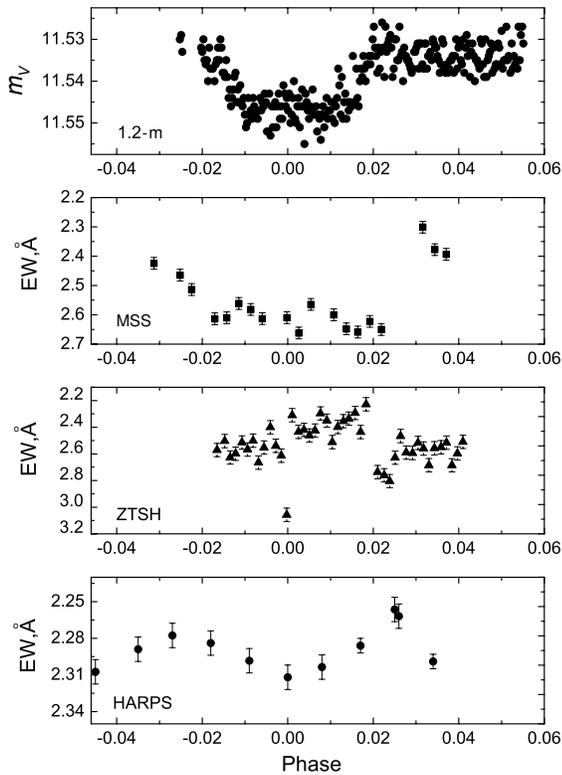


Рис. 3. Наблюдения транзита WASP-32b на разных телескопах. Сверху вниз: фотометрические наблюдения в фильтре V на 1.2-м телескопе КРАО, спектральные наблюдения (EW) на телескопе БТА, ЗТШ и HARPS ESO.

Меньшая амплитуда в наблюдениях со спектрографом HARPS также может иметь как физическую, так и «инструментальную» природу по двум причинам. Во-первых, из-за высокой дисперсии спектрографа линия $H\alpha$ в соответствующем спектральном порядке проектируется на очень широкий диапазон, что крайне усложняет проведение континуума по нашей методике. В процессе проведения континуума далекие крылья линии теряются, что неизбежно уменьшает контраст эффектов в крыльях и в линии в целом. Во-вторых, характерное отношение сигнал/шум в этих наблюдениях было низкое (около 15–20), вследствие чего нам приходилось усреднять близлежащие данные, что в несколько раз увеличило скважность наблюдений и «сгладило» контраст на выходе из транзита. Однако, несмотря на перечисленные трудности, факт положительной регистрации транзита в области линии $H\alpha$ мы считаем установленным. Мы не можем с уверенностью сказать, что транзит имеет переменную форму, но регистрация самого факта транзита в первичном исследовании такого рода обосновывает необходимость публикации результата. Ниже мы обсуждаем природу зарегистрированного явления.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все данные спектральных наблюдений транзита WASP-32b на нескольких телескопах с разными инструментами показали регистрацию транзита в области линии $H\alpha$ с модуляцией ее эквивалентной ширины до 10%. Исходя из того факта, что геометрический размер планеты по данным фотометрии находится на уровне 1%, полученный результат стал для нас неожиданностью — глубина транзита оказалась в несколько раз больше ожидаемой. Наша интерпретация данного факта заключается в том, что в то время как в широкополосных фильтрах видна собственно планета типа «горячий юпитер», в линии $H\alpha$ мы видим уширенное образование наподобие кометной комы, заполняющей полость Роша планеты ($R_{\text{ros}} \approx 8.36 R_{\text{Jup}}$).

Из анализа ширины транзита по данным, полученным на БТА и спектрографе HARPS ESO (см. рис. 3), следует, что в полосе линии $H\alpha$ он может длиться в среднем в полтора, а то и в два раза дольше фотометрического транзита (сравните с длительностью фотометрического «дна» транзита на верхней панели рис. 3). Полагая, что в процессе транзита такая уширенная оболочка затмевает часть холодных пятен, уменьшающих вклад более разогретых областей с хорошо развитыми линиями водорода в формирование интегрального спектра родительской звезды, мы частично можем объяснить переменную форму транзита. Между тем это вряд ли может полностью объяснить такие большие амплитуды, которые наблюдались на ОЗСП БТА. Мы предполагаем, что кроме эффекта затмения пятен главную роль в дополнительной модуляции глубины линии $H\alpha$ играет непрозрачность оболочки планеты. При этом в разных проекциях модуляция глубины линии $H\alpha$ может происходить как в сторону уменьшения ее интегральной глубины на дополнительных эмиссиях (например, при выходе из транзита), так и на дополнительных абсорбциях (например, в случае, когда оболочка затмевает родительскую звезду в центре транзита).

Представленное объяснение в свою очередь проблематично в том плане, что ожидаемая температура вокруг планеты (1000–2000 К) недостаточна для обеспечения населенности, необходимой для формирования линии $H\alpha$. Между тем в нашем исследовании мы также заметили, что основной вклад в переменность профиля линии вносит ее центральное не-ЛТР ядро, и мы не исключаем, что при определенных условиях окружающая планету водородная оболочка может обеспечить необходимую непрозрачность. В частности, полагая, что наблюдаемая нами водородная оболочка целиком заполняет полость Роша планеты, можно ожидать у WASP-32b наличие кометоподобного хвоста. Об

этом косвенно может свидетельствовать асимметричная форма транзита. Столь интенсивное звёздное излучение на орбите планеты должно неизбежно приводить к деформации такого хвоста в направлении «от звезды» и, таким образом, создавать необходимую дополнительную оптическую толщину на луче зрения в момент непосредственно перед выходом из транзита. Также мы можем предположить, что геометрия, размеры и ориентация такого хвоста будут меняться от транзита к транзиту. Это может создавать новые абсорбционные и эмиссионные детали транзита что, в свою очередь, скажется на его окончательной форме. Наблюдения подтверждают это предположение.

Возможно наличие огромных водородно-гелиевых корон вокруг планет. Например, предполагается, что они есть у системы Kepler-11 [13, 14]. У некоторых планет такие короны наблюдаются даже непосредственно — в линии $\text{Ly}\alpha$: у газового гиганта 55 Cancri b при её частичном транзите [15] и у горячего непуна GJ 436 b [16], глубина транзита которого в $\text{Ly}\alpha$ составляет 56% при глубине оптического транзита всего в 0.7%. Наблюдаются у горячих юпитеров также и кометообразные хвосты [1], что делает наше предположение о природе спектрального транзита вполне реалистичным.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обсуждаются результаты спектральных наблюдений транзита экзопланеты WASP-32b в САО РАН. Программа исследования экзопланет является частью проекта, поддержанного Российским научным фондом. В рамках данного проекта мы организуем и проводим ряд спектроскопических [10], спекл-интерферометрических [17] и фотометрических [11, 12] наблюдательных программ средствами наземной наблюдательной астрофизики с использованием ряда российских и зарубежных телескопов разных апертур. Цель этих программ — поиск новых экзопланет и детальное исследование уже открытых.

Проанализированы спектральные данные, полученные нами на ОЗСП БТА и ЗТШ. Профиль линии $\text{H}\alpha$ из архивных наблюдений транзита WASP-32b, проведенных на эшелле спектрографе высокого спектрального разрешения HARPS/ESO, использовался как контрольный.

Мы констатируем наличие водородной оболочки (а, соответственно, и атмосферы) вокруг горячего юпитера WASP-32b. Попытки детектирования других элементов (железа, кислорода и воды) с использованием транзитного события дали нулевой результат. Наблюдения же водородной оболочки

экзопланеты должны быть продолжены с целью определения ее точной природы и поиска других химических элементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-50-00043, программа «Экзопланеты»). Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004). Авторы благодарят архив Европейской южной обсерватории за предоставление данных со спектрографа HARPS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. L. Linsky, H. Yang, K. France, et al., *Astrophys. J.* **717**, 1291 (2010).
2. P. F. L. Maxted, D. R. Anderson, A. Collier Cameron, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 1465 (2010).
3. D. L. Pollacco, I. Skillen, A. Collier Cameron, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 1407 (2006).
4. P. V. Sada, D. Deming, D. E. Jennings, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **124**, 212 (2012).
5. R. D. Brothwell, C. A. Watson, G. Hébrard, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440**, 3392 (2014).
6. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 1804 (2006).
7. A. A. Boyarchuk, R. E. Gershberg, K. Y. Limorenko, et al., *Izvestiya Krymskoj Astrofiz. Obs.* **36**, 277 (1967).
8. S. G. Sergeev, PhD Thesis (Crimean Astrophys. Obs., Nauchnyj, 2012).
9. M. Mayor, F. Pepe, D. Queloz, et al., *Messenger* **114**, 20 (2003).
10. G. G. Valyavin, A. O. Grauzhanina, G. A. Galazutdinov, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 466 (2015).
11. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 318 (2015).
12. G. G. Valyavin, A. F. Valeev, D. R. Gadelshin, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 315 (2015).
13. H. Lammer, N. V. Erkaev, P. Odert, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **430**, 1247 (2013).
14. K. G. Kislyakova, C. P. Johnstone, P. Odert, et al., *Astron. and Astrophys.* **562**, A116 (2014).
15. D. Ehrenreich, V. Bourrier, X. Bonfils, et al., *Astron. and Astrophys.* **547**, A18 (2012).
16. D. Ehrenreich, V. Bourrier, P. J. Wheatley, et al., *Nature* **522**, 459 (2015).
17. A. Y. Burdanov, P. Benni, V. V. Krushinsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 3854 (2016).

Spectroscopic Observations of the Exoplanet WASP-32b Transit

**A. O. Grauzhanina, D. R. Gadel'shin, D. N. Baklanova, S. I. Plachinda, K. A. Antonyuk, N. V. Pit',
G. G. Valyavin, G. A. Galazutdinov, A. F. Valeev, T. E. Burlakova, and A. F. Kholtygin**

We present first results of spectroscopic observations of transiting exoplanets in the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences with the Main Stellar Spectrograph of the 6-m BTA telescope. For the exoplanet WASP-32b, we detected a significant variation of intensity and equivalent width in the $H\alpha$ spectral line of the parent star at the time of a transit. The equivalent width of the line during transit is by 8–10% larger than outside the planet passage. Residual intensity in the core of the line reveals the following tendency: the line is by 10–15% deeper inside transit than outside it. Observations with the long-slit spectrograph of the Crimean Astrophysical Observatory at the 2.6-m ZTSh telescope also showed a transit event in the $H\alpha$ line, although, with a smaller amplitude and shape inverted in relation to the data from the 6-m telescope. While in the observations with the BTA the $H\alpha$ line becomes deeper during the transit, in the ZTSh observations, the residual intensity of the $H\alpha$ line decreases during the transit. Reducing and analysis of the archive data of WASP-32b observations with the HARPS spectrograph also confirm the $H\alpha$ line modulation at the time of the transit. The observed data give evidence of the envelope in WASP-32b filling the Roche lobe and a comet-like tail of changing geometry and orientation relative to the observer. These changes determine different depths and shapes of the $H\alpha$ spectral line at the time of transits.

Keywords: *planetary systems—planets and satellites: individual: WASP-32b*