

УДК 524.6:520.82

## ЭКЗОПЛАНЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРАНСМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ ИЗБРАННЫХ ЭКЗОПЛАНЕТ

© 2018 Г. Г. Валявин<sup>1\*</sup>, Д. Р. Гадельшин<sup>1</sup>, А. Ф. Валеев<sup>1</sup>,  
Т. Е. Бурлакова<sup>1</sup>, Қ. А. Антонюк<sup>2</sup>, Г. А. Галазутдинов<sup>3,4,1</sup>, Н. В. Пить<sup>5</sup>,  
А. С. Москвитин<sup>1</sup>, Е. Н. Соков<sup>4,1</sup>, И. А. Сокова<sup>4</sup>, Бьенг-Чол Ли<sup>6</sup>,  
Инво Хан<sup>6</sup>, М. Лендл<sup>7</sup>, Л. Фоссати<sup>7</sup>, А. О. Граужанина<sup>1</sup>, Т. А. Фатхуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Крымская Астрофизическая Обсерватория, Научный, 298409 Россия

<sup>3</sup>Северный католический университет, Антофагаста, 0610 Чили

<sup>4</sup>Главная (Пулковская) обсерватория, Санкт-Петербург, 196140 Россия

<sup>5</sup>Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, 298409 Россия

<sup>6</sup>Институт астрономии и космических исследований, Тэджон, 34055 Корея

<sup>7</sup>Институт космических исследований, Академия наук Австрии, Грац, А-8042 Австрия

Поступила в редакцию 7 ноября 2017 года; принята в печать 10 апреля 2018 года

Представлены результаты наземных наблюдений и модельный анализ транзитов экзопланет WASP-33b, WASP-43b, WASP-104b и HD 219134b. Для всех экзопланет построены широкополосные трансмиссионные спектры (зависимость наблюдаемых радиусов экзопланет от длины волны) от ближнего УФ до инфракрасной зоны. Показано, что с точностью до погрешностей измерений трансмиссионный спектр WASP-33b является плоским в диапазоне от 3800 Å до 12000 Å. Полученный широкополосный спектр WASP-43b в первом приближении также является плоским, хотя по результатам данных других авторов в узких полосах присутствуют линии поглощения разных химических компонентов. Из модели спектра экзопланеты WASP-43b по инфракрасным данным, взятым из литературы, получена прямая оценка ее ночной температуры. Приведены и анализируются результаты наземных наблюдений, подтверждающих открытие транзитной суперземли в системе звезды HD 219134. Признаки существования этой планеты были обнаружены ранее при анализе лучевых скоростей звезды и по наблюдению транзитов космическим телескопом «Спитцер» в инфракрасном диапазоне. В расчетное время мы зарегистрировали транзит в ближнем ультрафиолетовом диапазоне несколько раз. Измеренная глубина транзита в фильтре *U* системы Джонсона составляет  $0.13\% \pm 0.027\%$ , что глубже известной по измерениям «Спитцера.» Обсуждаются вероятные причины этой разницы.

Ключевые слова: планеты и спутники: фундаментальные параметры

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Методы трансмиссионной спектроскопии, с помощью которых можно выявить изменения радиусов транзитных экзопланет с длиной волны, дают уникальную возможность изучения физических и химических свойств их атмосфер [1]. Трансмиссионный спектр представляет собой зависимость радиуса экзопланеты, полученную при наблюдениях ее транзита в наборе полос по спектральному диапазону, от длины волны. Для построения

широкополосных и среднеполосных трансмиссионных спектров проводятся многоцветные фотометрические наблюдения на телескопах небольших и средних апертур. Анализ таких спектров помогает сделать выводы о вертикальной структуре и внутреннем строении оболочек планет и исследовать их эволюцию. Трансмиссионная спектроскопия позволяет также восстановить линии поглощения и рассеяния в атмосфере экзопланеты [2]. Это линии различных химических компонентов, входящих в ее состав. Они проявляются при прохождении света родительской звезды сквозь атмосферу пла-

\*E-mail: gvalyavin@sao.ru

неты во время транзита и могут быть выделены при сравнении спектра звезды во время транзита и вне его. Такие исследования уже выполнены на многих наземных и космических телескопах в широком диапазоне спектральных разрешений. В результате на разных горячих юпитерах надёжно обнаружено присутствие таких веществ, как калий, натрий, вода, углекислый и угарный газы и т.д. [3]. Многие планеты покрыты туманами и облаками различной химической природы [4], которые могут ослаблять спектральные линии в излучении родительской звезды. В спектрах других планет наблюдаются признаки сильного рэлеевского рассеяния, что свидетельствует о протяженной и относительно ясной атмосфере [5].

Горячие юпитеры, составляющие основную группу экзопланет, которые исследуются в настоящей работе, — отнюдь не однородная популяция. Среди них выделяются очень горячие (равновесные температуры  $T_{\text{eq}}$  которых превышают 2000 К), умеренные и относительно прохладные планеты ( $T_{\text{eq}} \approx 1000$  К). Различаются они по массам и плотностям. Методами трансмиссионной спектроскопии наиболее удобно изучать горячие юпитеры с очень низкой средней плотностью — их атмосферы обладают очень большими шкалами высот [6], а спектральные проявления оказываются максимально контрастными [5, 7]. Накопление статистических данных по атмосферам самых различных горячих юпитеров помогает лучше понимать сценарии образования каждого их типа. В этой связи в настоящем исследовании мы предприняли попытку проанализировать весь имеющийся на сегодня опубликованный наблюдательный материал (включая данные собственных наблюдений) по нескольким выбранным горячим юпитерам для построения их трансмиссионных спектров с использованием однородной методики в максимально широком диапазоне длин волн.

Также в работе уделено особое внимание фотометрии недавно открытой экзопланеты HD 219134b [8, 9], которая является суперземлей. Мы наблюдали эту планету в течение года при помощи 1-м телескопа Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН). В результате был накоплен значительный статистически однородный материал, анализ которого позволил, во-первых, независимо в наземных наблюдениях подтвердить реальность существования этой планеты, а во-вторых, проанализировать ее трансмиссионный спектр в двух диапазонах — инфракрасном (по данным «Спитцера») и в ближнем ультрафиолетовом (по нашим наблюдениям).

В следующем разделе представлена сводка по наблюдениям и обработке транзитов исследуемых

экзопланет. В разделе 3 мы описываем компьютерную модель, с помощью которой анализируем фотометрические транзиты. Раздел «Результаты» содержит итоги реконструкции трансмиссионных спектров индивидуально для каждой экзопланеты и сделанные при их анализе выводы. В разделе «Дискуссия» приведено общее обсуждение полученных результатов.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

С 2015 г. по настоящее время наблюдения экзопланет проводятся нами на регулярной основе [10, 11] с использованием ПЗС-фотометров на телескопах метрового класса Специальной астрофизической (САО РАН) и Крымской астрофизической (КраО РАН) обсерваторий Российской академии наук. Фотометр 1-м телескопа САО РАН оснащен автоматизированным блоком сменных фильтров. Поле зрения с ПЗС-камерой формата  $2k \times 2k$  и размером пикселя 13.5 мкм составляет около  $7' \times 7'$ . Для наблюдений в КраО РАН используется похожий штатный ПЗС-фотометр на 1.25-м телескопе. На настоящий момент все наблюдения проводятся в широкополосной фотометрической системе Джонсона–Козинса. В зависимости от яркости объектов и погодных условий характерное время экспозиций варьируется от нескольких десятков секунд до 2–3 минут. Более подробно программные наблюдения на этих инструментах описаны в [10–12].

В данной работе мы используем также наблюдательный материал, полученный в 2010–2012 гг. на автоматизированных телескопах Пулковской обсерватории: зеркальном астрографе ЗА-320М и менисковом телескопе Д. Д. Максимова МТМ-500М. Зеркальный астрограф ЗА-320М системы Кассегрена с диаметром зеркала 320 мм и фокусным расстоянием 3200 мм установлен на территории Пулковской обсерватории (ГАО РАН) и работает с 1997 г. Телескоп снабжен ПЗС-камерой FLI IMG 1001E (1024 × 1024 пиксела) и имеет поле зрения  $28' \times 28'$ . Менисковый телескоп МТМ-500М установлен в 2007 г. на Горной астрономической станции ГАО РАН на горе Шаджатмаз на Северном Кавказе, около Кисловодска. Детально эти наблюдения описаны Соковым и др. [13].

Все наблюдения проводились по классической схеме. Для коррекции «плоского поля» в сумеречное время экспонировался рассеянный свет. Неизменное положение звезд на кадрах ПЗС во время экспозиций контролировалось ручным гидированием. Обработка данных проводилась по стандартной методике, подробное описание которой можно найти в работах [10–13].

В настоящей статье кроме наших собственных наблюдений транзитов экзопланет (в совокупности семнадцать транзитных событий для всех объектов программы) мы также используем большое количество данных других авторов (более сотни событий). Сводки по материалам всех этих наблюдений отдельно для каждого объекта программы приведены в разделе «Результаты.»

### 3. МОДЕЛЬ

Для расчета радиусов экзопланет как функции длины волны в зависимости от формы транзита нами создана компьютерная модель по общепринятому на сегодня алгоритму, представленному в работе [14]. Наша модель является его упрощенным вариантом, в котором орбитальные характеристики экзопланет, вращающихся вокруг их родительских звезд, не используются. Анализируется только транзитное событие в предположении плоскопараллельного прохождения непрозрачного тела экзопланеты с определенной температурой на фоне светящегося диска родительской звезды. Единственным существенным для нашего исследования параметром, связанным с орбитой экзопланеты и тестируемым моделью, является прицельный параметр — минимальное расстояние между центрами экзопланеты и ее родительской звезды в момент транзита, выраженное в долях радиуса родительской звезды.

Модель рассчитывает форму транзита в заданной спектральной полосе в зависимости от относительного радиуса экзопланеты в долях радиуса ее родительской звезды, равновесной температуры ( $T_{\text{eq}}$ ) экзопланеты, физических характеристик самой звезды и прицельного параметра. Равновесная температура экзопланеты определяет добавочное собственное излучение при расчете глубин транзитов, исходя из чернотельных соотношений. Такого приближения достаточно для подавляющего большинства практически реализуемых случаев.

Физические характеристики родительской звезды (ее эффективная температура  $T_{\text{eff}}$  поверхностная гравитация  $\log g$  и химический состав) используются для расчетов линейного и квадратичного коэффициентов потемнения к краю для данной полосы спектра. Алгоритм и таблицы моделей для расчета коэффициентов потемнения в полосах для основных фотометрических систем и космических экзопланетных миссий представлены в работе [15].

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе рассматриваются индивидуальные экзопланеты: особенности наблюдения и результаты моделирования их трансмиссионных спектров. Даются также краткие сведения по более ранним исследованиям данных объектов.

#### 4.1. WASP-33b

WASP-33 (HD 15082) является быстро вращающейся звездой спектрального класса A5 и относится к переменным типа дельты Щита ( $\delta$  Sct). В 2010 г. было подтверждено наличие транзитной планеты типа «горячий юпитер,» обращающейся около нее на близкой орбите с периодом 1.22 суток [16]. Планету и центр звезды разделяет расстояние всего 3.7 звездных радиуса [17]. Относительно крупный размер горячего юпитера, высокая температура его атмосферы и значительный видимый блеск родительской звезды ( $V = 8^{\text{m}}3$ ) делают планету очень привлекательной для исследования ее атмосферы методами трансмиссионной спектроскопии. Измерение глубины вторичного затмения позволяет наиболее просто определить температуру планеты: в инфракрасном диапазоне, где контраст между собственным излучением нагретой планеты и излучением звезды является наибольшим.

Первое обнаружение вторичного затмения WASP-33b было зафиксировано на длине волны 0.91 мкм и представлено в 2011 г. в работе [18]. На основании этой и целого ряда последующих работ (см., например, [19, 20]), в которых проводились измерения глубины вторичного затмения в различных длинах ИК-волн, была измерена температура планеты, которая оказалась очень большой — согласно [21], она составляет 3400 К. Это делает WASP-33b одной из самых горячих известных планет. В то же время эта экзопланта вследствие ее высокой температуры и хорошей изученности других свойств является удобной для проверки корректности применения используемой нами модели.

Моделируя транзиты WASP-33b, мы основываемся на уже известных для нее данных по прицельному расстоянию и эффективной температуре. Цель измерений — определение величин радиуса экзопланеты в зависимости от длины волны с использованием единой методики.

Наши наблюдения WASP-33b проводились в период 2010–2012 гг. на описанных выше автоматизированных телескопах Пулковской обсерватории с использованием широкополосной фотометрической системы Джонсона в следующие ночи: 26 января 2012 г. (фильтр  $V$ ), 04 января 2012 г. (фильтр  $B$ ) на двух телескопах, 21 декабря 2011 г. (фильтр  $R$ ), 10 октября 2011 г. (фильтры  $V$ ,  $R$ ) на двух телескопах и 30 августа 2011 г. (фильтр  $R$ ). Всего зарегистрировано пять транзитных событий в семи наблюдениях. Одно из наблюдений (26 января 2012 г.) из дальнейшего анализа мы исключили.

Сводка результатов измерений глубин транзитов WASP-33b в процентах падения блеска и их

**Таблица 1.** Глубины транзитов WASP-33b (в процентах падения блеска) и их ошибки<sup>a</sup> по измерениям разных авторов в разных полосах

Ref <sup>b</sup>	Band (filter / central wavelength in nm)							
	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>H<math>\alpha</math></i>	<i>I</i>	<i>z'</i>	<i>J</i>
	365	445	551	658	656	806	900	1200
TPB	1.40(04)	1.50(06)						
<i>n</i> <sup>c</sup>	3	1						
OUR		1.42(04)	1.01(12)	1.13(06)				
<i>n</i>		2	1	3				
ETD		1.290(035)	1.61(02)	1.408(012)		1.310(016)		
<i>n</i>		2	23	41		9		
ККН			1.40(03)	1.200(017)	1.540(047)	1.260(016)	1.170(029)	
<i>n</i>			9	11	1	7	1	
SDJ					1.16(32)		1.14(02)	0.95(14)
<i>n</i>					1		1	1

<sup>a</sup> указаны значащие цифры после десятичной точки.

<sup>b</sup> Ref: OUR — наши результаты (получены ЕНС и ИАС); ETD — база данных транзитов экзопланет; TPB: [22]; ККН: [23]; SDJ: [24].

<sup>c</sup> *n* — число зарегистрированных транзитных событий.

ошибок даны в таблице 1. Приведены также результаты измерений других исследователей из работ [22–24] и базы данных транзитов экзопланет<sup>1</sup> (в колонке «Ref» эти данные обозначены ETD). В случае регистрации нескольких транзитных событий (число «*n*» в таблице 1) представлены усредненные глубины транзитов для данной полосы.

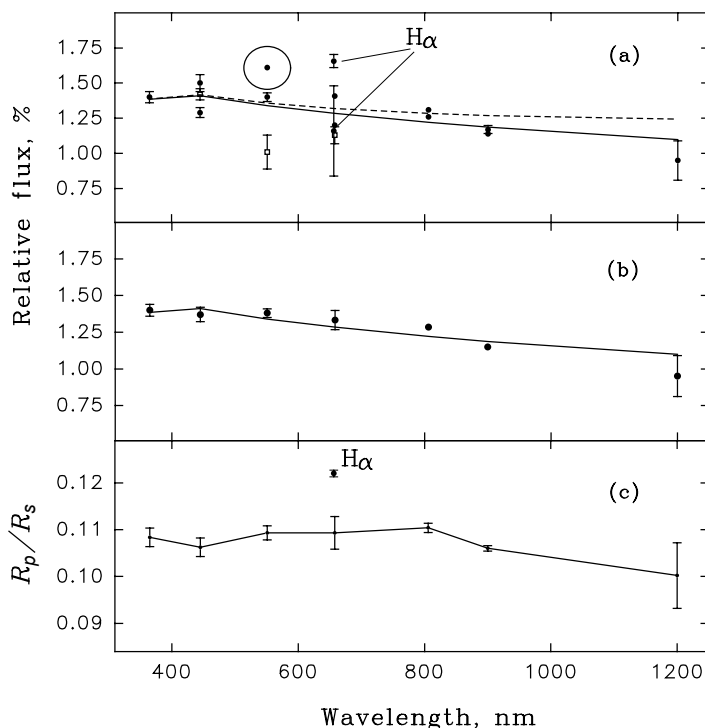
Данные таблицы 1 визуализированы на рис. 1а. На рисунке также представлены результаты моделирования транзитов WASP-33b с использованием нашей модельной программы, описанной выше. Физические параметры WASP-33b и ее родительской звезды для моделирования взяты из работы [21]. Результаты моделирования проиллюстрированы для двух случаев: с учетом собственной равновесной температуры экзопланеты ( $T_{\text{eq}} = 3358 \pm 165$  K [21]) и без ее учета. Из сравнения разности хода модельных зависимостей ясно, что учет температуры самых горячих планет имеет принципиальное значение в исследованиях транзитов.

Из рисунка и таблицы 1 следует, что несколько измерений транзитов в фильтрах *V* (ограничено кружком на рис. 1) и *H $\alpha$*  значимо отклоняются

от предсказанной зависимости. В связи с этим в работе [25] показано, что в видимой области длин волн недоучет пульсаций родительской звезды WASP-33 может приводить к переоценке глубин транзитов. Возможно, в нашем случае именно это обстоятельство сыграло роль, и указанную группу измерений мы из дальнейшего анализа исключили. Что касается сильного несоответствия глубин транзитов, измеренных в фильтре *H $\alpha$* , то оно, скорее всего, является физическим (см. ниже), и мы используем эти данные для интерпретации трансмиссионного спектра WASP-33b. Таким образом, отбраковав часть измерений в полосе *V*, мы все оставшиеся измерения усредняли для каждой полосы и использовали для оценки радиусов экзопланеты как функции длины волны. Усреднение в каждой полосе проводилось со взвешиванием данных по их статистическим весам, которые оценивались как коэффициенты, обратно пропорциональные квадрату величины ошибки индивидуального измерения. Результат усреднения приведен на рис. 1b (сплошная линия означает то же, что и на верхней панели рисунка).

Трансмиссионный спектр WASP-33b, полученный с помощью моделирования усредненных данных, представлен на рис. 1с. Анализ измеренных узлов спектра и ошибок позволяет

<sup>1</sup><http://var2.astro.cz/ETD/>



**Рис. 1.** (a) зависимость глубины транзита от длины волны по результатам измерений разных авторов (заполненные кружки) и наших измерений (пустые квадратики); сплошная и пунктирная линии — зависимости, рассчитанные с учетом температуры экзопланеты и без него. Детали см. в тексте. (b) глубины транзитов, усредненные в каждой полосе (заполненные кружки); сплошная линия — то же, что и на верхней панели. (c) трансмиссионный широкополосный спектр WASP-33b, представляющий радиус экзопланеты  $R_p$  в долях радиуса ее родительской звезды  $R_s$ .

нам сделать заключение, что в диапазоне длин волн от ближнего ультрафиолета до ближней инфракрасной области (1200 нм) широкополосный спектр является плоским со следующими характерными значениями: в видимой области ( $\lambda\lambda 365\text{--}700$  нм)  $R_p/R_s = 0.1083 \pm 0.0007$ ; в ближней инфракрасной области ( $\lambda\lambda 700\text{--}1200$  нм)  $R_p/R_s = 0.1071 \pm 0.001$ . Полученное значение для видимого диапазона длин волн в пределах ошибок измерений совпадает с результатами других авторов [16, 22, 23, 26]. Для ближнего инфракрасного диапазона оценка широкополосного трансмиссионного спектра получена впервые.

Кроме широкополосного трансмиссионного спектра WASP-33b на рис. 1 представлена и средняя по двум наблюдениям (см. таблицу 1) оценка радиуса экзопланеты в фильтре  $H\alpha$ :  $R_p/R_s = 0.1220 \pm 0.0007$ . Из ее сравнения с широкополосным трансмиссионным спектром следует, что радиус планеты в полосе фильтра  $H\alpha$  превышает средний радиус более чем на 10%. Согласно [21], это может быть связано с тем, что линия  $H\alpha$  является хромосферной и может исказить истинную глубину транзита. С другой стороны, в работах Каули и др. [25, 27] показано, что при наблюдениях в полосе линии  $H\alpha$  искажения транзитов, вызванные

хромосферной активностью звезд солнечного типа, имеют аномально высокую амплитуду, что может быть связано с наличием протяженной оболочки вокруг экзопланеты-горячего юпитера. Схожий вывод был сделан нашей группой при недавнем обнаружении подобного эффекта в наблюдениях другого горячего юпитера — WASP-32b [26, 29]. Отметим, что такие же идеи относительно влияния конвективной активности родительских звезд на глубины транзитов их экзопланет в полосе линии  $H\alpha$  высказывались при исследованиях звезд солнечного типа (HD 189733 и WASP-32). Родительская звезда WASP-33 принадлежит к классу конвективно-спокойных звезд класса A, поэтому мы не исключаем, что аномально глубокий транзит в полосе линии  $H\alpha$  действительно может быть связан с наличием протяженной водородной оболочки у экзопланеты WASP-33b. Для точного ответа на этот вопрос необходимы дополнительные массовые наблюдения транзита WASP-33b в полосе  $H\alpha$ .

#### 4.2. HD 219134

В июле 2015 г. группа европейских астрономов сообщила об открытии с помощью инструмента HARPS-N четырех планет в системе очень

близкой звезды HD 219134 [30]. Геометрическая вероятность транзита самой внутренней из планет, HD 219134b, была оценена на довольно высоком уровне 9%, что мотивировало исследователей начать поиск транзита в момент времени, рассчитанный из наблюдений лучевых скоростей звезды. Наблюдения ожидаемого транзита были проведены с помощью космического телескопа «Спитцер» на длине волны 4.5 мкм. В результате транзит глубиной  $0.000359 \pm 0.000038$  от потока был зарегистрирован, что позволило измерить размер планеты в дополнение к уже известной величине массы. Независимое обнаружение нескольких планет в системе HD 219134 также представили американские астрономы в сентябре 2015 г. [31]. Оценки параметров планеты HD 219134b обеими группами оказались очень близки. В настоящей статье мы представляем результаты наблюдений транзита HD 219134b, проведенных на 1-м телескопе САО РАН и 1.25-м телескопе КрАО РАН, и их интерпретацию.

Критическим для выполнения программы являлось наличие отличных погодных условий. Однако при первых наших наблюдениях HD 219134, в ночь с 15 на 16 августа 2015 г., погода была не идеальной. Более того, наблюдения начались непосредственно в момент транзита. Тем не менее полученные данные оказались пригодными для анализа, хотя потребовались и дополнительные наблюдения. Мы смогли провести их в ночь 18/19 сентября 2015 г. при погодных условиях, близких к идеальным.

При планировании программы наблюдений HD 219134b мы использовали эфемериды транзита, определенные в работе [30]: период обращения  $3.0937 \pm 0.0004$  суток; время центра транзита  $2457126.7001 \pm 0.0010$  BJD<sub>TDB</sub>.

На кривых блеска HD 219134, полученных нами в ходе этих наблюдений, транзит планеты HD 219134b регистрируется в обе наблюдательные ночи. Особенно явны его признаки во вторую ночь (рис. 2а). По времени транзит точно совпадает с расчетным и является статистически значимым. Вопреки ожиданиям полученная нами глубина транзита в фильтре *U* оказалась равной  $0.0073 \pm 0.0008$  звездной величины (или 0.0067 нормированного потока), что в 19 раз больше, чем было изначально обнаружено на 4.5 мкм. Анализ данных показал, что форма транзита с большой степенью вероятности может быть асимметричной — пологое начало сменяется крутым выходом. Это подтолкнуло нас к предположению о присутствии огромного «гало» окружающего HD 219134b, возможно, имеющего кометоподобный хвост.

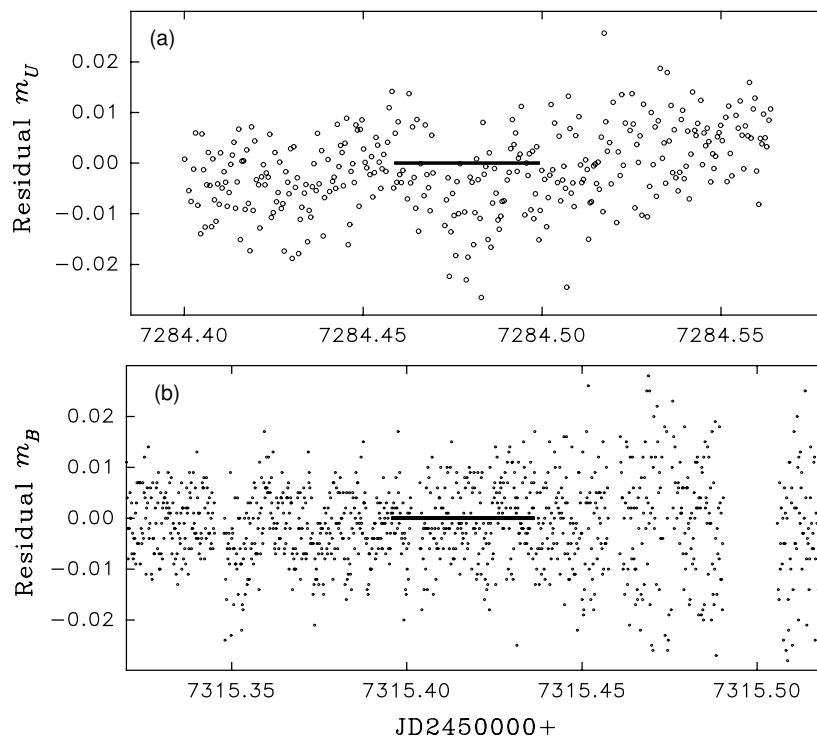
В ночь на 19 октября 2015 г. наблюдения были продолжены с помощью штатного ПЗС-фотометра

на 1.25-м телескопа КрАО РАН. Использовался фильтр *B* системы Джонсона. Несмотря на почти идеальные погодные условия, на полученной в результате кривой блеска в этой полосе (рис. 2b), напротив, нет каких-либо признаков транзита в расчетный момент времени на уровне характерной глубины 0.001 звездной величины. По этой причине попытки дальнейших наблюдений в фильтре *B* были прекращены, но продолжены в фильтре *U* — требовалось подтвердить полученный результат.

Дополнительные наблюдения транзитов HD 219134b были проведены в 2016 г. 11 и 17 сентября, 18 октября и 7 ноября. При анализе данных стала очевидной недостаточно высокая точность используемой нами эфемериды, тем не менее признаки искомого события всегда находились в области  $\pm 2$  часа от его расчетного центра. Предпринятый поиск «потерянного» транзита методами статистического анализа показал, что вероятное транзитное событие, если от наблюдения к наблюдению мы видим именно транзит HD 219134b, а не артефакт, имеет несколько более короткий период, чем предсказанный  $P = 3.0937 \pm 0.0004$  дня. Наш анализ указывал на значение  $P = 3^d0932$  и даже короче, что находится в пределах ошибок оригинальной эфемериды [30]. Однако из-за недостаточной, хоть и высокой, точности наших наземных наблюдений транзита не представлялось возможным однозначно доказать, что регистрируемые нами события потемнения блеска родительской звезды HD 219134 обусловлены именно транзитом экзопланеты.

Ситуация прояснилась после публикации нового исследования HD 219134b [32], в котором была представлена эфемерида экзопланеты с необходимой точностью:  $P = 3.092926 \pm 0.00001$  суток; время центра транзита  $2457126.69913 \pm 0.00087$  BJD<sub>TDB</sub>. Как можно видеть, наш поиск эфемериды происходил в нужном направлении. Мы опускаем детали поиска периода, приняв в данном исследовании значение эфемериды из [32] за истинное. Свернув данные с новой эфемеридой, мы получили набор из пяти наблюдений HD 219134b в разные годы, которые так или иначе пересекались с транзитным событием. Несмотря на это, полученных в ночи 18 октября 2016 г. и 7 ноября 2016 г. данных (около 2500 полуминутных экспозиций за полтора года наблюдений экзопланеты) оказалось достаточно, чтобы зафиксировать и исследовать транзит HD 219134b в фильтре *U*.

На рис. 3 приведены временные ряды блеска HD 219134 в единицах остаточных звездных величин (кроме нижней панели) в фильтре *U* последовательно для ночей (сверху вниз): 15 августа 2015 г., 18 сентября 2015 г., 17 сентября 2016 г., 18 октября 2016 г. и 7 ноября 2016 г. Нижняя



**Рис. 2.** Временные ряды блеска HD 219134 в единицах остаточных звездных величин в фильтре  $U$  (a) и в фильтре  $B$  (b) системы Джонсона. Ожидаемый транзит на каждой панели проиллюстрирован горизонтальной жирной линией.

панель иллюстрирует результат усреднения данных в единицах относительного потока. Усредняя все точки вне транзита и внутри него, мы получаем оценку относительной глубины транзита равной  $0.0013 \pm 0.00027$ . Таким образом, факт наличия транзита HD 219134b в ожидаемые моменты времени установлен в наземных наблюдениях.

Моделирование транзита в фильтре  $U$  с использованием нашего алгоритма с физическими параметрами экзопланеты вместе с ее родительской звездой, взятыми из работы [32], дает относительный радиус экзопланеты  $R_p/R_s = 0.0465 \pm 0.005$ , или  $R_p = 3.95 \pm 0.4 R_{\oplus}$ . Наблюдения в инфракрасном диапазоне [32] дают значение  $R_p = 1.602 \pm 0.055 R_{\oplus}$ .

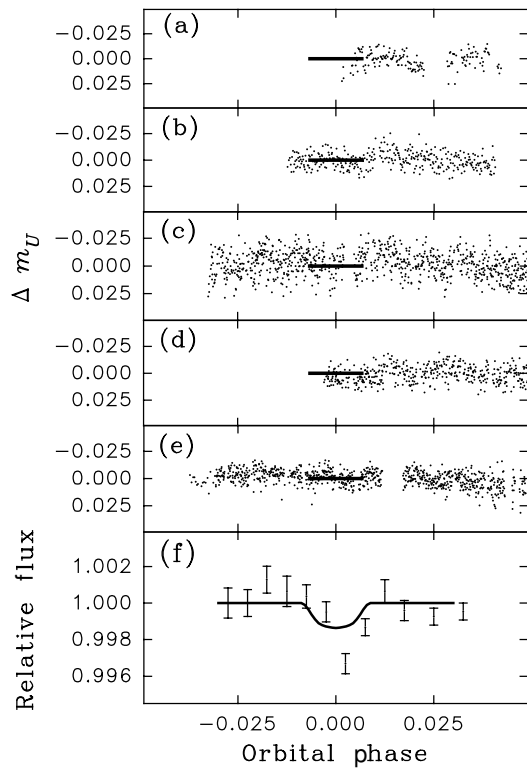
Сравнение этих двух результатов показывает, что найденные радиусы могут различаться даже более чем в два раза, и при всех вероятностных допущениях не менее чем в полтора раза. Вспоминая также, что некоторые из наблюдаемых индивидуальных транзитов HD 219134b (в частности, на дату 18 сентября 2015 г.) имеют значительно большую глубину, мы можем объяснить факт такой разницы вероятным наличием вокруг экзопланеты протяженной оболочки, геометрия которой переменна во времени. Это предположение поддерживается также тем обстоятельством, что в отличие от относительно симметричной формы транзита в инфракрасном диапазоне по данным «Спитцера» [32],

в полосе  $U$  наших наблюдений транзит имеет явную асимметрию: во второй половине транзитного события его глубина становится больше. Это угадывается и в формах индивидуальных транзитов на рис. 3.

Другое весьма вероятное объяснение такой асимметричной формы может быть в том, что эфемериды, указанная авторами в [32], все-таки имеет небольшую систематическую ошибку (например, из-за эффекта переменности времени наступления транзита в результате гравитационного влияния со стороны других планет [33]), в результате чего все наши данные смещены примерно на десять минут в сторону выхода из транзита. В настоящем исследовании мы не можем дать точный ответ на этот вопрос. Между тем сам по себе факт того, что зарегистрированный в полосе  $U$  транзит указывает на значение радиуса экзопланеты, в два раза превышающий радиус, определенный по инфракрасным данным, скорее всего, говорит о наличии в окружении планеты оболочки, непрозрачной в ближней ультрафиолетовой зоне. Более подробно это изложено в разделе «Дискуссия.»

#### 4.3. WASP-43b и WASP-104b

Краткий обзор по открытию и свойствам горячих юпитеров WASP-43b и WASP-104b представлен нами в работе [11]. В той же работе описаны



**Рис. 3.** Сфазированные временные ряды блеска HD 219134 в единицах остаточных звездных величин в фильтре *U* для ночей: 15 августа 2015 г. (а), 18 сентября 2015 г. (b), 17 сентября 2016 г. (с), 18 октября 2016 г. (d) и 7 ноября 2016 г. (е). Горизонтальная сплошная линия на нулевом уровне на панелях (а)–(е) — ожидаемый по обновленной эфемериде транзит. На панели (f) представлены результаты усреднения данных и модель формы транзита (сплошная линия) в единицах относительного потока.

наблюдения этих экзопланет в фильтре *V*. В настоящем исследовании мы моделируем эти данные с данными наблюдений транзитов других авторов. Сводка глубин транзитов представлена в таблице 2 (обозначение таки же, как в таблице 1).

Смоделированный на основании данных глубин транзитов (таблица 2) трансмиссионный спектр WASP-43b представлен на рис. 4. (физические параметры родительской звезды и прицельное расстояние взяты из [34]). Так же, как и в случае с WASP-43b, в широких полосах спектр не обнаруживает каких-либо особенностей (хотя в узких полосах особенности присутствуют [35, 36]). Средний радиус  $R_p/R_s = 0.1637 \pm 0.0015$ . С точностью до ошибки этот радиус практически совпадает с радиусом экзопланеты, измеренным в спутниковых наблюдениях другим методом (наблюдением вторичного транзита) [34]. В этой работе даны значения радиуса для длин волн 3.6 мкм и 4.5 мкм:  $R_p/R_s = 0.158 \pm 0.0003$  и

$R_p/R_s = 0.1589 \pm 0.0005$  соответственно. Совпадение величин радиуса экзопланеты, полученного «на просвет» в момент ее транзита в видимом диапазоне и измеренного «в отраженном свете» в инфракрасном диапазоне [34], позволяет с высокой степенью вероятности предположить, что эти радиусы экзопланеты равны между собой на уровне около одного процента среднего радиуса экзопланеты и не зависят значительно от длины волны. Это, в свою очередь, позволяет нам использовать опубликованную информацию о глубине транзитов WASP-43b на длинах волн 3.6 мкм и 4.5 мкм [34] в нашей модели для независимого определения ночной температуры экзопланеты с фиксированным средним радиусом. Высочайшей точности фотометрических спутниковых наблюдений, представленных в работе [34], оказалось достаточно, чтобы зарегистрировать собственное тепловое излучение температурой  $T_n$  от ночной стороны синхронно вращающейся по орбите экзопланеты WASP-43b. Моделирование инфракрасных транзитов на 3.6 мкм и 4.5 мкм дает значения  $T_n = 935 \pm 37$  К и  $T_n = 753 \pm 62$  К соответственно. Они совпадают с модельными оценками верхних пределов ночных температур WASP-43b, оцененными в [34].

Данных наблюдений транзитов недавно открытой [37] экзопланеты WASP-104b пока недостаточно для того, чтобы делать однозначные выводы относительно структур ее внешних слоев. Моделирование по глубинам транзита из таблицы 2 дает значение радиуса экзопланеты в фильтре *V*  $R_p/R_s = 0.124 \pm 0.01$  и  $R_p/R_s = 0.129 \pm 0.005$  в фильтре *R*. При этом мы не рассматривали единственное наблюдение транзита WASP-104b, представленное в ETD, поскольку оно дает аномально большой радиус экзопланеты в фильтре *V*, противоречащий нашим наблюдениям в том же фильтре и наблюдениям других авторов в других фильтрах.

Сравнивая полученные значения радиусов WASP-104b в фильтрах *V* и *R*, а также данные наблюдений в ближней инфракрасной области:  $R_p/R_s = 0.1214 \pm 0.014$  [37], мы можем заключить, что на уровне менее десяти процентов величины радиуса трансмиссионный спектр экзопланеты является «плоским.»

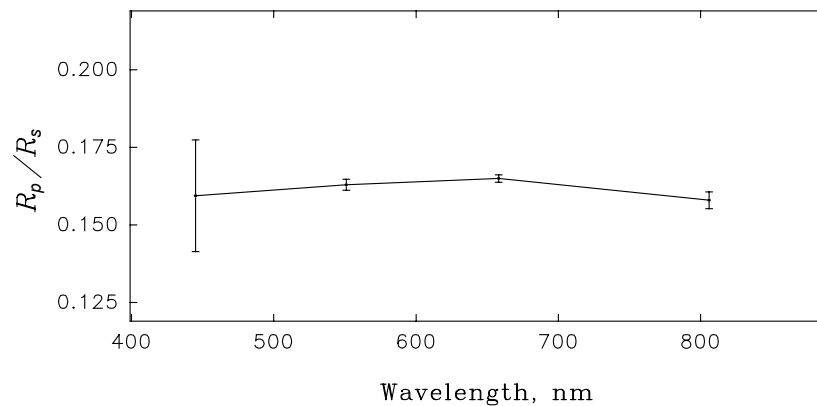
#### 4.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе новые наблюдения и модельный анализ транзитов экзопланет-горячих юпитеров WASP-33b, WASP-43b и WASP-104b позволили получить и проанализировать форму их трансмиссионных спектров в большом диапазоне длин волн от ближнего УФ до инфракрасного. С точностью до погрешностей измерения широкополосные трансмиссионные спектры исследуемых



**Таблица 2.** Глубины транзитов WASP-43b и WASP-104b (в процентах падения блеска) и их ошибки по измерениям разных авторов в разных полосах

Ref	Band (filter / central wavelength in nm)							
	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>H<math>\alpha</math></i>	<i>I</i>	<i>z'</i>	<i>J</i>
	365	445	551	658	656	806	900	1200
WASP-43b								
ETD		2.65(56)	2.84(06)	2.80(04)		2.60(09)		
<i>n</i>		1	2	13		2		
OUR			2.99(05)					
<i>n</i>			1					
WASP-104b								
ETD			3.06(10)	1.70(05)				
<i>n</i>			1	6				
OUR			1.58(10)					
<i>n</i>			1					



**Рис. 4.** Трансмиссионный широкополосный спектр WASP-43b, представляющий радиус  $R_p$  экзопланеты в долях радиуса  $R_s$  ее родительской звезды.

экзопланет являются плоскими. Моделированием литературных данных инфракрасных транзитов экзопланеты WASP-43b получена прямая оценка ее ночной температуры  $T_n$ . Это первая прямая оценка  $T_n$ , выполненная в предположении, что радиус отражающей поверхности экзопланеты совпадает с ее эффективным радиусом, полученным в транзитных наблюдениях «на просвет.»

Представленные в статье результаты наблюдений, с одной стороны, независимо подтверждают факт существования четвертой, внутренней, транзитной планеты в системе HD 219134. С другой стороны, получены новые неожиданные данные по форме транзита этой планеты. На длинах волн

0.3–0.4 и 4.5 мкм они оказываются чрезвычайно отличающимися, что, по нашему мнению, не вписывается в сложившиеся представления об атмосферах сильно нагретых и не очень мелких экзопланет.

Возможная интерпретация может заключаться в том, что в ИК-диапазоне видна «твердотельная» часть планеты, а в ультрафиолете — непрозрачная для фильтра *U* оболочка наподобие кометной комы. По полученной глубине транзита радиус этой оболочки составляет около трех земных радиусов против  $1.6 R_{\oplus}$  для «твердотельной» части. Это соответствует примерно 0.2 радиуса сферы Хилла, который при массе планеты 4.5 массы Земли

близок к  $16 R_{\oplus}$ . Если обнаруженная в  $U$ -полосе оболочка не полностью непрозрачна, то она, в принципе, может занимать и всю полость, т.е. иметь гораздо больший размер. Для выяснения точного размера оболочки нужны дополнительные прецизионные наблюдения транзита HD 219134b в ультрафиолетовом диапазоне.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00043, направление «Экзопланеты»).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Charbonneau, T. M. Brown, R. W. Noyes, and R. L. Gilliland, *Astrophys. J.* **568**, 377 (2002).
2. S. Seager and D. Deming, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **48**, 631 (2010).
3. D. K. Sing, J. J. Fortney, N. Nikolov, et al., *Nature* **529**, 59 (2016).
4. V. Parmentier, J. J. Fortney, A. P. Showman, et al., *Astrophys. J.* **828**, 22 (2016).
5. E. Palle, G. Chen, J. Prieto-Arranz, et al., *Astron. and Astrophys.* **602**, L15 (2017).
6. N. Madhusudhan, H. Knutson, J. J. Fortney, and T. Barman, in *Proc. Conf. on Protostars and Planets VI*, Ed. by H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, and Th. Henning (Univ. Arizona Press, Tucson, 2014), pp. 739–762.
7. G. Zhou, G. Á. Bakos, J. D. Hartman, et al., *Astron. J.* **153**, 211 (2017).
8. F. Motalebi, S. Udry, M. Gillon, et al., *Astron. and Astrophys.* **584**, A72 (2015).
9. M. Gillon, B.-O. Demory, V. Van Grootel, et al., *Nature Astronomy* **1**, 0056 (2017).
10. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 318 (2015).
11. G. G. Valyavin, A. F. Valeev, D. R. Gadelshin, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 315 (2015).
12. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 44 (2017).
13. E. N. Sokov, I. A. Vereshchagina, Y. N. Gnedin, et al., *Astronomy Letters* **38**, 180 (2012).
14. J. Southworth, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **386**, 1644 (2008).
15. A. Claret and S. Bloemen, *Astron. and Astrophys.* **529**, A75 (2011).
16. A. Collier Cameron, E. Guenther, B. Smalley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **407**, 507 (2010).
17. H. Lehmann, E. Guenther, D. Sebastian, et al., *Astron. and Astrophys.* **578**, L4 (2015).
18. A. M. S. Smith, D. R. Anderson, I. Skillen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **416**, 2096 (2011).
19. D. Deming, J. D. Fraine, P. V. Sada, et al., *Astrophys. J.* **754**, 106 (2012).
20. E. J. W. de Mooij, M. Brogi, R. J. de Kok, et al., *Astron. and Astrophys.* **550**, A54 (2013).
21. C. von Essen, M. Mallonn, S. Albrecht, et al., *Astron. and Astrophys.* **584**, A75 (2015).
22. J. D. Turner, K. A. Pearson, L. I. Biddle, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 789 (2016).
23. G. Kovács, T. Kovács, J. D. Hartman, et al., *Astron. and Astrophys.* **553**, A44 (2013).
24. P. V. Sada, D. Deming, D. E. Jennings, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **124**, 212 (2012).
25. P. W. Cauley, S. Redfield, and A. G. Jensen, *Astron. J.* **153**, 185 (2017).
26. C. von Essen, S. Czesla, U. Wolter, et al., *Astron. and Astrophys.* **561**, A48 (2014).
27. P. W. Cauley, S. Redfield, and A. G. Jensen, *Astron. J.* **153**, 217 (2017).
28. A. O. Grauzhanina, D. R. Gadelshin, D. N. Baklanova, et al., *ASP Conf. Ser.* **510**, 376 (2017).
29. A. O. Grauzhanina, G. G. Valyavin, D. R. Gadelshin, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 67 (2017).
30. F. Motalebi, S. Udry, M. Gillon, et al., *Astron. and Astrophys.* **584**, A72 (2015).
31. S. S. Vogt, J. Burt, S. Meschiari, et al., *Astrophys. J.* **814**, 12 (2015).
32. M. Gillon, B.-O. Demory, V. Van Grootel, et al., *Nature Astronomy* **1**, 0056 (2017).
33. E. N. Sokov, I. A. Sokova, V. V. Dyachenko, et al., in *ASP Conf. Ser.* **510**, 344 (2017).
34. K. B. Stevenson, M. R. Line, J. L. Bean, et al., *Astron. J.* **153**, 68 (2017).
35. F. Murgas, E. Pallé, M. R. Zapatero Osorio, et al., *Astron. and Astrophys.* **563**, A41 (2014).
36. G. Chen, R. van Boekel, H. Wang, et al., *Astron. and Astrophys.* **563**, A40 (2014).
37. A. M. S. Smith, D. R. Anderson, D. J. Armstrong, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A64 (2014).

## Exoplanet Studies. Photometric Analysis of the Transmission Spectra of Selected Exoplanets

**G. G. Valyavin, D. R. Gadelshin, A. F. Valeev, T. E. Burlakova, K. A. Antonyuk, G. A. Galazutdinov, N. V. Pit, A. S. Moskvitin, E. N. Sokov, I. A. Sokova, Byeong-Cheol Lee, Inwoo Han, M. Lendl, L. Fossati, A. O. Grauzhanina, and T. A. Fatkhullin**

We present the results of ground based observations and model analysis of transits of exoplanets WASP-33b, WASP-43b, WASP-104b, and HD 219134b. Broadband transmission spectra (dependence of the observed radii on wavelength) have been plotted for all exoplanets, ranging from the near-UV to the IR region. We show that the transmission spectrum of WASP-33b is, within errors, flat in the range of 3800 Å to 12 000 Å. The derived broadband spectrum of WASP-43b is also flat in the first approximation, although other authors have reported the presence of absorption lines of various chemical elements in the narrow bands. Model spectra of WASP-43b taken from the literature and based on IR data allowed us to obtain a direct estimate of its nighttime temperature. We present and analyze the results of ground based observations which confirm the discovery of a transiting super-Earth in the HD 219134 star system. Signs of this planet's existence were discovered earlier during the radial velocity analysis of the star, as well as transit observations with the Spitzer space telescope in the IR. At the estimated time, we registered a transit in the near-UV range several times. The transit depth measured in the *U*-band of the Johnson photometric system amounts to  $0.13\% \pm 0.027\%$ , which is deeper than the one based on Spitzer measurements. We discuss the possible causes of this difference.

*Keywords: planets and satellites: fundamental parameters*