

УДК 524.6:520.84

## ПОИСК СЛЕДОВ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА У ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 189733b МЕТОДОМ ОСТАТОЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

© 2015 Г. Г. Валявин<sup>1\*</sup>, А. О. Граужанина<sup>1,2</sup>, Г.А. Галазутдинов<sup>3,4,1</sup>,  
Д. Р. Гадельшин<sup>1</sup>, Р. Я. Жучков<sup>2,4</sup>, В. Г. Орлов<sup>5</sup>, Т. Е. Бурлакова<sup>1</sup>,  
А. Ф. Валеев<sup>1,2</sup>, А. Ф. Холтыгин<sup>6</sup>, А. Х. Рзаев<sup>1</sup>, Д. Е. Мкртчян<sup>7</sup>

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

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>3</sup>Институт астрономии, Католический университет Севера, Антофагаста, Чили

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

<sup>5</sup>Институт астрономии, Национальный автономный университет Мексики, Мехико, 04510 Мексика

<sup>6</sup>Астрономический институт им. В. В. Соболева, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

<sup>7</sup>Национальный астрономический научно-исследовательский институт Таиланда, Чиангмай, 50200 Таиланд

Поступила в редакцию 1 июля 2015 года; принята в печать 3 сентября 2015 года

Целью данного исследования является развитие и тестирование методики спектрального детектирования света родительских звезд, отраженного от их экзопланет. Представленный метод основан на анализе динамических спектров, который позволяет получать остаточные спектры за вычетом спектра родительской звезды с высоким соотношением сигнал/шум. Эти остаточные спектры содержат информацию об отраженном от экзопланеты свете и о ее альбедо. В работе приводятся первые результаты такого исследования для экзопланеты HD 189733b. Получена серия из нескольких десятков спектров умеренного спектрального разрешения родительской звезды HD 189733. Индивидуальные спектры имеют высокое отношение сигнал/шум ( $\approx 700$ ) и покрывают значительную долю полного орбитального цикла экзопланеты. Использование разработанного метода позволило достигнуть характерного контраста детектирования отраженного света на уровне  $5 \times 10^{-4}$  от уровня континуума. Исследование динамических спектров с этим характерным значением в качестве предела детектирования не выявило явных следов присутствия света родительской звезды, отраженного от планеты. Тем не менее, полученный предел высок, что демонстрирует необходимость развития методики для мониторинговых исследований экзопланет.

Ключевые слова: планетные системы — планеты и спутники: индивидуальные: HD 189733b

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В планетных системах часть потока излучения, исходящего от родительской звезды, неизбежно претерпевает отражение от отражающего слоя планеты с определенной эффективностью (отражающей способностью, альбедо — определения разных типов альбедо см. в работе [1]). Если это скалистая планета с достаточно прозрачной атмосферой, то отражающим слоем является непосредственно поверхность планеты. В случае планеты с плотной атмосферой, или планеты—газового гиганта, отражение происходит в определенных слоях

атмосферы из-за диффузного рассеяния. В зависимости от удаленности планеты от родительской звезды и в зависимости от собственных физических свойств (радиуса, массы, химсостава и т.д.) экзопланеты имеют разную отражательную способность и, соответственно, разный вклад отраженного, собственного и переработанного излучения в собственный спектр [2, 3].

Из-за значительной удаленности большинства экзопланет от их родительских звезд ожидаемая доля отраженного от них излучения по отношению к излучению родительской звезды ожидается на уровнях значительно меньше  $10^{-5}$ . Разрешение такого контраста современными наземными наблюдательными средствами является крайне про-

\*E-mail: gvalyavin@sao.ru

блематичным, если вообще достижимым. Тем не менее, часть экзопланет-гигантов, находящихся на тесных орбитах около своих родительских звезд (т.н. «горячие юпитеры»), могут демонстрировать значительные вклады отраженного света на уровнях около  $10^{-4}$  и даже более [4]. Кроме того, в то время как тепловой и переработанный спектры экзопланет наблюдаются в инфракрасной части спектра, у целого ряда горячих юпитеров отраженный свет доминирует в визуальной области (например спектр горячего юпитера HD 189377b [5]). Данное обстоятельство дает возможность исследовать горячие юпитеры в визуальном диапазоне длин волн, в том числе методом наземной спектроскопии высокого и умеренного спектрального разрешения [6, 7]. Тем самым открывается путь к систематическому исследованию отражающей способности экзопланет (в зависимости от длины волны) и ее временной переменности.

Зависимость альbedo от длины волны может, в частности, дать много сведений о структуре, составе и состоянии рассеивающего слоя атмосферы экзопланеты. Например, ранние модели для безоблачных атмосфер планет—горячих юпитеров предсказывали, что в голубой области видимого света их отражательная способность снижена из-за поглощения широкими линиями паров щелочных металлов, в особенности дублетом натрия на 589 нм [8, 9]. Наблюдения горячих юпитеров в основном находятся в согласии с этими предположениями [10–13]. С некоторой долей неопределенности можно привести и другой пример того, какая информация может быть получена из изучения спектров альbedo горячих юпитеров.

В первом приближении альbedo газовой планеты в видимом свете зависит от того, есть ли в ее атмосфере слой отражающих облаков, а также от высоты, на которой атмосфера становится оптически толстой. Для атмосфер горячих юпитеров можно выделить три наиболее простых варианта.

- Если облака, отражающие свет, становятся оптически толстыми при давлениях ниже образования линий поглощения щелочных металлов и других поглощающих веществ, то альbedo таких планет могут быть очень высокими (0.4–0.6) по всему диапазону видимого света. Такая модель, например, относительно неплохо объясняет высокое альbedo экзопланеты Kepler-7b [14].
- Если облака расположены на высотах значительно ниже оптически толстого слоя атмосферы или вовсе отсутствуют, то альbedo планет может быть очень низким.
- В случае, если облака есть и они становятся оптически толстыми при давлениях, сравнимых с давлениями, где толщина атмосферы достаточна

для образования широких линий поглощения дублета натрия, альbedo планеты в синей области спектра может быть более высоким, чем в красной [5].

Спектральное исследование альbedo Бонда позволяет также отслеживать динамику смены орбитальных фаз экзопланет. В свою очередь из этого можно непосредственно получить значение лучевой скорости экзопланеты вследствие ее орбитального движения (см. раздел 2) и детали, связанные с возможным наличием у нее спутников. Развитие методов исследования отраженного света с помощью наземной спектроскопии высокого и умеренного спектрального разрешения является, таким образом, весьма перспективным.

В то же время, эта задача до сих пор является предельной и очень сложной даже для больших телескопов. Попытки создания и тестирования методики спектрального исследования альbedo экзопланет на телескопе Subaru [6, 7] до сих пор ограничиваются лишь оценками верхних пределов разрешенных контрастов. Анализируя этот опыт, в следующем разделе (Методика) мы представляем наш собственный метод для спектроскопического исследования альbedo горячих юпитеров. В разделе 3 приводится информация об атмосфере экзопланеты HD 189733b. В разделах 4 и 5 мы тестируем метод на основе спектральных наблюдений этой экзопланеты, проведенных на 6-м телескопе САО РАН. В разделе 6 подводятся итоги проделанной работы и сформулированы дальнейшие задачи исследования.

## 2. МЕТОДИКА

Разрабатывая методику спектроскопического исследования альbedo планет, мы исходили как из опыта других авторов [6, 7], так и из собственного [15]. Идея предлагаемого нами метода очень проста. Он основан на анализе осредненных спектров с высоким отношением сигнал/шум, получаемых путем суммирования индивидуальных профилей спектральных линий. Полагая, что регистрируемый спектр на длине волны  $\lambda$  является сверткой истинного спектра звезды  $Sp(\lambda)$  с инструментальным профилем  $IP(\lambda)$  и представляя его в единицах лучевой скорости  $V_r(\lambda_0 - \lambda)$  относительно центра спектральной линии  $\lambda_0$ , имеем суммарный спектр  $F(V_r)$  вида

$$F(V_r) = \sum_{i=1}^N IP(V_r) \otimes Sp(V_r), \quad (1)$$

где  $N$  — количество спектральных линий в регистрируемом спектре. Инструментальный профиль

в данном случае представлен безразмерной функцией спектрального разрешения, уширяющего профиль спектральной линии. Назовем спектр вида (1) динамическим спектром (ДС). Таким образом, ДС является простой арифметической суммой всех профилей спектральных линий в шкале лучевых скоростей, отсчитываемых от центров линий, т.е. представляет собой одну усредненную абсорбционную линию с высоким отношением сигнал/шум. В общем случае ДС может быть получен с помощью спектрографа высокого или умеренного спектрального разрешения. Требования к разрешению определяются тем, что спектрограф должен быть способным разрешить орбитальное движение планеты. Поскольку большинство горячих юпитеров имеют полную амплитуду лучевой скорости их орбитального вращения в характерном диапазоне  $200\text{--}300\text{ км с}^{-1}$ , то вполне достаточно умеренного спектрального разрешения  $R5000\text{--}R10000$ . Хотя высокое спектральное разрешение более предпочтительно в плане минимизации искажающего влияния переменного инструментального профиля (см. также раздел 6).

Построенные таким образом фазоразрешенные спектры, полученные равномерно во всех точках орбитального движения экзопланеты, содержат информацию об отраженном свете. Принимая во внимание тот факт, что звезды солнечного типа, как правило, имеют тысячи сильных линий в видимой области спектра, отношение сигнал/шум для ДС может в десятки или даже сотни раз превышать отношение сигнал/шум для отдельного спектрального элемента. Так, имея спектр с типичным отношением сигнал/шум 3000 на спектральный элемент (что достигается при наблюдениях звезд 7–8 звездной величины со спектрографом UVES на 8-м телескопе ESO в течение около двух часов), можно получить ДС с соотношением сигнал/шум 30 000 (!) и более. Это эквивалентно накоплению нескольких десятков миллионов фотонов на элемент спектрального разрешения. Если экзопланта имеет ненулевое альбедо и наблюдается в момент значительного доплеровского смещения относительно родительской звезды вследствие орбитального движения, то смещенная из-за доплеровского эффекта абсорбционная деталь отраженного спектра также может быть зарегистрирована с высоким соотношением сигнал/шум.

К сожалению, кроме пуассоновского шума, ДС неизбежно имеют дополнительный высокий шум на некотором расстоянии от центра профиля. Этот шум возникает при последовательном суммировании спектральных линий в результате нескомпенсированного влияния соседних с выбранной спектральных линий. Значительные амплитуды орбитальных скоростей экзопланет (сотни километров

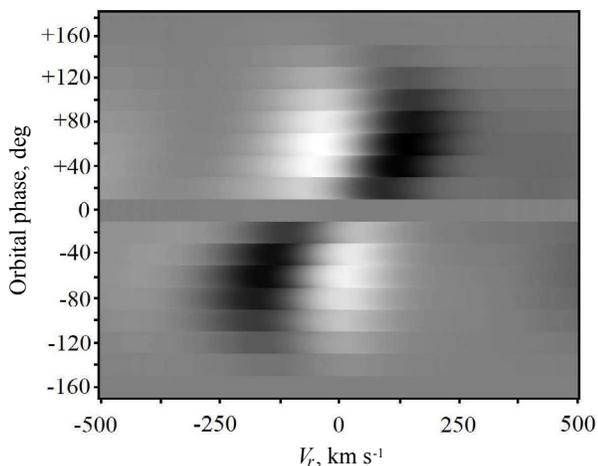
в секунду) практически не позволяют найти в спектре звезды солнечного типа такие индивидуальные линии, которые не имели бы на данных расстояниях соседних спектральных линий. Или же таких линий может быть найдено очень ограниченное количество (попытка подобного анализа приведена в работе [7]). Тем не менее, проблема может быть решена с получением серии ДС, которая охватывает весь орбитальный цикл экзопланеты. Последующее вычитание из каждого ДС того ДС, который не содержит отраженный от планеты свет (например в момент обратного транзита), в первом приближении решает проблему. В этом случае отраженная планетой спектральная особенность может быть зарегистрирована по остаточным ДС (ОДС). Полученные с необходимым временным разрешением ОДС позволяют отслеживать орбитальную динамику, изучать альбедо планеты и смену ее фаз (аналогично лунным) и т.д. В рамках данной методики можно определять и параметры орбиты.

В качестве иллюстрации применения метода в работе [16] мы приводим результаты численного моделирования ОДС для экзопланеты, вращающейся вокруг родительской звезды солнечного типа. В отсутствие пуассоновского шума и временных нестабильностей спектра родительской звезды ОДС должны демонстрировать характерное поведение отраженного спектра таким образом, как показано на рис. 1 (темные области). В случае реальных наблюдений картина будет сильно искажена пуассоновским шумом, нестабильностями инструментального профиля спектрографа и нестабильностями в спектре самой звезды. Для выяснения степени вклада всех этих искажающих факторов нами были проведены тестовые наблюдения одного из хорошо изученных горячих юпитеров HD 189733b с известным альбедо.

### 3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О HD 189733b

Исследования спектра атмосферы HD189733b показали, что поглощение в ее атмосфере уменьшается от 290 нм и, по крайней мере, до 1 мкм [17, 18]. Уменьшение поглощения возможно и в инфракрасной области [19]. В качестве объяснения этой особенности предполагалось наличие высотного облака пыли, которое вызывает рэлеевское рассеяние и приводит к высокому альбедо в видимом диапазоне спектра [20, 21]. Новым доказательством наличия пыли в атмосфере стало обнаружение в спектре узкого ядра дублета натрия на 589 нм [22]. Эти линии были бы уширены давлением в случае ясной атмосферы [23].

В 2013 г. исследование альбедо на разных длинах волн, включая коротковолновую область, методом измерения глубин вторичного затмения



**Рис. 1.** Ожидаемое поведение ОДС типичного горячего юпитера, вращающегося вокруг звезды солнечного типа [16]. ОДС представлены как функция интенсивности (градации серого цвета) в зависимости от лучевой скорости, отсчитываемой от центра средней абсорбционной спектральной линии родительской звезды. Спектры расположены в соответствии с их орбитальной фазой (фаза 0 на вертикальной оси соответствует моменту обратного транзита, когда планета затмевается звездой).

HD 189733b с помощью телескопа Hubble помогло определить, что геометрическое альbedo планеты составляет 0.40 в диапазоне 290–450 нм и 0.12 в области 450–570 нм [24]. Вместе с предыдущими исследованиями это обстоятельство может рассматриваться как доказательство наличия на дневном полушарии планеты отражающих облаков, рассеивающих излучение в линиях натрия на длинах волн начиная примерно с 450 нм. Предположительно, облака могут состоять из энстатита. Такое альbedo приводит к тому, что цвет этого горячего юпитера оказывается ядовито-синим.

#### 4. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Спектроскопические наблюдения HD 189733b проводились в течение двух наблюдательных сетов в июле и октябре 2014 г. как в рамках программ магнитометрического мониторинга звезд разных типов [25–27], так и в техническое время 6-м телескопа САО РАН. Использовался стационарно установленный в нем Основной звездный спектрограф (ОЗСП). Спектрограф и методика наблюдений на нем описаны в работе [28] (см. также ссылки в цитируемой работе). HD 189733b наблюдалась в спектральном диапазоне от 4300 до 5300 Å в режиме умеренного спектрального разрешения с дифракционной решеткой с углом блеска 8°, обеспечивающей спектральное разрешение R6000.

Спектрограф оборудован семиступенчатым резателем изображений и поляриметрическим анализатором [29], позволяющим одновременно проводить магнитометрические измерения. В настоящее время все спектральные измерения на ОЗСП проводятся в магнитометрическом режиме (более подробно о технике таких наблюдений см. в работах [30–32]). Журнал наблюдений приведен в таблице.

##### 4.1. Первичная редукция данных

Основные шаги первичной редукции спектров звезд проводились по стандартной методике с использованием программных пакетов MIDAS (Munich Image Data Analysis System). Однако обработка кадров, полученных с оптическим резателем изображения и анализатором поляризации, потребовала разработки дополнительных сценариев и индивидуальной (отличной от стандартной) последовательности шагов обработки, которые коротко опишем здесь.

На первом шаге использовались стандартные процедуры пакета MIDAS для вычитания кадра нулевой экспозиции (bias) светоприемника и удаления следов космических частиц (процедура `filter/cosmic`). Затем выполнялась экстракция спектров индивидуальных срезов изображения без привязки к длинам волн. Всего резатель изображения в комбинации со спектрополяриметрическим анализатором дает 14 срезов, соответствующих обыкновенному и необыкновенному лучам (по семь срезов на каждый) [29]. С помощью специально написанного для этой цели программного сценария строилась маска положений всех четырнадцати спектров индивидуальных срезов на наблюдаемом кадре. После с использованием полученной маски каждый спектр экстрагировался с заданной апертурой и вставлялся в новые двумерные изображения, где (условно) вертикальная ось соответствовала номеру среза, а горизонтальная — номеру пиксела в спектре. Эта процедура выполнялась с фиксированной маской положений для всех кадров каждой индивидуальной серии наблюдений HD 189733b, включая кадры со спектрами эталона длин волн и лампы «плоского поля» (использовались стандартная торий-аргоновая лампа с полым катодом и галогенная лампа). И затем окончательные шаги обработки сводились к стандартным процедурам двумерной калибровки по длинам волн и процедуре деления на плоское поле контекста LONG пакета MIDAS. Окончательные векторы изображений спектров получались путем суммирования спектров всех четырнадцати срезов с учетом длины волны. Проведение континуума для создания ОДС не требуется.

К сожалению, описанная процедура никак не включает экстракцию рассеянного света. В отличие от эшелле-спектроскопии, стандартная спектроскопия на ОЗСП с резателем изображения не позволяет корректно учесть рассеянный свет, который имеет разную морфологию внутри срезов и между ними на изображениях спектров, что, безусловно, вносит свой искажающий фактор в конечный результат. К счастью, дифференциальная природа ОДС в определенной степени учитывает рассеянный свет. Остаточные эффекты его недоучета дают дополнительный вклад в общее число шумовых факторов конечного результата, о которых еще будет сказано ниже.

#### 4.2. Построение динамических спектров

Процедура построения ДС и ОДС в случае реальных наблюдательных данных отличается от той процедуры, которая была применена нами при работе с идеальными модельными спектрами [16] и поэтому требует специальных пояснений.

Построение динамических спектров из обычных, полученных в результате применения описанных выше процедур, проводилось в два этапа. На первом этапе с использованием базы данных VALD [33, 34] проводился отбор спектральных линий. Мы использовали разные варианты отбора по параметрам линий. Окончательно был сделан выбор в пользу наиболее глубоких спектральных линий с относительными интенсивностями  $r_c \geq 0.4$  в единицах континуума. Поскольку при используемом спектральном разрешении (R6000) большинство спектральных линий спектра звезды солнечного типа фактически не разделяются, образуя группы сложных бленд, требуется дополнительная селекция. Пригодными считались те бленды, которые состояли из минимального набора спектральных линий и имели симметричную форму, близкую к гауссовой. Все несимметричные бленды сложных форм отбрасывались. Профили бленд, прошедших отбор, переводились из шкалы длин волн в шкалу лучевых скоростей относительно их центров и суммировались.

Из полученных таким образом суммарных спектров, представляющих из себя одну абсорбционную линию, вычиталось значение их минимальных интенсивностей в центре профиля. Затем спектры фильтровались скользящим средним с шириной окна, в три раза превосходящей ширину суммарного профиля. Результирующие ДС получались нормировкой спектров с вычтенными минимальными интенсивностями на результаты их фильтрации. Последняя операция приводила все спектры к одному абсолютно идентичному и стабильному

#### Журнал наблюдений HD 189733b

Дата	Количество экспозиций	Экспозиция, с	Погодные условия
14/15.07.14	10	900	средние
15/16.07.14	10	600	хорошие
16/17.07.14	8	600	хорошие
17/18.07.14	8	900	средние
10/11.10.14	9	1200	хорошие
11/12.10.14	11	1200	хорошие
12/13.10.14	8	1200	хорошие
13/14.10.14	10	1200	хорошие
14/15.10.14	8	1200	средние
15/16.10.14	5	1200	плохие

условному континууму. Условный континуум, строго говоря, континуумом в прямом смысле не является. Он содержит остаточные неровности в местах больших градиентов профиля. Деление исходных спектров на такой континуум искажает форму профиля. Тем не менее, нашим конечным результатом являются остаточные спектры, полученные вычитанием динамического спектра родительской звезды, не содержащего отраженного света. Представленная дифференциальная процедура позволяет с высокой точностью вычесть спектр родительской звезды, оставляя лишь отраженный спектр. Привнесенные искажения профиля отраженной линии на данном этапе не так важны по сравнению с фактом ее регистрации. Таким образом, описываемая процедура позволяет единым образом привязать все спектры к единой шкале (а именно к остаточной интенсивности усредненного абсорбционного профиля спектра родительской звезды). Относительно этой шкалы проводится поиск отраженного спектра. Регистрируемые спектры также переменны в силу флуктуаций погоды и иных причин. Описанная процедура идеально масштабирует и стабилизирует шкалу измерений.

Примеры полученных таким образом динамических спектров в трех разных фазах орбитального движения HD 189733b приведены на рис. 2. На верхней панели спектры визуально слабоотличимы друг от друга на масштабе рисунка. Это иллюстрирует стабильность метода. Между тем при детальной визуализации спектров (нижняя панель) обнаруживается динамическая переменность на характерном уровне 0.2–0.3%, в то время как мелкомасштабный шум на спектрах соответствует

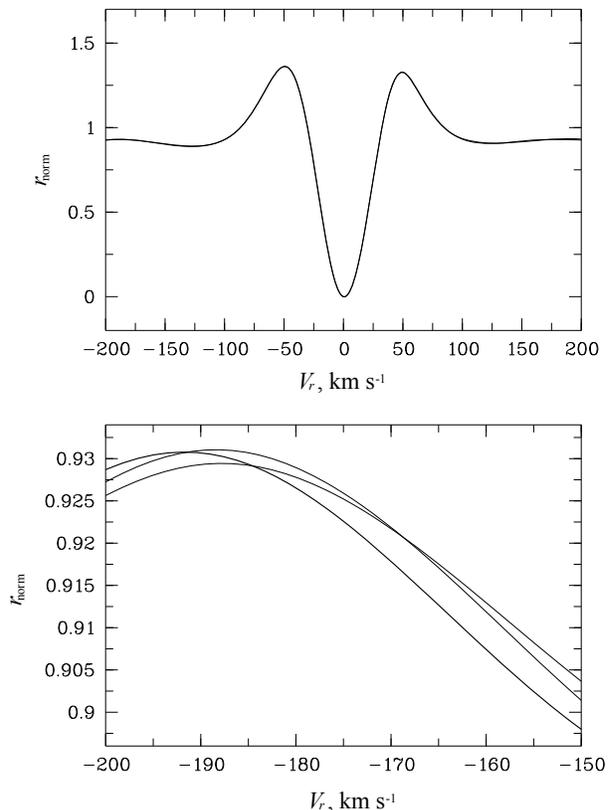
отношению сигнал/шум  $S/N > 10\,000$ , или уровню пуассоновского шума менее 0.01%. То есть переменность имеет амплитуду, превышающую естественный шум на порядок величины. Анализ этой переменности выявил присутствие целого ряда искажающих факторов, не связанных с физическими процессами на звезде. Часть из этих факторов оказались инструментальными, связанными с временной нестабильностью инструментального профиля спектрографа. Другая часть связана с условиями наблюдений, в частности, с влиянием фона, создаваемого рассеянным лунным светом (см. также ниже). Поэтому те ДС, которые в ряде коротких экспозиций демонстрировали значительные отклонения от соседних, отбраковывались (см. рис. 2 и пояснения к нему).

Таким образом, предложенная методика в приложении к реальным наблюдениям на спектрографе ОЗСП не позволяет достигнуть заявленной идеальной точности регистрации отраженного от экзопланеты света. Между тем, накопленный материал объемом около сотни спектров позволяет построить фазоразрешенные ОДС с усреднением их в фазовых интервалах, что, в свою очередь, повышает уровень контраста остаточных спектров до нескольких десятитысячных долей. Этот уровень сам по себе очень высок, и далее мы представляем результаты нашего анализа.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

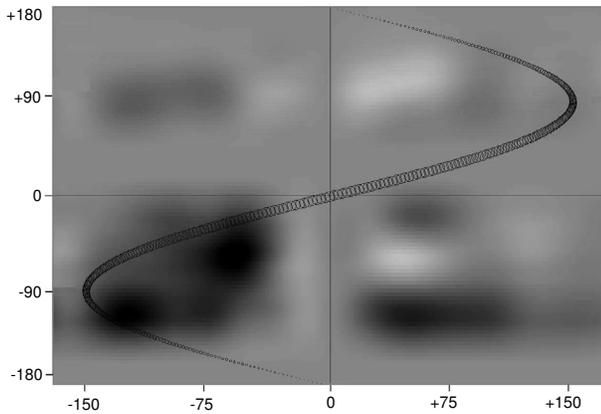
Остаточные динамические спектры были получены вычитанием из всех спектров одного, полученного в фазе, близкой к фазе транзита. В этой фазе сторона планеты, обращенная к земному наблюдателю, практически не освещена, и в спектре ее родительской звезды нет следов отраженного света. Полученные таким образом ОДС сортировались по фазам орбитального вращения экзопланеты и упаковывались в стандартные FITS-изображения как двумерная функция координат  $X$  (лучевая скорость) и  $Y$  (орбитальная фаза). Пример такого изображения представлен на рис. 3. (На рисунке орбитальная фаза 0 соответствует моменту обратного транзита, когда планета затмевается родительской звездой.) Для лучшего восприятия изображение сглажено двумерным скользящим средним с окном  $10^\circ$  по вертикали и  $10\text{ км с}^{-1}$  по горизонтали. Ожидаемая траектория планеты показана на рис. 3 цепью кружков разных радиусов. Величина радиуса кружка соответствует интенсивности отраженного света в данной фазе.

Анализ данных, представленных на рис. 3, не показал наличия следов света, отраженного от планеты, которые бы соответствовали обозначенной траектории ее орбитального движения. Между тем,

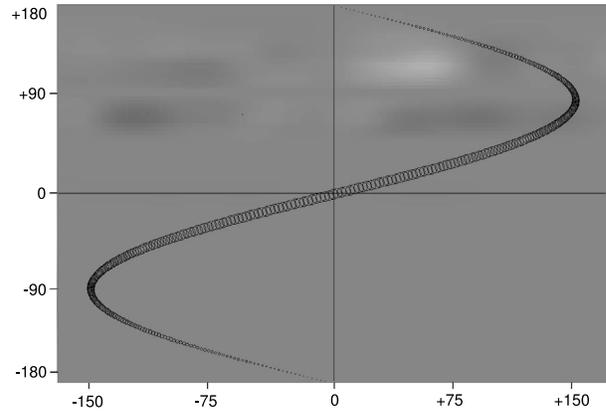


**Рис. 2.** Примеры динамических спектров родительской звезды, полученных в разных фазах орбитального движения HD 189733b. Центр усредненного абсорбционного профиля (верхняя панель рисунка) соответствует лучевой скорости  $0\text{ км с}^{-1}$ . Полуширина профиля, около  $50\text{ км с}^{-1}$ , определяется главным образом спектральным разрешением R6000 спектрографа. При более детальном рассмотрении одного из краев ДС (нижняя панель рисунка) виден шум со средней дисперсией 0.2–0.3% в области лучевых скоростей от  $-200$  до  $-150\text{ км с}^{-1}$ . Один из спектров (сплошная жирная линия на нижней панели рисунка — пример отбраковываемого образца) отклоняется более чем на 0.4–0.5%.

как можно заметить, в каждом квадранте рис. 3 присутствуют фрагменты сигналов с характерными амплитудами  $\sim 10^{-3}$  (темные пятна). Эти фрагменты являются результатом шума от фона неба, содержащего отраженный Луной солнечный спектр. Как уже говорилось выше, большинство наблюдений проводилось в лунное время, что и сказалось на качестве результата. Используемый нами спектрограф ОЗСП в его настоящей конфигурации не позволяет выполнять одновременное экспонирование фона неба. Корректный учет фона неба возможен лишь с проведением дополнительных наблюдений фона в стороне от звезды, что требует значительных затрат наблюдательного времени. Данные наблюдений, используемые в этой работе, были по-



**Рис. 3.** Результирующие ОДС звезды HD 189733, представленные градациями серого цвета в зависимости от лучевой скорости, отсчитываемой от центра средней абсорбции. Спектры расположены в соответствии с их орбитальной фазой (вертикальная ось). Фаза 0 соответствует моменту обратного транзита, когда планета затмевается родительской звездой. Ожидаемая траектория планеты показана цепью кружков разных радиусов. Величина радиуса кружка соответствует интенсивности отраженного света в данной фазе.



**Рис. 4.** Результирующие ОДС звезды HD 189733, построенные так же, как и на рис. 3, только для тех данных, которые были получены в безлунное время.

лучены в рамках программы магнитометрического мониторинга ярких звезд. Поскольку такие наблюдения не чувствительны к фону неба, наблюдения спектра фона не проводились, что в конечном итоге отрицательно сказалось на качестве обсуждаемого здесь результата. Тем не менее, часть наблюдений HD 189733 пришлось на практически безлунные промежутки наблюдательных ночей. Причем часть из этих наблюдений попали именно в ключевые фазы орбитального движения экзопланеты, по которым возможна устойчивая оценка отраженного от нее света, неотягощенная искажающим влиянием рассеянного лунного света. Эти данные мы представляем на рис. 4.

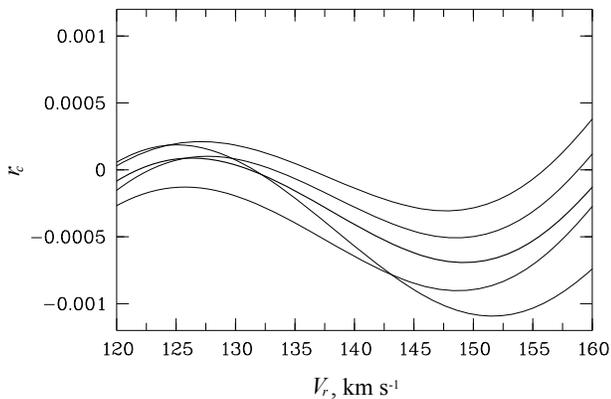
ОДС на рис. 4 представлены в том же порядке, что и на рис. 3. В отличие от данных, представленных на рис. 3, эти данные покрывают фазы вращения лишь частично, в диапазоне от  $+45^\circ$  до  $+120^\circ$ , и два спектра — около фазы  $+180^\circ$ . Последние были использованы для построения ОДС, поскольку в эту фазу спектр HD 189733 не содержит отраженного света. Как можно видеть, спектральный материал, полученный в безлунное время, демонстрирует гораздо более ровную морфологию и, соответственно, более высокие пределы по детектированию отраженного спектра. Наиболее важным в этом контексте является диапазон фаз орбитального вращения в области от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ . В этих фазах планета уже достаточно освещена своей родительской звездой со стороны, обращенной к наблюдателю, а также демонстрирует значительное

доплеровское смещение относительно спектра родительской звезды.

Исследование ОДС в диапазоне фаз от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  и доплеровских смещений от 100 до  $150 \text{ km s}^{-1}$  не выявило значимых следов присутствия отраженного спектра. Несмотря на то, что рассмотренный спектральный материал был получен в безлунные отрезки наблюдательных ночей, шум, связанный с временной нестабильностью инструментального профиля спектрографа, не дает возможности достичь до уровня пуассоновского шума. Ограничения, вызванные нестабильностью инструментального профиля в рассматриваемом диапазоне, оценены нами на уровне контраста  $5 \times 10^{-4}$  относительно остаточной интенсивности усредненного абсорбционного профиля спектра родительской звезды. Этот результат проиллюстрирован на рис. 5, где тонкими сплошными линиями обозначены фрагменты нескольких индивидуальных ОДС, последовательно отслеживающих орбитальное движение экзопланеты в области доплеровских смещений  $150 \text{ km s}^{-1}$ . Сплошная жирная линия представляет результат их усреднения. Несмотря на то, что в рассматриваемой области все ОДС демонстрируют локальный минимум на характерных уровнях контраста  $5 \times 10^{-4}$ , этот минимум статистически никак не отличается от флуктуаций ОДС во всех других диапазонах. Таким образом, в этой работе мы можем лишь зафиксировать нижний предел контраста обнаружения отраженного спектра на обозначенном уровне.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы представили спектроскопическую методику анализа света, отраженного от экзопланеты. Методика протестирована на реальных наблюдениях.



**Рис. 5.** Фрагменты нескольких индивидуальных ОДС, последовательно отслеживающих орбитальное движение экзопланеты в области доплеровских смещений  $150 \text{ км с}^{-1}$ . Сплошная жирная линия представляет результат их усреднения.

Несмотря на то, что в результате получен лишь очередной верхний предел спектроскопического детектирования отраженного света, этот предел сам по себе достаточно высок и находится в одном ряду с подобными пределами, полученными сходными методами на телескопе Subaru [6, 7].

В то же время критический анализ метода выявил целый ряд дополнительных коррекций, которые должны быть внесены при продолжении исследований. К числу этих коррекций прежде всего относится необходимость проведения наблюдений в безлунное время, либо обеспечение параллельного наблюдения спектра фона ночного неба. Необходимо также провести мероприятия по стабилизации спектрографа. Изменения формы инструментального профиля в процессе наблюдений при использовании данного метода генерируют значительные шумовые всплески на профилях спектральных линий. Все это должно быть учтено в последующих наблюдениях, которые, по нашему мнению, нужно продолжать.

Заметим также, что используемый в настоящем исследовании режим умеренного спектрального разрешения (R6000) накладывает свои ограничения на окончательный результат. Значительные ширины инструментального профиля по сравнению с естественными ширинами спектральных линий только усиливают искажающий вклад от механической и оптической нестабильностей спектрографа. Полученный нами опыт говорит о необходимости использования для этой задачи стабильного, желательно оптоволоконного спектрографа с разрешающей способностью около R100000. Использование оптоволокна минимизирует как механические, так и оптические нестабильности. Высокое спектральное разрешение во много раз

уменьшает искажающий вклад переменного инструментального профиля. В настоящее время САО РАН имеет спектрограф высокого спектрального разрешения [35], который может быть использован для решения поставленной задачи. К сожалению, в этом исследовании мы были ограничены рамками основных задач, подразумевающих использование ОЗСП, поэтому не имели возможности протестировать этот инструмент, но мы планируем его использование в будущем. Нами также разрабатывается и оптоволоконный спектрограф высокого разрешения [36, 37].

В заключение заметим следующее. В настоящем исследовании не обсуждается искажающий фактор влияния собственной спектральной переменности родительских звезд. Для солнечноподобных звезд с конвективными оболочками, в которых происходит активное перемешивание вещества, эта проблема остро не стоит и решается усреднением большого объема данных. Однако для более горячих классов звезд с устойчивыми пятнистыми структурами, например для конвективно-спокойных химически-пекулярных F–V звезд [38], это может представлять дополнительную проблему. Для ее решения мы планируем модернизацию метода в направлении анализа отдельных групп спектральных линий, что позволит повысить точность при исследовании горячих звезд. Этому будет посвящено отдельное исследование.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы, являющиеся сотрудниками САО РАН, благодарят Российский научный фонд (проект 14-50-00043, программа «Экзопланеты»). А. Ф. Холтыгин выражает благодарность за поддержку грантами СПбГУ 6.38.18.2014 и РФФИ 15-02-05183. Участие в проекте Р. Я. Жучкова финансировалось за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Наблюдения на 6-метровом телескопе САО РАН проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Madhusudhan and A. Burrows, *Astrophys. J.* **747**, 25 (2012).
2. B. N. Cowan and E. Agol, *Astrophys. J.* **729**, 54 (2011).
3. M. S. Marley, C. Gelino, and D. Stephens, *Astrophys. J.* **513**, 879, (1999).

4. J. Harrington, B. M. Hansen, S. H. Luszcz, et al., *Science* **314**, 623, (2006).
5. N. P. Gibson, S. Aigrain, F. Pont, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 753 (2012).
6. X. Liu, E. L. Turner, N. Narita, et al., arXiv:0711.2304.
7. S. V. Langford, J. S. B. Wyithe, E. L. Turner, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415**, 673 (2011).
8. D. Sudarsky, A. Burrows, and P. Pinto, *Astrophys. J.* **538**, 885 (2000).
9. A. Burrows, L. Ibgui, and I. Hubeny, *Astrophys. J.* **682**, 1277 (2008).
10. J. F. Rowe, J. M. Matthews, S. Seager, et al., *Astrophys. J.* **689**, 1345 (2008).
11. I. A. G. Snellen, E. J. W. de Mooij, and S. Albrecht, *Nature* **459**, 543 (2009).
12. R. Alonso, H. J. Deeg, P. Kabath, and M. Rabus, *Astron. J.* **139**, 1481 (2010).
13. J. L. Christiansen, S. Ballard, D. Charbonneau, et al., *Astrophys. J.* **710**, 97 (2010).
14. B.-O. Demory, S. Seager, N. Madhusudhan, et al., *Astrophys. J.* **735**, L12 (2011).
15. A. F. Kholtygin, T. E. Burlakova, S. N. Fabrika, et al., *Astronomy Reports* **50**, 887, (2006).
16. A. Grauzhanina, G. Valyavin, D. Gadelshin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 289 (2015).
17. F. Pont, H. Knutson, R. L. Gilliland, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **385**, 109 (2008).
18. D. K. Sing, F. Pont, S. Aigrain, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **416**, 1443 (2011).
19. N. P. Gibson, S. Aigrain, F. Pont, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 753 (2012).
20. A. Lecavelier des Etangs, F. Pont, A. Vidal-Madjar, and D. Sing, *Astron. and Astrophys.* **481**, L83 (2008).
21. F. Pont, D. K. Sing, N. Gibson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432**, 2917, (2013).
22. C. M. Huitson, D. K. Sing, A. Vidal-Madjar, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 2477 (2012).
23. J. J. Fortney, M. Shabram, A. P. Showman, et al., *Astrophys. J.* **709**, 1396 (2010).
24. T. M. Evans, F. Pont, D. K. Sing, et al., *Astrophys. J.* **772**, L16 (2013).
25. A. F. Kholtygin, S. N. Fabrika, N. A. Drake, et al., *Astronomy Letters* **36**, 370 (2010).
26. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515**, 88 (2014).
27. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. G. Valyavin, et al., *Astron. and Astrophys.* **580**, 120 (2015).
28. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 1804 (2006).
29. G. A. Chountonov, in *Magnetic Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk (Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, 2004), p. 286.
30. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 339 (2014).
31. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **69**, 427 (2014).
32. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **69**, 191 (2014).
33. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **112**, 525 (1995).
34. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119 (1999).
35. В. Г. Ключкова, Научно-технич. отчет № 266 (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1998).
36. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
37. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 305 (2015).
38. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70**, 191 (2015).

### Search for Signatures of Reflected Light from the Exoplanet HD 189733b by the Method of Residual Dynamical Spectra

**G. G. Valyavin, A. O. Grauzhanina, G. A. Galazutdinov, D. R. Gadelshin, R. Ya. Zhuchkov, V. G. Orlov,  
T. E. Burlakova, A. F. Valeev, A. F. Kholtygin, A. Kh. Rzaev, and D. E. Mkrtchian**

The goal of the present study is the development and testing of a method for spectral detection of the light of host stars reflected from their exoplanets. The presented method is based on the analysis of dynamical spectra, which make it possible to obtain high signal-to-noise residual spectra after host star spectrum deduction. These residual spectra contain information on the light reflected from an exoplanet and on its albedo. The first results of such research for the exoplanet HD 189733b are presented in the paper. We obtained a series of a few dozens moderate-resolution spectra of the host star HD 189733. Individual spectra have a high signal-to-noise ratio ( $\approx 700$ ) and cover a considerable part of the complete orbital cycle of the exoplanet. The use of the developed method allowed us to achieve a characteristic contrast of the reflected light detection at a level of  $5 \times 10^{-4}$  from the continuum. Investigation of the dynamic spectra with this characteristic value as a detection threshold has not revealed obvious evidence of the host star light reflected from the planet. Nevertheless, the obtained threshold is high, which demonstrates the necessity of the development of the method for the exoplanet monitoring studies.

*Keywords: planetary systems—planets and satellites: individual: HD 189733b*