

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

**Научно-квалификационная работа
(диссертация)**

**«Спектроскопическое исследование атмосфер
избранных экзопланет – горячих юпитеров»**

Граужанина Анастасия Олеговна

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Валявин Г. Г.

Нижний Архыз 2020

Научно-квалификационная работа

Тема работы:

Спектроскопическое исследование атмосфер избранных экзопланет – горячих юпитеров

Структура работы:

Введение

Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо

Глава 2. Спектральные наблюдения транзита WASP-32b

Глава 3. Трансмиссионный спектр WASP-32b

Заключение

Список используемой литература

Введение

Актуальность

Цель:

Комплексное исследование атмосфер горячих юпитеров различными спектроскопическими методами.

Задачи:

- Разработка методики динамических спектров (ДС)
- Тестирование методики ДС на практике
- Проведение одновременных спектральных наблюдений транзита WASP-32b на различных инструментах
- Построение трансмиссионного спектра WASP-32b по наблюдениям 10-ти метрового телескопа GTC (спектрограф OSIRIS)

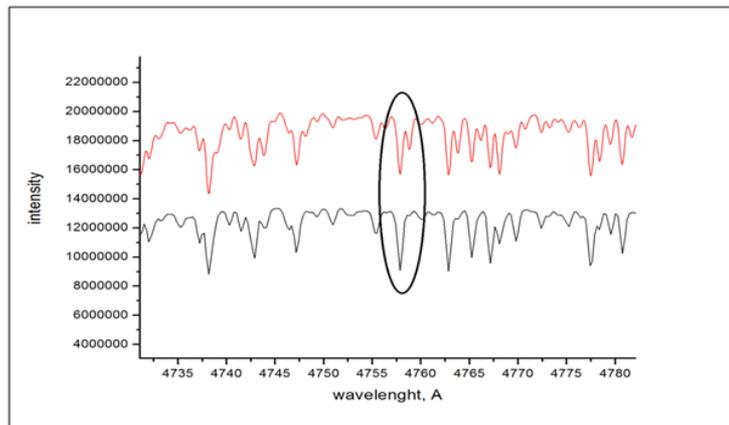
Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо



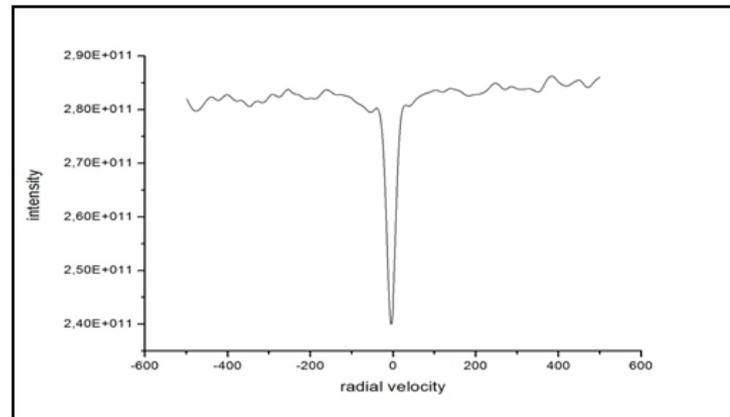
Основу данного метода составляют средние динамические спектры (СДС).

Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо

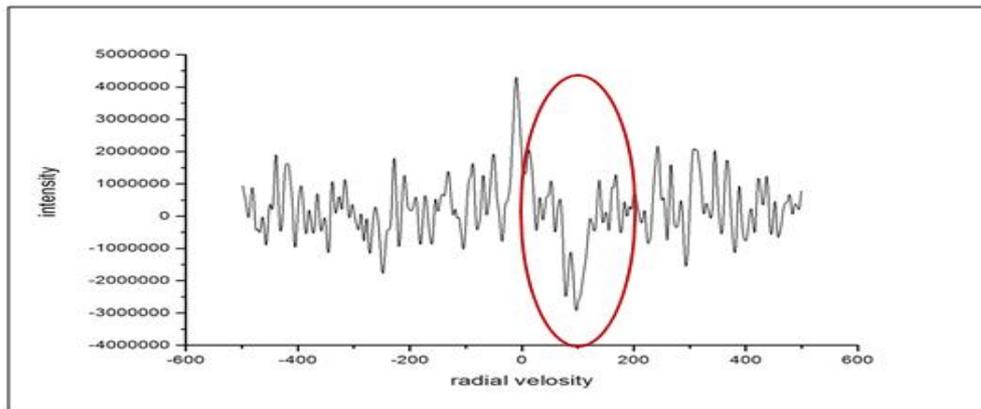
а)



б)



в)



а) - спектр звезды (нижний) и динамический спектр системы звезда+планета (верхний); б) – средний динамический спектр (СДС); в) – остаточный динамический спектр (ОДС) (овала указывает на абсорбционную деталь от спектра планеты)

Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо

Звезда HD 189733

спектральный класс

K2 V;

$V=7.7$ mag

$T_{\text{eff}}=5050$ K;

$M=0.82 M_{\text{sun}}$;

$R=0.76 R_{\text{sun}}$;

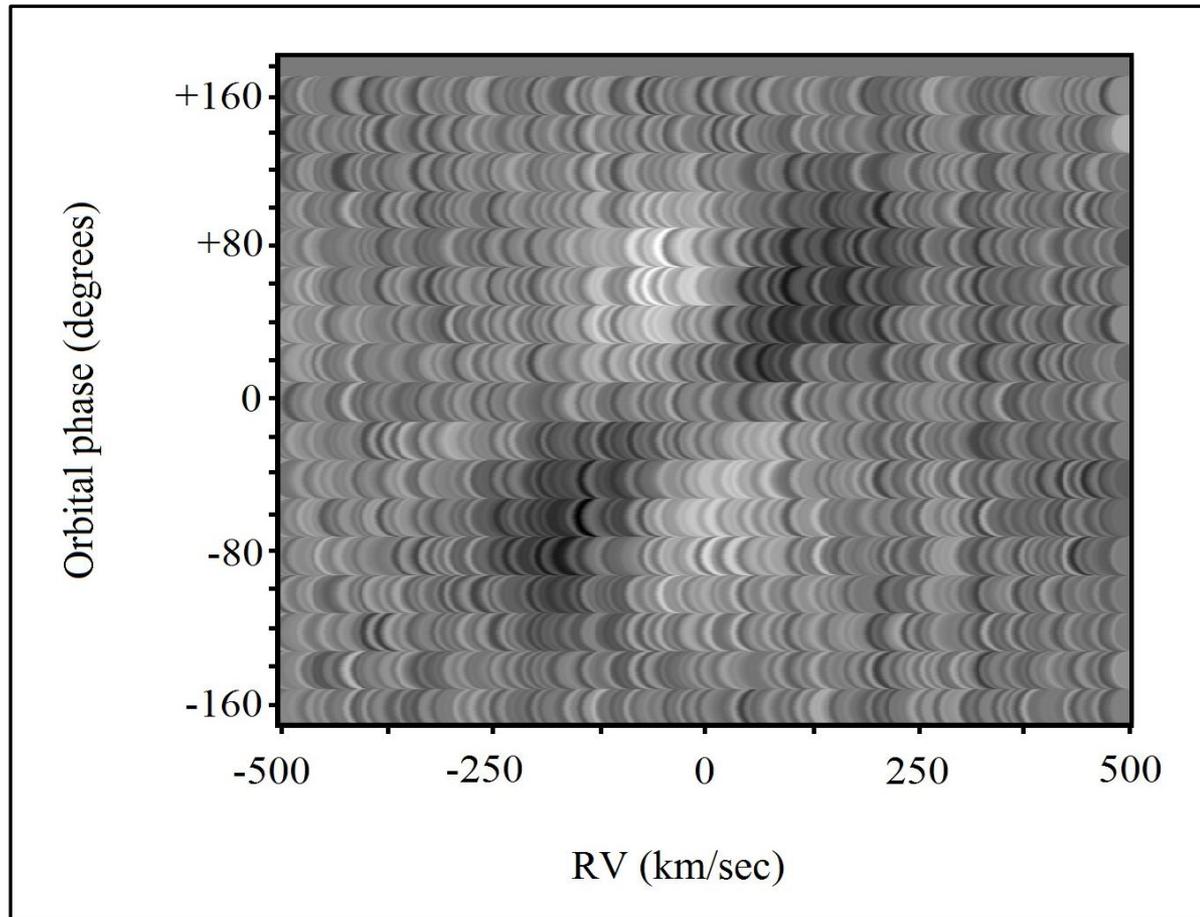
Планета HD 189733b

$M=1.15 \pm 0.04 M_{\text{J}}$;

$R=1.26 \pm 0.03 R_{\text{J}}$;

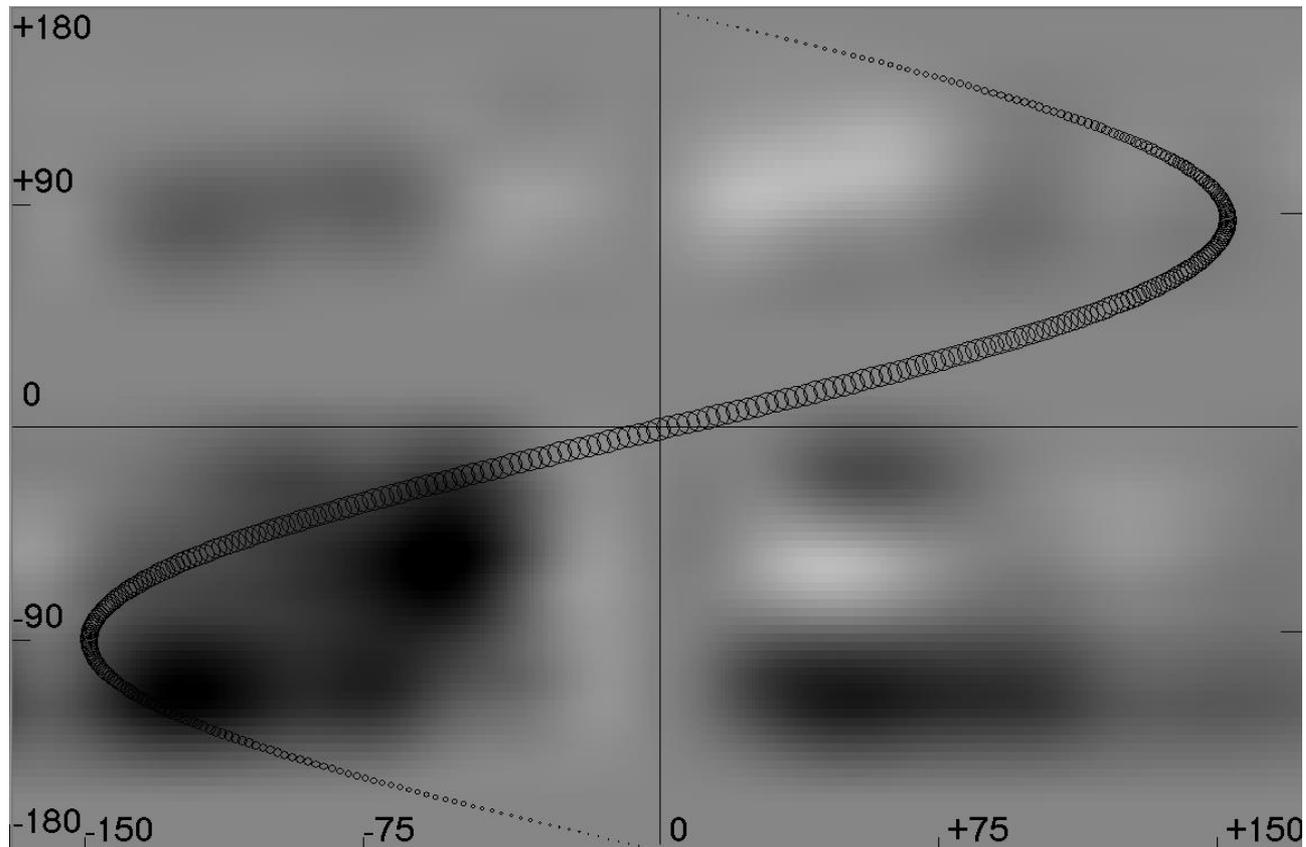
$P=2.219$ day

Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо



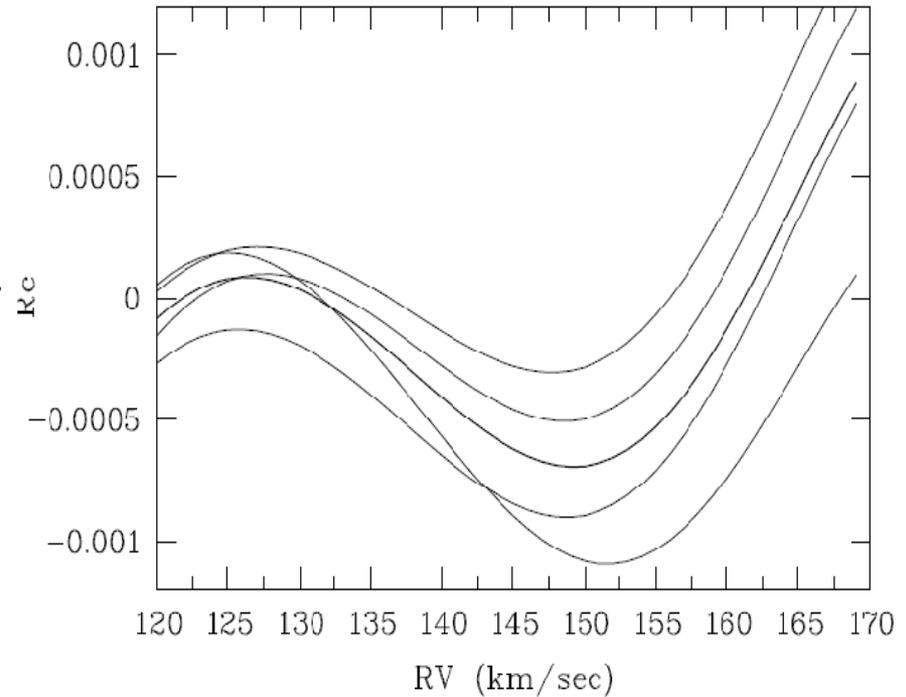
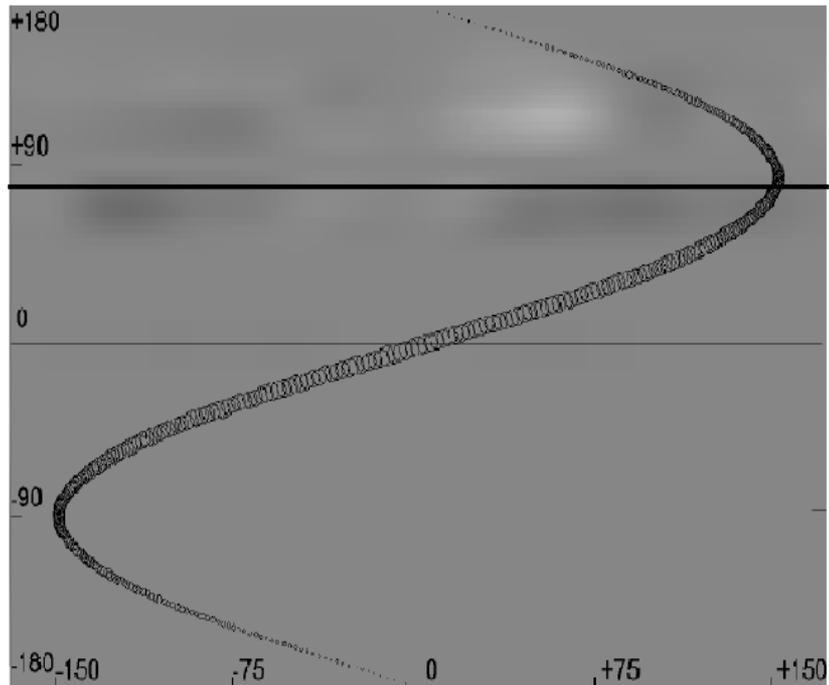
Результаты расчета модельных остаточных динамических спектров для
HD189733

Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо



Результирующие ОДС звезды HD189733, представленные градациями серого цвета в зависимости от лучевой скорости, отсчитываемой от центра средней абсорбции

Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо



Слева ОДС, полученные в безлунное время. Рисунок справа - фрагменты нескольких индивидуальных ОДС, последовательно отслеживающих орбитальное движение экзопланеты в области доплеровских смещений 150 км/сек

Глава 1. Спектральный метод изучения альбедо

- Представлена спектроскопическая методика анализа альбедо горячих Юпитеров
- Методика протестирована на реальных наблюдениях системы HD189733
- Использование разработанного метода позволило достигнуть характерного контраста детектирования отраженного света на уровне $(4 - 5) \cdot 10^{-4}$
- Исследование динамических спектров с этим характерным значением в качестве предела детектирования не выявило явных следов присутствия света родительской звезды, отраженного от планеты.

Глава 2. Спектральные наблюдения транзита WASP-32b

Звезда WASP-32

TYC2-1155-1

Спектральный класс: G

$V=11.3^m$

$R=1.11R_{\text{sun}}$

$T_{\text{eff}}=6100\text{K}$

$[\text{Fe}/\text{H}]=-0.13$

1 планета в системе

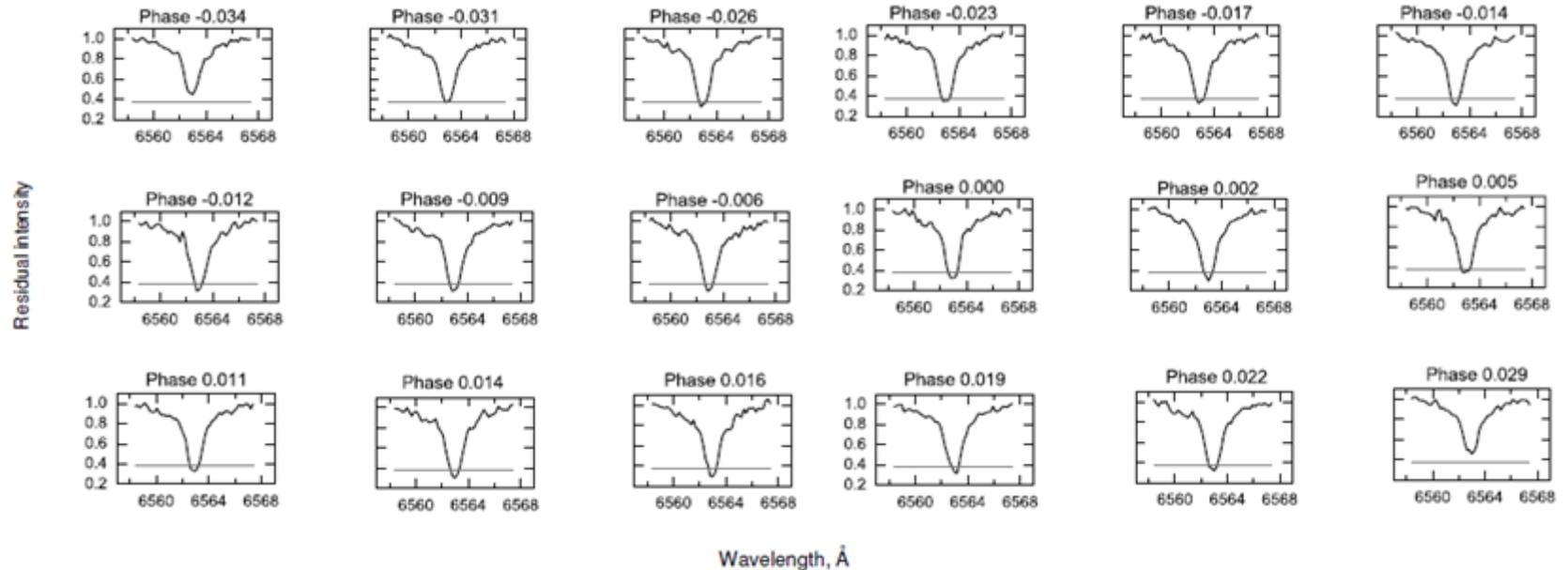
Планета WASP-32b

$M=3.6 M_j$

$R=1.18 R_j$

$P=2.72 \text{ day}$

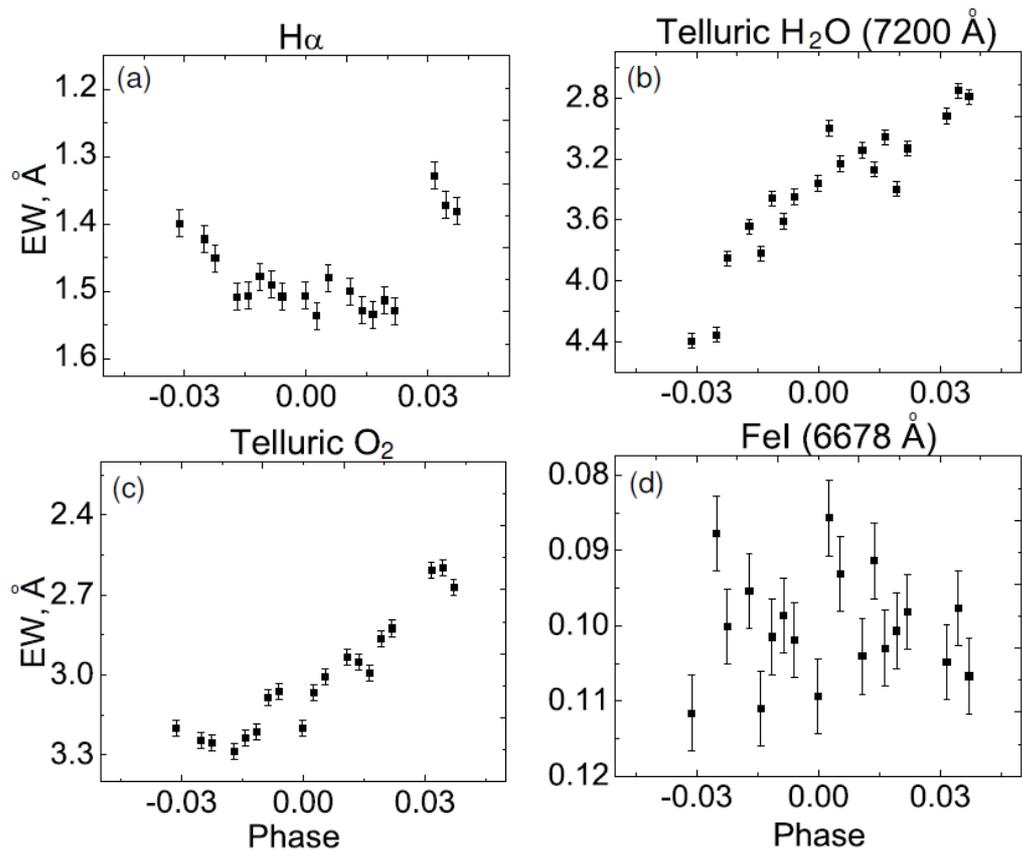
Глава 2. Спектральные наблюдения транзита WASP-32b



Остаточные профили линии Na в разные моменты орбитальных фаз планеты в момент транзита и в непосредственной близости от него.

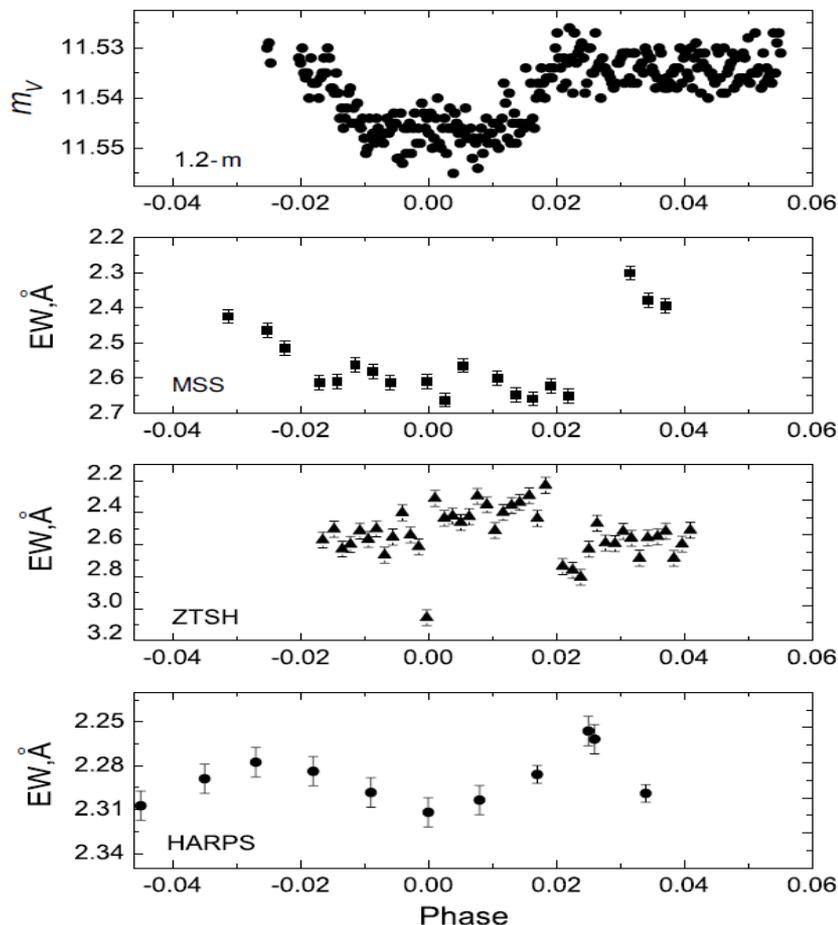
Горизонтальной линией обозначен средний уровень остаточной интенсивности ядра линии Na по совокупности всех наблюдений на БТА

Глава 2. Спектральные наблюдения транзита WASP-32b



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)

Глава 2. Спектральные наблюдения транзита WASP-32b



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

Глава 2. Спектральные наблюдения транзита WASP-32b

- Проанализированы спектральные данные WASP-32b, полученные на телескопах БТА и ЗТШ
- Обработаны архивные данные со спектрографа HARPS (ESO)
- Обнаружение водородной оболочки вокруг горячего юпитера WASP-32b
- Попытки детектирования других элементов (железа, кислорода и воды) с использованием транзитного события дали нулевой результат

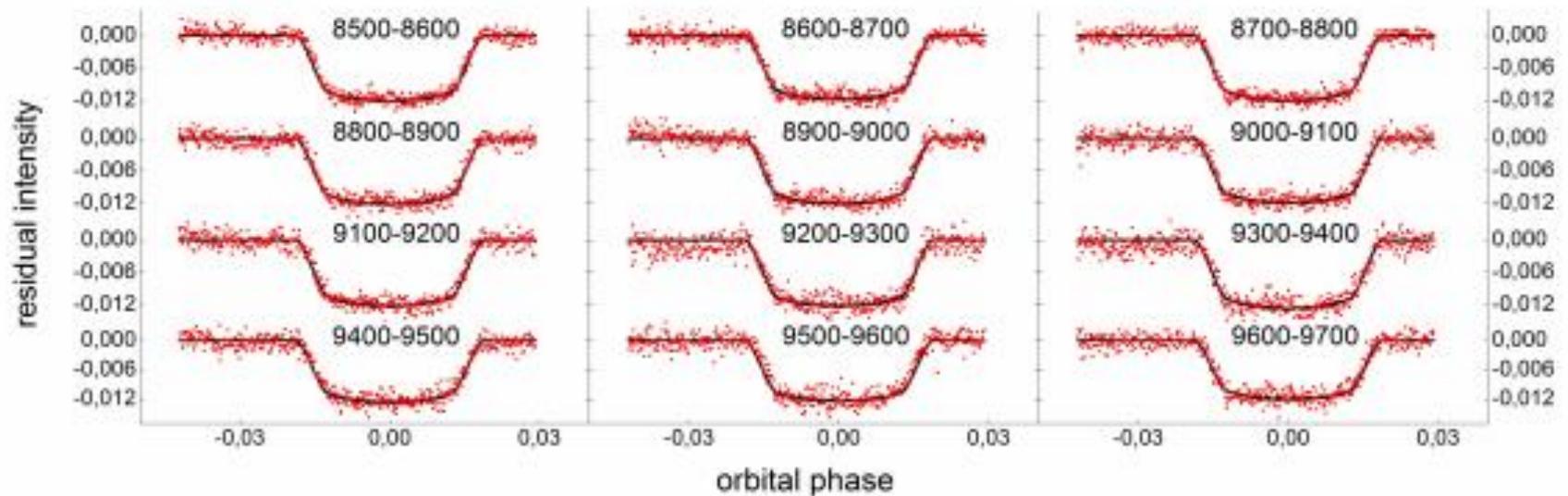
Глава 3. Трансмиссионный спектр WASP-32b

Построение трансмиссионных спектров представляет собой расчет функциональной зависимости радиуса планеты от длины волны и формы транзита.

Модель:

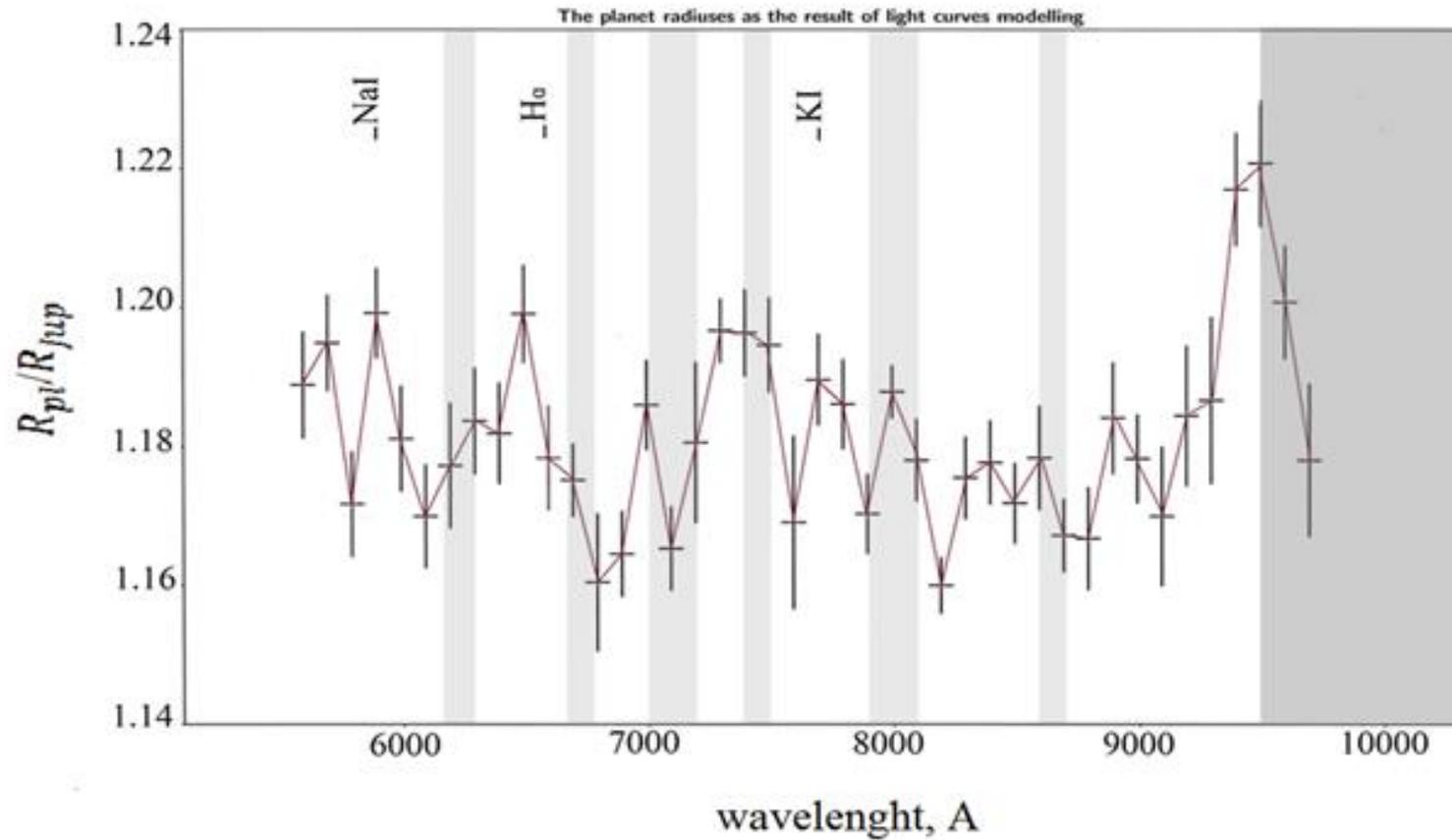
- анализируем только транзитное событие в предположении что непрозрачное тело экзопланеты с заданной температурой совершает плоскокопараллельный транзит через светящийся диск звезды-хозяйки
- Единственный орбитального параметра - прицельный параметр. Его величина характеризует минимальное расстояние между центрами планеты и звезды-хозяйки в момент транзита. Значение параметра выражено в долях радиуса звезды.
- Вычисляем форму транзита для отдельной спектральной полосы (100\AA) как функцию относительного радиуса планеты, выраженного в долях радиуса звезды хозяйки, равновесной температуры (T_{eq}) экзопланеты, физических характеристик звезды-хозяйки и прицельного параметра.

Глава 3. Трансмиссионный спектр WASP-32b



Часть профилей транзита (точки) WASP-32b во всем рабочем диапазоне длин волн. (Построены для 42 спектральных полосах шириной 100Å)

Глава 3. Трансмиссионный спектр WASP-32b



Трансмиссионный спектр WASP-32b

Глава 3. Трансмиссионный спектр WASP-32b

- Построен трансмиссионный спектр для WASP-32b
- Эффективный радиус экзопланеты может быть оценен с точностью 0.004-0.006 RJup
- Следы наличия в оболочке химических элементов Na и K, и возможно H₂.
- Также предполагается наличие некоторых молекулярных полос TiO / V₂O

Заключение

Были выполнены все цели и задачи исследования:

- Разработана и протестирована методика спектрального изучения альbedo. Использование разработанного метода позволило достигнуть характерного контраста детектирования отраженного света на уровне $(4 - 5) \cdot 10^{-4}$.
- Проведены спектральных наблюдений транзита экзопланеты WASP-32b и обнаружено наличие раздутой водородной оболочки вокруг планеты.
- Построен трансмиссионный спектр WASP-32b. Найдены следы наличия в оболочке химических элементов Na и K, возможно HI, а также предполагается наличие некоторых молекулярных полос TiO / V₂O.

Апробация работы

1. Международная астрономическая конференция «Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars», 25-31 августа 2014 года, Нижний Архыз, САО РАН.
2. XIII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 13-15 апреля 2016 года, Москва, ИКИ РАН.
3. Международная астрономическая конференция «Физика звезд: от коллапса до коллапса», 3-7 октября 2016 года, Нижний Архыз, САО РАН.
4. Традиционный конкурс-конференция научных, научно-технических и научно-популярных работ САО РАН, 8 февраля 2016 года, Нижний Архыз, САО РАН.
5. VII Пулковская молодежная астрономическая конференция, 28-31 мая, 2018 года, Санкт-Петербург, Пулково.
6. Всероссийская конференция «Звезды, планеты и их магнитные поля», 17-21 сентября 2018 года, Санкт-Петербург, СПбГУ.
7. Международная конференция «Физика магнитных звезд», 1-5 октября 2018 года, Нижний Архыз, САО РАН.
8. Международная конференция «Физика звезд и планет», 16-20 сентября 2019 года, Азербайджан, НАНА.

Список публикаций автора

1. Grauzhanina A., Valyavin G., Gadelshin D. et al. A Method for Spectral Studies of Albedos of Hot Jupiter Planets // *Astron. Soc. Pacific.* – 2015. – Vol. 494. –P.289-292.
2. Valyavin, G.G., Grauzhanina, A.O., Galazutdinov G. et al. Search for signatures of reflected light from the exoplanet HD189733b by the method of residual dynamical spectra // *Astrophysical Bulletin.* – 2015. –Vol. 70. – P.466-473.
3. Grauzhanina, A.O., Valyavin, G.G., Gadelshin D.R. et al. Spectroscopic observations of the exoplanet WASP-32b transit // *Astrophysical Bulletin.* – 2017. –Vol. 72. –P. 67-72
4. Grauzhanina, A.O., Gadelshin, D.R., Baklanova, D.N. et al. Spectroscopic Transit of Exoplanet WASP-32 b // *Astron. Soc. Pacific.* – 2017. –Vol. 510. –P. 376-378.
5. Valeev, A.F., Grauzhanina, A.O., Valyavin, G.G. et al. The Transmission Spectrum of the Planet WASP-32b // *Astron. Soc. Pacific.* – 2019. –Vol. 518. –P. 225-227.

Личный вклад автора

- Автор участвовал в подготовке и наблюдениях на телескопах САО РАН, а также в обработке полученного и архивного спектрального материала с других телескопов.
- Внес определяющий вклад в создание программы для расчета динамических спектров, моделирование и применение метода для HD189733b.
- Равный с соавторами вклад в интерпретацию результатов спектральных наблюдений транзита WASP-32b.
- Равное участие с соавторами в получении и анализе трансмиссионного спектра WASP-32b.
- Равный вклад с соавторами в написание текстов статей.

Спасибо за внимание!