

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 524.6:520.82;52-325.4;524.6-337

Гадельшин Дамир Раелович

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИЗБРАННЫХ
ЭКЗОПЛАНЕТ И КАНДИДАТОВ В ЭКЗОПЛАНЕТЫ**

Специальность 01.03.02
«Астрофизика и звёздная астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории исследований звёздного магнетизма, **Валявин Геннадий Геннадьевич**.

Официальные оппоненты:

- кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета **Шиманский Владислав Владимирович**.
- доктор физико-математических наук, заведующий Отделом физики Солнца и Солнечной системы КРАО РАН **Киселёв Николай Николаевич**.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится 19 октября 2018 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук по адресу: 369167, Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский район, посёлок Нижний Архыз, лабораторный корпус САО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан «__ ____» 2018 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.203.01, кандидат физико-математических наук, Шолухова О. Н.

Общая вводная часть

На сегодняшний день обнаружено и подтверждено существование около четырёх тысяч экзопланет, обращающихся вокруг звёзд разных типов [1,2]. Однако несколько тысяч зарегистрированных объектов всё ещё остаются в статусе планетных кандидатов. Поиск экзопланет проводится фотометрическими или спектроскопическими методами в рамках наземных и космических проектов [3,4]. Благодаря интенсивному изучению известных экзопланет и открытиям новых планетных систем, многое уже ясно об их физических свойствах [5], но мы ещё далеки до полного понимания всех особенностей их формирования и эволюции. Желание узнать больше, понять причины различий наблюдательных проявлений, найти закономерности, и, может быть, приблизиться к ответу на вопрос, есть ли жизнь во Вселенной, является мощным стимулом к проведению массовых исследований планетных систем средствами наземной астрономии.

Актуальность темы

Изучение планетных систем представляет собой фундаментальную научную задачу с важной мировоззренческой функцией. Поскольку до относительно недавнего времени единственным примером планетных систем являлась Солнечная система, детальное понимание их эволюции не представлялось возможным.

По примеру Земли считается, что на некоторых планетах может существовать и развиваться жизнь.

Отдельного внимания заслуживают транзитные экзопланеты. Фотометрические наблюдения их родительских звёзд позволяют измерять глубины транзитов в разных фильтрах. Зависимость транзитного радиуса планеты от длины волны называется трансмиссионным спектром [6]. При восстановлении таких спектров можно получить наиболее полную информацию о физических условиях, царящих в атмосферах экзопланет, а также в некоторых случаях

выявить следы тех или иных химических веществ, входящих в состав атмосферы [7].

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является комплексное исследование экзопланет методами фотометрии и спектроскопии. Были поставлены следующие задачи:

- 1) Независимое фотометрическое подтверждение транзитов недавно открытых экзопланетных кандидатов с использованием телескопов метрового класса.
- 2) Построение трансмиссионных спектров (детальное определение трансмиссионного спектра дано во второй главе настоящей диссертации) избранных транзитных экзопланет по собственным фотометрическим наблюдениям на 1-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН) и по наблюдениям других авторов с целью детектирования у этих планет атмосфер, а также исследования их свойств.
- 3) Уточнение физических характеристик исследуемых экзопланет с помощью спектроскопических наблюдений на БТА.
- 4) Подтверждение экзопланетной природы кандидатов, отобранных по данным фотометрии, и поиск новых на основе наблюдений со спектрографами высокого спектрального разрешения НЭС БТА и БОЕС 1.8-м телескопа обсерватории Бохюнсан (Южная Корея).

Научная новизна работы

Одни результаты, полученные нами, имеют ценность для Специальной астрофизической обсерватории РАН, т.к. на её инструментах были получены впервые, другие являются новыми на территории России, третьи могут представлять ценность для мировой науки.

Новизна данной работы определяется следующими аспектами:

- 1) Нами было продемонстрировано, что с помощью 1-метрового телескопа САО РАН можно проводить наблюдения транзитов экзопланет с точностью фотометрии 0.1% от потока (и даже лучше) для звёзд вплоть до 13 звёздной величины в широкополосной системе Джонсона-Козинса.
- 2) Впервые обнаружены свидетельства существования гигантской пылевой или газопылевой оболочки у планеты с радиусом несколько больше радиуса Земли.
- 3) Впервые по анализу широкополосных трансмиссионных спектров горячих юпитеров, полученных при наблюдениях транзитов, а не вторичных затмений, была сделана оценка температуры ночной стороны планеты.
- 4) Впервые в России проверка лучевых скоростей звёзд с планетными кандидатами, открытыми сторонними фотометрическими проектами, позволила подтвердить планетную природу затмевающих объектов.

Научная и практическая значимость

- 1) Благодаря высокой точности фотометрии на телескопах метрового класса, открываются широкие перспективы для регистрации наземными российскими наблюдательными средствами нептунов и более крупных планет у солнцеподобных звёзд, а также суперземель у красных карликов.
- 2) Высокая точность фотометрии также делает возможным проведение высокоточных TTV-исследований уже известных экзопланет, что позволяет измерять массы планет в многокомпонентных системах и находить в них другие тела.
- 3) Обнаружение гигантской оболочки вокруг планеты типа «суперземля» ставит ряд вопросов о происхождении и эволюции планетных систем и является стимулом к расширению их исследований, в том числе с помощью наземных телескопов.
- 4) Подтверждение нами планетной природы кандидатов, открытых телескопом «Кеплер», свидетельствует о большом потенциале использования российских спектрометров для уточнения статуса объектов как из существующих («Cotrot»),

«Кеплер» и др.), так и будущих массовых поисковых обзоров («TESS», «Plato» и др.).

Результаты данной работы могут быть использованы в научных учреждениях России и других стран, в которых ведутся исследования экзопланет, в том числе: САО РАН, ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ГАО РАН, ИКИ РАН, КрАО РАН, СПбГУ и КФУ.

Положения, выносимые на защиту

1) Для горячих юпитеров WASP-33b, WASP-43b и WASP-104b построены широкополосные трансмиссионные спектры – зависимости эффективных радиусов планет от длины волны. С точностью около 5% от значения радиуса трансмиссионный спектр планеты WASP-33b является «плоским» в диапазоне от 0.35 до 1.2 мкм. Получены свидетельства того, что широкополосный спектр WASP-43b от голубого до инфракрасного диапазонов, вплоть до длины волны 4.5 мкм, также плоский. Независимо определена ночная температура этой планеты, $T = 930$ К. Для WASP-104b дана уточнённая оценка её радиуса в видимом диапазоне.

2) Результаты наземных фотометрических исследований транзитной экзопланеты HD 219134 b. Транзит был неоднократно зарегистрирован, что независимо подтверждает факт существования этой планеты. Глубина транзита в полосе U в среднем почти в 4 раза больше, чем в инфракрасной полосе 4.5 мкм по данным других авторов. Различие свидетельствует о существовании оболочки вокруг планеты, которая непрозрачна (или частично прозрачна) в ближней ультрафиолетовой области.

3) Доказательства планетной природы 4 транзитных кандидатов в экзопланеты, обращающихся у звёзд KOI-974, KOI-2687, KOI-2706. Кандидаты были выбраны из каталога космической миссии «Кеплер» и проверены методом измерения лучевых скоростей из спектров, полученных с помощью инструмента НЭС БТА. Все кандидаты оказываются планетами. Измерены их радиусы и температуры.

KOI-974b и KOI-2706b являются нептонами, а KOI-2687b и KOI-2687c – землеразмерными планетами.

4) Предположение о существовании новых кандидатов в массивные планеты в системах KOI-974 и хи Дракона на основании анализа лучевых скоростей.

Апробация результатов работы

Результаты работы обсуждались на семинарах Специальной астрофизической обсерватории РАН и докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1) Международная астрономическая конференция «Физика звёзд: от коллапса до коллапса», 3-7 октября 2016 года, Нижний Архыз, САО РАН.

2) Конкурс-конференция научных, научно-технических и научно-популярных работ САО РАН, 8 февраля 2017 года, Нижний Архыз.

3) Летняя школа по экзопланетам, 27 августа – 1 сентября 2017 года, Ондреёв, Чехия.

4) Всероссийская астрономическая конференция, 17-22 сентября 2017 года, Ялта, республика Крым.

5) VII Пулковская молодежная астрономическая конференция, 28-31 мая 2018 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН.

6) Международная конференция «Звёзды, планеты и их магнитные поля», 17-21 сентября 2018 года, Санкт-Петербург, СПбГУ.

7) Международная конференция «Физика магнитных звёзд», 1-5 октября 2018 года, Нижний Архыз, САО РАН.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях и 1 статье в нерцензируемом издании:

- 1) Valyavin, G. G., Gadelshin, D. R., Valeev, A. F., Burlakova, T. E. et al. «Exoplanet studies. Photometric analysis of the transmission spectra of selected exoplanets» // 2018, Astrophysical Bulletin, vol. 73, iss. 2, pp. 225-234
- 2) Lee, B.-C, Gadelshin, D. R., Han, I., Kang, D.-I. et al. «Magnetic field and radial velocities of the star Chi Draconis A» // 2018, MNRAS Letters, vol. 473, iss. 1, pp. 41-45
- 3) Gadelshin, D. R., Valyavin, G. G., Yushkin, M. V., Semenko, E. A. et al. «Exoplanet studies. Spectral confirmation of photometric exoplanet candidates discovered by the «Kepler» mission» // 2017, Astrophysical Bulletin, vol. 72, iss. 3, pp. 330-336
- 4) Valeev, A. F., Antonyuk, K. A., Pit, N. V., .., Gadelshin, D. R et al. «Detection of regular low-amplitude photometric variability of the magnetic dwarf WD0009+501...» // 2015, Astrophysical Bulletin, vol. 70, iss. 3, pp. 318-327
- 5) Valyavin, G. G., Valeev, A. F., Gadelshin, D. R., Moskvitin, A. S. et al. «First detection of exoplanet transits with the SAO RAS 1-m telescope» // 2015, Astrophysical Bulletin, vol. 70, iss. 3, pp. 315-317
- 6) Valeev, A. F., Antonyuk, K. A., Pit, N. V., .., Gadelshin, D. R. et al. «Detection of Low-Amplitude Photometric Variability of Magnetic White Dwarfs» // 2017, ASPC, vol. 510, p. 504

Личный вклад автора

- 1) Участие автора в подготовке и наблюдениях на телескопах САО РАН наравне с соавторами.
- 2) Равный с научным руководителем вклад автора в обсуждение и создание компьютерной модели транзитных кривых по известным параметрам родительских звёзд и их планет.
- 3) Непосредственное участие автора в получении и анализе трансмиссионных спектров горячих юпитеров.
- 4) Определяющий вклад автора в измерение лучевых скоростей родительских звёзд кандидатов «Кеплера» и главного компонента двойной звезды хи Дракона.

- 5) Равный с научным руководителем вклад автора в интерпретацию результатов наблюдений транзитов экзопланет.
- 6) Определяющий вклад автора в интерпретацию подтверждающих спектроскопических наблюдений на НЭС БТА.
- 7) Равный с научным руководителем вклад автора в написание текстов статей.

Структура диссертации и краткое содержание

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Содержит 101 страницу печатного текста, 16 рисунков и 12 таблиц. Список литературы насчитывает 145 наименований.

Во **Введении** представлен необходимый расширенный обзор современного состояния экзопланетной астрономии как молодого направления – даётся принятое международным сообществом определение понятия «экзопланета», приводится история исследований экзопланет, рассматриваются перспективы изучения транзитных планет. Также обсуждаются типы и распространённость экзопланет.

Во второй части введения более предметно обосновывается актуальность темы диссертационной работы, описаны поставленные цели и задачи исследования, приведены научная новизна работы, научная и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту. Кроме этого, поясняется личный вклад автора, приводится список статей с результатами диссертационной работы, а также список конференций, на которых они докладывались.

Первая глава состоит из вступления и четырёх подразделов, посвящённых первым фотометрическим наблюдениям транзитов экзопланет на 1-метровом телескопе САО РАН, демонстрирующих возможности этого инструмента. Во вступлении помимо общей части содержится причина выбора наблюдательных целей – систем с горячими юпитерами WASP-43b WASP-04b. Общие характеристики этих систем и краткая история их изучения приводятся в

подразделе 1.1. В подразделе 1.2 даётся информация о 1-м телескопе САО РАН, датах и условиях проведённых наблюдений. Также представлена методика редукции полученных фотометрических данных. Подраздел 1.3 содержит результаты обработки наблюдательных данных в виде таблицы, двух графиков и качественной оценки характерной точности фотометрии. Подраздел 1.4 является заключением первой главы. В нём обсуждается результат и перспективы для будущих возможностей в изучении экзопланет средствами нашей обсерватории.

Вторая глава содержит вступление и пять подразделов. В ней исследуются широкополосные трансмиссионные спектры горячих юпитеров WASP-33b, WASP-43b и WASP-104b, которые были получены в наших наблюдениях и наблюдениях других авторов. В подразделе 2.1 описан метод трансмиссионной спектроскопии экзопланет и рассматриваются его возможности. В подразделе 2.2 представлена сводка по наблюдениям и обработке транзитов исследуемых горячих юпитеров. В подразделе 2.3 описывается компьютерная модель, с помощью которой мы анализируем фотометрические транзиты. Подраздел 2.4 содержит итоги реконструкции трансмиссионных спектров индивидуально для каждой экзопланеты и сделанные при их анализе выводы. В подразделе 2.5 приведено общее обсуждение полученных результатов.

Третья глава посвящена обнаружению оболочки у планеты HD 219134 b, которое было сделано при наблюдениях на телескопе «Цейсс-1000» САО РАН с использованием U-фильтра. Глава состоит из вступления и пяти подразделов. В подразделе 3.1 обсуждаются физические условия на относительно небольших планетах, обращающихся по экстремально близким к родительским звёздам орбитам (орбитальные периоды короче 10 суток соответствуют большим полуосям в сотые доли астрономической единицы), и наблюдательные проявления в случае, если такие планеты имеют атмосферы и испаряющиеся оболочки. В подразделе 3.2 приводится история открытия и изучения планет системы HD 219134 по литературным данным. Подраздел 3.3 содержит информацию об инструментах, с помощью которых нами были проведены наблюдения, об условиях и датах этих наблюдений. В пункте 3.4 даются

результаты обработки наблюдательных данных и их интерпретация. В подразделе 3.5 приведено обсуждение результатов.

Четвёртая глава представляет второй блок исследований данной диссертационной работы, в котором фокус смещается с фотометрии на измерение лучевых скоростей звёзд. Глава включает вступительную часть и пять подразделов. Она посвящена подтверждению планетной природы четырёх отобранных кандидатов в экзопланеты, открытых по фотометрическим данным космического телескопа «Кеплер». Эти кандидаты обращаются на орбитах вокруг трёх звёзд: KOI-974, KOI-2687 и KOI-2706. В подразделе 4.1 даётся общая информация о применяемом методе подтверждения и об эшелле-спектрографе, с помощью которого такая задача могла быть решена. В подразделе 4.2 приводятся критерии выбора объектов из каталога кеплеровских кандидатов. В подразделе 4.3 приведён журнал наблюдений объектов и дано описание редукции полученных данных. В подразделе 4.4 рассматриваются результаты анализа каждой системы индивидуально. В подразделе 4.5 обсуждаются результаты и приводятся общие выводы исследования.

Пятая глава посвящена изучению лучевых скоростей главного компонента двойной звезды χ Дракона. Глава состоит из вступления и трёх подразделов. Во вступительной части упоминается об истории изучения звезды и предыдущих измерениях, а также сообщается об инструменте, использовавшемся в новых наблюдениях. Сведения о них приводятся в подразделе 5.1. Дана информация о способе обработки данных. В подразделе 5.2 приведены результаты исследования χ Дракона. Показано, что периодическое зеемановское расщепление линий звезды А говорит о существовании у неё сильного магнитного поля, которое нами было измерено. Вариации лучевых скоростей позволили также измерить период вращения звезды вокруг собственной оси. Кроме того, остаточные лучевые скорости после учёта всех факторов могут указывать на возможное присутствие в системе третьего тела – массивной планеты. Это обсуждается в подразделе 5.3.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы данной диссертационной работы.

Раздел **Литература** содержит перечень публикаций, цитируемых и используемых в диссертации.

Список литературы

- [1] <http://exoplanet.eu>
- [2] <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- [3] Pollacco, D. L., Skillen, I., Collier Cameron, A., Christian, D. J. et al. The WASP Project and the SuperWASP Cameras. // 2006, PASP, 118, 1407P
- [4] Koch, D. G., Borucki, W. J., Basri, G., Batalha, N. M. et al. Kepler Mission Design, Realized Photometric Performance, and Early Science. // 2010, ApJ, 713L, 79K
- [5] Morton, T. D., Bryson, S. T., Coughlin, J. L., Rowe, J. F. et al. False Positive Probabilities for all Kepler Objects of Interest: 1284 Newly Validated Planets and 428 Likely False Positives. // 2016, ApJ, 822, 86M
- [6] Seager, S., Sasselov, D. D. Theoretical Transmission Spectra during Extrasolar Giant Planet Transits. // 2000, ApJ, 537, 916S
- [7] Charbonneau, D., Brown, T. M., Noyes, R. W., Gilliland, R. L. et al. Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere. // 2002, ApJ, 568, 377C

Бесплатно

Гадельшин Дамир Раелович

Комплексное исследование свойств избранных экзопланет и кандидатов в
экзопланеты

Зак. № 203с Уч. изд. л. – 1.0 Тираж 100

САО РАН