

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Валявин Геннадий Геннадьевич

Нижний Архыз 2018

Оглавление

Введение	3
Глава 1 Первые фотометрические наблюдения экзопланет на телескопе «Цейсс-1000» Специальной астрофизической обсерватории РАН	22
1.1 Планетные системы WASP-43 и WASP-104	23
1.2 Наблюдения и редукция данных	24
1.3 Результат обработки данных наблюдений	25
1.4 Выводы из наблюдений транзитов планет на 1-м телескопе САО РАН.....	27
Глава 2 Исследование широкополосных трансмиссионных спектров горячих юпитеров WASP-33b, WASP-43b и WASP-104b	29
2.1 Трансмиссионная спектроскопия экзопланет	29
2.2 Наблюдения и инструменты	32
2.3 Модель.....	33
2.4 Анализ индивидуальных систем.....	35
2.4.1 WASP-33b	36
2.4.2 WASP-43b и WASP-104b.....	40
2.5 Основные выводы.....	43
Глава 3 Регистрация транзитов планеты HD 219134 b в U-фильтре	44
3.1 Физические условия на экстремально горячих планетах и наблюдательные проявления	44
3.2 Планетная система HD 219134.....	45
3.3 Наблюдения на телескопах САО и КрАО РАН	46
3.4 Результаты.....	48
3.5 Обсуждение.....	53

Глава 4 Подтверждение кандидатов в экзопланеты, открытых миссией «Кеплер»	56
4.1 Методика подтверждения кандидатов в экзопланеты.....	57
4.2 Выбор объектов	59
4.3 Наблюдения и анализ данных	60
4.4 Результаты.....	64
4.4.1 KOI-974 (KIC 9414417).....	65
4.4.2 KOI-2687 (KIC 7202957).....	67
4.4.3 KOI-2706 (KIC 9697131).....	68
4.5 Обсуждение результатов	68
Глава 5 Магнитное поле и лучевые скорости двойной звезды хи Дракона....	72
5.1 Наблюдения, редукция данных и измерения	74
5.2 Результаты.....	76
5.2.1 Магнитное поле.....	77
5.2.2 Лучевые скорости.....	80
5.3 Обсуждение результатов	84
Заключение	87
Литература	90

Введение

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.

Экзопланетное направление в современной астрономии: краткий обзор

В этой части «Введения» приводятся наиболее важные моменты, связанные с базовыми знаниями о планетных системах. Исследование экзопланет является молодым направлением астрономической науки – прошло всего лишь около 30 лет со времени первых открытий, но оно очень быстро развивается и уже имеет свою богатую историю, методологию и собственную систему терминов.

Определение понятий «планета» и «экзопланета»

До открытия экзопланет, т.е. планет, находящихся за пределами Солнечной системы, строгого определения термина «планета» фактически не существовало. Для планет Солнечной системы оно было сформулировано только в 2006 году на 26-ой Ассамблее Международного астрономического союза [19]. Согласно принятой резолюции, «планета» – это небесное тело: обращающееся по орбите

вокруг Солнца, т.е. не являющееся спутником другого тела; обладающее достаточной гравитацией, чтобы иметь шарообразную форму; «очистившее» свою орбиту от других тел. Данная формулировка не вполне пригодна для термина «экзопланета». Строгого официального определения для него до сих пор нет и в данной диссертации используется рабочее, рекомендованное МАС в 2001 году [20].

Под «экзопланетой» следует понимать объект:

- 1) обращающийся вокруг звезды или её остатка;
- 2) имеющий истинную массу ниже такого порогового значения массы, при котором возможны термоядерные реакции с участием дейтерия (около 13 масс Юпитера при солнечном химическом составе);
- 3) минимальная масса и размеры которого совпадают с требованиями, предъявляемыми для планет Солнечной системы.

Если объект удовлетворяет всем этим критериям, то он считается «экзопланетой» вне зависимости от способа его формирования.

В данной работе понятия «планета» и «экзопланета» являются тождественными.

Из истории изучения планетных систем

С тех пор, как в XIX веке с изобретения спектрального анализа возникла современная астрофизика [8], к вопросу об уникальности Солнечной системы и Земли с существующей на ней биосферой ученые возвращались неоднократно. Обнаружение планет около других звёзд – один из основополагающих ключей к ответу, есть ли где-то ещё во Вселенной жизнь и другие цивилизации. Солнце является обычной звездой в Галактике и за её пределами, поэтому логично предположить существование своих планет у других звёзд.

Несмотря на многочисленные попытки, предпринятые разными исследователями, найти другие планетные системы не удавалось вплоть до конца XX века [9]. Лишь в конце 80-х годов прошлого столетия, с созданием инструментов нового поколения, отличавшихся более высокими

чувствительностью и стабильностью [10], удалось обнаружить признаки вероятного наличия планет около нескольких звёзд. В 1988 году в своей статье канадские астрономы Б. Кэмпбелл, Г. Уолкер и С. Янг сообщили о возможности существования массивной планеты у главной компоненты двойной звезды γ Цефея [11]. Только спустя почти 15 лет, в 2003 году, в ходе мониторинга лучевых скоростей γ Цефея А на инструменте обсерватории Макдональда (США) были получены веские доказательства, подтвердившие это открытие [12].

Первое надёжное и независимо подтверждённое открытие экзопланеты в 1995 году принадлежит астрономам Женевской обсерватории Мишелю Майору и Дидье Келоцу [13]. Используя волоконный спектрограф «ELODIE», с помощью которого можно было измерять лучевые скорости с рекордной на тот момент точностью 13 м/с [10], астрономы зарегистрировали доплеровские вариации лучевой скорости 51 Пегаса, нормальной звезды солнечного типа, обусловленные обращением вокруг нее на расстоянии 0.5 а.е. планеты-гиганта. В том же году, практически сразу, американские астрономы Д. Марси и П. Батлер подтвердили данное открытие в наблюдениях со спектрографом Ликской обсерватории Калифорнийского университета [14].

Получившая название 51 Пегаса b экзопланета вызывает колебания лучевой скорости родительской звезды с полуамплитудой 59 м/с и периодом около 4.2 суток, из чего следует, что минимальная масса планеты приблизительно равна 0.5 массы Юпитера. Это открытие стало неожиданностью для мирового астрономического сообщества – теория формирования планет не предсказывала существования таких массивных планет на столь близких к звёздам орбитах. Единственным известным примером планетной системы на тот момент была Солнечная, где, казалось, всё более-менее очевидно и понятно [15]. Сценарий же формирования подобной системы по типу двойных звёзд не предполагал различий масс компонентов много больше, чем на порядок [21].

В последующие годы было обнаружено немало планет с подобными характеристиками. Таким образом, 51 Пегаса b явилась первым представителем нового класса планет, не представленного в Солнечной системе, – класса

«горячих юпитеров». А за более чем 20 лет, прошедших с момента открытия первого горячего юпитера, оказалось, что «зоопарк» экзопланет намного шире – это семейство представлено объектами с самыми разнообразными физико-химическими и орбитальными свойствами, находящимися на разных стадиях эволюционной истории [5]. Фактически, ни одна планетная система не похожа ни на какую другую. Современные гипотезы образования планетных систем предполагают протопланетные диски с разными начальными параметрами, а также миграцию планет, которая может происходить по разным причинам [16,145]: из-за взаимодействия «новорождённых» планет с ещё не рассеявшимся протопланетным диском, из-за гравитационного взаимодействия между соседними планетами в одной системе, из-за механизма Лидова-Козаи, приливных и других эффектов [17,18].

Близость экзопланет к своим родительским звёздам даёт новую возможность, открывающую двери к совершенно новым горизонтам изучения этих небесных тел, – обнаружение транзитных событий в плотных и длительных фотометрических рядах наблюдений таких звёзд. Вероятность того, что планета пересечёт звёздный диск, обратно пропорциональна её орбитальному расстоянию, а многие горячие юпитеры, подобные 51 Пегаса b, обращаются вокруг своих «родителей» на расстояниях около 10 их радиусов. Таким образом, вероятность транзита среднего горячего юпитера составляет почти 10% (для сравнения, вероятность «прохождения» Земли по диску Солнца, при взгляде на систему извне, составляет всего около 0.5%).

Когда в конце 1990-х годов число обнаруженных планет типа «горячий юпитер» достигло десятка, активно начались поиски их транзитов [23]. В случае успеха астрономы получили бы дополнительное подтверждение планетной природы источника периодических доплеровских колебаний лучевой скорости некоторых звёзд, исключив другие причины, их вызывающие, например, какие-то собственные самим звёздам особенности, неизвестные до высокопрецизионных измерений из-за небольшого масштаба проявлений.

Перспективы изучения транзитных экзопланет

Совмещение транзитного метода и метода лучевых скоростей позволяет определить истинную массу планеты. При измерении только лучевых скоростей угол наклона орбиты i к картинной плоскости неизвестен, а значит можно получить лишь минимальное значение массы экзопланеты, вызывающей доплеровские колебания, $m \cdot \sin(i)$. В случае транзитных планет $i \approx 90^\circ$, то есть масса планеты практически равна минимальной массе. Зная массу и радиус планеты, можно определить её среднюю плотность, что, в свою очередь, даёт возможность оценивать её приблизительный химический состав, а в массовых случаях – создавать модели внутреннего устройства экзопланет, исходя из знаний о распространённости тех или иных химических элементов во Вселенной и их поведении при высоких давлениях и температурах [24].

Первой планетой, транзиты которой были обнаружены, стала HD 209458 b. Она, как и 51 Пегаса b, представляет собой горячий юпитер. Эта планета обращается вокруг похожей на Солнце звезды с периодом около 3.5 суток, и имеет минимальную массу 0.7 массы Юпитера. В 1999 году сразу два коллектива астрономов независимо друг от друга объявили об её открытии [25,26]. Тогда же были проведены фотометрические исследования, приведшие обе команды к обнаружению транзитов HD 209458 b практически одновременно – их статьи были представлены в журнале «Astrophysical Journal» с разницей лишь в один день [26,27]. Падение блеска родительской звезды во время транзита составило примерно 1.5% от общего потока. Благодаря этому открытию, впервые в истории науки у внесолнечной планеты были измерены размер и, по длительности транзитов, наклонение её орбиты к лучу зрения, и, таким образом, стали известны истинная масса планеты и её средняя плотность. Радиус HD 209458 b оказался на 30-40% больше радиуса Юпитера, что приводило к значению плотности 0.3-0.4 г/см³.

Планета HD 209458 b также стала первой экзопланетой, у которой в 2001 году впервые удалось во время транзита детектировать атмосферу, и даже линии дублета натрия в ней (на длине волны 589 нм) [7].

Многие последующие успехи в открытии транзитных экзопланет были связаны с масштабными наземными и космическими обзорами, проводившими одновременный мониторинг огромного числа звёзд: проекты «SuperWASP» [3], «HATNet» [28], «SWEEPS» [29], «TrES» [30], CoRoT [31], KELT [144] и многие другие. В настоящее время по количеству и качеству результатов космическая миссия «Кеплер» [4], созданная специально для поиска и исследования внесолнечных планет, занимает в этом ряду первое место [32]: подавляющее большинство транзитных планет, особенно небольших размеров (менее 2 размеров Земли), открыто с помощью этого телескопа [5].

В недалёком будущем возможности поиска и исследования транзитных экзопланет должны быть существенно расширены с помощью новых космических и наземных средств. К ним можно отнести поисковые космические миссии «TESS» [33] и «PLATO 2.0» [34], космический телескоп «JWST» [35,36] и наземный «Европейский экстремально большой телескоп» («E-ELT») [37], которые позволят значительно увеличить объём знаний об атмосферах транзитных планет.

Типы экзопланет

Для того чтобы можно было классифицировать планеты, необходимо знать распределение их по плотностям, химическому составу, орбитальным характеристикам и т. д.

При первых обнаружениях (в период с 1995 по 2005 годы) полуамплитуды измеренных доплеровских смещений звёзд, вызываемых планетами, составляли 50-500 м/с, что было вполне достаточно для их уверенного детектирования на имевшихся в то время спектрографах – точность единичных оценок лучевых скоростей ярких звёзд не превышала порядка 10 м/с [23]. Однако это были, в основном, тела, подобные Юпитеру по массе.

Для измерения массы землеподобных планет, обращающихся в зоне обитаемости звёзд, подобных Солнцу, необходимы точности порядка сантиметров в секунду.

При таких условиях на первый план выходит проблема инструментальной стабильности и калибровки длин волн спектрографов. В большинстве спектрографов для этого используются торий-аргоновые лампы и йодные ячейки. Эти приборы имеют свои фундаментальные ограничения, поэтому повысить точность калибровки с их помощью можно лишь до какого-то предела. Более перспективным решением в этом плане выглядит использование лазерных частотных «гребёнок». Такой прибор, в частности, будет установлен на спектрографе «ESPRESSO» на VLT [38].

Вторым пунктом идёт нестабильность атмосферы, которая более критична для относительно небольших телескопов, а также телескопов, не использующих, например, адаптивной оптики, которая позволяет лучше справляться с последствиями атмосферного искажения волнового фронта.

Третьим источником шумов является собственная активность звёзд. Её учёт может быть осуществлён при математической обработке рядов наблюдательных данных.

В настоящее время основными инструментами для наблюдений с целью определения масс планет являются спектрографы HIRES на телескопе Кек I, HARPS и HARPS-N на телескопах Южной европейской обсерватории. Точности 1-2 м/с, а иногда и лучше, которые они обеспечивают, уже позволяют проводить исследования очень небольших планет (с массами, незначительно превышающими массу Земли), пусть даже очень короткопериодических. Кроме того, в определении масс все более востребованным становится метод тайминга транзитов планет, входящих в многопланетные системы (TTV-метод, подробнее о методе см. первую главу). С его помощью даже на современном этапе определяют массы у планет очень низких масс [45,46].

В настоящее время пока ещё не существует единой официально признанной Международным астрономическим союзом классификации всех планет, включая экзопланеты, по типам. Однако астрономы, исследующие внесолнечные планеты, довольно часто прибегают к их условному делению по группам, и, если удаётся

определить плотность открываемых планет, иногда относят их к тому или иному типу.

Планеты можно классифицировать по размеру, по массе, химическому составу (как это делают для планет Солнечной системы), по степени нагрева родительской звездой, по возрасту, по их существованию в системах звёзд тех или иных классов и кратности, и по более «тонким» признакам, вроде параметров осевого вращения, наличия или отсутствия планетарных спутников, колец и т. д.

По массе планеты обычно делят следующим образом:

- субземли и земли – планеты с массой Земли или меньше;
- суперземли – планеты, масса которых превышает массу Земли, но меньше массы Урана (планеты такого типа в Солнечной системе отсутствуют) [39];
- нептунуны – планеты с массами от массы Урана до примерно 0.2 массы Юпитера (при этом значении массы давление в недрах планеты оказывается достаточным для того, чтобы водород начал переходить в металлическую фазу);
- планеты-гиганты (или юпитеры) – планеты с массами до 13 масс Юпитера.

По размерам планеты могут быть поделены аналогичным образом. Например, вот как это принято в публикациях по данным телескопа «Кеплер» [40]:

- землеразмерные планеты – планеты, имеющие радиус меньше $1.25 R_{\oplus}$;
- суперземли – планеты с радиусом, лежащим в пределах $1.25-2 R_{\oplus}$;
- нептунуны – планеты, радиус которых составляет $2-6 R_{\oplus}$;
- юпитеры – планеты, имеющие радиус, лежащий в пределах $6-15 R_{\oplus}$;

По химическому составу планеты можно поделить на:

- 1) планеты земной группы – планеты, почти на 100% по массе состоящие из силикатов (например, $MgSiO_3$) и железа, и имеющие либо мало летучих веществ, либо практически совсем их не имеющие;
- 2) океаниды – планеты, состоящие в основном из воды (примером могут быть большие спутники планет-гигантов Солнечной системы) [41];

- 3) нептуну – планеты со значительным количеством воды и тяжёлых газов (например, метана, азота, углекислого газа, и др.), имеющие небольшую массовую долю водорода и гелия в виде плотной атмосферы;
- 4) планеты-гиганты – планеты, в основном состоящие из водорода и гелия;
- 5) планеты, по большей части состоящие из экзотических (по меркам планет Солнечной системы) веществ, – углерода и его соединений (например, углеводородов), соединений серы, почти чистого гелия и т. д. – идущие отдельным классом.

Углеродные планеты ожидаемы в системах таких звёзд, которые имеют более высокое, чем у Солнца, соотношение углерода к кислороду [42].

Согласно результатам исследований по данным группы «Кеплера», условная граница между планетами земной группы и планетами, содержащими большое количество летучих веществ, проходит в районе радиусов 1.5-1.6 радиуса Земли [43,44]. Это значит, что транзитная планета, масса которой неизвестна, но размер определён, и он меньше $1.5R_{\oplus}$, с большей вероятностью является планетой земной группы. Отметим, что планеты небольших масс, содержащие много лёгких веществ, встречаются даже на очень тесных орбитах с периодами в несколько суток [46].

Распространённость экзопланет

По современным оценкам распространённость горячих юпитеров у звёзд главной последовательности классов F, G и K составляет около 1.2% [22], при этом с ростом масс планет частота их встречаемости падает.

Согласно статистическим исследованиям, проведённым группой «Кеплера» по данным основной 4-летней миссии телескопа, частота встречаемости планет с радиусами $0.75-2.5 R_{\oplus}$, обращающихся с периодами 50-300 суток на орбитах около звёзд типа F и G, составляет 0.77 на звезду [47]. При этом распространённость планет оказывается довольно сильно зависящей от типа родительских звёзд: на каждый M-карлик в среднем приходится 2.5 планеты в диапазоне радиусов $1-4 R_{\oplus}$ и периодов до 200 суток [48]. На Рисунке 1

представлена частота встречаемости самых разнообразных типов планет у F, G и K звёзд по данным миссии «Кеплер» [105].

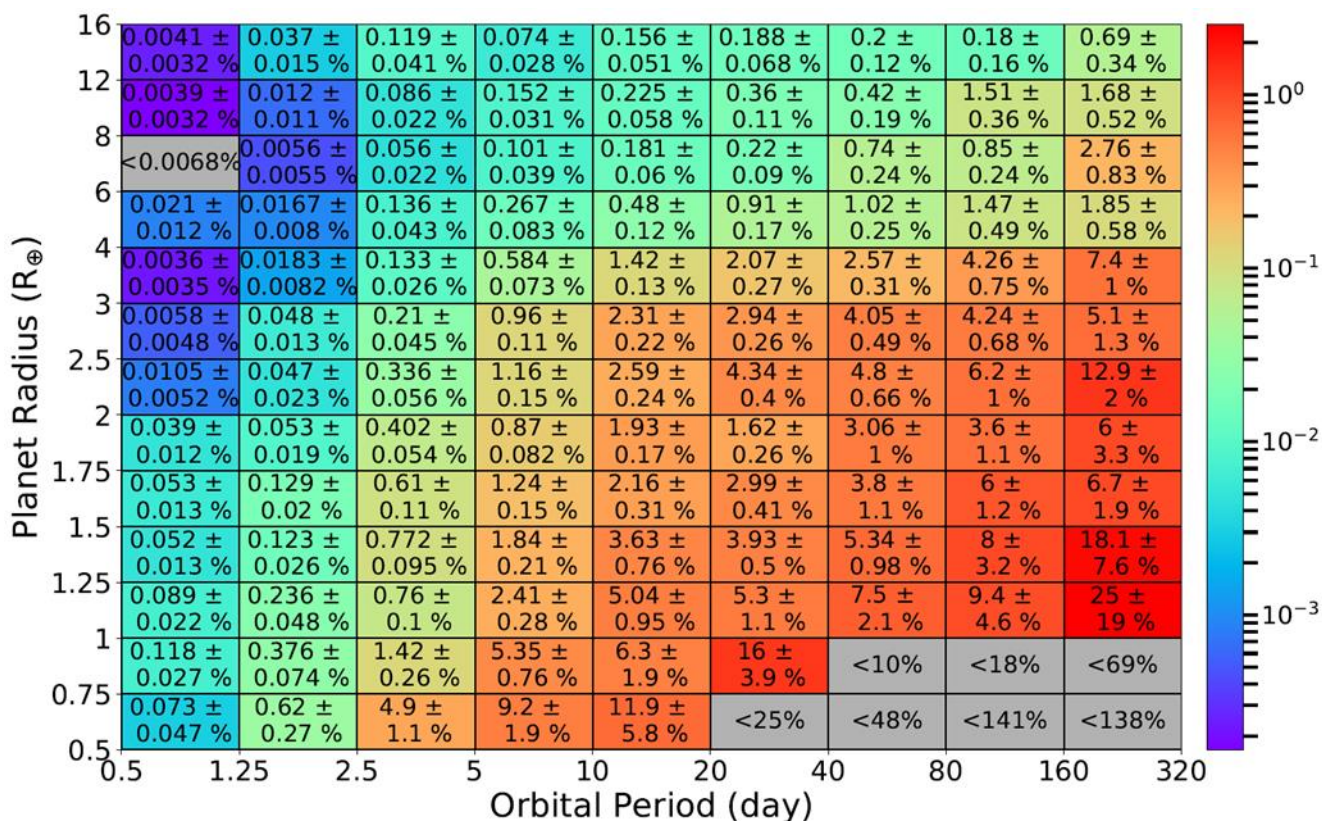


Рисунок 1. Частота встречаемости планет у FGK-звёзд на диаграмме «период-радиус» по данным миссии «Кеплер».

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.

На сегодня открыто около 4000 экзопланет [1,2], но многие их особенности остаются неизвестными.

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 нептонов 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 («Corot», «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 нерецензируемом 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 χ 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

хи 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.

Глава 1 Первые фотометрические наблюдения экзопланет на телескопе «Цейсс-1000» Специальной астрофизической обсерватории РАН

В этом разделе диссертационной работы представлены результаты пробных наблюдений транзитов экзопланет, проведённых на метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН в 2015 году [49].

Поскольку исследования экзопланет на наземных инструментах требуют высокоточного оборудования и идеальных погодных условий, основной целью нашей первой программы по изучению экзопланет было выяснить, являются ли наблюдения транзитных планет принципиально возможными на телескопе САО РАН «Цейсс-1000». Полученная в результате точность фотометрии оказалась довольно высокой, что убедило нас в перспективности изучения экзопланет в имеющихся условиях.

Главной задачей нашей программы являлось детальное изучение уже открытых планет и возможного поиска в тех же системах новых планет при помощи метода тайминга транзитов (Transit Timing Variation method, или TTV) [45]. TTV-метод представляет собой поиск и анализ отклонений моментов времени наступления транзитов от предсказанных вследствие гравитационных возмущений со стороны других тел системы [50].

Для фотометрического мониторинга были выбраны объекты с подходящими координатами, удовлетворявшие двум условиям: звёзды не должны иметь слишком слабый блеск, а их транзитные экзопланеты должны быть достаточно крупными и короткопериодическими. Планеты WASP-43b и WASP-104b, на которые пал выбор, имеют различающиеся глубины затмений, но обе принадлежат к типу «горячий юпитер».

1.1 Планетные системы WASP-43 и WASP-104

Горячий юпитер WASP-43b был открыт транзитным методом в 2011 году у звезды с видимой звездной величиной $V = 12.4^m$ [51] в ходе осуществления международного наземного широкоугольного обзора «SuperWASP» [52]. WASP-43b выделяется среди планет типа «горячий юпитер» тем, что у нее один из наиболее коротких периодов обращения вокруг своей родительской звезды – 0.81 суток [51], а также тем, что родительская звезда принадлежит к карликам спектрального класса K7V. В настоящее время известно мало горячих юпитеров у звезд подобного типа, то есть звезд, имеющих массу меньше 0.75 масс Солнца [53]. В остальном параметры WASP-43b являются обычными для горячих юпитеров: масса в 2.03 раза превосходит массу Юпитера, радиус – 1.04 радиуса Юпитера [54]. Планета удалена от звезды на расстояние 0.015 астрономической единицы. В предположении нулевого альbedo поверхностная температура планеты оценивается в 1440 K [51]. Изучение атмосферы и альbedo WASP-43b представляет большой интерес: так, например, в 2014 году с помощью телескопа «Хаббл» были измерены глубины транзита планеты, и её затмения, в зависимости от длины волны, в результате чего в атмосфере горячего юпитера было установлено присутствие водяного пара [55]. Было измерено его относительное содержание.

WASP-104b – это транзитный горячий юпитер, открытый обзором «SuperWASP» в 2014 году [56]. Обращается вокруг подобной Солнцу звезды спектрального типа G8, которая имеет блеск $V = 11.1^m$. Период планеты составляет 1.76 суток, её масса превышает массу Юпитера в 1.27 раза, а радиус – 1.14 радиуса Юпитера. Планету и родительскую звезду разделяет расстояние 0.029 астрономической единицы, температура на поверхности планеты оценивается в 1516 K.

WASP-104b на сегодняшний день сравнительно мало изучена. Летом 2017 года она наблюдалась в течение 80 суток [137] космическим телескопом «Кеплер» в рамках миссии «K2». Была обнаружена эллипсоидальная модуляция кривой

блеска родительской звезды, вызванная небольшим искажением её формы гравитацией находящегося рядом горячего юпитера. Смена фаз отражённого планетой света и вторичное затмение были обнаружены на пределе чувствительности с очень низким уровнем достоверности, что привело авторов исследования к мысли о чрезвычайно низком значении геометрического альbedo этой экзопланеты – менее 3% в видимом свете. Это означает, что атмосфера WASP-104b лишена отражающих свет высотных облаков.

Набор статистики по транзитам WASP-43b и WASP-104b имеет самостоятельную научную ценность как для уточнения эфемерид транзита, поскольку планеты открыты сравнительно недавно, так и для поиска возмущений этих эфемерид вследствие гравитационного воздействия других планет, если таковые существуют.

1.2 Наблюдения и редукция данных

Наблюдение звёзд WASP-43 и WASP-104 выполнялось в течение одной ночи – с 10 на 11 марта 2015 года. Фотометрия двух последовательных транзитов была проведена с помощью 1-метрового телескопа САО РАН «Цейсс-1000», который оснащён автоматизированным блоком сменных фильтров. В этих наблюдениях был задействован широкополосный фильтр V системы Джонсона-Козинса. В качестве светоприемника использовалась ПЗС-матрица формата $2k \times 2k$. Поле зрения этой камеры составляет около $7' \times 7'$, а размер пикселя – 13.5 мкм [114]. Важным условием выполнения программы являлось наличие идеальных погодных условий, и в ночь наблюдений это условие было выполнено. Для коррекции «плоского поля» отдельно производилась съёмка рассеянного света сумеречного неба.

Редукция фотометрических данных проводилась стандартными методами программного пакета «Python» [57]. Она включала в себя процедуру вычитания «тока смещения» из изображений, деление на плоское поле для исправления неоднородностей чувствительности ПЗС и удаление следов космических частиц.

Для построения временных рядов блеска (или кривых блеска) целевых звёзд проводилась дифференциальная апертурная фотометрия с помощью специальной программы, написанной соавтором исследования. Алгоритм в целом следующий: сначала с помощью астрометрической программы [142] каждый кадр наблюдательной серии привязывается к какой-либо системе небесных координат (обычно это экваториальная система). Рядом с целевой звездой на изображении выбираются наиболее яркие соседние опорные звёзды. Для измерений используется круговая апертура, центр которой совпадает с центром вписанного в фотометрический профиль звезды ряда гауссиан. При этом соблюдается условие, что размеры апертуры одинаковы для всех звёзд. В кольце вокруг этой апертуры вычисляется фон неба и вычитается из потока внутри основной апертуры. Затем программа считывает полный поток внутри апертуры и производит сравнение потоков от целевого объекта и от опорных звёзд. Используя большое количество кадров наблюдения, мы получаем временной ряд таких дифференциальных оценок. Переменность какой-либо из звёзд относительно других, с постоянным блеском, обнаруживается, если за время наблюдений её блеск статистически значимо меняется на фоне неточностей оценок.

1.3 Результат обработки данных наблюдений

Результаты наблюдений транзитов WASP-43b и WASP-104b в ночь с 10 на 11 марта 2015 года проиллюстрированы на Рисунке 2, и суммированы в Таблице 1. В ней представлены глубины транзитов в относительных звёздных величинах и основные характерные моменты транзитов: t_1 (момент начала транзита – внешнее касание диска планеты с лимбом родительской звезды), t_2 (момент полного входа в транзит), t_3 (момент начала выхода из транзита) и t_4 (окончание транзита). Характерная точность регистрации амплитуды транзита в широкополосном фильтре V системы Джонсона составила 0.003^m .

Таблица 1. Результаты наблюдений транзитов WASP-43b и WASP-104b.

Планета	Относительная глубина транзита, Δm_V	t1 JD 2457090 +	t2 - -	t3 - -	t4 - -
WASP-43b	0.032 ± 0.003	2.339 ± 0.001	2.352 ± 0.001	2.373 ± 0.0015	2.392 ± 0.001
WASP-104b	0.017 ± 0.003	≤ 2.444	2.454 ± 0.002	2.494 ± 0.001	2.516 ± 0.001

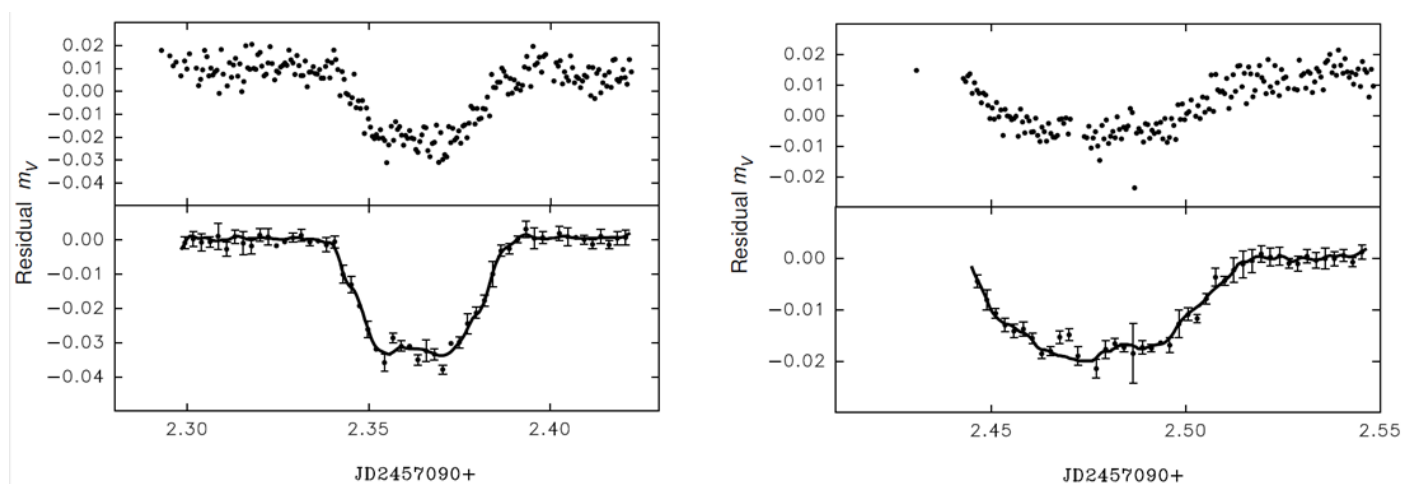


Рисунок 2. Слева: транзит WASP-43b в ночь с 10 на 11 марта 2015 года. Справа: транзит WASP-104b в ту же ночь. Верхняя панель: исходная кривая блеска в звёздных величинах относительно среднего по всему ряду наблюдений. Нижняя панель: данные с вычтенным трендом вне транзита, и усреднённые внутри интервалов с характерной длительностью три минуты (черные кружки). Сплошной линией обозначена сглаженная кривая с использованием Фурье-преобразования до пятой гармоники.

На кривых блеска с вычтенными трендами обоих горячих юпитеров хорошо заметны небольшие флуктуации блеска непосредственно во время транзитных событий. Эти отклонения с большой вероятностью являются следствием влияния нестабильности земной атмосферы. Есть, однако, вероятность того, что подобное небольшое усиление блеска является следствием затмения планетой пятна или группы пятен на диске родительской звезды [54,58]. Тогда пятно (группа пятен) должно быть очень большим. Для звёзд главной последовательности более позднего, чем Солнце, типа, к которым и принадлежат WASP-43 и WASP-104, это

может быть вполне обычным явлением [59,60]. Что именно представляют собой подобные «отпечатки» на транзитах данных горячих юпитеров, можно будет выяснить в будущих исследованиях.

1.4 Выводы из наблюдений транзитов планет на 1-м телескопе CAO РАН

По результатам фотометрических наблюдений транзитов планет у звёзд WASP-43 и WASP-104 на 1-м телескопе CAO РАН получены новые данные по характерным временам основных моментов транзитов горячих юпитеров WASP-43b и WASP-104b. По мере накопления информации в дальнейшем эти данные могут быть использованы как для уточнения эфемерид транзитов, так и для поиска других тел в системах с помощью метода TTV. Результаты, представленные в этой работе, можно также рассматривать как отчёт о старте в CAO РАН проекта по исследованию экзопланет методом наблюдений транзитов.

На основании этих первых наблюдений нами была сформулирована долгосрочная программа фотометрического изучения экзопланет. В рамках программы предполагается:

— регистрация основных моментов транзитов t_1, t_2, t_3, t_4 , как это описано в настоящем исследовании;

— накопление наблюдательного материала для исследования эффектов переменности фотометрического профиля транзита и момента его наступления.

Учитывая тот факт, что характерная единичная точность регистрации амплитуды транзита в широкополосном фильтре V оказалась высокой (0.003^m и выше, вплоть до десятитысячных долей звёздной величины в совокупных измерениях), мы не ограничились исследованиями только планет-гигантов. В список объектов программы входят:

- 1) экзопланеты типа «юпитер» (не только горячих) у звезд ярче $V = 15^m$;
- 2) планеты типа «нептун» у звезд ярче $V = 14^m$;

3) крупные представители планет типа «суперземля» у самых ярких звёзд поздних спектральных классов.

Кроме вышеозначенных целей наблюдение транзитных экзопланет различных типов в САО РАН может включать в себя также наблюдения для изучения свойств их орбит, атмосфер и т. д. Например, для поиска и исследования атмосфер необходимо проведение фотометрии транзитов на разных длинах волн электромагнитного излучения.

Глава 2 Исследование широкополосных трансмиссионных спектров горячих юпитеров WASP-33b, WASP-43b и WASP-104b

В этой главе мы не ограничиваемся только лишь регистрацией транзитов горячих юпитеров, а пытаемся идти дальше в их изучении. Используя результаты наблюдений транзитов экзопланет WASP-33b, WASP-43b, WASP-104b из статей различных авторов, включая и наши результаты [49], представленные в первой главе этой диссертации, мы строим и исследуем широкополосные трансмиссионные спектры от ближнего УФ до инфракрасной области [106]. Трансмиссионный спектр представляет собой зависимость радиусов экзопланет от длины волны в наборе полос доступного для наблюдений спектрального диапазона. Для получения радиусов планет из транзитных кривых мы создали программу, позволяющую моделировать эти кривые с наилучшей подгонкой к данным наблюдений.

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. Однако следует заметить, что по данным других авторов в узких полосах WASP-33b и WASP-43b присутствуют линии поглощения разных химических компонентов. Из модели спектра экзопланеты WASP-43b по инфракрасным данным, взятым из литературы, получена прямая оценка её ночной температуры.

2.1 Трансмиссионная спектроскопия экзопланет

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 [7]. 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 с высоким разрешением позволяет обнаружить тонкие особенности поглощения и рассеяния в атмосфере экзопланеты [107]. Обычно заметны линии различных химических компонентов, входящих в её состав. Они проявляются при прохождении света родительской звезды сквозь атмосферу планеты 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 зафиксировано присутствие таких веществ, как калий, натрий, вода, углекислый и угарный газы, и даже гелий [108,109]. Однако высокопрецизионные наблюдения небольших планет, особенно в звёздной зоне обитаемости, будут возможны лишь при использовании будущих космических телескопов с большими апертурами [117]. На Рисунке 3 показан модельный спектр атмосферы Земли, как если бы транзит нашей планеты наблюдался оттуда-то из глубины Галактики [62].

Многие планеты покрыты туманами и облаками различной химической природы [110], которые могут ослаблять спектральные линии в излучении родительской звезды. В спектрах других планет наблюдаются признаки сильного рэлеевского рассеяния, что свидетельствует о протяжённой и относительно ясной атмосфере [111]. Пример трансмиссионного спектра высокого разрешения для WASP-43b по литературным данным показан на Рисунке 4.

Горячие юпитеры, составляющие основную группу экзопланет, которые исследуются в настоящей работе, – отнюдь не однородная популяция. Среди них выделяются очень горячие (равновесные температуры T_{eq} которых превышают 2000 К), умеренные и относительно прохладные планеты ($T_{eq} \approx 1000$ К). Различаются они по массам и плотностям. Методами трансмиссионной спектроскопии наиболее удобно изучать горячие юпитеры с очень низкой средней

плотностью, поскольку их атмосферы обладают очень большими шкалами высот [112], а спектральные проявления оказываются максимально контрастными [111,113]. 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.

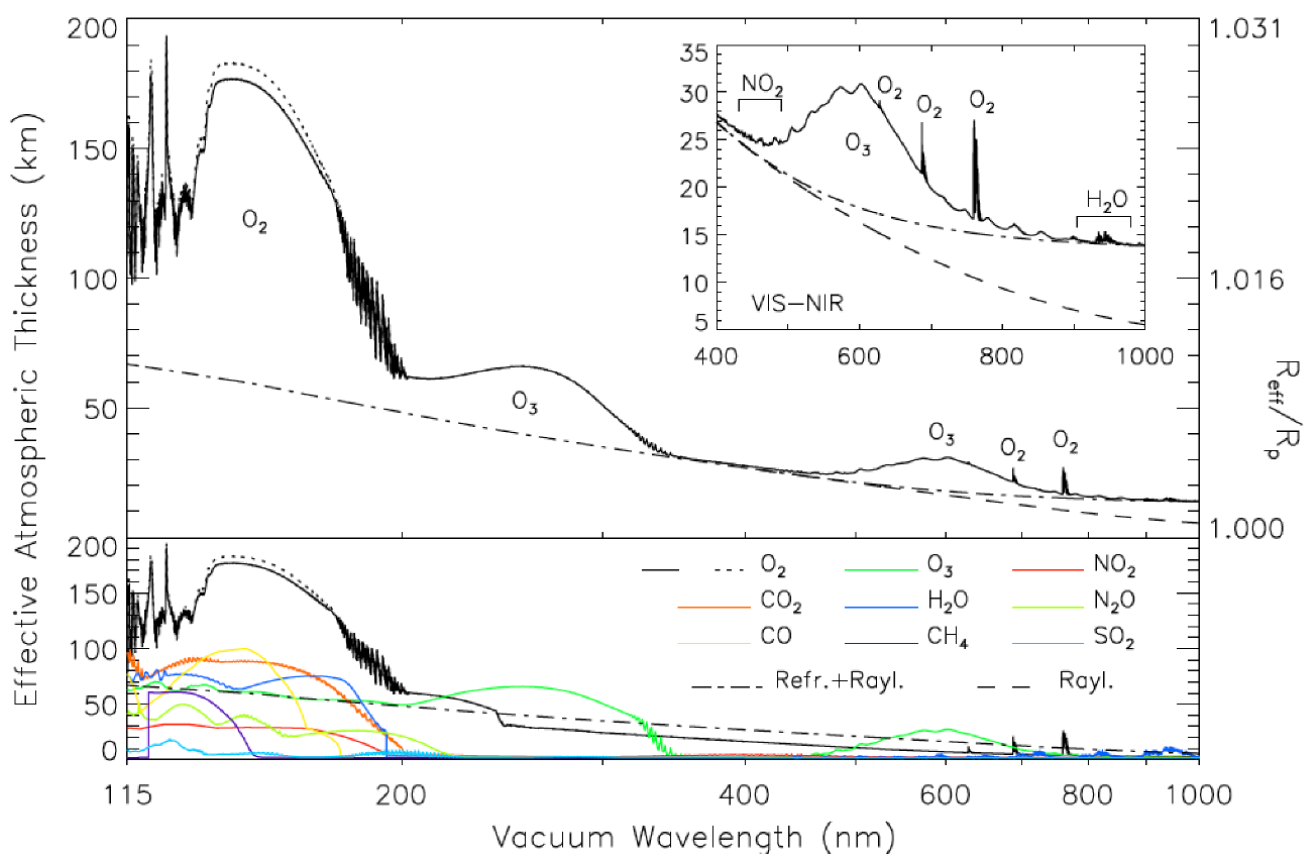


Рисунок 3. Эффективная толщина атмосферы Земли как функция длины волны (из статьи [62]). На верхней панели показан полный спектр от ультрафиолетового диапазона до ближнего инфракрасного. На нижней панели различными цветными линиями показан спектральный вклад различных веществ по отдельности. Штрихпунктирной линией показан вклад рэлеевского рассеяния.

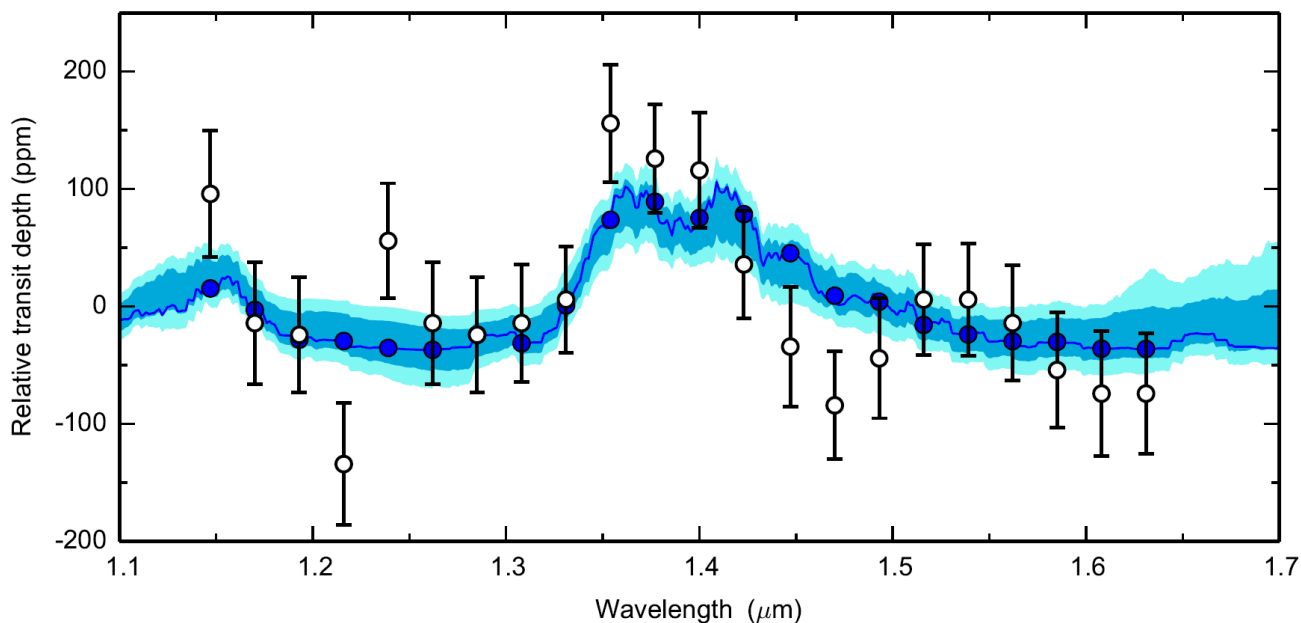


Рисунок 4. Узкополосный трансмиссионный спектр горячего юпитера WASP-43b, полученный с помощью камеры «Хаббла» WFC3 [55]. Белыми кружками обозначены результаты измерений, синими – модельный спектр. Синяя и голубая штриховка вокруг заполненных кружков указывают на область доверия в 1- и 2 σ соответственно. Анализ этого спектра позволил авторам определить концентрацию водяного пара в атмосфере планеты.

2.2 Наблюдения и инструменты

Наблюдения двух горячих юпитеров, проведённые нами в 2015 году на телескопе «Цейсс-1000» в широкополосной фотометрической системе Джонсона–Козинса, подробнее описаны в первой главе настоящей диссертации.

В данной работе мы используем также наблюдательный материал, полученный в 2010-2012 годах на автоматизированных телескопах Пулковской обсерватории: зеркальном астрографе ЗА-320М и менисковом телескопе Д. Д. Максудова 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 года. Телескоп снабжен ПЗС-камерой FLI IMG 1001E (1024 \times 1024 пикселя) и имеет

поле зрения $28' \times 28'$. Менисковый телескоп МТМ-500М установлен в 2007 году на Горной астрономической станции ГАО РАН на горе Шаджатмаз на Северном Кавказе, около Кисловодска. Детально эти наблюдения описаны Соковым и др. в работе [116].

Все наблюдения проводились по классической схеме. Для коррекции «плоского поля» в сумеречное время экспонировался рассеянный свет. Неизменное положение звёзд на кадрах ПЗС во время экспозиций контролировалось ручным гидированием. Обработка данных проводилась по стандартной методике, подробное описание которой можно найти в работах [57,115,116].

В настоящей работе было также использовано большое количество данных других авторов – всего более сотни событий. Сводки по материалам всех этих наблюдений отдельно для каждого объекта программы приведены в последнем подразделе главы.

2.3 Модель

Для определения радиуса экзопланеты как функции длины волны в зависимости от формы транзита нами была создана компьютерная модель на основе часто используемого в настоящее время алгоритма, описанного в работе [118]. Этот алгоритм строит форму транзита в определённой спектральной полосе в зависимости от относительного радиуса экзопланеты. Наша же модель является его упрощённым вариантом, в котором орбитальные характеристики планет, вращающихся вокруг их родительских звёзд, не используются. Орбиты планет предполагаются круговыми. Анализируется только транзитное событие при прямолинейном прохождении непрозрачного диска экзопланеты с определенной температурой на фоне светящегося диска родительской звезды. Единственным существенным для нашего исследования параметром, связанным с орбитой планеты и тестируемой моделью, является прицельный параметр – минимальное

расстояние между центрами планеты и её родительской звезды в момент транзита, выраженное в долях радиуса родительской звезды.

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

Физические характеристики родительской звезды – её эффективная температура T_{eff} , поверхностная гравитация $\log g$ и химический состав. Они используются для вычисления линейного и квадратичного коэффициентов потемнения к краю для данной полосы спектра. Алгоритм и таблицы моделей для расчёта коэффициентов потемнения в полосах для основных фотометрических систем и космических экзопланетных миссий представлены в работе [119].

Пример моделирования транзитной кривой планеты HD 219134 b (см. третью главу диссертации) с использованием нашей модели представлен на Рисунке 5. Как уже было сказано, эта модель учитывает потемнение к краю диска звезды и нецентральность транзита планеты.

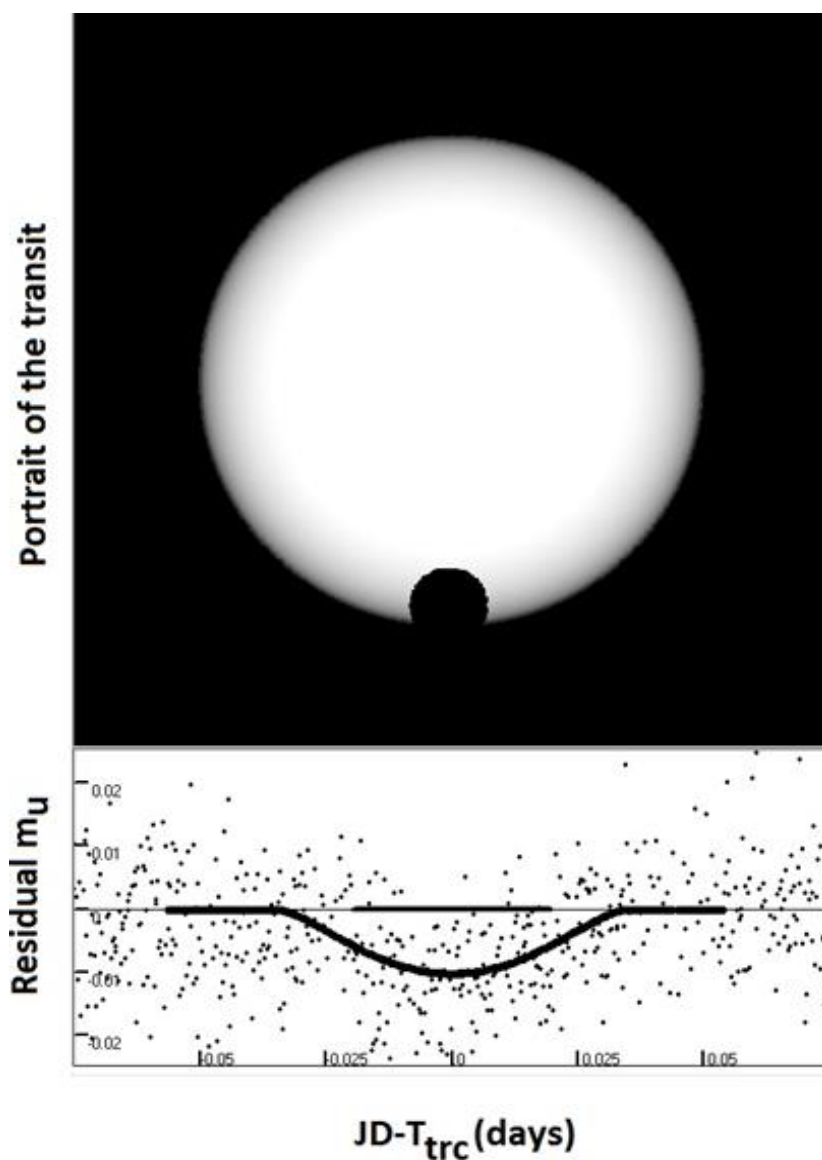


Рисунок 5. Модель транзитной кривой в фильтре U, наложенная на комбинированную кривую блеска HD 219134 b.

2.4 Анализ индивидуальных систем

В этом подразделе экзопланеты рассматриваются по отдельности. Рассматриваются особенности наблюдения и результаты моделирования их трансмиссионных спектров. Приводятся также краткие сведения по результатам более ранних исследований данных объектов.

2.4.1 WASP-33b

WASP-33 (HD15082) является быстровращающейся звездой спектрального класса A5 и относится к переменным типа дельты Щита (δ Sct). В 2010 году транзитным методом около неё был открыт горячий юпитер с орбитальным периодом 1.22 суток [120]. Планету и центр звезды разделяет расстояние всего 3.7 звездных радиуса [121]. Большой относительный размер горячего юпитера, высокая температура его атмосферы и значительный видимый блеск родительской звезды ($V = 8.3^m$) делают эту планету очень привлекательной целью для исследования атмосферы методами трансмиссионной спектроскопии. В инфракрасном диапазоне, где контраст между собственным излучением нагретой планеты и излучением звезды является наибольшим, измерение глубины вторичного затмения позволяет наиболее просто определить температуру планеты.

Первое обнаружение вторичного затмения WASP-33b было зафиксировано на длине волны 0.91 мкм в 2011 году и представлено в работе [122]. На основании этой и целого ряда последующих работ (см., например, [123,124]), в которых проводились измерения глубины вторичного затмения в различных длинах ИК-волн, была измерена температура планеты, которая оказалась очень большой – согласно [125] она составляет 3400 К. Это делает WASP-33b одной из самых горячих известных планет. В то же время эта экзопланета вследствие её 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 неё данных по прицельному расстоянию и эффективной температуре. Цель измерений – определение величин радиуса экзопланеты в зависимости от длины волны с использованием единой методики.

Наблюдения WASP-33b, которые были использованы в нашей модели, проводились на описанных выше автоматизированных телескопах Пулковской обсерватории в период с 2010 по 2012 годы с применением широкополосной

фотометрической системы Джонсона. Транзитные события были зарегистрированы в пяти сетях наблюдений: 4 января 2012 года (фильтр В) на двух телескопах, 21 декабря 2011 года (фильтр R), 10 октября 2011 года (фильтры V, R) на двух телескопах и 30 августа 2011 года (фильтр R).

Сводка результатов измерений глубин транзитов WASP-33b (в процентах падения блеска) и их ошибок даны в Таблице 2. Приведены также результаты других исследователей из работ [126,127,128] и базы данных транзитов экзопланет [129] (в колонке «Ref» эти данные обозначены ETD). В случае регистрации нескольких транзитных событий (число «n» в Таблице 2) представлены усреднённые глубины транзитов для данной полосы.

Таблица 2. Глубины транзитов WASP-33b (в процентах падения блеска) и их ошибки^a по измерениям разных авторов в различных полосах.

Ref ^b	Полоса (фильтр, центральная длина волны в нм)							
	U 365	B 445	V 551	R 658	H α 656	I 806	z' 900	J 1200
TPB n ^c	1.40(04) 3	1.50(06) 1						
Pul n		1.42(04) 2	1.01(12) 1	1.13(06) 3				
ETD n		1.290(035) 2	1.61(02) 23	1.408(012) 41		1.310(016) 9		
KKH n			1.40(03) 9	1.200(017) 11	1.540(047) 1	1.260(016) 7	1.170(029) 1	
SDJ n					1.16(32) 1		1.14(02) 1	0.95(14) 1

^a Указаны значащие цифры после десятичной точки.

^b Ref: Pul – результаты получены на телескопах Пулковской обсерватории; ETD – база данных транзитов экзопланет; TPB – [126]; KKH: [127]; SDJ: [128].

^c n – число зарегистрированных транзитных событий.

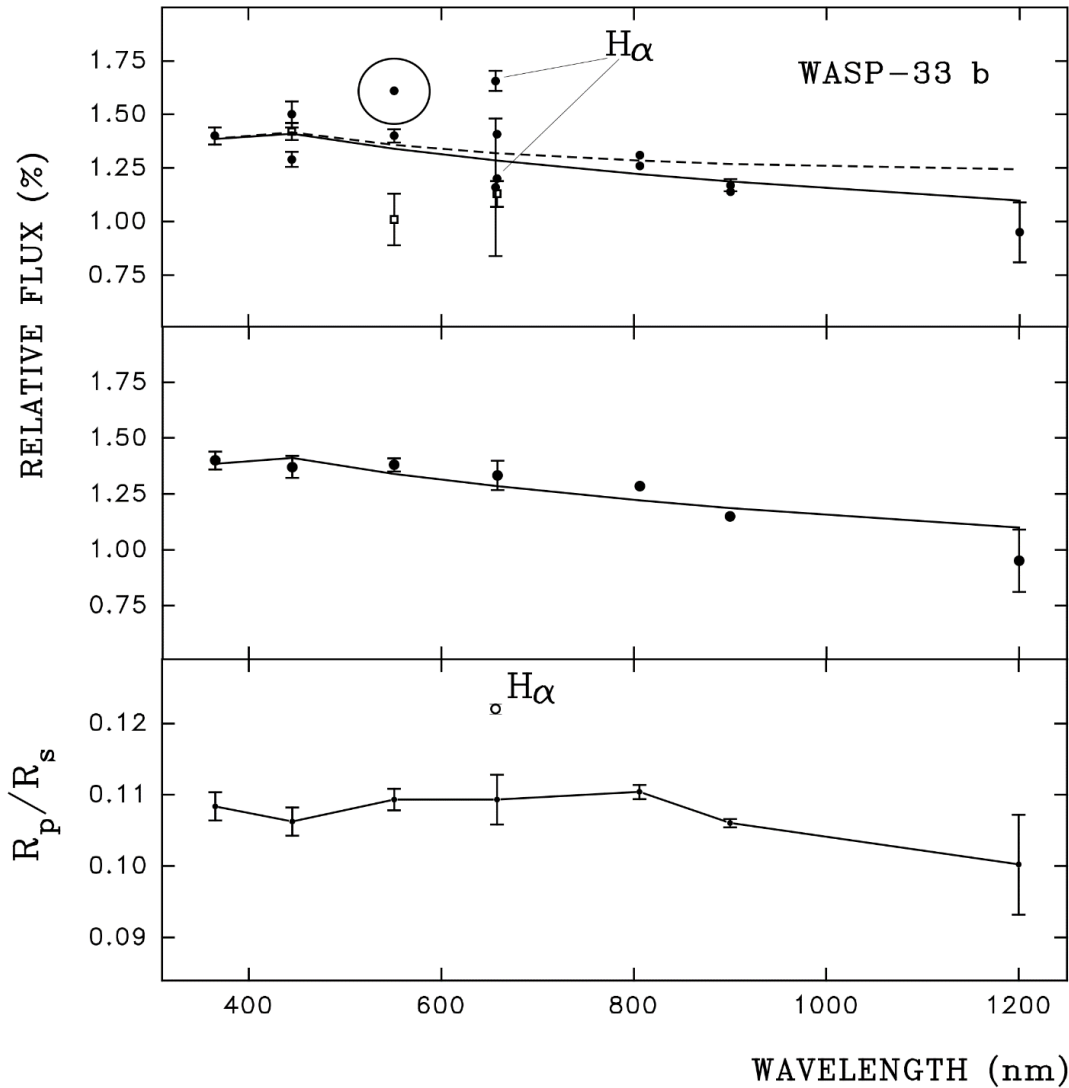


Рисунок 6. Панель (а) – зависимость глубины транзита WASP-33b от длины волны по результатам измерений разных авторов (чёрные кружки), в том числе по результатам измерений в Пулковско (пустые квадратики); сплошная и пунктирная линии – зависимости, рассчитанные с учётом температуры экзопланеты и без него. Панель (б) – то же, что и на верхней панели, но с усреднёнными в каждой полосе глубинами транзитов и исключёнными вылетающими значениями. Панель (с) – трансмиссионный широкополосный спектр WASP-33b, представляющий радиус экзопланеты R_p в долях радиуса ее родительской звезды R_s .

Данные Таблицы 2 изображены на графике (а) Рисунка 6. На рисунке также представлены результаты моделирования транзитов WASP-33b с использованием нашей модельной программы, описанной выше. Физические параметры WASP-

33b и её родительской звезды для моделирования взяты из работы [125]. Результаты моделирования проиллюстрированы для двух случаев: с учётом собственной равновесной температуры экзопланеты ($T_{eq} = 3358 \pm 165$ K [125]), и без её учета. Из сравнения разности хода модельных зависимостей ясно, что учёт температуры самых горячих планет имеет принципиальное значение в исследованиях транзитов.

В Таблице 2 и на Рисунке 6 видно, что несколько измерений транзитов в фильтрах V (на рисунке выделено кружком) и Na значимо отклоняются от предсказанной зависимости. В этой связи в работе [130] говорится, что в видимой области длин волн недоучёт 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 Na, то оно, скорее всего, является физическим, и мы используем эти данные для интерпретации трансмиссионного спектра WASP-33b.

Таким образом, отбраковав часть измерений в полосе V, мы все оставшиеся измерения усреднили 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 приведён на панели (b) Рисунка 6 (сплошная линия означает то же, что и на верхней панели рисунка).

Трансмиссионный спектр WASP-33b, полученный с помощью моделирования усреднённых данных, представлен на панели (c) Рисунка 6.

Анализ измеренных узлов спектра и ошибок позволяет 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 ($\lambda = 365-700$ нм) $R_p / R_s = 0.1083 \pm 0.0007$; в ближней инфракрасной области ($\lambda = 700-1200$ 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 [120,126,127,8131]. Для ближнего инфракрасного диапазона оценка широкополосного трансмиссионного спектра получена впервые.

Кроме широкополосного трансмиссионного спектра WASP-33b на Рисунке 6 представлена и средняя по двум наблюдениям (см. Таблицу 2) оценка радиуса планеты в фильтре H α : $R_p / R_s = 0.1220 \pm 0.0007$. Из её сравнения с широкополосным трансмиссионным спектром следует, что радиус планеты в полосе фильтра H α превышает средний радиус более чем на 10%. Согласно [125] это может быть связано с тем, что линия H α является хромосферной, и может искажать истинную глубину транзита. С другой стороны, в работах [130,132] показано, что при наблюдениях в полосе линии H α искажения транзитов, вызванные хромосферной активностью звёзд солнечного типа, имеют аномально высокую амплитуду, что может быть связано и с наличием протяжённой оболочки вокруг горячего юпитера. Схожий вывод был сделан нашей группой при недавнем обнаружении подобного эффекта в наблюдениях другого горячего юпитера – WASP-32b [131,133]. Отметим, что такие же идеи относительно влияния конвективной активности родительских звёзд на глубины транзитов их экзопланет в полосе линии H α высказывались при исследованиях звёзд солнечного типа (HD 189733 и WASP-32). Родительская звезда WASP-33 принадлежит к классу конвективно-спокойных звёзд класса A, поэтому мы не исключаем, что аномально глубокий транзит в полосе линии H α действительно может быть связан с наличием протяжённой водородной оболочки у WASP-33b. Для точного ответа на этот вопрос необходимы дополнительные наблюдения транзита WASP-33b в полосе H α .

2.4.2 WASP-43b и WASP-104b

Краткий обзор по открытию и свойствам горячих юпитеров WASP-43b и WASP-104b представлен в первой главе этой диссертации и статье [49]. Там же описаны наблюдения этих экзопланет в фильтре V на 1-метровом телескопе САО

РАН. В настоящей главе для построения широкополосных трансмиссионных спектров WASP-43b и WASP-104b мы используем наши данные наряду с данными наблюдений других авторов. Сводка глубин транзитов представлена в Таблице 3 (обозначение в ней такие же, как в Таблице 2).

Таблица 3. Глубины транзитов WASP-43b и WASP-104b (в процентах падения блеска) и их ошибки по измерениям разных авторов в различных полосах.

Ref	Полоса (фильтр, центральная длина волны в нм)							
	U 365	B 445	V 551	R 658	H α 656	I 806	z' 900	J 1200
WASP-43b								
ETD		2.65(56)	2.84(06)	2.80(04)		2.60(09)		
n		1	2	13		2		
Our ^d			2.99(05)					
n			1					
WASP-104b								
ETD			3.06(10)	1.70(05)				
n			1	6				
Our			1.58(10)					
n			10					

^d Our – наши результаты.

Смоделированный на основании оценок глубин транзитов в Таблице 3 трансмиссионный спектр WASP-43b представлен на Рисунке 7. Физические параметры родительской звезды и прицельное расстояние взяты из [134]. Так же, как и в случае с WASP-43b, в широких полосах спектр не обнаруживает каких-либо особенностей (хотя в узких полосах особенности присутствуют [135,136]). 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 затмения) [134]. В этой

же работе приводятся 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 величины радиуса, полученного «на просвет» в момент транзита планеты в видимом диапазоне, и измеренного «в отраженном свете» в инфракрасном диапазоне [134], позволяет с высокой степенью вероятности предположить, что эти радиусы равны между собой на уровне около одного процента от среднего радиуса, и значительно от длины волны не зависят. Это, в свою очередь, позволяет нам использовать опубликованную информацию о глубине транзитов WASP-43b на длинах волн 3.6 мкм и 4.5 мкм [134] в нашей модели для независимого определения ночной температуры экзопланеты с фиксированным средним радиусом. Высочайшей точности фотометрических спутниковых наблюдений [134] оказалось достаточно, чтобы зарегистрировать собственное тепловое излучение, соответствующее температуре T_n , от ночной стороны приливно-синхронизированного горячего юпитера WASP-43b. Проведённое нами моделирование транзитов в инфракрасных полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм даёт 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, представленными в работе [134].

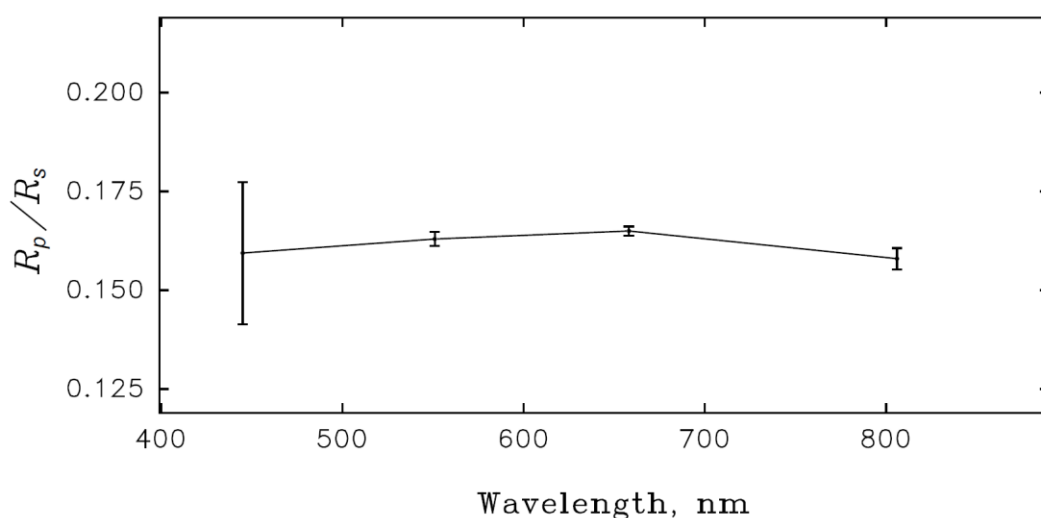


Рисунок 7. Трансмиссионный широкополосный спектр WASP-43b, представляющий радиус экзопланеты R_p в долях радиуса её родительской звезды R_s .

Данных наблюдений транзитов не очень давно открытой [56] планеты WASP-104b пока недостаточно для того, чтобы делать однозначные выводы относительно структур её внешних слоёв. Моделирование по глубинам транзита из Таблицы 3 даёт значение радиуса $R_p / R_s = 0.124 \pm 0.01$ в фильтре V 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 даёт аномально большой радиус планеты в фильтре V, противоречащий нашим наблюдениям в том же фильтре и наблюдениям других авторов в отличающихся фильтрах.

Сравнивая полученные значения радиусов WASP-104b в фильтрах V и R, а также данные наблюдений в ближней инфракрасной области: $R_p / R_s = 0.1214 \pm 0.014$ [56], мы можем заключить, что на уровне менее десяти процентов величины радиуса трансмиссионный спектр экзопланеты является «плоским».

2.5 Основные выводы

Представленные в этой главе 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 ультрафиолетового до инфракрасного излучения. С точностью до погрешностей измеренные широкополосные трансмиссионные спектры всех трёх исследуемых экзопланет являются плоскими. Моделирование литературных данных о транзитах планеты WASP-43b в инфракрасном диапазоне позволило впервые получить оценку её ночной температуры T_n из прямого транзита. Эта оценка выполнена в предположении, что радиус отражающей поверхности экзопланеты совпадает с её эффективным радиусом, полученным в наблюдениях «на просвет».

Глава 3 Регистрация транзитов планеты HD 219134 b в U-фильтре

В этой главе приводятся результаты наблюдений, независимо подтверждающие присутствие на орбите звезды HD 219134 транзитной экзопланеты околоземного размера. Ранее её существование было заподозрено при анализе лучевых скоростей звезды двумя группами астрономов, из Европы и США [61,63]. Подозрение усиливало ещё и то, что с помощью космического телескопа «Спитцер» в инфракрасном диапазоне был открыт транзит HD 219134 b [61]. Мы подтвердили наличие транзитного события, несколько раз зарегистрировав его в расчётное время в ближнем ультрафиолетовом диапазоне при широкополосных фотометрических наблюдениях на 1-метровом телескопе «Цейсс-1000» Специальной астрофизической обсерватории РАН [106]. Измеренная глубина транзита в фильтре U системы Джонсона составила $0.0013^m \pm 0.00027^m$, что почти в 4 раза больше, чем получено при измерениях по данным телескопа «Спитцер». Мы предполагаем, что HD 219134 b может окружать разреженная протяжённая оболочка – кома, состоящая из ионизованного газа и пыли. Чтобы оболочка являлась непрозрачной или частично прозрачной в ультрафиолете, и полностью прозрачной в более длинноволновых диапазонах, размер пылевых частиц должен быть меньше 400 нм.

3.1 Физические условия на экстремально горячих планетах и наблюдательные проявления

Открытие огромного количества небольших транзитных планет на короткопериодических орбитах [138] интересно как для составления наиболее полной картины образования и эволюции планетных систем, так и для изучения разнообразия свойств их атмосфер. Экзопланеты, которые обращаются очень близко к поверхностям своих звёзд, сильно разогреты из-за интенсивного звёздного облучения, а мощные приливные взаимодействия заставляют их

нагреваться ещё больше [139]. Эрозия атмосфер может носить катастрофический характер, и если к настоящему времени некоторые экстремально горячие суперземли ещё сохранили часть своих атмосфер, то последние должны быть сильно уширены по высоте по сравнению с аналогичными атмосферами более холодных планет [140]. При наблюдениях это находит своё отражение в более отчётливых переменных формах транзитов в разных цветах: например, из-за рэлеевского рассеяния, которое сильнее рассеивает свет с более короткими длинами волн в атмосфере, и регистрируемый радиус планеты там больше, чем на длинных волнах. Разреженные внеатмосферные газ и пыль, которые окружают испаряющиеся планеты, заполняют сферу Хилла и постепенно утекают в космос, и также могут быть обнаружены методами трансмиссионной спектроскопии [141]. Именно поэтому как новые детектирования, так и многоцветные мониторинговые наблюдения горячих планет чрезвычайно важны, они дают возможность изучать физические свойства их внешних оболочек в «разрезе».

3.2 Планетная система HD 219134

В июле 2015 года коллектив европейских астрономов сообщил об открытии с помощью инструмента HARPS-N четырёх планет в системе звезды HD 219134 [61]. Эта звезда примечательна своим близким расположением к Земле – до неё всего 6.5 парсек. Она представляет собой карлик спектрального класса K3, имеющий абсолютную болометрическую светимость около 0.26 солнечной. Блеск звезды в фильтре V составляет 5.57^m .

В том же году независимое обнаружение шести планет в системе HD 219134 представила группа американских астрономов [63]. Открытие было сделано с помощью спектрографа HIRES на 10-м телескопе обсерватории Кека. Полученные параметры планеты HD 219134 b по оценкам обоих коллективов оказались очень похожими.

Геометрическая вероятность транзита самой внутренней из планет, HD 219134 b, была оценена европейской группой на довольно высоком уровне в 9%,

так как период обращения планеты по орбите составлял около 3.09 суток, и из третьего закона Кеплера следовало, что звезду и планету разделяет расстояние всего 0.038 астрономической единицы. Это мотивировало исследователей начать поиск транзита в момент времени, рассчитанный из наблюдений лучевых скоростей звезды. Поиск ожидаемого транзита был предпринят с помощью космического телескопа «Спитцер» на длине волны 4.5 мкм. В результате, транзит с глубиной 0.000359 ± 0.000038 от нормированного потока был зарегистрирован, что позволило измерить размер планеты в дополнение к уже известному значению массы, и оценить её среднюю плотность.

Позднее, уже в 2017 году, после накопления новых данных на HARPS-N, европейской группе удалось уточнить параметры системы [64]. С помощью новых наблюдений на «Спитцере» им также удалось обнаружить транзиты и второй планеты системы, HD 219134 c, обращающейся вокруг звезды с периодом 6.76 суток. Она, как и HD 219134 b, по-видимому, является преимущественно железно-силикатной по составу. Наличие как минимум двух транзитных планет у одной звезды говорит о том, что, скорее всего, её планетная система является плоской и невозмущённой. Возможно, что и какие-то из других планет, найденных в этой системе на более широких орбитах, также могут оказаться транзитными.

В настоящей главе мы представляем результаты и интерпретацию наблюдений транзитов HD 219134 b, полученных на 1-м телескопе САО РАН и 1.25-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). Экзопланетные исследования ведутся на этих инструментах на регулярной основе.

3.3 Наблюдения на телескопах САО и КрАО РАН

Наблюдения HD 219134 проводились на ПЗС-фотометре 1-м телескопа САО РАН формата $2k \times 2k$ в течение года, начиная с лета 2015 года. Для единственного наблюдения этой экзопланеты на 1.25-м телескопе в КрАО

использовался похожий штатный ПЗС-фотометр. Все наблюдения проводились в широкополосной фотометрической системе Джонсона–Козинса, и в зависимости от погодных условий время экспозиции варьировалось от нескольких десятков секунд до 2-3 минут. Однако поскольку HD 219134 является довольно яркой звездой, и в хорошую погоду перенакопление сигнала в фильтре V для неё происходило за время меньше 10 секунд, то все последующие наблюдения на «Цейсс-1000» решено было проводить в фильтре U. В наблюдениях на телескопе КрАО использовался фильтр B.

Наблюдения проводились по классической схеме: на рассвете или закате непосредственно в наблюдательную ночь экспонировался рассеянный свет для коррекции «плоского поля», а неизменное положение звёзд на кадрах ПЗС в ходе экспозиции контролировалось ручным гидированием.

Изображение поля HD 219134 представлено на Рисунке 8. Единственная достаточно яркая звезда в поле, которую можно использовать как вторичный стандарт для фотометрической привязки, отстоит от HD 219134 на расстояние $2.88''$. Поскольку эта звезда на несколько звёздных величин слабее, то основной вклад в ошибку фотометрических измерений даёт именно она. Впрочем, звезда достаточно яркая, что позволяет проводить фотометрию с необходимой точностью.

В целом же обработка данных, как и в случае с горячими юпитерами, проведена по стандартной методике [57], и более подробно описана в первой главе настоящей диссертации.

Критически важным условием выполнения программы являлось наличие идеальных погодных условий. Однако при первых наших наблюдениях HD 219134 на телескопе «Цейсс-1000», в ночь с 15 на 16 августа 2015 года, оно выполнено не было, более того, наблюдения начались непосредственно в момент транзита. Тем не менее полученные данные оказались пригодными для анализа, хотя и потребовались дополнительные наблюдения. Во время вторых наблюдений в ночь 18/19 сентября 2015 года погодные условия были близки к идеальным. В обе ночи транзит был зарегистрирован. Погодные условия в другие

наблюдательные ночи также различались. Всего с середины 2015 по конец 2016 года мы провели не менее 5 успешных или частично успешных наблюдений HD 219134 на «Цейсс-1000». Наблюдения в КрАО были проведены в ночь на 19 октября 2015 года.

При планировании программы наблюдений HD 219134 b использовались эфемериды транзита, определённые в работе [61]: период обращения 3.0937 ± 0.0004 суток; время центра транзита 2457126.7001 ± 0.0010 BJD_{TDB}.

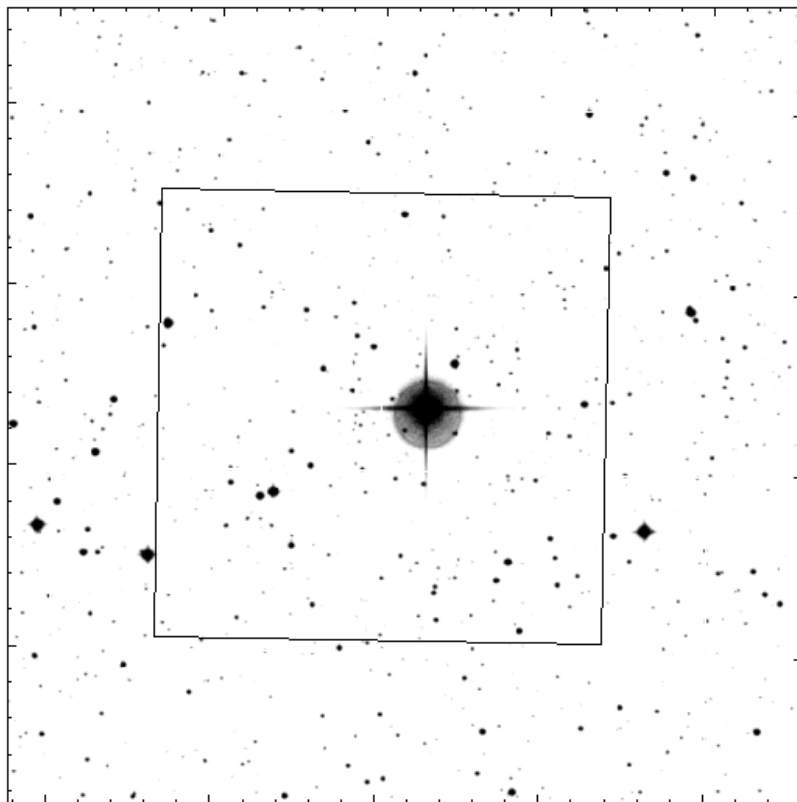


Рисунок 8. Поле зрения телескопа Цейсс-1000 с HD 219134 и опорной звездой (вторая по яркости звезда слева внизу от исследуемой звезды).

3.4 Результаты

На кривых блеска, полученных в фильтре U в 5 разных наблюдательных ночей, есть признаки транзитов планеты HD 219134 b. Результаты второй ночи наблюдений HD 219134, когда транзит проявился лучше всего, представлены на

Рисунке 9 (а). По времени этот транзит точно совпадает с расчётным и является статистически значимым.

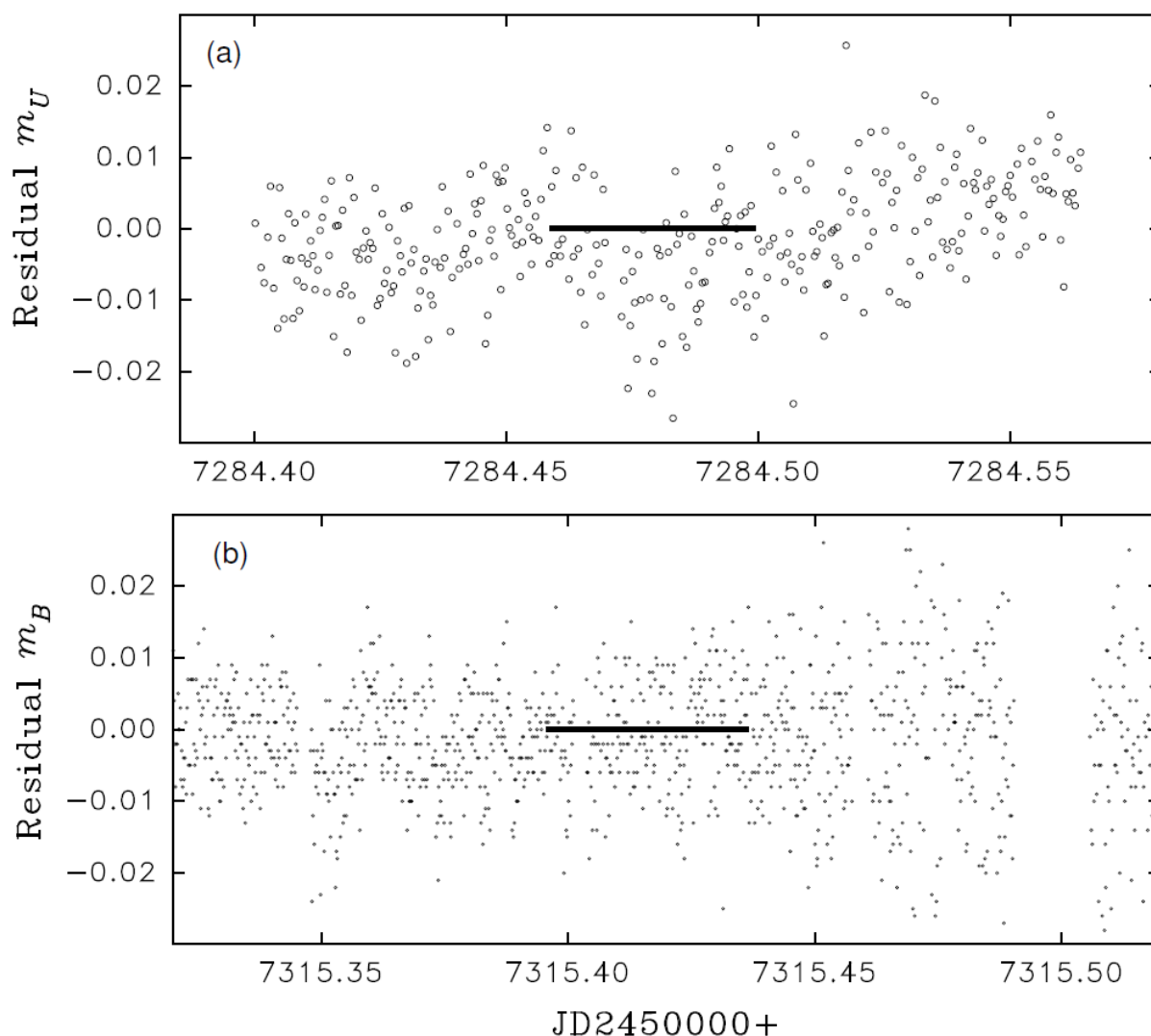


Рисунок 9. Временные ряды блеска HD 219134 в единицах остаточных звёздных величин в фильтре U (а) и в фильтре В (b) системы Джонсона. Ожидаемый, согласно эфемериде из статьи [61], транзит на каждой панели проиллюстрирован горизонтальной линией.

Неожиданно полученная нами глубина транзита в фильтре U оказалась равной 0.0073 ± 0.0008 звёздной величины (или 0.0067 нормированного потока), что почти в 19 раз больше, чем было измерено на 4.5 мкм. При этом, форма транзита похожа на латинскую букву «V», в отличие от транзита на 4.5 мкм, который имеет «плоское» дно, и с большой вероятностью асимметрична –

пологое начало сменяется крутым выходом. Хотя в полосе U и на 4.5 мкм продолжительность транзита примерно одинакова, 57 минут, в ультрафиолете она всё же немного больше. Всё это наводит нас на мысль о присутствии огромного «гало», окружающего HD 219134 b, возможно, имеющего кометоподобный хвост.

Несмотря на почти идеальные погодные условия во время наблюдения транзита в КрАО, на полученной в результате кривой блеска в полосе В, напротив, нет каких-либо признаков транзита в расчётный момент времени на уровне характерной точности 0.001 звёздной величины (Рисунок 9 (b)). По этой причине попытки дальнейших наблюдений в фильтре В были прекращены, но продолжены в фильтре U – для подтверждения полученного результата.

Дополнительные наблюдения транзитов HD 219134 b были проведены 11 и 17 сентября, 18 октября и 7 ноября 2016 года. При анализе данных стала очевидной недостаточно высокая точность используемой нами эфемериды, тем не менее мы всегда обнаруживали признаки искомого события в области ± 2 часа от его расчётного центра. Предпринятый поиск «потерянного» транзита методами статистического анализа показал, что период вероятного транзитного события, если от наблюдения к наблюдению мы видим именно транзит HD 219134 b, а не артефакт, несколько короче представленного в статье об открытии [61] $P = 3.0937 \pm 0.0004$ дня. Наш анализ указывал на значение $P = 3.0932$ и даже меньше, что находится в пределах ошибок оригинальной эфемериды. Однако из-за недостаточной, хоть и высокой, точности наших наземных наблюдений транзитного события, однозначно доказать, что регистрируемые нами события потемнения блеска родительской звезды HD219134 обусловлены именно транзитом экзопланеты, не представлялось возможным.

Ситуация прояснилась после публикации нового исследования HD 219134 b [64], в котором была представлена новая эфемерида с необходимой точностью: $P = 3.092926 \pm 0.00001$ суток; время центра транзита $2457126.69913 \pm 0.00087$ BJD_{TDB}. Как можно видеть, наш поиск эфемериды происходил в нужном направлении. Мы опускаем детали поиска периода, приняв в данном исследовании значение эфемериды из [64] за истинное. Свернув данные с новой

эфемеридой, мы получили набор из пяти наблюдений HD 219134 b в разные годы, которые так или иначе пересекались с транзитным событием. Несмотря на то, что в результате уточнения эфемериды в некоторые даты транзит оказался за пределами проведенных наблюдений, данных (около 2500 полуминутных экспозиций за полтора года) оказалось достаточно, чтобы зафиксировать и исследовать транзит HD 219134 b в фильтре U.

Временные ряды блеска HD219134 в единицах остаточных звёздных величин (кроме нижней панели) в фильтре U приведены на Рисунке 10, последовательно для пяти ночей, сверху вниз: 15 августа, 18 сентября 2015 года, 17 сентября, 18 октября и 7 ноября 2016 года. Нижняя панель иллюстрирует результат усреднения данных в единицах относительного потока. Усреднив все точки вне транзита и внутри него, получаем оценку относительной глубины транзита, равную 0.0013 ± 0.00027 . Таким образом, факт транзита HD 219134 b в ожидаемые моменты времени установлен в наземных наблюдениях.

Моделирование транзита в фильтре U с применением нашего алгоритма (см. вторую главу диссертации) и физическими параметрами планеты и её родительской звезды из работы [64] даёт относительный радиус экзопланеты $R_p / R_s = 0.0465 \pm 0.005$, или $R_p = 3.95 \pm 0.4 R_{\oplus}$. По данным наблюдений в инфракрасном диапазоне [64] $R_p = 1.602 \pm 0.055 R_{\oplus}$.

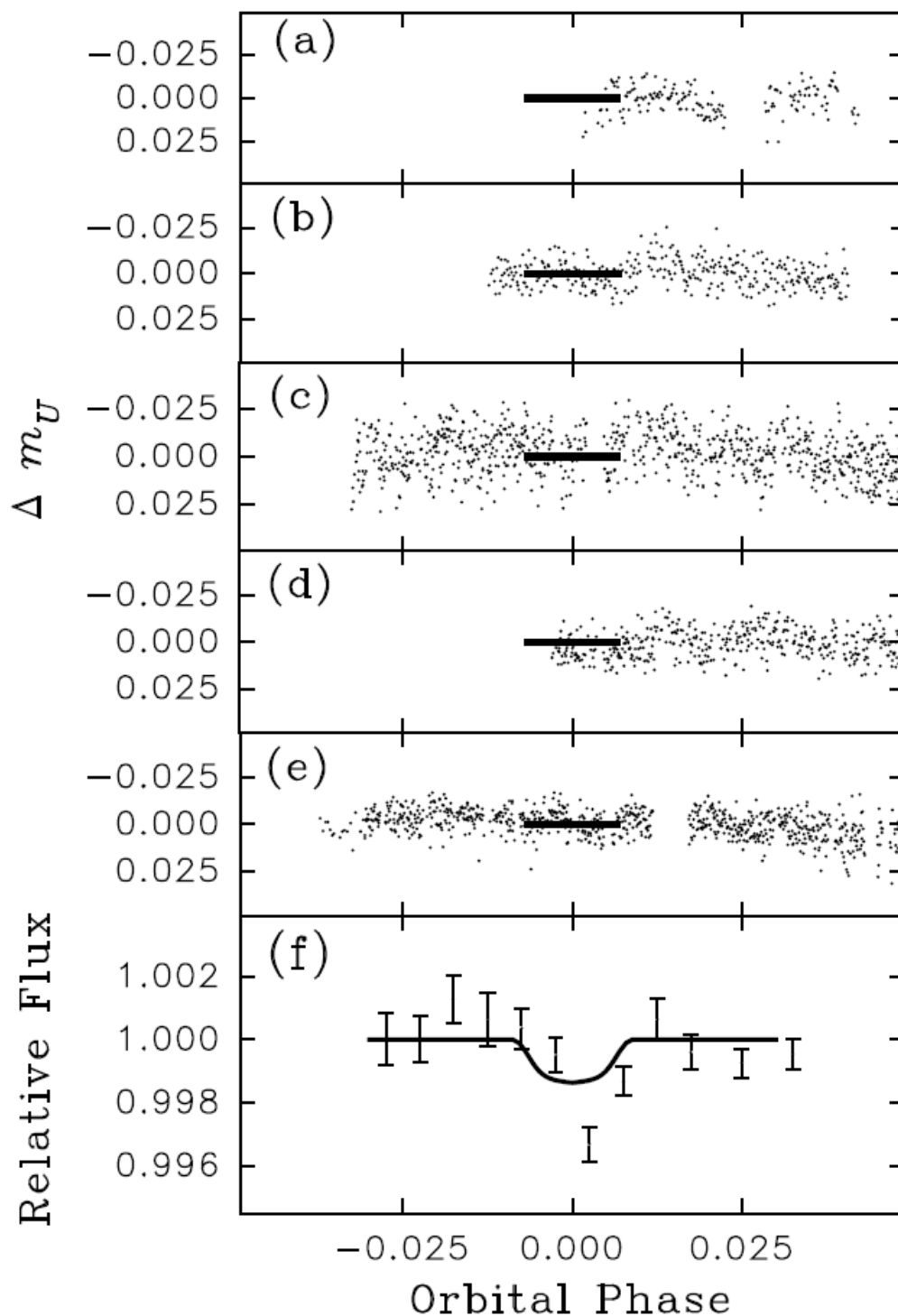


Рисунок 10. Индивидуальные кривые блеска HD 219134 в разные наблюдательные ночи (панели а–е), горизонтальной линией отмечено положение расчётного транзита по обновлённой эфемериде [64]; комбинированный транзит – результат усреднения всех полученных в фильтре U данных (f), сплошной линией показана модельная форма транзита, шкала по вертикальной оси дана в единицах относительного потока.

Сравнение двух результатов показывает, что найденные радиусы различаются в 2.47 ± 0.33 раза, или, при всех вероятностных допущениях, не менее чем в полтора раза. Принимая также во внимание то, что для некоторых из индивидуальных транзитов HD 219134 b (например, наблюдавшегося 18 сентября 2015 года) зарегистрирована значительно большая глубина, мы можем объяснить такую разницу вероятным наличием у планеты протяжённой оболочки, геометрия которой переменна во времени.

Аргументом в пользу этого предположения служит тот факт, что в отличие от относительно симметричной формы транзита в инфракрасном диапазоне по данным «Спитцера» [64], 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 Рисунке 10.

Другой причиной такой асимметричной формы может быть имеющаяся небольшая систематическая ошибка эфемериды, указанной авторами [64], (например, из-за TTV-эффекта в результате гравитационного влияния со стороны других планет [75]). В этом случае все наши данные будут смещены примерно на десять минут в сторону выхода из транзита.

В настоящем исследовании истинную причину мы указать не можем, но отметим, что большая величина радиуса по данным в полосе U скорее всего говорит о существовании вокруг планеты оболочки, непрозрачной в ближней ультрафиолетовой зоне.

3.5 Обсуждение

Представленные в этой работе результаты наблюдений, с одной стороны, независимо подтверждают факт существования четвертой, внутренней, транзитной планеты в системе HD 219134. С другой стороны, получены новые неожиданные данные о форме транзита этой планеты. Глубины транзитов HD 219134 b на длинах волн 0.3-0.4 и 4.5 мкм сильно различаются, что, по нашему

мнению, не вписывается в сложившиеся представления об испаряющихся оболочках таких экзопланет, как, например, KIC 12557548 b [65].

Возможная интерпретация заключается в том, что в инфракрасном диапазоне видна «твердотельная» часть планеты, а в ультрафиолете – непрозрачная для фильтра U оболочка наподобие кометной комы. По полученной глубине транзита радиус этой оболочки равен примерно 4 земным радиусам против $1.6 R_{\oplus}$ для «твердотельной» части. Это составляет около 0.24 радиуса сферы Хилла, который при массе планеты 4.7 массы Земли близок к $16 R_{\oplus}$. Если обнаруженная в U-полосе оболочка прозрачна лишь частично, то она может занимать и всю сферу, что выглядит более естественным. Однако заполнением всей сферы Хилла дело, вероятно, не обходится: интенсивное звёздное излучение, которое имеется на орбите HD 219134 b, неизбежно должно приводить к деформации комы и образованию хвоста как у кометы.

Для определения точного размера оболочки нужны дополнительные высокоточные наблюдения транзита в ультрафиолетовом диапазоне.

Огромные водородно-гелиевые короны предполагаются вокруг некоторых экзопланет. Например, у планет системы Kepler-11 [66,67]. Однако они могут быть видны только на определённых длинах волн в очень узком диапазоне спектра, например, в линии Лайман-альфа: у газового гиганта 55 Рака b имеется такая корона, частичный транзит которой наблюдается только в Лайман-альфа [68], при этом транзита самой планеты нет. У горячего непуна GJ 436 b [69] глубина транзита в Лайман-альфа составляет 56%, в то время как в широкополосном оптическом диапазоне – всего 0.7%.

Заметим, что наряду с обширной оболочкой у HD 219134 b может иметься плотная атмосфера, слишком тонкая для наземных наблюдений. У расположенной столь близко к звезде планеты, испытывающей приливные силы, сравнимые с тем, что испытывает Ио от Юпитера, вулканическая активность должна быть не менее мощной. Сама планета представляет собой суперземлю, и вполне могла бы удерживать атмосферу из тяжёлых газов и, к примеру, паров некоторых металлов. Наблюдения экзопланет – горячих непунов и юпитеров, у которых миллиарды

лет сохраняется атмосфера, в том числе, водород и гелий, несмотря на крайнюю близость к звёздам солнечного типа, свидетельствуют о такой возможности.

Источником вещества в оболочке как раз и могла бы служить эта атмосфера, а также вулканическая пыль, которая вместе с испаряющимися газами поднимается высоко над планетой, и уносится оттуда звёздным излучением (и ветром).

Глава 4 Подтверждение кандидатов в экзопланеты, открытых миссией «Кеплер»

Открытие и изучение планет с различными физическими и орбитальными характеристиками является фундаментальной научной задачей, которая позволяет лучше понимать образование и эволюцию разных планет. Уникальный шанс дает исследование транзитных планет, радиусы, массы, плотности, химический состав атмосфер и другие характеристики которых можно измерить. Такие сведения полезны как при индивидуальных исследованиях, так и в массовых (статистических) обзорах.

Большинство экзопланет в настоящее время открыто именно транзитным методом. Однако этот метод не обеспечивает стопроцентный успех в детектировании планет. Короткое, на фоне длительности орбитального периода, событие падения блеска родительской звезды является необходимым, но не достаточным условием для открытия транзитной планеты как таковой, вследствие неоднозначной связи размера космического объекта с его массой. В частности, событие прохождения холодного белого карлика на фоне горячей родительской звезды фотометрически может быть идентично транзиту планеты земного радиуса. Другим примером подобной неоднозначности является транзит коричневых карликов по диску обычных звёзд: эти транзиты практически неотличимы от транзитов планет размером с Юпитер.

Поэтому, когда для поиска применяется исключительно транзитный метод, обнаруженные тела, даже в случае самых явных признаков планеты, могут считаться лишь кандидатами в экзопланеты. Для подтверждения планетной природы кандидатов используются другие методы анализа – в частности, спеклинтерферометрия (см., например, [70]) и метод лучевых скоростей [71].

В Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук наблюдения по программе подтверждения кандидатов в экзопланеты, обнаруженных в ходе различных фотометрических обзоров и космических

миссий, проводятся с использованием, в основном, спекл-интерферометрической и спектральной аппаратуры 6-м телескопа БТА.

В этой главе представлены результаты спектроскопического подтверждения кандидатов в экзопланеты из каталога космической миссии «Кеплер». С помощью спектрографа НЭС, установленного на 6-м телескопе БТА, лучевые скорости трёх звёзд проверены на доплеровскую переменность [72]. У этих звёзды, – KOI-974, KOI-2687 и KOI-2706, расположенных в поле основной 4-летней кампании космического телескопа «Кеплер» [73], на фотометрических кривых имеются провалы, носящие периодический характер. Подобные изменения блеска могут вызываться двойными затменными звёздами, а также транзитными планетами. Всего эти три звезды демонстрируют четыре типа затмений, каждый из которых имеет собственный период, глубину и продолжительность, то есть в трёх системах обнаружено четыре кандидата.

Благодаря нескольким высококачественным спектрам с НЭС, нам удалось показать, что все транзитные события с большой вероятностью вызываются именно экзопланетами. А дополнительный дрейф лучевых скоростей у одной из звёзд может свидетельствовать в пользу присутствия в системе третьего массивного тела.

Кроме того, методом синтетических спектров для всех родительских звёзд получены более точные оценки параметров атмосферы и радиусов, что в свою очередь позволило нам уточнить и радиусы исследуемых кандидатов в экзопланеты.

4.1 Методика подтверждения кандидатов в экзопланеты

Накопление и обработка исследовательской группой «Кеплера» огромного объёма фотометрических данных привело к обнаружению нескольких тысяч планетных кандидатов [32]. Большинство из них было открыто автоматически – с помощью пакета компьютерных программ «Kepler pipeline» [74]. Сведения о

кандидатах и их родительских звёздах доступны на сайте экзопланетного архива NASA [2].

Подтверждение обнаружения кандидатов в планеты представляет собой комплекс исследований, которые чаще всего проводятся наземными средствами. Как уже упоминалось выше, затмевающее звезду тело может иметь непланетную природу. Помимо транзитов карликовых звёзд за прохождение планеты (даже малого размера) по диску родительской звезды могут быть приняты:

- 1) частичные затмения в системе двойной звезды;
- 2) затмения в системе двойной звезды фона, находящейся на небольшом угловом расстоянии от более яркой звезды, при низком качестве изображений или недостаточном разрешении наблюдательной аппаратуры.

Кроме естественных причин, имитацию транзитов могут вызывать различные процессы в приёмном устройстве. Как правило, подтверждение планетной природы транзитных кандидатов проводят после определения параметров родительских звёзд с наилучшей точностью, поиска их возможных звёздных компаньонов и учёта влияния последних на фотометрию.

В методике подтверждения можно выделить два независимых направления:

— исключение всех возможных явлений, которые могут имитировать прохождение планет по диску звёзд;

— оценки массы планеты с помощью метода лучевых скоростей или тайминга транзита, если кандидат находится в составе многопланетной плоской системы [46,75].

Иногда ограничиваются одним исследованием, например, проводится только статистическое исключение явлений, имитирующих транзит, без измерения масс кандидатов. Это вполне распространённая практика в случае кандидатов «Кеплера» [5].

В нашей работе для исключения непланетной природы выбранных кандидатов использовался метод измерения лучевых скоростей. Были наложены ограничения на амплитуду колебаний, вызываемых околозвёздными спутниками: в случае слишком большой амплитуды изменения лучевой скорости звезды,

порядка 1 км/с и больше, мы имеем дело с транзитным объектом непланетной природы.

Спектроскопические наблюдения родительских звёзд с максимально высоким разрешением проводились на эшелле-спектрометре НЭС [76,77], стационарно установленном в фокусе Нэсмит-2 6-м телескопа БТА САО РАН.

Мы считаем фотометрические данные «Кеплера», а также физические параметры звёзд, определенные командой «Кеплера» специально для создания каталога кандидатов [78], вполне надёжными. Тем не менее, используя полученные нами собственные спектры необходимого качества, мы переопределяем некоторые из этих параметров. В частности, получаем оценки ускорений свободного падения, эффективных температур и металличностей исследуемых родительских звёзд, что даёт возможность уточнить физические параметры кандидатов в экзопланеты.

4.2 Выбор объектов

При выборе объектов из каталога кандидатов «Кеплера» NASA мы руководствуемся следующими критериями:

— подобие Солнцу по таким физическим параметрам, как масса, эффективная температура и размер;

— отсутствие звёзд-соседей на близких угловых расстояниях, вклад от излучения которых может усложнить задачу интерпретации природы объекта, вызывающего затмения;

— максимальная длительность непрерывных наблюдений «Кеплером», исключающих инструментальные и иные ошибки при выделении транзитных событий (благодаря этому группой «Кеплера» создан большой массив статистических данных транзитов исследуемых кандидатов [2]);

— наличие явно выраженных транзитных событий, повторяющихся с частотой не больше 100 земных суток, и имеющих глубины, соответствующие небольшим планетам (с радиусами меньше радиуса Урана, $4 R_{\oplus}$);

— отсутствие подтверждённого статуса транзитного кандидата;

— U-образная форма транзитов – «плоское дно» затмения говорит о том, что объект, экранирующий свет звезды, заходит на её диск целиком;

— относительно высокая яркость объекта для достижения необходимой точности в определении лучевых скоростей при наблюдениях на спектрографе НЭС.

Соответственно, из каталога были выбраны следующие три звезды с кандидатами в транзитные экзопланеты:

- 1) KOI-974, $K_p = 9.58^m$;
- 2) KOI-2687, $K_p = 10.16^m$;
- 3) KOI-2706, $K_p = 10.27^m$.

Блеск «Кр» указан в звёздных величинах по «Кеплеру» – что для солнцеподобных звёзд очень близко к величине в фильтре V системы Джонсона–Козинса.

Согласно работе [79], в радиусе 4'' вокруг выбранных звёзд отсутствуют какие-либо компаньоны, имеющие разность блеска с главной звездой меньше, чем 6^m .

4.3 Наблюдения и анализ данных

Инструмент НЭС представляет собой эшелле-спектрограф высокого спектрального разрешения ($R = 40\,000\text{--}60\,000$) [76,77], стационарно установленный в фокусе N2 6-м телескопа САО РАН [80]. Максимальное разрешение достигается с помощью трёхступенчатого резателя изображений [76]. Спектрограф одновременно покрывает весь видимый спектральный диапазон, является достаточно эффективным для наблюдения звёзд заявленной яркости, и обеспечивает требуемую точность измерения лучевых скоростей звёзд [81] для решения поставленной в этой работе задачи.

Наблюдения проводились в течение четырёх ночей в 2016 и 2017 годах. Таблица 4 даёт краткую сводку по этим наблюдениям. Как можно видеть,

погодные условия в целом были хорошими, кроме ночи 12/13 мая 2017 года, когда были получены спектры лишь для одного, самого яркого, кандидата.

Таблица 4. Журнал наблюдений.

Дата	Звезда	Количество экспозиций	Время экспозиций, секунд	Качество изображения
Июль 13/14, 2016	KOI-2706	3	2400	1.5''
Июль 13/14, 2016	KOI-974	2	2400	1.5''
Июль 13/14, 2016	KOI-2687	3	2400	1.5''
Август 18/19, 2016	KOI-2706	2	3600	1.5''
Август 18/19, 2016	KOI-974	2	3000	1.5''
Август 18/19, 2016	KOI-2687	2	3600	1.5''
Ноябрь 12/13, 2016	KOI-974	3	2400	1.5''
Ноябрь 12/13, 2016	KOI-2687	3	2700	1.5''
Май 12/13, 2017	KOI-974	2	2700	3''

Описание первичной редукции полученных данных приводится в работе [82]. Измерения лучевых скоростей по спектрам звёзд программы также проводились по стандартной схеме путем измерения индивидуальных спектральных линий, для каждой из которых измерялся её «центр тяжести». Отбор линий осуществлялся с помощью базы данных VALD [83,84]. При этом выбирались только одиночные наиболее симметричные линии с остаточными интенсивностями более 40% в единицах континуума. Результаты индивидуальных измерений затем статистически усреднялись взвешиванием, предложенным в статье [85].

Затмевающие тела с размерами менее $4 R_{\oplus}$ либо являются настоящими планетами, либо относятся к совершенно иному типу астрономических объектов – белым карликам (коричневым карликам или маломассивным звёздам в случае неправильного определения размеров родительских звёзд). Лучевые скорости,

которые должны индуцировать объекты звёздных масс, являются достаточно большими, чтобы можно было надёжно исключить их планетную природу (больше десятка км/с как минимум). Массы же планет могут быть недостаточными для того, чтобы при небольшом количестве измерений наводимые ими колебания лучевых скоростей можно было бы уверенно зарегистрировать на НЭС БТА [81].

В ходе анализа были получены индивидуальные оценки абсолютных лучевых скоростей кандидатов за каждую ночь. Характерная «внутренняя» точность измерения лучевых скоростей по сотням отобранных линий в каждом спектре составляла типичную величину примерно от 70 м/с до 100–120 м/с. Между тем необходимость исправлять ошибки, накопленные из-за нестабильности спектрографа в течение наблюдательной ночи, потребовала от нас корректировки оценок лучевых скоростей с использованием поправок, привязанных к позиционным положениям теллурических линий в спектрах исследуемых звёзд. Это естественным образом внесло дополнительную статистическую ошибку в индивидуальные измерения, которые в исправленном виде приведены в Таблице 5. В ней колонка «JD» представляет юлианскую дату наблюдений, φ_1 и φ_2 – орбитальные фазы первого и второго (если есть) кандидатов планетного размера у данной звезды. Результаты исследования переменности лучевых скоростей звёзд программы представлены также на рисунке, подробное рассмотрение которого следует чуть ниже.

Параметры выбранных систем из каталога KOI (согласно последнему релизу данных DR25) даны в Таблице 6. Как можно видеть, все кандидаты в экзопланеты имеют радиусы, сравнимые с земным. Поэтому отсутствие регистрации переменности лучевых скоростей на уровне представленных точностей их измерения позволяет сделать положительное заключение в пользу планетной природы кандидатов.

Таблица 5. Результаты измерений лучевых скоростей кандидатов в экзопланеты.

Звезда	JD	φ_1	φ_2	RV, км/с	σ (RV), км/с
KOI-974	2457583.435	0.170	—	-21.38	0.12
	2457619.369	0.843		-20.53	0.13
	2457619.498	0.846		-21.01	0.12
	2457705.203	0.447		-21.88	0.19
	2457886.432	0.834		-21.42	0.13
KOI-2706	2457583.290	0.410	—	-36.71	0.19
	2457619.324	0.048		-36.57	0.16
	2457619.458	0.091		-36.55	0.18
KOI-2687	2457583.454	0.150	0.0859	+11.29	0.18
	2457619.409	0.093	0.4883	+11.23	0.14
	2457619.538	0.169	0.5041	+11.15	0.13
	2457705.297	0.121	0.0043	+11.37	0.16

Таблица 6. Параметры выбранных систем согласно каталогу KOI.

Название кандидата	Орбитальный период, суток	Радиус, R_{\oplus}	T_0 (JD)
KOI-974.01	53.5057611 ± 0.0001596	$2.52^{+0.16}_{-0.12}$	2455005.98304
KOI-2687.01	$1.716828304 \pm 0.00000941$	$0.74^{+0.012}_{-0.03}$	2454965.03204
KOI-2687.02	8.16733851 ± 0.0000602	$1.03^{+0.015}_{-0.06}$	2454969.20356
KOI-2706.01	$3.09756897 \pm 0.00003169$	$1.75^{+0.07}_{-0.08}$	2454964.55889

На Рисунке 11 представлены транзиты четырёх исследуемых кандидатов на кривых блеска их родительских звёзд по данным с космического телескопа «Кеплер». Изображения получены с сайта Экзопланетного Архива NASA [2].

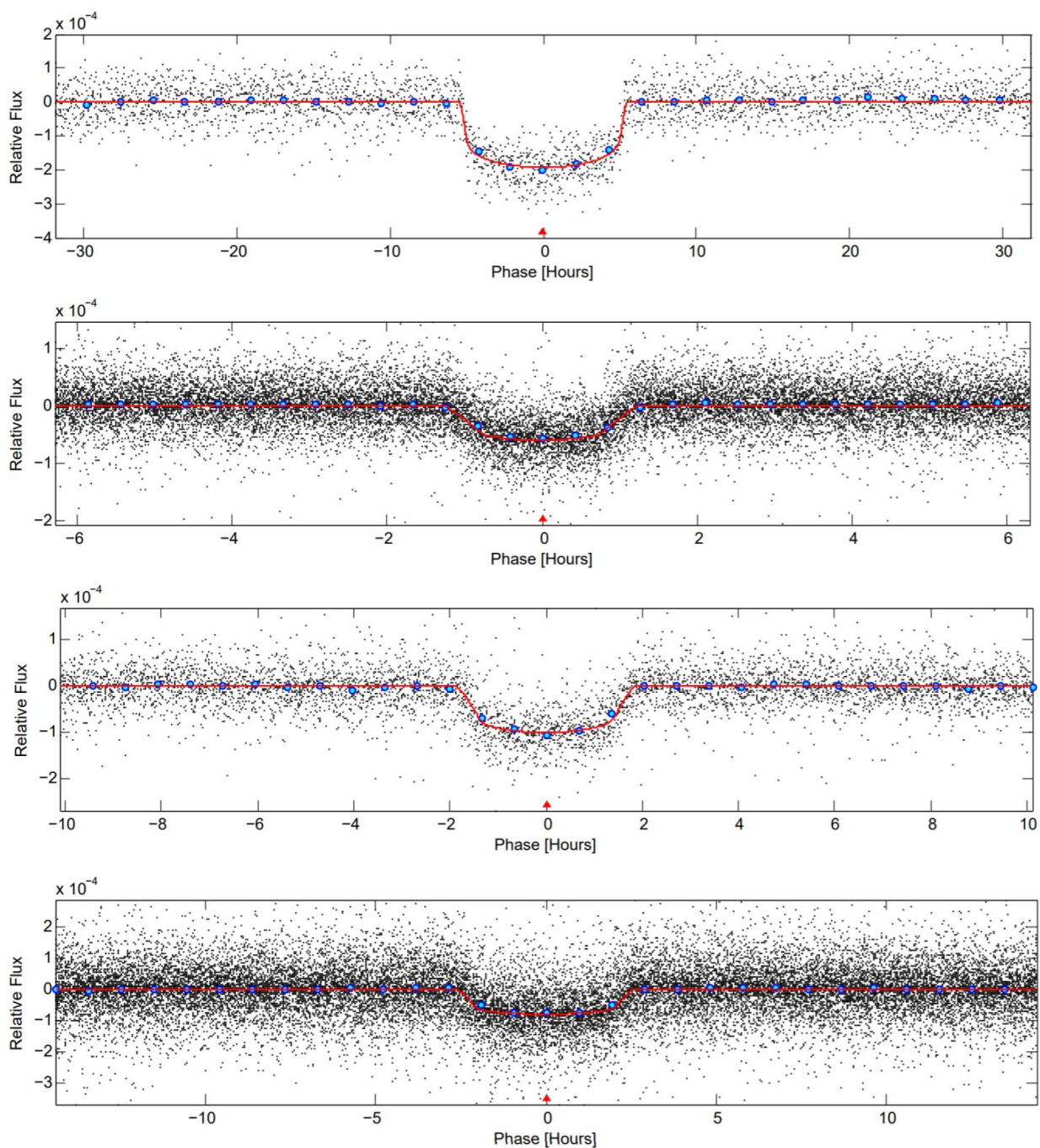


Рисунок 11. Сфазированные транзиты четырёх кандидатов «Кеплера» по данным фотометрии их родительских звёзд. Сверху вниз: KOI-974.01, KOI-2687.01, KOI-2687.02 и KOI-2706.01.

4.4 Результаты

Анализируя результаты измерений для каждого кандидата, мы исходили из того, что физические параметры их родительских звёзд, указанные в кеплеровском обзоре, верны. Между тем качество спектрального материала,

полученного в ходе этой работы, оказалось вполне приемлемым для определения своих оценок некоторых из этих параметров. Это позволило нам провести независимую экспертизу кандидатов, которую мы представляем в подразделе «Обсуждение результатов».

Рассмотрим каждую систему индивидуально.

4.4.1 KOI-974 (KIC 9414417)

Звезда KOI-974, вероятно, является субгигантом позднего F-класса. Её радиус был оценён в $1.762^{+0.112}_{-0.084} R_{\odot}$, эффективная температура $T_{\text{eff}} = 6247^{+75}_{-69}$ К. На кривой блеска этой звезды наблюдаются транзитные события, имеющие одинаковую глубину и форму, отстоящие друг от друга на 53.51 суток, по-видимому, принадлежащие одному телу. Глубина затмения соответствует планете с радиусом $2.52 R_{\oplus}$. Параметры затмевающих тел указаны в Таблице 6. Они были использованы для точного построения фазовой кривой и нанесения на неё значений лучевых скоростей.

Наблюдения KOI-974 на НЭС БТА проводились в течение четырех ночей: 13 июля, 18 августа, 12 ноября 2016 г. и 12 мая 2017 г. Всего для этой звезды получено девять спектров, часть из которых была усреднена внутри последовательных наблюдений одной ночи. В результате анализа этих спектров было получено пять устойчивых оценок лучевой скорости KOI-974 (Таблица 5). Мы нашли (Рисунок 12, верхняя панель), что разброс лучевых скоростей у звезды составляет не более 400 м/с в разные моменты времени. Причём в одну и ту же фазу кандидата KOI-974.01, 0.83–0.84, но в разные даты наблюдений значения лучевых скоростей звезды сильно различаются (бары ошибок даже не пересекаются). Вероятнее всего, разброс лучевых скоростей указывает на долгопериодический тренд, т.е. в системе может присутствовать дополнительное тело (или несколько тел) на широких орбитах.

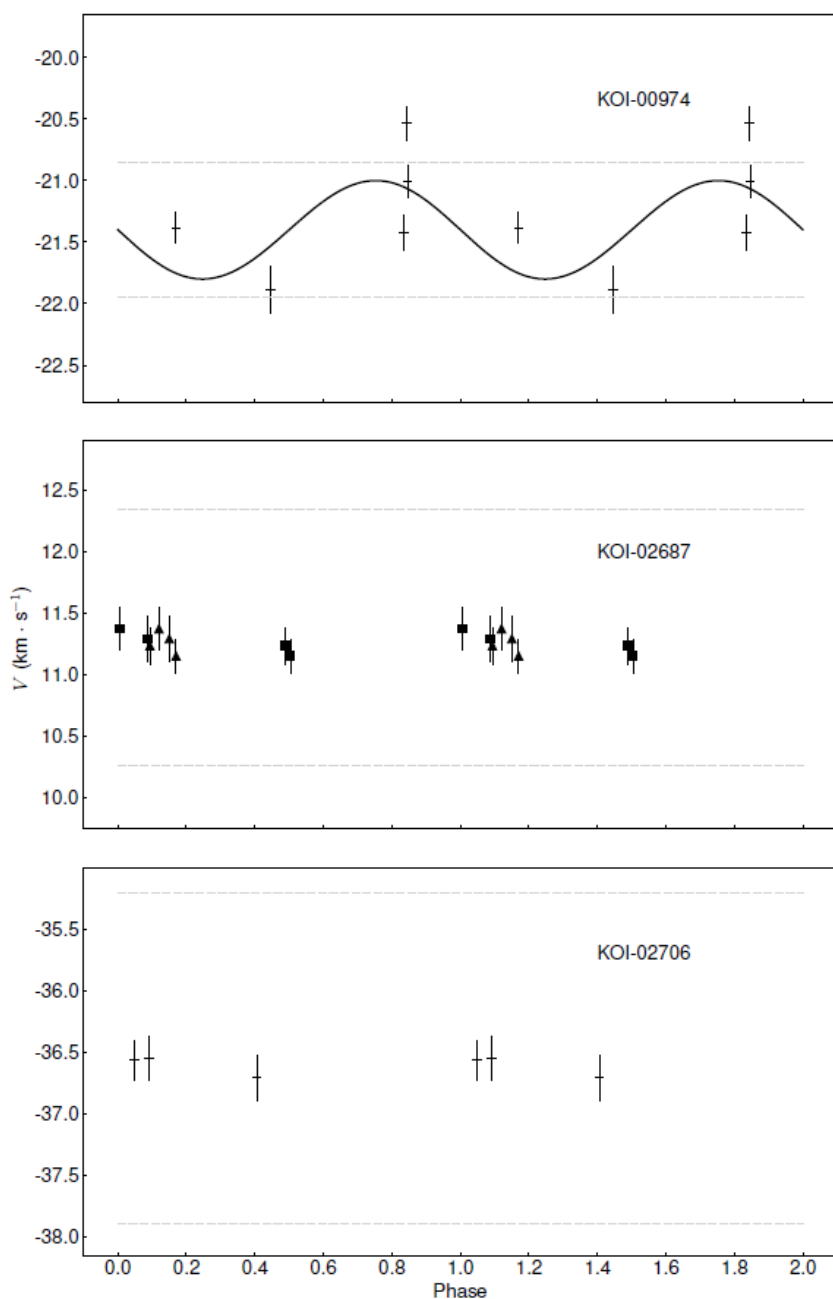


Рисунок 12. Переменность лучевых скоростей исследованных звёзд, найденная при наблюдениях на спектрографе НЭС. Сплошная синусоидальная линия на верхней панели иллюстрирует результат моделирования орбитальной кривой с полуамплитудой 400 м/с. Пунктирными линиями показаны верхние пределы изменения лучевых скоростей, соответствующие экзопланетам с пограничной массой 12 масс Юпитера при данных массах родительских звёзд и орбитальных периодах кандидатов.

Если отклонение лучевой скорости родительской звезды, равное 400 м/с, вызывает KOI-974.01, то её масса должна быть близкой к восьми массам

Юпитера. Однако планета всего в 2.52 раза больше Земли, что при подобной массе привело бы к физически нереалистичной плотности. Соответственно, с большой долей вероятности мы подтверждаем планетную природу KOI-974.01 и высказываем предположение, что в системе имеется ещё по меньшей мере один невидимый спутник в случае, если данные «Кеплера» о физических характеристиках родительской звезды KOI-974 являются верными.

4.4.2 KOI-2687 (KIC 7202957)

Родительская звезда, вероятно, относится к звёздам Главной последовательности раннего G-класса. Её радиус был оценен в $0.902^{+0.138}_{-0.046} R_{\odot}$, эффективная температура $T_{\text{eff}} = 5808^{+105}_{-128}$ К. Фотометрическая кривая этой звезды демонстрирует два типа транзитных сигналов, за которые, по-видимому, ответственны два планетных кандидата, имеющих радиусы 0.74 и 1.03 R_{\oplus} . Их периоды соответственно составляют 1.72 и 8.17 суток. Отношение их периодов приблизительно равно 1:4.76 (или 4:19). Наличие сразу двух транзитных тел у одной звезды резко повышает вероятность их истинно-планетной природы.

Мы наблюдали KOI-2687 на НЭС БТА в течение трех ночей: 13 июля, 18 августа, и 12 ноября 2016 года. Всего для этой звезды было получено восемь спектров высокого разрешения. Согласно нашим измерениям разброс лучевых скоростей у KOI-2687 оказывается сравним с нулём (Рисунок 12, средняя панель: треугольниками изображены оценки лучевых скоростей первого кандидата, квадратиками – второго). С большой вероятностью оба кандидата этой системы также являются настоящими планетами, поскольку отсутствие орбитальных возмущений лучевых скоростей от тел звёздных масс в этой системе мы исключаем полностью.

4.4.3 KOI-2706 (KIC 9697131)

Этот объект из каталога кандидатов [78], вероятно, является звездой-субгигантом позднего F- или раннего G-класса, радиус которой оценён в $1.885^{+0.075}_{-0.093} R_{\odot}$. Эффективная температура $T_{\text{eff}} = 6329^{+82}_{-76}$ К. В результате фотометрии у этой звезды по наблюдениям «Кеплера» обнаружен единственный транзитный сигнал, за который может нести ответственность планетный кандидат, имеющий период 3.1 суток. Его радиус оценивается в $1.75 R_{\oplus}$.

Наблюдения KOI-2706 на НЭС БТА проводились в течение двух ночей: 13 июля и 18 августа 2016 г. Всего для этой звезды было получено пять спектров высокого разрешения, которые в рамках одной ночи были последовательно усреднены. Согласно нашим оценкам разброс лучевых скоростей KOI-2706 также оказывается близким к нулю – в предположении круговой орбиты полуамплитуда лучевых скоростей не превышает 800 м/с. С большой долей вероятности кандидат KOI-2706.01 также является настоящей планетой.

4.5 Обсуждение результатов

Мы представили результаты исследования кандидатов в планеты KOI-974.01, KOI-2687.01/02 и KOI-2706.01 [72]. С помощью спектрографа НЭС БТА лучевые скорости родительских звёзд этих объектов проверены на доплеровскую переменность. Согласно полученным верхним пределам все изученные кандидаты не могут быть объектами звёздных масс, что подтверждает их планетную природу. И этот результат практически не зависит от того, насколько точно параметры родительских звёзд систем были определены различными исследовательскими группами. Интерпретация природы лишь одного кандидата, KOI-974.01, с некоторой натяжкой может зависеть от точности измерения параметров звёзд в контексте вероятных размеров. В ходе программы нами были получены спектры высокого разрешения родительских звёзд кандидатов. С целью уточнения их параметров мы предприняли модельный анализ спектров.

Параметры атмосфер звёзд (эффективная температура T_{eff} , логарифм ускорения свободного падения $\lg \cdot g$ и микротурбулентная скорость v_{turb}) определялись из условия ионизационного равновесия для атомов нейтрального и ионизованного железа Fe I и Fe II. Для каждой звезды проведены измерения 100–150 линий Fe I и около 15 линий Fe II. Для расчётов использовался комплекс программ и моделей атмосфер ATLAS/WIDTH [86]. В результате мы определили фундаментальные параметры для родительских звёзд программы (Таблица 7).

Таблица 7. Параметры родительских звёзд исследуемых систем по нашим расчётам.

Звезда	T_{eff} , К	$\lg \cdot g$	V_{turb} , км/с	[Fe/H]
KOI-974	6171 ± 30	3.74 ± 0.03	1.5	-0.197 ± 0.08
KOI-2687	5815 ± 30	4.59 ± 0.03	1.0	0.003 ± 0.07
KOI-2706	6177 ± 30	3.66 ± 0.03	1.5	-0.007 ± 0.10

Задачей нашего исследования являлось не определение или уточнение физических параметров кандидатов, а подтверждение или опровержение их планетной природы путём наложения пределов на амплитуду лучевых скоростей их родительских звёзд с точностью от десятков до полутора сотен метров в секунду. Такой точности при небольшом количестве данных наблюдений должно быть достаточно для того, чтобы выделить и отбросить кандидаты звёздных масс. В будущем же по мере накопления наблюдательного материала для этих и других кандидатов мы планируем получить оценки масс планет для уточнения их физических характеристик.

При общем согласии большинства рассчитанных нами параметров с параметрами, представленными для этих звёзд в каталоге KOI, значения ускорения свободного падения для двух звёзд (KOI-974 и KOI-2706) оказались заметно ниже. В свою очередь это означает, что эти две звезды явно не принадлежат главной последовательности, а являются субгигантами IV класса

светимости. Подобный результат был получен в работе [87], авторы которой также определяют для KOI-974 IV класс светимости.

Взяв оценки масс целевых звёзд из литературы [78], а также учитывая значение $lg \cdot g$, полученное в данном исследовании, мы получили собственные оценки их радиусов (кроме оценки радиуса KOI-2687, которая взята из литературы, так как полученное нами значение $lg \cdot g$ совпадает с литературным в пределах погрешностей). Они представлены в Таблице 8.

Таблица 8. Радиусы родительских звёзд исследуемых систем по расчётам, выведенным из наших значений $lg \cdot g$ и масс, взятых из литературы (для KOI-2687 из литературы взят и радиус).

Звезда	Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}
KOI-974	$1.174^{+0.14}_{-0.056}$	$2.420^{+0.23}_{-0.14}$
KOI-2687	$0.987^{+0.049}_{-0.078}$	$0.902^{+0.14}_{-0.05}$
KOI-2706	$1.374^{+0.076}_{-0.131}$	$2.871^{+0.18}_{-0.23}$

Таким образом, мы можем утверждать, что радиусы изучаемых звёзд больше, чем было представлено в каталоге «Кеплера». Это означает, что планетные кандидаты KOI-974.01 и KOI-2706.01 соответственно также оказываются крупнее, чем давали более ранние оценки. В данном случае речь может идти о планетах размером с Нептун. Однако это изменение никак не затрагивает наш основной вывод, что все четыре кандидата являются именно планетами. Параметры планет по нашим оценкам представлены в Таблице 9.

Таблица 9. Параметры планет, полученные на основе наших оценок радиусов родительских звёзд.

Название кандидата	Радиус, R_{\oplus}	Длительность транзита, часов	Прицельный параметр, R_* (при круговой орбите)	Поверхностная температура, К (при $A_B = 0$)
KOI-974.01	$3.70^{+0.38}_{-0.24}$	10.56	0.74	855
KOI-2687.01	$0.74^{+0.12}_{-0.03}$	2.07	–	1593
KOI-2687.02	$1.03^{+0.15}_{-0.06}$	3.34	–	947
KOI-2706.01	$2.86^{+0.29}_{-0.34}$	4.59	0.74	2347

Таким образом, мы считаем, что все четыре кандидата не являются объектами звёздных масс, так как не вызывают заметных колебаний лучевых скоростей своих родительских звёзд, и их массы не превосходят 12 масс Юпитера. В будущем мы продолжим мониторинг лучевых скоростей этих систем.

Глава 5 Магнитное поле и лучевые скорости двойной звезды χ Дракона

Возникновение и эволюция планет неразрывно связаны с происхождением и эволюцией звёзд, вокруг которых они обращаются. Поэтому одним из важнейших направлений исследования экзопланет является поиск и изучение этих объектов в системах кратных звёзд. Двойные и кратные звёзды составляют большую часть звёздного населения Галактики. В этой главе представлены результаты поиска экзопланет в системе яркой ($V = 3.58^m$) спектроскопической двойной звезды χ Дракона с помощью метода лучевых скоростей [100]. Двойственность этой звезды была впервые обнаружена в 1898 году американским астрономом Уильямом Кэмпбеллом [88].

С 1987 года система также известна как интерферометрическая двойная [89,90]. Угловое разделение между компонентами составляет $0.12''$, а орбитальный период – 280.55 дней [89,90]. Первичный компонент χ Дракона А представляет собой звезду четвёртой величины класса F7V с прогнозируемой скоростью вращения $v \cdot \sin(i) = 2.5$ км/с [91] и радиусом $1.2 R_{\odot}$ [92]. Вторичный компонент – конвективная звезда типа K, на две величины слабее первичного.

В сравнительно недавнем исследовании [85] было высказано предположение о том, что основной компонент χ Дракона А имеет слабое продольное поле до нескольких десятков Гаусс. Помимо двойственности χ Дракона, эта система интересна как лаборатория для изучения формирования и эволюции магнитных звёзд внутри кратных звёздных систем. Основываясь на этой идее, мы провели мониторинговые спектрополяриметрические наблюдения высокого спектрального разрешения χ Дракона со спектрографом Бохюнсанской оптической астрономической обсерватории (BOAO) Корейского института астрономии и космических исследований (KASI) в Республике Корея.

Другой целью исследования был высокоточный поиск вариаций радиальной скорости основного компонента системы. Если в системе χ Дракона существуют планеты, то более вероятна конфигурация, при которой их орбиты являются

почти компланарными плоскости орбиты двойной звезды, поскольку высокие взаимные наклонения орбит приводят к их неустойчивости [17]. Тот факт, что орбита хи Дракона видна почти «с ребра», наводит на мысль о том, что планеты могли бы вызывать максимально возможные проекционные возмущения лучевой скорости хи Дракона А. С высокой степенью вероятности такие планеты могут быть и транзитными. В этой связи, совместное исследование динамики магнитосферы хи Дракона А и нахождение периодических вариаций её лучевой скорости представляют хорошую возможность для поиска планет. В то время как высокоточные доплеровские измерения спектров звёзд могут лишь указать на возможное присутствие планет при наличии переменности лучевых скоростей, одновременно проведённые исследования динамики магнитных полей родительских звёзд (если, конечно, такие поля у них наблюдаются) позволят точно интерпретировать природу найденной переменности. Дело в том, что переменность лучевых скоростей у звёзд далеко не всегда может быть связана с планетами. Это могут быть также и радиальные пульсации, и переменность магнитного поля в результате собственного вращения звезды [85]. Независимо проведенные магнитометрические измерения способны разделить эти эффекты. Настоящая глава посвящена такому исследованию.

Далее в этой главе идёт описание наблюдений, редукции данных и методов измерений. Результаты измерений магнитного поля и радиальной скорости приведены в подразделах «Результаты» и «Обсуждение». Основной вывод состоит в том, что спектральные линии в спектре основного компонента хи Дракона показывают переменное зеемановское расщепление, что подтверждает ранее высказанные предположения о наличии слабого магнитного поля на поверхности этой звезды. В течение почти 2 лет наших наблюдений продольная составляющая V_L её магнитного поля изменяется от -11.5 ± 2.5 Гс до $+11.1 \pm 2.1$ Гс с периодом около 23 дней. Учитывая скорость вращения хи Дракона А по литературным данным и скорость, недавно измеренную в этой работе, подобная переменность объясняется вращением звезды в предположении об устойчивости магнитного поля.

Наши новые измерения лучевых скоростей по спектрам высокого разрешения позволили уточнить орбитальные параметры и выявить стойкие отклонения лучевых скоростей от орбитальной кривой. Мы подозреваем, что эти отклонения могут быть вызваны влиянием локальных пятен, пульсаций самой звезды, или же влиянием возможной планеты с массой около массы Юпитера на близкой к компоненту А орбите.

5.1 Наблюдения, редукция данных и измерения

Наблюдения хи Дракона были проведены в течение 15 ночей с 2006 по 2008 годы. Использовался спектрополяриметр BOES, установленный на 1.8-м телескопе ВАО. Спектрограф и процедура спектрополяриметрических наблюдений подробно описаны в работе [94]. Инструмент представляет собой спектрограф с высоким разрешением, снабженный оптическим волокном, который включает в себя три волокна STU Polymicro с диаметрами ядер 300, 200 и 80 мкм (спектральные разрешения составляют $\lambda/\Delta\lambda = 30000, 45000$ и 90000 соответственно). Мы использовали рабочий диапазон длин волн 3800 – 10000 ангстрем и спектрополяриметрический режим со спектральным разрешением 60000 с использованием двух дополнительных волоконно-оптических каналов. Обзор наблюдений приведен в Таблице 10, где указаны дата наблюдений, общее количество экспозиций, типичное время экспозиции для отдельного кадра и погодные условия.

Редукция спектрополяриметрических данных проводилась с использованием программы обработки изображений DECH [95], а также автоматической «pipeline» программы [96,97]. Общие этапы являются стандартными и включают в себя удаление следов космических частиц, вычитание тока смещения и рассеянного света, извлечение спектральных порядков, деление на спектр плоского поля, нормировку на континуум и калибровку по длинам волн.

Таблица 10. Журнал наблюдений хи Дракона.

Дата	Количество экспозиций	Время экспозиции, секунд	Погодные условия
27 сентября 2006	4	360	хорошие
22 января 2007	12	600	умеренные
24 января 2007	16	410	хорошие
25 января 2007	8	600	умеренные
28 января 2007	4	600	умеренные
31 января 2007	6	480	хорошие
02 февраля 2007	8	500	умеренные
03 февраля 2007	24	360	хорошие
04 февраля 2007	4	360	хорошие
25 апреля 2007	4	360	хорошие
26 апреля 2007	4	720	плохие
27 апреля 2007	4	600	плохие
02 мая 2007	24	600	умеренные
13 июня 2008	4	800	умеренные
10 сентября 2008	4	360	хорошие

Измерения лучевых скоростей (RV-измерения) в спектрах звёзд проводились путем вычисления центров тяжести всех узких и симметричных спектральных линий и их сравнения с лабораторными длинам волн, которые вместе с факторами Ланде и другими атомными данными, необходимыми для обработки данных, были получены из базы данных VALD [83,98,84]. Измерения продольного магнитного поля были сделаны согласно пошаговому описанию в работе [94].

Мы отождествили несколько сотен линий в спектре хи Дракона A в диапазоне 3800 – 10000 ангстрем, из которых выбрали около 300 самых глубоких ($r_c > 0.4$, где r_c – центральная глубина линии) одиночных узких и симметричных

линий поглощения с ненулевым фактором Ланде. Измеряя зеемановские расщепления индивидуально во всех этих линиях, взвешивая и усредняя эти измерения, как описано в [85], мы получили оценки и соответствующие неопределенности продольного магнитного поля звезды, выполненные по схеме, подробно описанной в статье [94]. Поскольку период вращения χ Дракона A намного длиннее, чем несколько дней, мы объединили эти индивидуальные оценки в комбинированную экспозицию за каждую ночь наблюдений. Продолжительность такой эквивалентной экспозиции равна $N \times E_{\text{exp}}$ (Таблица 10) и колеблется от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Чтобы контролировать знак и нулевой уровень измеряемого поля, мы использовали типичные магнитные звезды (HD 215441, HD 32633 и HD 40312) с магнитными полями различной напряженности, а также звезды нулевого поля (подробнее в [94]). Для контроля корректности наших оценок мы также использовали ненасыщенные теллурические спектральные линии и звезду Процион, которая не демонстрирует магнитное поле выше одного Гс [94], и имеет спектральный класс, очень близкий к классу χ Дракона A.

Поскольку индивидуальные оценки лучевых скоростей, полученные для каждой короткой экспозиции, не показали никаких заметных особенностей, мы усреднили все измерения RV в рамках комбинированных экспозиций таким же образом, как и оценки магнитного поля.

5.2 Результаты

Результаты наших измерений за каждую дату наблюдения представлены в Таблице 11, где в столбце (1) указана дата наблюдений, в столбце (2) – гелиоцентрическая юлианская дата середины экспозиции, столбцы (3) и (4) показывают среднее ночное значение RV, и его неопределенности σ , столбцы (5) и (6) дают соответствующие оценки продольного магнитного поля B_L , и его неопределенности σ .

Таблица 11. Результаты измерений лучевых скоростей и магнитного поля для звезды χ Дракона А.

Дата	HJD-2450000 (дней)	RV (км/с)	σ (км/с)	B_L (Гс)	σ (Гс)
27 сентября 2006	4006.096	38.78	0.05	+11.1	2.1
22 января 2007	4123.337	36.351	0.017	+5.3	0.9
24 января 2007	4125.334	34.836	0.013	-3.2	0.7
25 января 2007	4126.331	34.112	0.021	-2.3	1.1
28 января 2007	4129.320	32.126	0.029	-5.3	1.7
31 января 2007	4132.345	29.898	0.032	-10.5	3.4
02 февраля 2007	4134.093	27.019	0.017	-11.5	2.5
03 февраля 2007	4135.345	26.089	0.018	-7.8	0.7
04 февраля 2007	4136.347	24.421	0.045	-9.5	1.8
25 апреля 2007	4216.014	25.58	0.046	+5.8	2.0
26 апреля 2007	4216.999	25.55	0.045	+4.4	2.0
27 апреля 2007	4218.061	26.31	0.045	+5.0	2.8
02 мая 2007	4223.218	26.88	0.023	-7.1	0.9
13 июня 2008	4630.817	46.56	0.035	-8.9	1.9
10 сентября 2008	4719.988	12.24	0.04	-8.5	2.5

5.2.1 Магнитное поле

Рассмотрим результаты измерений эффекта Зеемана и лучевых скоростей независимо.

Как видно из Таблицы 11, десять из пятнадцати оценок продольного поля имеют значение, превышающее уровень 3σ . Кроме того, длительный сет наблюдений между 22 января 2007 года и 4 февраля 2007 года выявил монотонное изменение поля B_L от максимума до минимума при прохождении через отрицательный экстремум. Это может указывать на наличие глобального магнитного поля на поверхности звезды. Из-за вращения χ Дракона А мы

наблюдаем различные интегральные проекции поверхностного магнитного поля на луче зрения. Если магнитосфера устойчива, этот эффект должен быть периодическим и совпадать с периодом вращения звезды. Двухлетняя база наших наблюдений позволяет исследовать эту возможность в первую очередь.

Чтобы определить интервал времени, на котором изменяется продольное магнитное поле (который может являться периодом вращения звезды), мы применили метод Лафлера-Кинмана [143]. В его основе лежит тестирование пробных периодов при выполнении условия минимальности суммы квадратов разностей величин поля между наблюдениями соседних фаз. Такой критерий эффективно показывает сглаженные периодические сигналы на ограниченном числе наблюдений. При анализе спектра мощности (Рисунок 13, верхний график) данных, полученных с помощью метода Лафлера-Кинмана, выявлен сильный сигнал, указывающий на наличие периода $P = 23.39(9)$ дней.

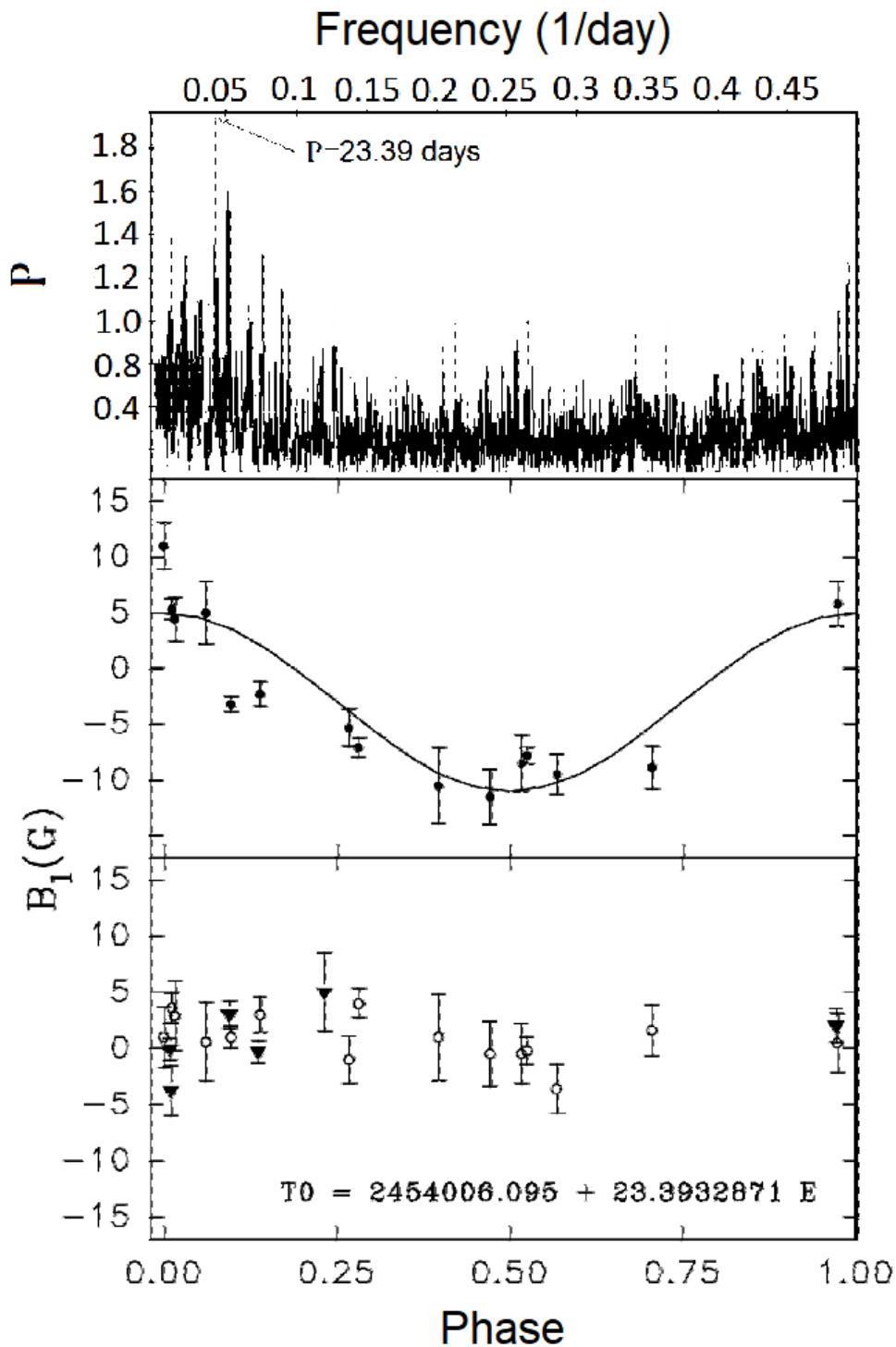


Рисунок 13. Верхняя панель: спектр мощности изменения поля. Средняя панель: наблюдаемое изменение фазы продольного поля B_L звезды χ Дракона А (заполненные кружки) и наилучшая синусоидальная подгонка данных (сплошная линия). Нижняя панель: контрольные результаты измерений «нулевого поля» в спектрах Прокциона (заполненные треугольники) и теллурические линии в спектрах χ Дракона А (пустые кружки).

Фазовая магнитная кривая χ Дракона А, свернутая с найденным периодом, показана на Рисунке 13 (средний график). Изменение фазы продольного поля имеет синусоидальную симметрию с небольшими отклонениями (например, две точки между $\phi = 0$ и $\phi = 0.25$). Если от минимальных до максимальных индивидуальных измерений V_L варьируется от -11.5 ± 2.5 Гс до $+11.1 \pm 2.1$ Гс, синусоидальная подгонка этих данных по методу минимизации χ^2 Марквардта [93] даёт изменение поля от -11.5 ± 1.5 Гс до $+5.2 \pm 1.5$ Гс. Это несоответствие указывает на то, что геометрия поля сложнее простого диполя. Момент максимума среднего продольного поля может быть рассчитан в соответствии со следующей эфемеридой: $T_0 = 2454006.095 + 23.39(9)$ Е.

5.2.2 Лучевые скорости

Высокие механическая и оптическая стабильности спектрографа BOES позволяют проанализировать лучевые скорости χ Дракона А со значительно большей точностью, чем было достигнуто в предыдущих исследованиях. Наиболее полный набор RV-данных для системы был представлен и проанализирован в 1987 году в работе Томкин и др. [89]. Используя несколько десятков отдельных RV-измерений, а также спекл-интерферометрические наблюдения, эти авторы определили орбиты обоих компонентов χ Дракона. В более поздних исследованиях орбита была уточнена интерферометрическим методом [90,99]. Объединение измерений RV, опубликованных в [89] с нашими новыми измерениями [100], описанными здесь, позволило получить значительно более точное орбитальное решение для системы. Уточнённые параметры приведены в Таблице 12, в которой представлена прогнозируемая полуамплитуда скорости χ Дракона А (K), аргумент перицентра (W), эпоха перицентра (T_p), орбитальный период (P), эксцентриситет (e), смещение лучевых скоростей (V_0) и вычитаемый линейный уклон S вариации лучевых скоростей.

Таблица 12. Лучевые скорости орбиты хи Дракона А.

Орбитальный элемент	Размерность	Значение	Неопределённость
K	км/с	16.95	0.19
W	градусов (°)	116.9	2.0
T_p	HJD	2437307.827	1.294
P	суток	280.523	0.019
e		0.432	0.02
V_0	км/с	28.73	11.18
S	м/(с·сут)	0.13	0.05

На верхнем графике Рисунка 14 сплошной линией показано наше решение со всеми известными оценками лучевых скоростей для хи Дракона А, сложенными с полученным значением орбитального периода $P = 280.523$ дня. Заполненными кружками обозначены результаты наших измерений [100], а пустыми ромбами – данные Томкин [89]. Стандартное отклонение значений «О-С» («observation – calculation», «наблюдаемое значение минус вычисленное значение») показано на нижнем графике Рисунка 14 и для всего набора данных составляет 0.97 км/с, а для наших измерений – 0.37 км/с. Наши данные гораздо лучше согласуются с орбитальной кривой благодаря усовершенствованию спектроскопических методов с 1980-х годов. Однако, несмотря на лучшее согласие, как наши данные, так и данные Томкин демонстрируют заметные отклонения RV-измерений от расчётной орбиты. Учитывая, что орбитальные элементы, полученные нами (Таблица 12), отлично согласуются с последними спекл-интерферометрическими данными [99], мы подозреваем, что эти отклонения обусловлены неопределённостями в орбитальном решении. Например, проверка оценок лучевых скоростей, полученных нами в течение самого длинного двухнедельного наблюдательного сета (с 22 января по 4 февраля 2007 года), показывает неожиданно высокий разброс данных – в несколько раз больше наблюдательных погрешностей. При просмотре Рисунка 14 можно

заподозрить возможное присутствие периодичности в отклонениях наблюдаемых лучевых скоростей от орбитальной кривой χ Дракона А, которая может находиться в пределах от нескольких дней до десятков дней. Аналогичную картину можно видеть на Figure 2 из [89]. Чтобы исследовать эту изменчивость, мы проанализировали остаточные лучевые скорости «О-С» из спектроскопического орбитального решения, полученного здесь для всех доступных RV-измерений.

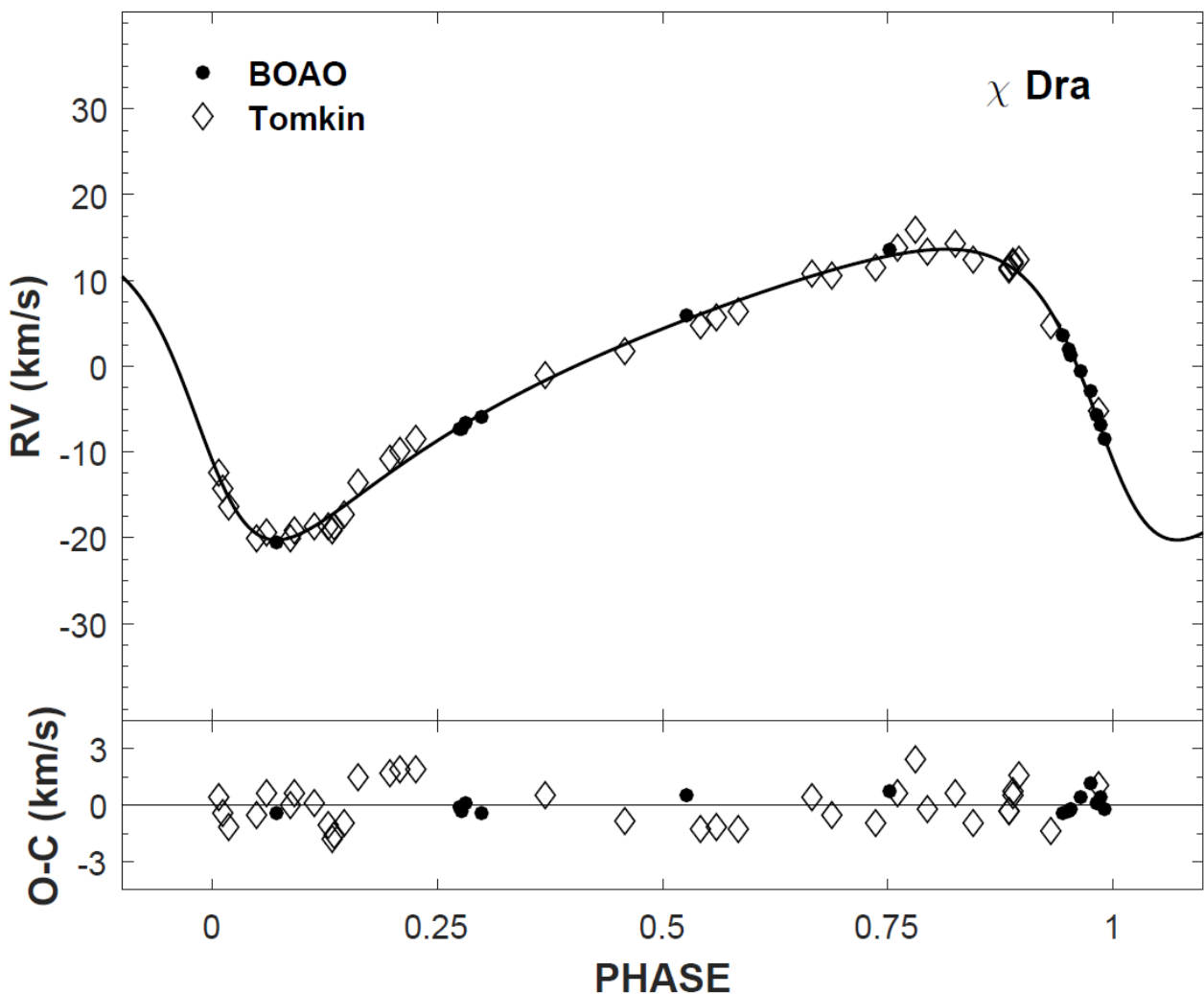


Рисунок 14. Верхняя панель: наблюдаемые лучевые скорости и модельная орбитальная кривая. Пустые ромбы – данные из работы Томкин. Заполненными кружками показаны наши данные. Нижняя панель: остаточные лучевые скорости (значения «О-С») после вычитания орбитальной кривой.

Спектр мощности Ломба-Скаргла [101,102] остаточных лучевых скоростей «О-С» представлен на Рисунке 15. Значительный пик на ~12 сутках показал наличие периодического сигнала. К сожалению, из-за сильной неоднородности данных очень длительной базы наблюдений (в десятки лет), и их недостаточного количества, мы не можем однозначно определить истинную периодичность в остаточных лучевых скоростях χ Дракона А. Для более надёжных выводов требуются дополнительные длительные спектральные наблюдения.

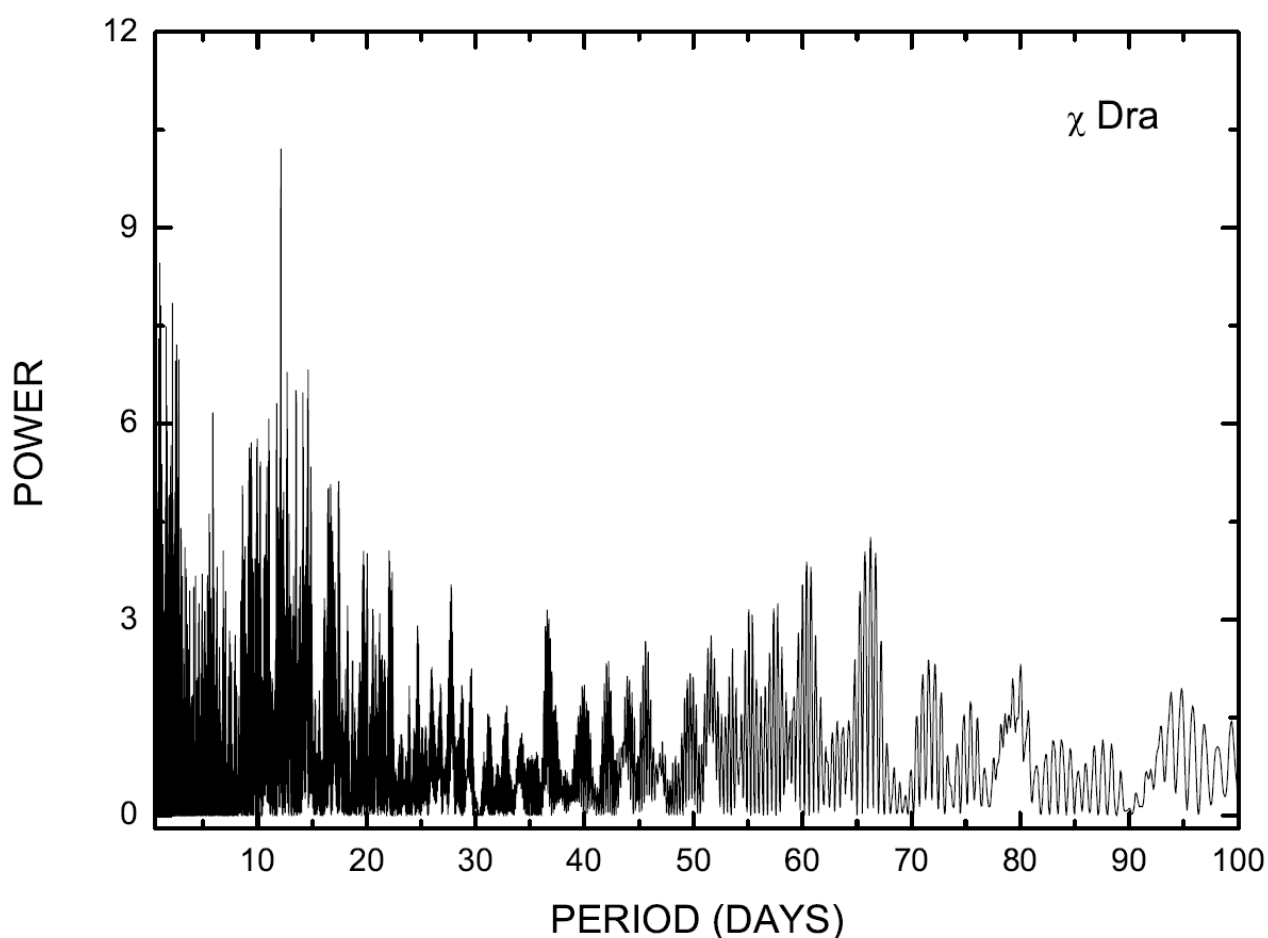


Рисунок 15. Спектр мощности остаточного изменения лучевых скоростей χ Дракона А.

Между тем, мы можем выделить и проиллюстрировать целый набор вероятных периодов, с которыми наблюдаются вполне осмысленные, «планетоподобные» изменения остаточных лучевых скоростей χ Дракона А.

Ниже, на Рисунке 16, мы приводим фазовые свёртки данных для нескольких таких возможных периодов.

5.3 Обсуждение результатов

Анализ новых данных звезды χ Дракона А, полученных при спектрополяриметрических наблюдениях высокого разрешения на телескопе ВАО, а также ранее опубликованных данных, показал наличие переменного продольного магнитного поля. В течение двух лет наблюдений поле периодически изменялось от -11.5 ± 1.5 Гс до $+5.2 \pm 1.5$ Гс с периодом $P = 23.39(9)$ дней.

Как обсуждалось в [89] и [92], звезда χ Дракона А – старая звезда с низкой массой и металличностью. Происхождение поля на χ Дракона А должно быть типичным для звёзд спектральных классов от позднего F до более холодных классов [103]. Для этих звёзд, как и для Солнца, магнитные поля сосредоточены в основном в локально генерируемых, динамически неустойчивых сильных магнитных трубках, которые видны как тёмные пятна на звёздных поверхностях. Эти пятна монотонно мигрируют с разной скоростью, давая вклад в изменение поля в дополнение к вращению. Найденный период $P = 23.39$ дней в принципе согласуется с типичными периодами вращения звёзд с аналогичными χ Дракона А массами, хотя он может быть немного дольше, чем ожидалось, исходя из измеренных нами напряжённостей продольного магнитного поля [104]. С этой точки зрения важно установить, действительно ли период вращения звезды составляет около 23 суток.

Чтобы прояснить ситуацию с вращением, мы проанализировали доплеровские ширины спектральных линий в спектре χ Дракона А. Для измерения прогнозируемой скорости вращения $v \cdot \sin(i)$ было выбрано несколько одиночных линий с малыми факторами Ланде. Путём моделирования профилей этих линий с использованием программ моделей атмосферы ATLAS/WIDTHS [86] был выведен $v \cdot \sin(i) \leq 3$ км/сек, что согласуется с оценкой $v \cdot \sin(i) = 2.5$ км/сек в

работе [91]. Отметим, что $v \cdot \sin(i) = 2.5$ км/сек с наклоном орбиты около 75° [89], и звёздным радиусом $1.2 R_\odot$ [92] даёт период вращения 23.5 дня, почти так же, как найденный период $P = 23.39$ суток.

Таким образом, мы считаем, что найденный 23.39-дневный период в основном связан с вращением звезды. Этот результат может также подразумевать существование долгоживущего (более чем несколько лет) глобального полоидального магнитного поля. В отличие от нестабильных магнитных полей звёзд солнечного типа, устойчивая полоидальная (скажем, дипольная) морфология поля предполагает, что мы можем видеть особый случай реликтового или генерируемого магнитного поля, возникшего и развивающегося в условиях двойной системы.

Лучевые скорости, измеренные у α Дракона А, демонстрируют систематические отклонения от орбитальной кривой. Несмотря на то, что измерения, представленные в настоящей работе, демонстрируют гораздо лучшее согласие с орбитальным решением, чем у предыдущих авторов, отклонения всё ещё существуют. Это, в принципе, может быть следствием дополнительного смещения линий из-за магнитной природы звезды. Например, магнитное поле с неоднородным распределением по поверхности звезды (в частности, если на поверхности звезды есть магнито-индуцированные пятна) может просто исказить общую симметрию спектральных линий. Вращательная модуляция форм таких искажённых профилей может, в свою очередь, вызывать «искусственные» RV-колебания. Однако период, обнаруженный при анализе остаточных лучевых скоростей, не согласуется с периодом вращения, оцененным с помощью спектрополяриметрических методов – Рисунок 16. И это весьма важный результат, который позволяет нам ограничить интерпретацию обнаруженной доплеровской переменности.

Итак, наши данные не могут исключить существование массивной планеты, вращающейся вокруг α Дракона А с коротким периодом. Более того, по результатам проведённых нами доплеровских исследований, такая возможность является весьма вероятной, поскольку независимо проведённые

магнитометрические наблюдения звезды исключают искусственную, «магнитную» природу переменности её остаточных лучевых скоростей. Мы всё ещё не можем исключить пульсационную природу обнаруженной переменности, но магнитометрические наблюдения её не подтверждают. Таким образом, мы можем говорить о новом кандидате в списке уже известных экзопланет. Также, принимая во внимание то обстоятельство, что система видна почти «с ребра», представляется разумным предложение начать проведение фотометрического мониторинга звезды для поиска глубокого, в 1-2%, транзита.

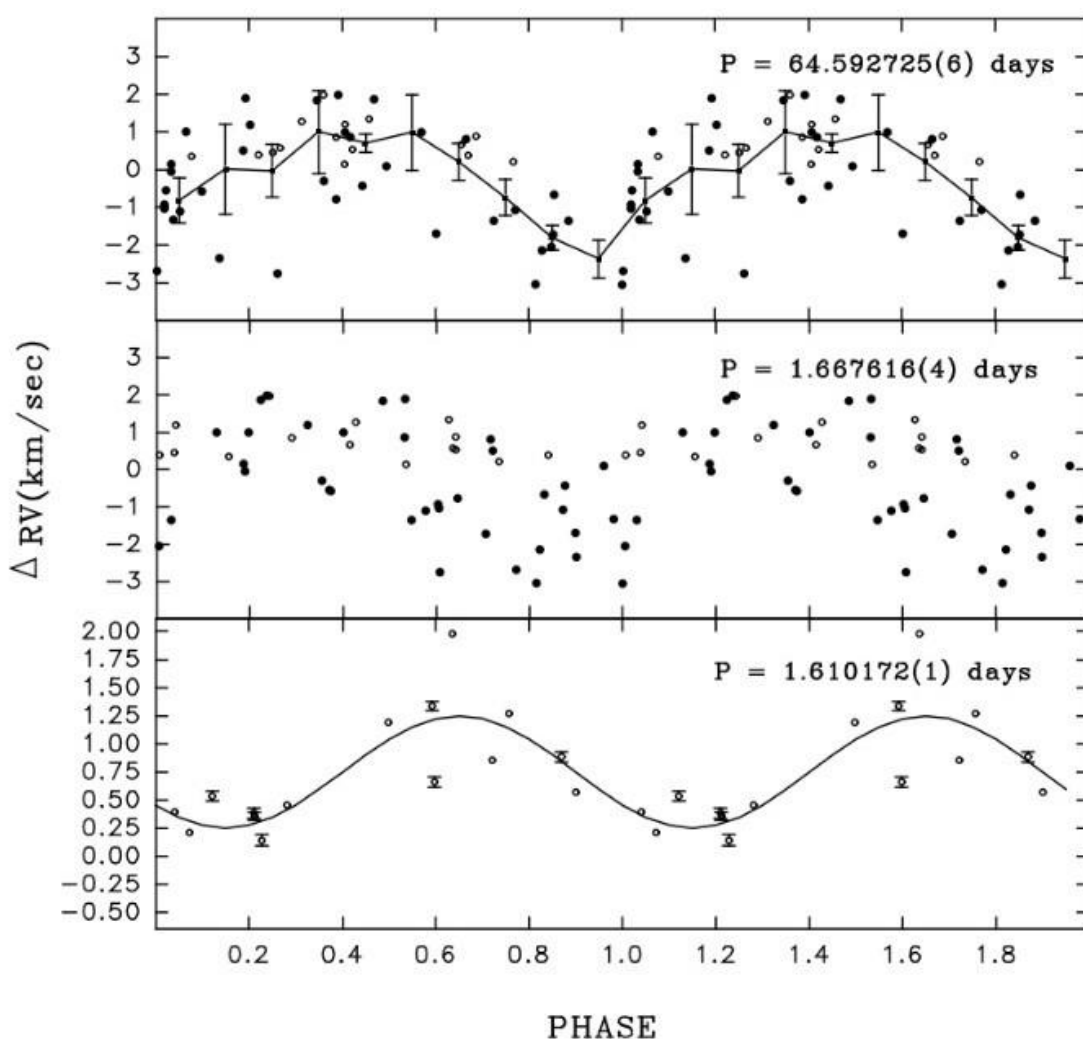


Рисунок 16. Остаточные лучевые скорости звезды ξ Дракона А после учёта всех известных факторов. Они демонстрируют колебания с двумя значениями периода – около 1.6 суток и 65 суток. Могут вызываться неизвестным третьим телом. Верхняя и средняя панели рисунка представляют собой все известные данные «О-С». Нижняя панель – данные с БОЕС.

Заключение

Основной целью данной диссертации являлось комплексное изучение экзопланетных систем. Для решения поставленных задач мы предприняли два типа анализа – фотометрический (главы 1-3) и спектроскопический (главы 4, 5). Для каждого направления исследования применялся индивидуальный подход, была выработана своя методическая система.

Ниже приводится общий список результатов и выводов диссертационной работы.

1) Первые в CAO РАН наблюдения транзитов горячих юпитеров WASP-43b и WASP-104b, проведенные в марте 2015 года, позволили оценить возможности фотометрических экзопланетных исследований с использованием российских телескопов метрового класса. Точность фотометрии звёзд до 13^m широкополосной системы Джонсона-Козинса составила величину около 0.3% от потока для индивидуальных измерений, и лучше для совокупных измерений. Это открывает широкую дорогу возможностей для проведения разнообразных фотометрических исследований экзопланет в CAO РАН и в других астрономических учреждениях России.

2) На основе алгоритма, разработанного другими авторами [118], нами была создана собственная компьютерная модель, позволяющая строить транзитные кривые экзопланет по заданным параметрам родительской звезды (радиуса, температуры и коэффициентам потемнения края в какой-либо полосе спектра) и самой планеты (радиуса, прицельного параметра орбиты и собственного теплового излучения). Эта модель может быть использована также для подгонки кривых транзита к данным реальных наблюдений для вычисления радиуса планеты в соответствующей спектральной полосе с высокой точностью.

3) Используя созданную модель, для горячих юпитеров WASP-33b, WASP-43b и WASP-104b по данным разных авторов мы построили 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 также является плоским от голубого до инфракрасного диапазонов, вплоть до длины волны 4.5 мкм, и это с учётом собственного теплового излучения на длинных волнах. Это дало нам возможность прямо измерить ночную температуру этой планеты из прямых транзитов, $T = 930 \text{ K}$, хотя обычно для измерения температуры поверхности планет используются модельно зависимые оценки из вторичных затмений. Для WASP-104b дана уточнённая оценка её радиуса в видимом диапазоне.

4) Результаты наземных фотометрических наблюдений транзитной экзопланеты HD 219134 b, проведённых на 1-метровом телескопе САО РАН, независимо подтверждают факт существования этой планеты. Глубина транзита в полосе U оказалась в среднем почти в 4 раза больше, чем в инфракрасной полосе 4.5 мкм телескопа «Спитцер», с помощью которого транзит впервые был обнаружен другими авторами. Этот результат свидетельствует в пользу существования обширной оболочки вокруг планеты, которая может быть непрозрачна (или частично прозрачна) в ближней ультрафиолетовой области. Результат является новым не только для российской астрофизики, но и для мировой.

5) В ходе проверки природы 4 транзитных кандидатов в экзопланеты, обнаруженных телескопом «Кеплер» было установлено, что они являются истинными планетами. Эти планеты обращаются вокруг звёзд KOI-974, KOI-2687, KOI-2706. Проверка осуществлялась методом измерения лучевых скоростей инструментом НЭС БТА. Спектры с высоким разрешением позволили также уточнить параметры родительских звёзд (радиуса, температуры и др.), что в свою очередь позволило получить оценку радиусов планет. Оказалось, что KOI-974b и KOI-2706b являются нептонами, а KOI-2687b и KOI-2687c – землеразмерными планетами. У звезды KOI-974 наблюдается дополнительный тренд, который может свидетельствовать о присутствии третьего массивного тела в системе – другой планеты или второго звёздного компонента.

б) Значения лучевых скоростей звезды хи Дракона А, полученные по данным 1.8-метрового телескопа корейской обсерватории, позволили уточнить характеристики орбиты двойной. Переменное зеемановское расщепление линий указывает на существование у звезды А магнитного поля. Также был определён период вращения звезды вокруг оси. При анализе остаточных лучевых скоростей в данной системе заподозрено наличие нового кандидата в массивные планеты.

Благодарности

Автор выражает большую благодарность научному руководителю Валявину Г. Г. за бесценный вклад в подготовку настоящей диссертации и приобретённый опыт работы в САО РАН.

Хотелось бы поблагодарить своих соавторов за значительную помощь в наших исследованиях: Валеева А. Ф., Марьеву О. В., Москвитина А. С., Семенко Е. А., Галазутдинова Г. А., Юшкина М. В., Бьён-Чол Ли, Инво Хана и других.

Также благодарю друзей и коллег за доброту и поддержку: Чмырёву Е. Г., Перекотиенко В. А., Граужанину А. О., Бескина Г. М., Уклеина Р. И., Кондрашёву Л. И., Винокурова А. С., Романюка И. И.

Спасибо моей маме, брату и невестке за помощь и поддержку всегда!

Литература

- [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
- [8] Засов, А. В., Постнов К. А. Общая астрофизика. // 2011, 2014, 2015, Изд. 3-е, исправленное и дополненное, Фрязино: Век 2
- [9] van de Kamp, P., 1986, Space Sci. Rev., 43, 211
- [10] Queloz, D., Mayor, M., Sivan, J. P., Kohler, D. et al. The Observatoire de Haute-Provence Search for Extrasolar Planets with ELODIE. // 1998, ASPC, 134, 324Q
- [11] Campbell, B., Walker, G. A. H., Yang, S. A search for substellar companions to solar-type stars. // 1988, ApJ, 331, 902C
- [12] Hatzes, A. P., Cochran, W. D., Endl, M., McArthur, B. et al. A Planetary Companion to γ Cephei A. // 2003, ApJ, 599, 1383H
- [13] Mayor, M., Queloz, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. // 1995, Nature, 378, 355M
- [14] Marcy, G. W., Butler, R. P. The Planet around 51 Pegasi. // 1995, AAS, 187, 7004M
- [15] Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. // 1979, Москва: Мир

- [16] Ida, S., Lin, D. N. C. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. I. A Desert in the Mass and Semimajor Axis Distributions of Extrasolar Planets. // 2004, ApJ, 604, 388I
- [17] Takeda, G., Kita, R., Rasio, F. A., Rubinstein, S. M. Secular Evolution of Planetary Systems in Binaries. // 2008, ASPC, 398, 209T
- [18] Nagasawa, M., Ida, S., Bessho, T. Formation of Hot Planets by a Combination of Planet Scattering, Tidal Circularization, and the Kozai Mechanism. // 2008, ApJ, 678, 498N
- [19] <http://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/>
- [20] <http://w.astro.berkeley.edu/~basri/defineplanet/IAU-WGExSP.htm>
- [21] Parker, R. J., Reggiani, M. M. The binary companion mass ratio distribution: an imprint of the star formation process? // 2013, MNRAS, 432, 2378P
- [22] Wright, J. T., Marcy, G. W., Howard, A. W., Johnson, J. A. et al. The Frequency of Hot Jupiters Orbiting nearby Solar-type Stars. // 2012, ApJ, 753, 160W
- [23] Wright, J. T., Gaudi, B. S. Exoplanet Detection Methods. // 2013, «Planets, Stars and Stellar Systems» book, 489W
- [24] Seager, S., Kuchner, M., Hier-Majumder, C. A., Militzer, B. Mass-Radius Relationships for Solid Exoplanets. // 2007, ApJ, 669, 1279S
- [25] Mazeh, T., Naef, D., Torres, G., Latham, D. W. et al. The Spectroscopic Orbit of the Planetary Companion Transiting HD 209458. // 2000, ApJ, 532, L55
- [26] Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S. A Transiting «51 Peg-like» Planet. // 2000, ApJ, 529L, 41H
- [27] Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. // 2000, ApJ, 529L, 45C
- [28] Bakos, G. A., Lazar, J., Papp, I., Sari, P., Green, E. M. System Description and First Light Curves of the Hungarian Automated Telescope, an Autonomous Observatory for Variability Search. // 2002, PASP, 114, 974B
- [29] Sahu, K. C., Casertano, S., Valenti, J., Bond, H. E. et al. Planets in the Galactic Bulge: Results from the SWEEPS Project. // 2008, ASPC, 398, 93S

- [30] Alonso, R., Brown, T. M., Torres, G., Latham, D. W. et al. TrES-1: The Transiting Planet of a Bright K0 V Star. // 2004, ApJ, 613L, 153A
- [31] Auvergne, M., Bodin, P., Boisnard, L., Buey, J.-T. et al. The CoRoT satellite in flight: description and performance. // 2009, A&A, 506, 411A
- [32] Twicken, J. D., Jenkins, J. M., Seader, S. E., Tenenbaum, P. et al. Detection of Potential Transit Signals in 17 Quarters of Kepler Data: Results of the Final Kepler Mission Transiting Planet Search (DR25). // 2016, AJ, 152, 158T
- [33] Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., Latham, D. W. et al. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). // 2014, SPIE, 9143E, 20R
- [34] Rauer, H., Catala, C., Aerts, C., Appourchaux, T. et al. The PLATO 2.0 mission. // 2014, ExA, 38, 249R
- [35] Stevenson, K. B., Lewis, N. K., Bean, J. L., Beichman, C. et al. Transiting Exoplanet Studies and Community Targets for JWST's Early Release Science Program. // 2016, PASP, 128i, 4401S
- [36] Greene, T. P., Line, M. R., Montero, C., Fortney, J. J. et al. Characterizing Transiting Exoplanet Atmospheres with JWST. // 2016, ApJ, 817, 17G
- [37] Marconi, A., Di Marcantonio, P., D'Odorico, V., Cristiani, S. et al. EELT-HIRES the high-resolution spectrograph for the E-ELT. // 2016, SPIE, 9908E, 23M
- [38] Pepe, F., Molaro, P., Cristiani, S., Rebolo, R. et al. ESPRESSO: The next European exoplanet hunter. // 2014, arXiv 1401.5918
- [39] Haghighipour, N. Super-Earths: a new class of planetary bodies. // 2011, ConPh, 52, 403H
- [40] Batalha, N. M., Rowe, J. F., Bryson, S. T., Barclay, T. et al. Planetary Candidates Observed by Kepler. III. Analysis of the First 16 Months of Data. // 2013, ApJS, 204, 24B
- [41] Leger, A., Selsis, F., Sotin, C., Guillot, T. et al. A new family of planets? «Ocean-Planets». // 2004, Icarus, 169, 499L
- [42] Kuchner, M. J., Seager, S. Extrasolar Carbon Planets. // 2005, arXiv 0504214
- [43] Weiss, L. M., Marcy, G. W. The Mass-Radius Relation for 65 Exoplanets Smaller than 4 Earth Radii. // 2014, ApJ, 783L, 6W

- [44] Rogers, L. A. Most 1.6 Earth-radius Planets are Not Rocky. // 2015, ApJ, 801, 41R
- [45] Miralda-Escude, J. Orbital Perturbations of Transiting Planets: A Possible Method to Measure Stellar Quadrupoles and to Detect Earth-Mass Planets. // 2002, ApJ, 564, 1019M
- [46] Hadden, S., Lithwick, Y. Kepler Planet Masses and Eccentricities from TTV Analysis. // 2017, AJ, 154, 5H
- [47] Burke, C. J., Christiansen, J. L., Mullally, F., Seader, S. et al. Terrestrial Planet Occurrence Rates for the Kepler GK Dwarf Sample. // 2015, ApJ, 809, 8B
- [48] Dressing, C. D., Charbonneau, D. The Occurrence of Potentially Habitable Planets Orbiting M Dwarfs Estimated from the Full Kepler Dataset and an Empirical Measurement of the Detection Sensitivity. // 2015, ApJ, 807, 45D
- [49] 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, AstBu, 70, 315V
- [50] Holman, M. J., Murray, N. W. The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial-Mass Extrasolar Planets. // 2005, Science, 307, 1288H
- [51] Hellier, C., Anderson, D. R., Collier, C. A., Gillon, M. et al. WASP-43b: the closest-orbiting hot Jupiter. // 2011, A&A, 535L, 7H
- [52] Street, R. A., Pollaco, D. L., Fitzsimmons, A., Keenan, F. P. et al. SuperWASP: Wide Angle Search for Planets. // 2003, ASPC, 294, 405S
- [53] Hartman, J. D., Bayliss, D., Brahm, R., Bakos, G. Á. et al. HATS-6b: A Warm Saturn Transiting an Early M Dwarf Star, and a Set of Empirical Relations for Characterizing K and M Dwarf Planet Hosts. // 2015, ApJ, 149, 166H
- [54] Gillon, M., Triaud, A. H. M., Fortney, J. J., Demory, B.-O. et al. The TRAPPIST survey of southern transiting planets. I. Thirty eclipses of the ultra-short period planet WASP-43 b. // 2012, A&A, 542A, 4G
- [55] Kreidberg, L., Bean, J. L., Desert, J.-M., Line, M. R. et al. A Precise Water Abundance Measurement for the Hot Jupiter WASP-43b. // 2014, ApJ, 793L, 27K

- [56] Smith, A. M. S., Anderson, D. R., Armstrong, D. J., Barros, S. C. C. et al. WASP-104b and WASP-106b: two transiting hot Jupiters in 1.75-day and 9.3-day orbits. // 2014, *A&A*, 570A, 64S
- [57] 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*, 70, 318V
- [58] Huber, K. F., Czesla, S., Wolter, U., Schmitt, J. H. M. M. Planetary eclipse mapping of CoRoT-2a. Evolution, differential rotation, and spot migration. // 2010, *A&A*, 514A, 39H
- [59] Sanchis-Ojeda, R., Winn, J. N., Fabrycky, D. C. Starspots and spin-orbit alignment for Kepler cool host stars. // 2013, *Astronomische Nachrichten*, 334, 180S
- [60] Sanchis-Ojeda, R., Winn, J. N., Marcy, G. W., Howard, A. W. et al. Kepler-63b: A Giant Planet in a Polar Orbit around a Young Sun-like Star. // 2013, *ApJ*, 775, 54S
- [61] Motalebi, F., Udry, S., Gillon, M., Lovis, C. et al. The HARPS-N Rocky Planet Search. I. HD 219134 b: A transiting rocky planet in a multi-planet system at 6.5 pc from the Sun. // 2015, *A&A*, 584A, 72M
- [62] Bétrémieux, Y., Kaltenegger, L. Transmission Spectrum of Earth as a Transiting Exoplanet from the Ultraviolet to the Near-infrared. // 2013, *ApJ*, 772L, 31B
- [63] Vogt, S. S., Burt, J., Meschiari, S., Butler, R. P. et al. Six Planets Orbiting HD 219134. // 2015, *ApJ*, 814, 12V
- [64] Gillon, M., Demory, B.-O., Van Grootel, V., Motalebi, F. et al. Two massive rocky planets transiting a K-dwarf 6.5 parsecs away. // 2017, *Nature Astronomy*, 1E, 56G
- [65] Rappaport, S., Levine, A., Chiang, E., El Mellah, I. et al. Possible Disintegrating Short-period Super-Mercury Orbiting KIC 12557548. // 2012, *ApJ*, 752, 1R
- [66] Lammer, H., Erkaev, N. V., Odert, P., Kislyakova, K. G. et al. Probing the blow-off criteria of hydrogen-rich «super-Earths». // 2013, *MNRAS*, 430, 1247L
- [67] Kislyakova, K. G., Johnstone, C. P., Odert, P., Erkaev, N. V. et al. Stellar wind interaction and pick-up ion escape of the Kepler-11 «super-Earths». // 2014, *A&A*, 562A, 116K

- [68] Ehrenreich, D., Bourrier, V., Bonfils, X., Lecavelier des Etangs, A. et al. Hint of a transiting extended atmosphere on 55 Cancri b. // 2012, A&A, 547A, 18E
- [69] Ehrenreich, D., Bourrier, V., Wheatley, P. J., Lecavelier des Etangs, A. et al. A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b. // 2015, Nature, 522, 459E
- [70] Burdanov, A. Y., Benni, P., Krushinsky, V. V. et al. First results of the Kourovka Planet Search: discovery of transiting exoplanet candidates in the first three target fields. // 2016, MNRAS, 461, 3854B
- [71] Morton, T. D., Johnson, J. A. On the Low False Positive Probabilities of Kepler Planet Candidates. // 2011, ApJ, 738, 170M
- [72] Gadelshin, D. R., Valyavin, G. G., Yushkin, M. V., Semenko, E. A. et al. Exoplanet studies. Spectroscopic confirmation of photometric exoplanet candidates discovered by the «Kepler» mission. // 2017, AstBu, Vol. 72, No. 3
- [73] Borucki, W. J. KEPLER Mission: development and overview. // 2016, Reports on Progress in Physics, Volume 79, Issue 3, article id. 036901
- [74] Jenkins, J. M., Caldwell, D. A., Chandrasekaran, H., Twicken, J. D. et al. Overview of the Kepler Science Processing Pipeline. // 2010, ApJ, 713L, 87J
- [75] Sokov, E. N., Sokova, I. A., Dyachenko, V. V., Rastegaev, D. A. et al. Transit timing analysis of the exoplanet TrES-5 b. Possible existence of the exoplanet TrES-5 c. // 2018, MNRAS, 1543S
- [76] V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, Preprint No.179, SAO RAS (Special Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2003)
- [77] V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, J. Optical Technology 76, 42 (2009)
- [78] Mathur, S., Huber, D., Batalha, N. M., Ciardi, D. R. et al. Revised Stellar Properties of Kepler Targets for the Q1-17 (DR25) Transit Detection Run. // 2017, ApJS, 229, 30M
- [79] Baranec, C., Ziegler, C., Law, N. M., Morton, T. et al. Robo-AO Kepler Planetary Candidate Survey. II. Adaptive Optics Imaging of 969 Kepler Exoplanet Candidate Host Stars. // 2016, AJ, 152, 18B

- [80] <http://www.sao.ru/hq/ssl/sdev/NES.html>
- [81] V. E. Panchuk, D. S. Nasonov, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* 64, 286 (2009)
- [82] V. G. Yushkin and M. V. Klochkova, Preprint №206, SAO RAS (Special *Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz*, 2005)
- [83] Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., Weiss W. W., Jeffery C. S., 1995, *A&AS*, 112, 525
- [84] Kupka, F., Piskunov, N., Ryabchikova, T. A., Stempels H. C., Weiss W. W., 1999, *A&AS*, 138, 119
- [85] Monin, D. N., Fabrika, S. N., Valyavin, G. G., 2002, *A&A*, 396, 131
- [86] R. Kurucz, *ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s Grid*. CD-ROM № 13 (Smithsonian *Astrophys. Obs.*, Cambridge, 1993)
- [87] Molenda-Zakowicz, J., Sousa, S. G., Frasca, A., Uytterhoeven, K. et al. Atmospheric parameters of 169 F-, G-, K- and M-type stars in the Kepler field. // 2013, *MNRAS*, 434, 1422M
- [88] Campbell, W. W., 1898, *ApJ*, 8, 292
- [89] Tomkin, J., McAlister, H. A., Hartkopf, W. I., Fekel, F. C. The orbit of the speckle and double-lined spectroscopic binary CHI Draconis. // 1987, *AJ*, 93, 1236T
- [90] Schoeller, M., Balega, I. I., Balega, Y. Y., Hofmann, K.-H. et al. Diffraction-limited speckle masking interferometry of binary stars with the SAO 6-m telescope. // 1998, *AstL*, 24, 283S
- [91] Gray, D. F. Measurements of rotation and turbulence in F, G, and K dwarfs. // 1984, *ApJ*, 281, 719G
- [92] Torres, G., Andersen, J., Gimenez, A. Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications. // 2010, *A&ARv*, 18, 67
- [93] Bevington P.R., 1969, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, McGraw-Hill, New York
- [94] Kim, K.-M., Han, I., Valyavin, G. G., Plachinda, S. et al. 2007, *PASP*, 119, 1052
- [95] <http://gazinur.com/DECH-software.html>

- [96] Kang, D.-I., Park, H.-S., Han, I., Valyavin, G. et al. 2005, Publication of the Korean Astronomical Society, 20, 97
- [97] Kang, D.-I., Park, H.-S., Han, I., Valyavin, G. et al. 2006, Publications of the Korean Astronomical Society, 21, 101
- [98] Ryabchikova T. A., Piskunov N. E., Stempels H. C., Kupka F., Weiss W. W., 1999, in the 6th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths, Victoria BC, Canada, 1998, Physica Scripta, T83, 162
- [99] Farrington, C. D., ten Brummelaar, T. A., Mason, B. D., Hartkopf, W. I. et al. Separated Fringe Packet Observations with the CHARA Array. I. Methods and New Orbits for χ Draconis, HD 184467, and HD 198084. // 2010, AJ, 139, 2308F
- [100] Lee, B.-C., Gadelshin, D. R., Han, I., Kang, D.-I., Kim, K.-M. et al. Magnetic field and radial velocities of the star Chi Draconis A. // 2018, MNRAS, 473L, 41L
- [101] Lomb, N. R., 1976, ApSS, 39, 447
- [102] Scargle, J. D., 1982, ApJ, 263, 835
- [103] Reiners, A. Observations of Cool-Star Magnetic Fields. // 2012, LRSP, 9, 1R
- [104] Marsden, S. C., Petit, P., Jeffers, S. V., Morin, J. et al. A BCool magnetic snapshot survey of solar-type stars. // 2014, MNRAS, 444, 3517M
- [105] Hsu, D. C., Ford, E. B., Ragozzine, D., Morehead, R. C. Improving the Accuracy of Planet Occurrence Rates from Kepler Using Approximate Bayesian Computation. // 2018, AJ, 155, 205H
- [106] 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
- [107] Seager, S., Deming, D. Exoplanet Atmospheres. // 2010, ARA&A, 48, 631S
- [108] Sing, D. K., Fortney, J. J., Nikolov, N., Wakeford, H. R. et al. A continuum from clear to cloudy hot-Jupiter exoplanets without primordial water depletion. // 2016, Nature, 529, 59S
- [109] Spake, J. J., Sing, D. K., Evans, T. M., Oklopčić, A. et al. Helium in the eroding atmosphere of an exoplanet. // 2018, Accepted in Nature, arXiv 1805.01298

- [110] Parmentier, V., Fortney, J. J., Showman, A. P., Morley, C., Marley, M. S. Transitions in the Cloud Composition of Hot Jupiters. // 2016, ApJ, 828, 22P
- [111] Palle, E., Chen, G., Prieto-Arranz, J., Nowak, G. et al. Feature-rich transmission spectrum for WASP-127b. Cloud-free skies for the puffiest known super-Neptune? // 2017, A&A, 602L, 15P
- [112] Madhusudhan, N., Knutson, H., Fortney, J. J., Barman, T. Exoplanetary Atmospheres. // 2014, Protostars and Planets VI conference, 739M, arXiv 1402.1169
- [113] Zhou, G., Bakos, G. A., Hartman, J. D., Latham, D. W. et al. HAT-P-67b: An Extremely Low Density Saturn Transiting an F-subgiant Confirmed via Doppler Tomography. // 2017, AJ, 153, 211Z
- [114] <https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/CCD/>
- [115] Valeev, A. F., Antonyuk, K. A., Pit, N. V., Moskvitin, A. S. et al. Search for and study of photometric variability in magnetic white dwarfs. // 2017, AstBu, 72, 44V
- [116] Sokov, E. N., Vereshchagina, I. A., Gnedin, Yu. N., Devyatkin, A. V. et al. Observations of extrasolar planet transits with the automated telescopes of the Pulkovo Astronomical Observatory. // 2012, AstL, 38, 180S
- [117] Barstow, J. K., Irwin, P. G. J. Habitable worlds with JWST: transit spectroscopy of the TRAPPIST-1 system? // 2016, MNRAS, 461L, 92B
- [118] Southworth, J. Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - I. Light-curve analyses. // 2008, MNRAS, 386, 1644S
- [119] Claret, A., Bloemen, S. Gravity and limb-darkening coefficients for the Kepler, CoRoT, Spitzer, uvby, UBVRIJHK, and Sloan photometric systems. // 2011, A&A, 529A, 75C
- [120] Collier Cameron, A., Guenther, E., Smalley, B., McDonald, I. et al. Line-profile tomography of exoplanet transits - II. A gas-giant planet transiting a rapidly rotating A5 star. // 2010, MNRAS, 407, 507C
- [121] Lehmann, H., Guenther, E., Sebastian, D., Döllinger, M. et al. Mass of WASP-33b. // 2015, A&A, 578L, 4L

- [122] Smith, A. M. S., Anderson, D. R., Skillen, I., Collier Cameron, A., Smalley, B. Thermal emission from WASP-33b, the hottest known planet. // 2011, MNRAS, 416, 2096S
- [123] Deming, D., Fraine, J. D., Sada, P. V., Madhusudhan, N. et al. Infrared Eclipses of the Strongly Irradiated Planet WASP-33b, and Oscillations of Its Host Star. // 2012, ApJ, 754, 106D
- [124] de Mooij, E. J. W., Brogi, M., de Kok, R. J., Snellen, I. A. G. et al. The GROUSE project. III. Ks-band observations of the thermal emission from WASP-33b. // 2013, A&A, 550A, 54D
- [125] von Essen, C., Mallonn, M., Albrecht, S., Antoci, V. et al. A temperature inversion in WASP-33b? Large Binocular Telescope occultation data confirm significant thermal flux at short wavelengths. // 2015, A&A, 584A, 75V
- [126] Turner, J. D., Pearson, K. A., Biddle, L. I., Smart, B. M. et al. Ground-based near-UV observations of 15 transiting exoplanets: constraints on their atmospheres and no evidence for asymmetrical transits. // 2016, MNRAS, 459, 789T
- [127] Kovács, G., Kovács, T., Hartman, J. D., Bakos, G. Á. et al. Comprehensive time series analysis of the transiting extrasolar planet WASP-33b. // 2013, A&A, 553A, 44K
- [128] Sada, P. V., Deming, D., Jennings, D. E., Jackson, B. K. et al. Extrasolar Planet Transits Observed at Kitt Peak National Observatory. // 2012, PASP, 124, 212S
- [129] <http://var2.astro.cz/ETD/>
- [130] Cauley, P. W., Redfield, S., Jensen, A. G. Evidence for Abnormal H α Variability During Near-transit Observations of HD 189733 b. // 2017, AJ, 153, 185C
- [131] von Essen, C., Czesla, S., Wolter, U., Breger, M. et al. Pulsation analysis and its impact on primary transit modeling in WASP-33. // 2014, A&A, 561A, 48V
- [132] Cauley, P. W., Redfield, S., Jensen, A. G. A Decade of H α Transits for HD 189733 b: Stellar Activity versus Absorption in the Extended Atmosphere. // 2017, AJ, 153, 217C
- [133] Grauzhanina, A. O., Valyavin, G. G., Gadelshin, D. R., Baklanova, D. N. et al. Spectroscopic observations of the exoplanet WASP-32b transit. // 2017, AstBu, 72, 67G

- [134] Stevenson, K. B., Line, M. R., Bean, J. L., Désert, J.-M. et al. Spitzer Phase Curve Constraints for WASP-43b at 3.6 and 4.5 μm . // 2017, AJ, 153, 68S
- [135] Murgas, F., Pallé, E., Zapatero Osorio, M. R., Nortmann, L. et al. The GTC exoplanet transit spectroscopy survey . I. OSIRIS transmission spectroscopy of the short period planet WASP-43b. // 2014, A&A, 563A, 41M
- [136] Chen, G., van Boekel, R., Wang, H., Nikolov, N. et al. Broad-band transmission spectrum and K-band thermal emission of WASP-43b as observed from the ground. // 2014, A&A, 563A, 40C
- [137] Močnik, T., Hellier, C., Southworth, J. WASP-104b is Darker than Charcoal. // Submitted to AJ, arXiv 1804.05334
- [138] Mulders, G. D., Pascucci, I., Apai, D., Ciesla, F. J. The Exoplanet Population Observation Simulator. I - The Inner Edges of Planetary Systems. // 2018, Accepted in AAS journals, arXiv 1805.08211
- [139] Henning, W. G., Renaud, J. P., Saxena, P., Whelley, P. L. et al. Highly Volcanic Exoplanets, Lava Worlds, and Magma Ocean Worlds: An Emerging Class of Dynamic Exoplanets of Significant Scientific Priority. // 2018, A white paper submitted in response to the National Academy of Sciences 2018 Exoplanet Science Strategy solicitation, from the NASA Sellers Exoplanet Environments Collaboration (SEEC) of the Goddard Space Flight Center, arXiv 1804.05110
- [140] Crida, A., Ligi, R., Dorn, C., Lebreton, Y. Mass, radius, and composition of the transiting planet 55 Cnc e: using interferometry and correlations. // 2018, Accepted for publication in ApJ, arXiv 1804.07537
- [141] Bochinski, J. J., Haswell, C. A., Marsh, T. R., Dhillon, V. S., Littlefair, S. P. Direct Evidence for an Evolving Dust Cloud from the Exoplanet KIC 12557548 b. // 2015, ApJ, 800L, 21B
- [142] <http://astrometry.net>
- [143] Lafler, J., Kinman, T. D. An RR Lyrae Star Survey with the Lick 20-INCH Astrograph II. The Calculation of RR Lyrae Periods by Electronic Computer. // 1965, ApJS, 11, 216L

[144] Pepper, J., Stassun, K., Gaudi, B. S. KELT: The Kilodegree Extremely Little Telescope, a Survey for Exoplanets Transiting Bright, Hot Stars. // 2018, arXiv 1802.10158

[145] Armitage, P. J. Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems. // 2007, arXiv 0701485