

На правах рукописи

Бурданов Артем Юрьевич

**Результаты поиска кандидатов в транзитные
экзопланеты на телескопе МАСТЕР-II-Урал
Коуровской астрономической обсерватории**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина"

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, доцент,
КУЗНЕЦОВ Эдуард Дмитриевич

Официальные оппоненты:

РУДНИЦКИЙ Георгий Михайлович,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоастрономии,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского
государственного университета им. М. В. Ломоносова

КОПАЦКАЯ Евгения Николаевна,
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии
математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного
университета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
астрономии Российской академии наук

Защита диссертации состоится 27 ноября 2015 года в 11 час. 15 мин. на
заседании диссертационного совета Д.002.120.01 Главной (Пулковской)
астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН), по
адресу:
196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО
РАН (www.gao.spb.ru).

Автореферат разослан "___" _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милецкий Евгений Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Открытие и исследование планет вне Солнечной системы (экзопланет) — это одна из наиболее активно развивающихся областей современной астрономии. Всего за 20 лет, прошедших с момента первого обнаружения экзопланеты около звезды солнечного типа [1], было открыто несколько тысяч внесолнечных планет у звезд различных типов [2]. Сделанные открытия выявили большое разнообразие наблюдаемых параметров внесолнечных систем и их родительских звезд, таких как масса и период обращения экзопланеты, эксцентриситет, большая полуось и наклонение орбиты экзопланеты к оси вращения звезды, масса, блеск и металличность родительской звезды.

Из 1900 экзопланет, известных к началу 2015 г., около 1200 являются транзитными. В случае транзитных внесолнечных планет родительская звезда, экзопланета и наблюдатель расположены таким образом, что для наблюдателя на Земле периодически происходит как прохождение экзопланеты по диску звезды (транзит), так и ее покрытие звездой. Регистрируемое падение блеска звезды при транзите экзопланеты зависит от размеров планеты и родительской звезды. При прохождении по диску звезды солнечного типа экзопланеты с земными размерами соответствующее падение блеска (глубина транзита) составит порядка $0^m.001$. При транзитах газовых гигантов падение блеска будет порядка $0^m.01$ [3]. При известном радиусе звезды метод транзитной фотометрии позволяет определить размеры внесолнечной планеты. Одним из главных результатов, получаемых из транзитной кривой блеска, является наклонение орбиты экзопланеты i . Это значение дает возможность узнать истинную массу экзопланеты M_p , устранив неопределенность в значении $M_p \sin i$, получаемом методом лучевых скоростей. Зная массу экзопланеты и ее размер, можно определить среднюю плотность экзопланеты и тем самым провести ее классификацию.

Уже открытые внесолнечные планеты и их первичное распределение по типам (железо-каменные, ледяные, газовые экзопланеты) — это лишь ”верхушка айсберга”, к тому же обремененная эффектами селекции каждого из методов поиска. Так, если хотя бы 10% звезд солнечного типа обладают массивными, схожими с Юпитером планетами и 3% имеют землеподобные планеты, то общее число экзопланет в нашей Галактике можно оценить в миллиарды [3, 4].

Некоторые из аспектов формирования и эволюции внесолнечных планет (например, рост частиц размером в несколько сантиметров до планетезималей размером в 1 км) остаются не до конца понятыми [5]. Но сейчас становится возможным рассмотрение экзопланет как популяции, которая ставит статистические ограничения на теоретические модели формирования внесолнечных планет. Поэтому каждая новая открытая экзопланета с надежно опре-

деленными характеристиками будет увеличивать эту популяцию и вносить вклад в развитие планетного популяционного синтеза — метода, в котором синтетические популяции экзопланет сравниваются с наблюдаемыми [6].

Вместе с тем, поиск новых транзитных экзопланет необходим и для определения более точной границы между поздними карликами спектрального класса M ($M \approx 80M_J$, где M_J — масса Юпитера), коричневыми карликами ($13M_J < M < 80M_J$) и планетами газовыми гигантами ($M \approx 13M_J$), так как все эти объекты имеют схожие размеры.

Помимо прочего, уже в настоящее время могут исследоваться атмосферы транзитных экзопланет типа ”горячий юпитер” [7]. Вероятнее всего, с развитием наблюдательных технологий вскоре будет возможным выявление биомаркеров в атмосферах экзопланет, находящихся в зонах обитаемости своих родительских звезд. В конечном итоге это позволит выяснить, существуют ли проявления известной нам жизни за пределами Земли.

Кроме того, открытие новых транзитных экзопланет с помощью фотометрических обзоров неба будет неизбежно сопровождаться обнаружением большого числа новых переменных звезд. Переменные звезды дают возможность изучать не только основные характеристики звезд, но и их строение и эволюцию. Они также важны для исследования строения и эволюции различных звездных систем и позволяют определять расстояние до них.

Цель диссертационной работы

1) организация и проведение фотометрического обзора с помощью телескопа МАСТЕР–II–Урал Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета с целью поиска кандидатов в транзитные экзопланеты типа ”горячий юпитер” в диапазоне блеска родительских звезд от 11^m до 14^m в фильтре R;

2) создание системы обработки и анализа фотометрических данных, позволяющей регистрировать и находить периодические падения блеска звезд в $0^m01 - 0^m02$ в длинных неравномерных рядах фотометрических данных;

3) организация дополнительных наблюдений открытых кандидатов в транзитные экзопланеты с последующим анализом наблюдательных данных.

Научная новизна

Большинство наземных фотометрических обзоров, направленных на поиск транзитных экзопланет типа ”горячий юпитер”, не имеют возможности уверенно регистрировать транзиты у родительских звезд слабее 13^m0 в полосе R. Телескоп МАСТЕР–II–Урал (400 мм f/2.5) обладает оптимальными параметрами для поиска таких планет у родительских звезд от 11^m0 до 14^m0 . Ожидаемая при этом глубина транзита составляет около $0^m01 - 0^m02$ и может регистрироваться с точностью порядка 0^m001 . Масштаб изображения $1''8$ /пиксель позволяет наблюдать с высокой фотометрической точностью области неба с большой концентрацией звезд, расположенные в плоскости Галактики. Существующие наземные широкопольные обзоры, как правило,

избегают плотных участков плоскости Галактики во избежание ”слипания” звезд и сопутствующих сложностей фотометрической обработки. Поэтому телескоп МАСТЕР–II–Урал был использован для проведения Коуровского Поиска Планет — Kourovka Planet Search (KPS). На данный момент, обзор KPS является единственным проектом широкопольного поиска транзитных экзопланет, организованным на территории России.

В рамках обзора KPS в период с 2012 г. по 2014 г. впервые были проведены наблюдения двух областей Млечного Пути размером $2^\circ \times 2^\circ$. Основной наблюдательный массив данных составляют 8000 кадров в фильтре R, полученные за 80 наблюдательных ночей. В результате было найдено 3 кандидата в экзопланеты с глубинами транзита около 0^m02 и периодом обращения около 1^d и 400 новых переменных звезд из 38000 фотометрируемых звезд. Проведены дополнительные фотометрические, спектральные и спекл-интерферометрические наблюдения найденных кандидатов в транзитные экзопланеты, которые оказались астрофизическими ложноположительными кандидатами (вероятнее всего, затмевающие тела не имеют планетной природы).

Практическая значимость

Созданная система обработки и анализа данных уже используется для обработки любых фотометрических наблюдений, получаемых на телескопе МАСТЕР–II–Урал. Система может быть использована и для обработки данных, полученных на других телескопах. Так, в результате обработки 7000 кадров, полученных в фильтре R в любительской обсерватории Acton Sky Portal (США) с помощью телескопа Rowe-Ackermann Schmidt Astrograph (279 мм $f/2.2$), был найден еще один кандидат в транзитные экзопланеты с глубиной транзита около 0^m01 и периодом обращения около 1^d7 .

Полученный длинный ряд фотометрических данных звезд поля может использоваться для дальнейшего изучения избранных объектов.

Результаты, выносимые на защиту:

1) система обработки и анализа длинных рядов фотометрических данных, позволяющая регистрировать и находить периодические падения блеска звезд в $0^m01 - 0^m02$. В потоковом режиме система выполняет процедуры фотометрической калибровки кадров в пакете IRAF [8], создания WCS-шапки в пакете Astrometry.net [9], апертурной фотометрии в пакете IRAF и дифференциальной фотометрии в разработанной программе Astrokit [10]. Дифференциальная фотометрия звезд поля выполняется с помощью индивидуальных ансамблей опорных звезд сравнения, которые близки по блеску и положению на кадре. При использовании десяти и более опорных звезд в ансамбле становится неважным различие их спектральных классов и спектрального класса изучаемого объекта;

2) результаты анализа дополнительных фотометрических, спектральных и спекл-интерферометрических наблюдений найденных кандидатов в транзитные экзопланеты; Показано, что вероятнее всего, открытые канди-

даты в экзопланеты являются представителями самых распространенных типов астрофизических ложноположительных кандидатов — объектов, кривые блеска которых имитируют наличие транзитной внесолнечной планеты, обращающейся вокруг родительской звезды;

3) список открытых переменных звезд; было найдено около 400 ранее неизвестных переменных звезд, в том числе одна вспышка карликовой Новой звезды USNO-B1.0 1413-0363790 [11].

Степень достоверности и апробация работы

Научные результаты и выводы, полученные в работе, достоверны, так как основаны на наблюдательных данных высокого качества и современных апробированных методиках обработки и анализа данных. Сравнение полученных результатов с опубликованными результатами других проектов по поиску транзитных экзопланет показывает общую согласованность, что также является подтверждением достоверности полученных результатов.

Результаты работы обсуждались на объединенных научных семинарах кафедры астрономии и геодезии и Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета, а также были представлены на следующих научных конференциях:

— 41-я Международная студенческая научная конференция "Физика космоса", Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 30 января–03 февраля 2012 г.;

— 2012 Sagan Exoplanet Summer Workshop "Working with Exoplanet Light Curves", NASA Exoplanet Science Institute, Pasadena, 23–27 July 2012;

— "20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics", National Shevchenko University of Kyiv, Ukraine, Kyiv, 22–27 April, 2013;

— Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике "Физические процессы в космосе и околоземной среде" / XIII Конференция молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом", Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 9–14 сентября 2013 г.;

— 5-я Пулковская молодежная астрономическая конференция, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 09–11 июня 2014 г.;

Личный вклад автора

Автором работы рассмотрены основные источники ошибок, влияющие на результирующую точность дифференциальной апертурной ПЗС-фотометрии как на этапе получения данных, так и на этапе постобработки. На телескопе МАСТЕР–II–Урал проведены наблюдения транзитов известных экзопланет с точностью не хуже 0^m007 и глубиной транзита порядка 0^m01 .

Автором организован и проведен фотометрический обзор с помощью телескопа МАСТЕР–II–Урал с целью поиска новых транзитных внесолнечных планет. Выполнен отбор наблюдательных площадок и планирование ро-

ботизированных наблюдений. Создана система обработки и анализа фотометрических данных, которая позволяет регистрировать и находить периодические падения блеска звезд $0^m01 - 0^m02$ в длинных неравномерных рядах данных. На основании полученных данных осуществлен поиск кандидатов в транзитные экзопланеты и новых переменных звезд.

В целях подробного исследования характеристик обнаруженных кандидатов организованы их дополнительные наблюдения. Проведены дополнительные фотометрические наблюдения найденных кандидатов на телескопе МАСТЕР-II-Урал. Выполнена фотометрическая обработка наблюдательных данных, полученных на других телескопах. Произведен анализ результатов спектральных и спекл-интерферометрических наблюдений открытых кандидатов в транзитные экзопланеты.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников (93 наименования) и одного приложения. Объем работы составляет 116 страниц машинописного текста, включая приложение, список литературы, 42 рисунка и 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение содержит основные цели диссертационной работы, обоснование ее актуальности, научной новизны и практической значимости. Также приведены положения, выносимые на защиту, публикации по результатам работы, список конференций и семинаров, где проходила апробация работы. Рассматривается личный вклад автора, структура, объем и содержание диссертации.

Глава 1 посвящена общему обзору основных методов поиска внесолнечных планет.

В *разделе 1.1* более детально рассмотрен спектральный метод поиска экзопланет (метод лучевых скоростей). Метод основан на регистрации периодических изменений лучевой скорости звезды при ее движении по эллиптической орбите вокруг центра масс системы звезда–экзопланета. Отмечено, что этот метод чувствителен к массивным экзопланетам на близких эксцентричных орбитах около маломассивных звезд. Данным фактом объясняется наблюдательный эффект селекции, в результате которого сначала были найдены только “горячие юпитеры” — массивные внесолнечные планеты на близких орбитах. Метод позволяет оценить только минимальную массу экзопланет $M_p \sin i$ у ярких звезд с достаточным количеством линий в спектре.

В *разделе 1.2* представлен самый успешный метод поиска экзопланет — метод транзитной фотометрии, основанный на регистрации изменения потока излучения от родительской звезды во время прохождения экзопланеты по ее диску. Рассмотрены существующие и запланированные проекты по поиску транзитных экзопланет. Подраздел 1.2.1 посвящен физическим характеристикам системы звезда–экзопланета, которые возможно получить из транзитной кривой блеска. Отмечено, что методы транзитной фотометрии и лучевых скоростей взаимодополняемы. Одним из главных результатов, получаемых из транзитной кривой блеска, является наклонение орбиты экзопланеты i . Это значение позволяет узнать истинную массу экзопланеты M_p , устранив неопределенность в значении $M_p \sin i$, получаемом методом лучевых скоростей. Зная массу экзопланеты и ее размер, становится возможным определить среднюю плотность экзопланеты и провести классификацию планетного объекта. В подразделе 1.2.2 обсуждается вероятность наблюдения транзита экзопланеты, которая в случае круговой орбиты определяется как R_*/a , где a — большая полуось орбиты экзопланеты, R_* — радиус звезды.

Глава 2 посвящена наблюдениям и методам обработки данных, полученных в рамках обзора по поиску транзитных экзопланет Kourouka Planet Search.

Раздел 2.1 содержит технические характеристики и описание телескопа МАСТЕР–II–Урал, который использовался для проведения обзора.

В *разделе 2.2* обсуждается ожидаемое отношение сигнал/шум при наблюдениях транзитов экзопланет с использованием инструмента с конкретными характеристиками. Телескоп МАСТЕР–II–Урал обладает параметрами, делающими возможным поиск транзитных внесолнечных планет типа ”горячий юпитер” в диапазоне родительских звезд от 11^m0 до 14^m0 в полосе R.

В *разделе 2.3* представлены оценки предполагаемой эффективности поиска транзитных экзопланет с помощью телескопа МАСТЕР–II–Урал. При наблюдении в течение 40 ночей одной области небесной сферы размером $2^\circ \times 2^\circ$, лежащей в плоскости Галактики, предполагается открыть около двух транзитных экзопланет типа ”горячий юпитер”.

В *разделе 2.4* рассматриваются основные источники ошибок, влияющие на качество фотометрических данных. В подразделе 2.4.1 обсуждается фотонный шум источника. Подраздел 2.4.2 рассматривает шумы ПЗС–камеры: шум считывания, темновой шум, эффект нелинейности ПЗС, попиксельные и внутрипиксельные вариации чувствительности. Подраздел 2.4.3 посвящен влиянию атмосферы Земли на точность фотометрических наблюдений: обсуждается влияние рассеяния света, поглощение света, звездные мерцания. Отмечено, что основным фактором, ухудшающим результирующую точность фотометрии, является фон неба в условиях засветки Луной и/или повышенной искусственной засветки, а также изменение атмосферной экстинкции со временем. В случае наблюдений ярких объектов с короткими экспозициями также сказывается фотонный шум источника.

В *разделе 2.5* рассматриваются наблюдения транзитов известных экзопланет с помощью телескопа МАСТЕР–II–Урал. Показано, что телескоп позволяет уверенно регистрировать транзиты известных экзопланет типа ”горячий юпитер”, что делает этот инструмент способным открывать новые транзитные экзопланеты.

Раздел 2.6 содержит информацию о проведенных наблюдениях двух участков Млечного Пути размером $2^\circ \times 2^\circ$ с целью поиска новых транзитных экзопланет. Один из участков (TF1) находится в созвездии Лебедя, второй участок (TF2) — в созвездии Андромеды. Основными наблюдательными массивами данных составляют 8000 кадров в фильтре R, полученные за 80 наблюдательных ночей.

В *разделе 2.7* рассмотрены методы обработки наблюдательных данных. Полученный объем данных составил несколько терабайт, что требует автоматической потоковой обработки. В подразделе 2.7.1 показана процедура фотометрических калибровок с использованием кадров плоского поля и

кадров темнового тока. В подразделе 2.7.2 представлена процедура апертурной фотометрии. С помощью задания PHOT пакета IRAF на каждом кадре выполнялась апертурная фотометрия с индивидуальными значениями апертуры и фона неба для каждого кадра. Для этого использовался каталог объектов, созданный с помощью каталога 2MASS [12] и содержащий экваториальные координаты звезд и их порядковый номер. Для первой площадки входной каталог содержит 23000 звезд, для второй площадки — 15000 звезд. Подраздел 2.7.3 описывает разработанную программу Astrokit и содержит результаты исследования методики дифференциальной фотометрии с помощью ансамблей звезд сравнения, реализованной в программе. Использование тесного ансамбля звезд сравнения при проведении дифференциальной фотометрии позволяет учесть неравномерности рядов данных, вызванные локальными изменениями прозрачности атмосферы, вариациями фона неба, а также уменьшает вклад звездных мерцаний в бюджет ошибок получаемых величин блеска [13, 14]. При использовании более 10 опорных звезд в близком ансамбле сравнения, становится несущественным отличие их спектральных классов от спектрального класса объекта. Тем не менее, для достижения наибольшей точности остается важным небольшое различие в блеске (не более 2^m) и положение звезд ансамбля относительно объекта (удаление не более $5'-7'$).

В разделе 2.8 представлены результаты фотометрической обработки данных. Получено, что наилучшая фотометрическая точность телескопа МАСТЕР-II-Урал была достигнута в фильтре R. Для площадки TF1 она составила от 0^m005 до 0^m05 для звезд от 11^m до 16^m соответственно. Для области TF2 — от 0^m005 до 0^m06 для звезд от 11^m до 16^m соответственно. Для каждого набора данных были отобраны "малошумные" звезды, стандартное отклонение блеска которых по всей серии наблюдений меньше 0^m01 .

Раздел 2.9 содержит описание используемого метода поиска периодичностей в кривых блеска "малошумных" звезд. Для поиска транзитных сигналов кривые блеска анализировались методом BLS (Box-fitting Least Squares [15]). Найденные периоды изменений блеска звезд с высоким отношением сигнал/шум на периодограмме использовались для построения фазовых кривых, которые затем анализировались визуально. Фазовые кривые блеска, имеющие характерные падения в $0^m01 - 0^m02$, изучались отдельно.

Глава 3 посвящена трем открытым кандидатам в транзитные экзопланеты и новым переменным звездам.

Раздел 3.1 содержит исследование первого кандидата KPS-TF1-3154, имеющего затмение с периодом 0^d847 , глубиной около 0^m02 и продолжительностью около 2^h . Выяснено, что кандидат KPS-TF1-3154 представляет собой визуально двойную систему с более ярким компонентом А (у которого происходят затмения) и менее ярким компонентом В. Спектральные наблюдения показали, что яркий компонент А представляет собой звезду спектрального

класса G8V, менее яркий В — также G8V. Последующие фотометрические наблюдения в теоретический момент вторичного минимума выявили падение блеска в 0^m009 продолжительностью 1^h7 . Таким образом, кандидат в транзитные экзопланеты KPS-TF1-3154 вероятнее всего является ложноположительным и представляет собой затменную переменную звезду. V-образность кривых блеска свидетельствует о частном затмении.

Раздел 3.2 содержит исследование второго кандидата KPS-TF1-19251, который имеет затмения с периодом 0^d98 . Дополнительные фотометрические наблюдения выявили V-образность кривой блеска с глубиной транзита в 0^m025 и длительностью в 2^h5 . Было выяснено, что кандидат KPS-TF1-19251 также представляет собой визуально кратную систему, состоящую из двух звезд примерно равного блеска и отстоящих друг от друга на $1''3$. Основываясь на спектральных данных, выяснилось, что более яркий компонент А — это карлик класса G2, более слабый компонент В — карлик класса K0. Падения блеска в предсказанные моменты времени, соответствующие вторичному минимуму, выявлены не были (определено по фотометрическим наблюдениям с точностью 0^m003). Основываясь на спекл-интерферометрических данных, было уточнено, что слабый компонент системы В является визуальной двойной системой и содержит компонент С.

По имеющимся данным невозможно определить, у какой звезды происходят периодические падения блеска. Но были последовательно оценены "истинные" глубины затмений каждого из компонентов этой визуальной тройной системы. Под "истинной" глубиной затмения понимается величина падения блеска одного из компонентов, которая была бы наблюдаема в отсутствие других звезд в апертуре.

Если затмения происходят у звезды А, то истинная глубина затмения была бы около 0^m05 . Подобные падения блеска не характерны для транзитов внесолнечных планет. Если предположить, что такое падение блеска вызывает планета, вращающаяся около звезды G2V, то ее радиус был бы равным 2.2 радиуса Юпитера. Если затмения происходят у звезды В или С, то тогда истинные глубины затмения были бы равными 0^m08 или 0^m14 соответственно. Такая глубина также велика для того, чтобы затмевающий объект был экзопланетой. Вероятнее всего, система представляет собой затменную переменную звезду с большим наклоном орбиты, делающим видимым только один из минимумов. Окончательно прояснить природу затмевающего тела возможно с помощью метода лучевых скоростей, то есть оценив его массу.

Раздел 3.3 посвящен исследованию третьего кандидата в транзитные экзопланеты KPS-TF2-11789. Объект имеет затмения с периодом 1^d346 , форма кривой блеска U-образная, глубина транзита составляет 0^m02 , а продолжительность — 1^h8 . По полученным изображениям с большим угловым разрешением, чем на телескопе МАСТЕР-II-Урал, обнаружить визуального спутника кандидата KPS-TF2-11789 не удалось. Однако удалось обнаружить вторич-

ный минимум глубиной около 0^m006 звездной величины и продолжительностью около 2^h0 в предсказанные моменты времени. Таким образом, данный кандидат, вероятнее всего, также является астрофизическим ложноположительным и представляет собой затменную переменную звезду.

В *разделе 3.4* представлены результаты поиска новых переменных звезд. Было найдено 300 ранее неизвестных переменных звезд в области TF1 и около 100 переменных звезд в области TF2. Среди найденных переменных звезд из области TF1 была открыта вспышка карликовой Новой звезды USNO-B1.0 1413-0363790 [11]. У некоторых звезд были обнаружены колебания блеска с амплитудой всего в 0^m005 .

В заключении приводятся основные полученные результаты, рассматриваются возможные причины несоответствия предполагаемого количества открытых внесолнечных планет с фактическим. Как итог, предлагаются способы увеличения вероятности нахождения новых внесолнечных планет путем изменения тактики наблюдений.

В приложении А приведен список новых переменных звезд, открытых в областях TF1 и TF2.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (в рамках научных проектов 2-02-31095 мол_а и 14-02-31338 мол_а), Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проектов RFMEFI59114X0003 и 01201465056), а также программы поддержки молодых ученых УрФУ. Часть научных результатов работы получена на оборудовании уникальной научной установки "Коуровская астрономическая обсерватория".

Работа выполнена с использованием баз данных SIMBAD и VizieR Страсбургского центра астрономических данных, международной базы данных переменных звезд General Catalogue of Variable Stars, а также библиографической базы данных NASA Astrophysics Data System.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

- 1) *Burdanov A. Y., Krushinsky V. V., Popov A. A.* Astrokit—an efficient program for high-precision differential CCD photometry and search for variable stars // *Astrophysical Bulletin*. — 2014. — Vol. 69. — P. 389–398.
- 2) *Иванов К. И., Бурданов А. Ю., Попов А. А., Крушинский В. В.* Дополнительные фотометрические наблюдения кандидатов в транзитные экзопланеты MASTER-1b и MASTER-2b // *Известия Иркутского государственного университета*. — 2013. — Т. 6, № 2. — С. 104–113.
- 3) *Burdanov A. Y., Popov A. A., Krushinsky V. V., Ivanov K. I.* Two Transiting Exoplanet Candidates in Cygnus from the MASTER Project // *Peremennye Zvezdy*. — 2013. — Vol. 33, № 2. — P. 1–5.
- 4) *Gorbovskey E. S., Lipunov V. M., Kornilov V. G. et al.* The MASTER-II network of robotic optical telescopes. First results // *Astronomy Reports*. — 2013. — Vol. 57, № 4. — P. 233–286.
- 5) *Burdanov A. Y., Krushinsky V. V., Denisenko D. et al.* Discovery of Possible Dwarf Nova in Cygnus USNO-B1.0 1413-0363790 // *Peremennye Zvezdy Prilozhenie*. — 2012. — Vol. 12, № 24.
- 6) *Бурданов А. Ю.* Техника прецизионной ПЗС-фотометрии на телескопе МАСТЕР-II-УРАЛ Коуровской астрономической обсерватории для изучения экзопланет // *Физика космоса*. — Тр. 41-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв.—3 февр. 2012 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — С. 217.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 *Mayor M., Queloz D.* A Jupiter-mass companion to a solar-type star // *Nature*. — 1995. — Vol. 378. — P. 355–359.

2 *Schneider J., Dedieu C., Le Sidaner P. et al.* Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 532. — P. A79.

3 *Perryman M.* The Exoplanet Handbook. — Cambridge : Cambridge University Press, 2011.

4 *Catanzarite J., Shao M.* The Occurrence Rate of Earth Analog Planets Orbiting Sun-like Stars // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 738. — P. 151.

5 *Papaloizou J. C. B., Terquem C.* Planet formation and migration // *Reports on Progress in Physics*. — 2006. — Vol. 69. — P. 119–180.

6 *Mordasini C., Mollière P., Dittkrist K.-M. et al.* Global models of planet formation and evolution // *International Journal of Astrobiology*. — 2015. — Vol. 14. — P. 201–232.

7 *Seager S., Deming D.* Exoplanet Atmospheres // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 48. — P. 631–672.

8 *Tody D.* The IRAF Data Reduction and Analysis System // *Instrumentation in astronomy VI* / Ed. by D. L. Crawford. — Vol. 627 of Proceedings of the Meeting, Tucson, AZ, March 4-8, 1986. — Bellingham, WA : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 1986. — P. 733.

9 *Lang D., Hogg D. W., Mierle K. et al.* Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images // *Astron. J.* — 2010. — Vol. 139. — P. 1782–1800.

10 *Burdanov A. Y., Krushinsky V. V., Popov A. A.* Astrokit—an efficient program for high-precision differential CCD photometry and search for variable stars // *Astrophysical Bulletin*. — 2014. — Vol. 69. — P. 368–376.

11 *Burdanov A. Y., Krushinsky V. V., Denisenko D. et al.* Discovery of Possible Dwarf Nova in Cygnus USNO-B1.0 1413-0363790 // *Peremennye Zvezdy Prilozhenie*. — 2012. — Vol. 12. — P. 24.

12 *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163–1183.

13 *Everett M. E., Howell S. B.* A Technique for Ultrahigh-Precision CCD Photometry // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2001. — Vol. 113. — P. 1428–1435.

14 *Kornilov V.* Angular correlation of the stellar scintillation for large telescopes // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 425. — P. 1549–1557.

15 *Kovács G., Zucker S., Mazeh T.* A box-fitting algorithm in the search for periodic transits // *Astron. Astrophys.* — 2002. — Vol. 391. — P. 369–377.