



УДК 52-13

Дополнительные фотометрические наблюдения кандидатов в транзитные экзопланеты MASTER-1b и MASTER-2b¹

К. И. Иванов (ivorypalace@gmail.com)

А. Ю. Бурданов (artem.bourdanov@gmail.com)

А. А. Попов (apopov66@gmail.com)

В. В. Крушинский (krussh@gmail.com)

Аннотация. В работе представлены результаты дополнительных наблюдений двух кандидатов в транзитные экзопланеты, открытых в созвездии Лебедя в ходе пилотного фотометрического обзора неба, выполненного в Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (УрФУ) в 2012 г. Дополнительные наблюдения, проведённые с помощью телескопов «МАСТЕР-II Урал» и «МАСТЕР-II Тунка», позволили более точно оценить характеристики систем, однако для выяснения истинной природы объектов необходимы дальнейшие фотометрические и спектроскопические исследования.

Ключевые слова: экзопланета, метод транзитов, фотометрия, MASTER-1b, MASTER-2b.

Введение

Исследование внесолнечных планет (экзопланет) – молодая, перспективная и быстро развивающаяся область современной астрономии. В ходе реализации космических миссий CoRoT [2] и KEPLER [5] было установлено, что наличие планетных систем у других звёзд – отнюдь не исключение, а закономерность, присущая, по-видимому, большинству существующих ныне звёзд. Изучение физических характеристик сотен экзопланетных систем, известных в настоящее время, выявило интересную особенность: вопреки ожиданиям, ни одна из этих систем не оказалась похожа на Солнечную. Более того: огромный разброс значений основных величин, характеризующих различные планетные системы, поставил под сомнение все существующие теории образования и эволюции как Солнечной системы в целом, так и отдельных планет, входящих в её состав. В связи с этим возникла острая необходимость выявления общих закономерностей, присущих как можно большему числу экзопланетных систем, что, в свою очередь, требует открытия новых объектов данного типа.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке молодых ученых УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ.

Особое место в этом ряду занимает возможность обнаружения планет, сравнимых по размеру и массе (и, возможно, иным характеристикам) с Землёй, дальнейшее изучение которых позволит внести ряд существенных поправок в теорию её эволюции, внутреннего строения и сопутствующих процессов. Результатом успешного развития данного направления может стать открытие большого числа экзопланет, схожих с Землёй по многим параметрам. Это впервые позволит рассматривать Землю не как уникальный объект, а как один среди прочих, что, в свою очередь, даст возможность обобщить полученные знания и применить их к Земле как частному случаю. В перспективе данный подход способен предоставить ценную информацию, необходимую для решения спорных вопросов, таких, например, как состав и структура внутреннего ядра, происхождение воды и влияние активности Солнца на эволюцию и состав атмосферы.

Экзопланетная астрономия уже располагает методами, необходимыми для решения упомянутых вопросов, однако ввиду крайне незначительного изменения блеска звезды в стадии транзита исследование данного явления представляет собой непростую задачу, подчас требующую мощных телескопов и специального оборудования. Несмотря на это, авторами был создан алгоритм получения и обработки данных, позволяющий успешно проводить высокоточные фотометрические наблюдения транзитов экзопланет с помощью автоматизированных телескопов малого диаметра «МАСТЕР-II», результатом практического применения которого стало открытие двух кандидатов в экзопланетные системы [1].

1. Метод транзитов

Метод транзитов [10] является наиболее простым, относительно легко реализуемым, но в то же время достаточно мощным методом обнаружения и исследования экзопланет. Данный метод основан на явлении прохождения экзопланеты по диску родительской звезды, что сопровождается незначительным (около 1–3 %) ослаблением блеска последней. Точные фотометрические наблюдения позволяют построить кривую блеска (рис. 1), найти период обращения планеты вокруг звезды, определить отношения их радиусов, а также угол наклона орбитальной плоскости по отношению к наблюдателю. Основными наблюдательными величинами являются глубина транзита ΔF , промежуток времени t_T между первым и четвертым контактами, а также промежуток времени t_F между вторым и третьим контактами.

Транзитный метод достаточно информативен. Он позволяет определить период обращения планеты вокруг звезды, её массу [9], оценить радиус по величине ослабления блеска, т. е. по доле площади звёздного диска, покрываемой планетой, если радиус самой звезды уже известен [11].

Основная причина вариаций блеска родительской звезды – экранирование потока излучения планетным диском – вовсе не является единственной. На фоне общего снижения потока излучения от звезды во время транзита могут наблюдаться флуктуации яркости на временных масштабах от нескольких минут до десятков минут, так называемые транзитные эффекты, природа которых на сегодняшний день выясняется. Кроме того, по-

тенииально метод позволяет обнаруживать и исследовать спутники экзопланет, звёздные пятна, а также экзотические образования, присущие как планетам (кольца), так и родительским звёздам (протопланетные диски, астероидные пояса).

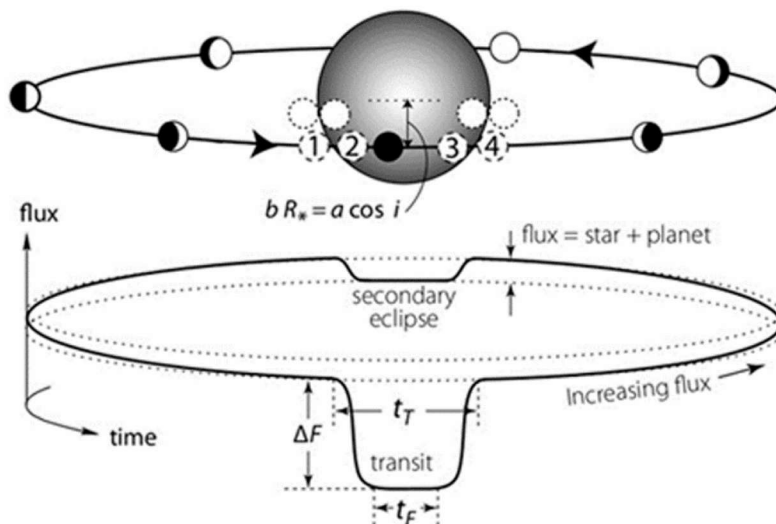


Рис. 1. Схема транзита экзопланеты по диску звезды [10]

2. Проект «МАСТЕР»

Астрономический комплекс «МАСТЕР» – один из самых эффективных в своём классе и активно развивающихся проектов на территории России. Созданный учёными ГАИШ МГУ в 2002 г. с целью изучения космических гамма-всплесков, сегодня проект представляет собой мощную сеть наблюдательных инструментов и систем анализа и обработки данных.

Телескоп «МАСТЕР-II» [8], составляющий основу проекта, представляет собой систему из двух одинаковых катадиоптрических телескопов системы Гамильтона с диаметром объектива 400 мм и фокусным расстоянием объектива 1000 мм. Каждая труба снабжена устройством автофокусировки, набором светофильтров, соответствующих фотометрической системе Джонсона – Козинса, а также ПЗС²-приёмником ArogeeAltaU16 с прямой засветкой и антиблумингом, имеющим размер 4096×4096 пикселей. Конструкция телескопа укреплена на экваториальной монтировке NTM-500 фирмы Astelco и позволяет получать снимки звёздного поля площадью 2°×2° с масштабом 1,85"/пикс. Техническое оснащение телескопа даёт возможность осуществлять поиск новых и более детальное исследование

² Прибор с зарядовой связью – общее обозначение класса полупроводниковых приборов, построенных на основе технологии управляемого переноса заряда в объёме полупроводника.

дование уже известных переменных объектов, в том числе экзопланетных систем методом транзитов.

3. Пилотный фотометрический обзор 2012 года

Основная часть наблюдений была выполнена в период с мая по август 2012 г. с помощью телескопа «МАСТЕР-II Урал», входящего в состав проекта «МАСТЕР». Также небольшой наблюдательный сет был проведен в декабре 2012 г. В общей сложности в течение пятидесяти ночей получено около 3600 кадров богато звёздами участка небесной сферы в созвездии Лебедя, с центром в точке $RA = 20^h 30^m 00^s$, $Dec = +50^\circ 30' 00''$ (J2000) и площадью $2^\circ \times 2^\circ$. В ходе летних наблюдений была задействована лишь одна оптическая труба, наблюдения проводились в фильтре R с экспозицией 50 с; зимняя серия выполнена с использованием обеих труб в фильтрах V и R.

Фотометрическая калибровка осуществлялась с помощью кадров темнового тока и плоского поля, полученных накануне и сразу после наблюдений соответственно для достижения максимальной фотометрической точности. Все наблюдения выполнены в автоматическом режиме.

Предварительная обработка данных включала в себя учёт темновых кадров и кадров плоского поля, после чего выполнялась астрометрическая калибровка с помощью программы *Astrometry.net* [7]. Дальнейшая фотометрическая обработка кадров выполнялась с применением программного пакета *IRAF* [13]; с целью увеличения точности фотометрии оценка среднего значения уровня фона неба и FWHM проводилась для каждого кадра индивидуально, полученные значения использовались для проведения высокоточной апертурной фотометрии. Фотометрическая постобработка, позволяющая существенно повысить точность, выполнялась с помощью собственного ПО *Astrokit*, разработанного на базе алгоритма, описанного в [3]. Данный алгоритм подразумевает наличие отдельного ансамбля звёзд сравнения для каждой звезды в кадре, что позволяет учитывать и эффективно устранять погрешности измерений, связанные вариациями прозрачности атмосферы в пределах кадра, увеличивая тем самым фотометрическую точность вплоть до $0^m.001$. Программа позволяет обрабатывать большое количество звёзд в полностью автоматическом режиме.

В ходе обработки были получены фотометрические данные для 21 500 звёзд от 10^m до 16^m с точностью от $0^m.006$ до $0^m.06$ соответственно, из которых около 5000, имеющих ошибки менее $0^m.02$, отобраны для поиска кандидатов в экзопланетные системы (падение блеска в ходе транзита «горячего юпитера» составляет в среднем $0^m.01$). Дальнейшая обработка представляла собой поиск периодических падений блеска методом BLS^3 [6], реализованным в программном пакете *VARTOOLS* [4]. В результате были обнаружены два объекта, проявляющие характер переменности, присущий транзитным экзопланетным системам. В соответствии с общепринятой номенклатурой, объектам предварительно были присвоены наименования MASTER-1b и MASTER-2b.

³Box-fittingLeastSquares.

4. Кандидаты в экзопланеты

Родительская звезда кандидата MASTER-1b имеет координаты $RA = 20^h 26^m 02^s.13$, $Dec = 50^\circ 06' 03.2''$ (J2000) и блеск $J = 11^m.40$, $H = 11^m.05$ и $K_s = 10^m.88$ согласно каталогу 2MASS [12]. Приблизительный спектральный класс объекта оценен как G0-M8. Основные расчётные характеристики системы следующие: орбитальный период затмевающего тела $P = 0^d.846822$, момент середины первого минимума $T_0 = 2456062.81719$, отношение радиусов затмевающего тела и центральной звезды $R_p/R^* = 0.12$, отношение длины большой полуоси орбиты затмевающего тела к радиусу звезды $a/R^* = 3.1$, угол наклона плоскости орбиты затмевающего тела к лучу зрения $i = 75^\circ$. Фазовая кривая MASTER-1b представлена на рис. 2.

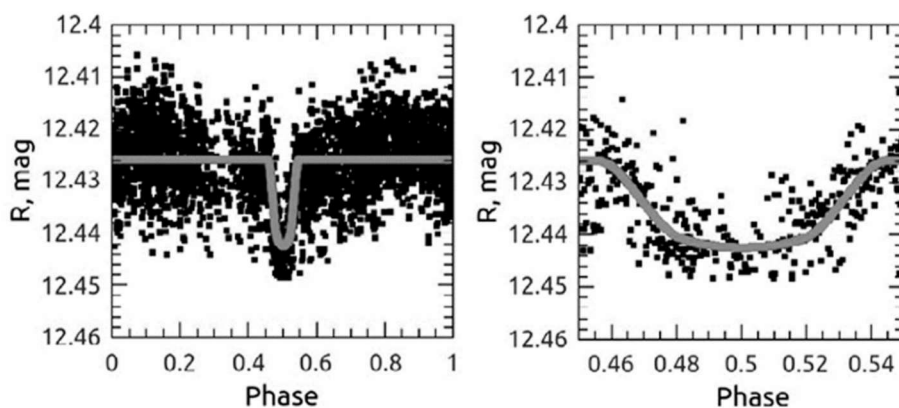


Рис. 2. Фазовые кривые MASTER-1b

Фазовая кривая объекта MASTER-2b представлена на рис. 3. Кандидат расположен в точке $RA = 20^h 34^m 16^s.25$, $Dec = 50^\circ 15' 42.7''$ имеет звёздные величины $J = 12^m.60$, $H = 12^m.21$ и $K_s = 12^m.10$. Спектральный класс объекта оценивается как G8-K5, основные параметры системы следующие: $P = 0^d.983316$, $T_0 = 2456062.96155$, $R_p/R^* = 0.12$, $a/R^* = 4.9$, $i = 87^\circ$.

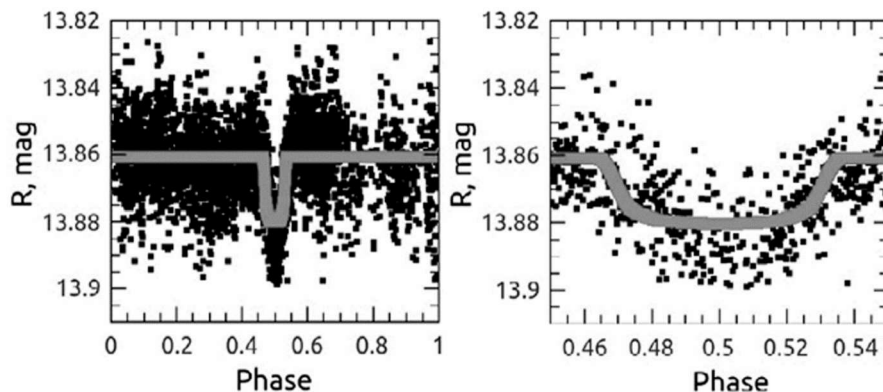


Рис. 3. Фазовые кривые MASTER-2b

5. Дополнительные наблюдения MASTER-1b и MASTER-2b

В целях более подробного изучения обнаруженных объектов был проведён ряд дополнительных наблюдений. На рис. 4 приведены кривые блеска MASTER-1b в стадии транзита, полученные 12. 07. 2013 с помощью телескопа «МАСТЕР-II Тунка», расположенного в Тункинской долине (Республика Бурятия) вблизи пос. Торы.

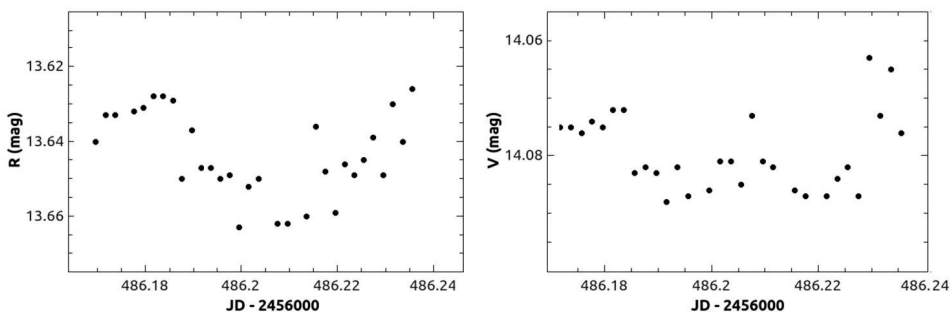


Рис. 4. Кривые блеска MASTER-1b по данным наблюдений от 12.07.2013

Наблюдения выполнялись в безлунную ночь в условиях лёгкого тумана. На рисунке в обоих фильтрах отчётливо виден «провал» глубиной $0^m.02$, соответствующий середине транзита затмевающего тела по диску центральной звезды. Ошибка измерений в смысле стандартного отклонения изучаемого объекта вне фазы транзита не превышала $0^m.007$. Значения звёздных величин указаны в инструментальной системе.

В фильтре V просматривается «горб» в центре транзита, возможно, представляющий собой тонкий эффект, вероятно, вызванный флуктуациями состояния земной атмосферы, однако возможность его возникновения вследствие физических процессов, протекающих в пределах экзопланетной системы, также не исключается. На момент наблюдений начало транзита смещено на 20 мин относительно предсказанного времени, в связи с чем произведён перерасчёт периода обращения затмевающего тела. С учётом полученных данных начальный период MASTER-1b, равный $0^d.846822$, был пересчитан и составил $0^d.846764$. Данное значение подтверждено последующими наблюдениями и в настоящий момент считается наиболее точным; дальнейшая корректировка значения периода возможна в будущем в случае получения более точных данных.

Рисунок 5 демонстрирует кривые блеска, построенные на основе результатов наблюдений транзита MASTER-1b от 19.08.2013. Наблюдения выполнены с помощью телескопа «МАСТЕР-II Урал», расположенного на территории Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета.

Обе кривые демонстрируют падение блеска порядка $0^m.02$, что подтверждает факт наличия транзита. Множественные «выбросы», наблюдаемые на обеих кривых, предположительно связаны с неустойчивостью атмосферы и потому не имеют отношения к физическим процессам, проте-

кающим внутри экзопланетной системы. Данное обстоятельство, однако, отнюдь не означает отсутствия последних: их вклад в общую картину транзита может быть меньше ошибки измерений.

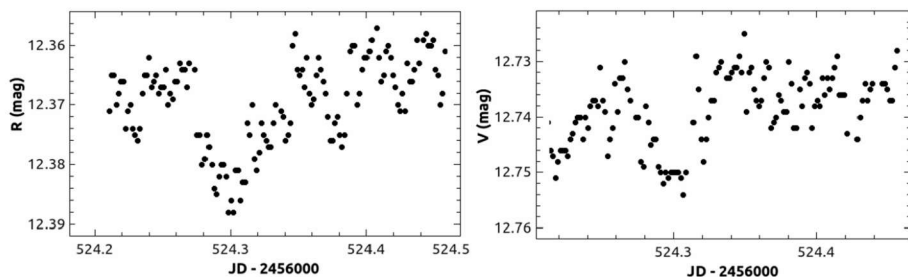


Рис. 5. Кривые блеска MASTER-1b по данным наблюдений от 19.08.2013

На рис. 6 приведены кривые блеска, полученные по данным наблюдений транзита MASTER-1b от 22.08.2013 с помощью телескопа «МАСТЕР-II Урал». На фоне общего падения блеска, кривая в фильтре R содержит «ступеньку» – возможно, тонкий эффект, вызванный наличием пятен в фотосфере центральной звезды или особенностями затмеваемого тела (влияние земной атмосферы не исключается). Кривая в фильтре V демонстрирует незначительный минимум, следующий сразу за основным, предположительно являющийся следствием инструментальной ошибки или влияния флуктуаций атмосферы.

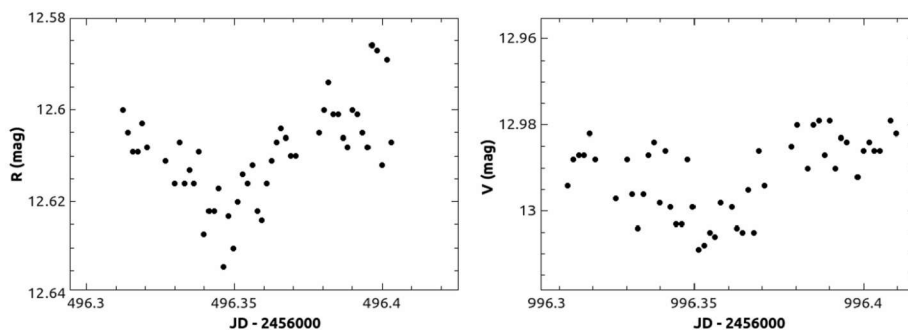


Рис. 6. Кривые блеска MASTER-1b по данным наблюдений от 22.08.2013

Ввиду неудовлетворительных погодных условий на сегодняшний день удалось провести лишь одно неполное наблюдение транзита MASTER-2b. Тем не менее полученные данные также позволили уточнить период: начальное значение $0^{\text{d}}.983316$ исправлено и в данный момент составляет $0^{\text{d}}.983430$. Кривая блеска транзита, полученная 04.08.2013 с помощью телескопа «МАСТЕР-II Урал», представлена на рис. 7.

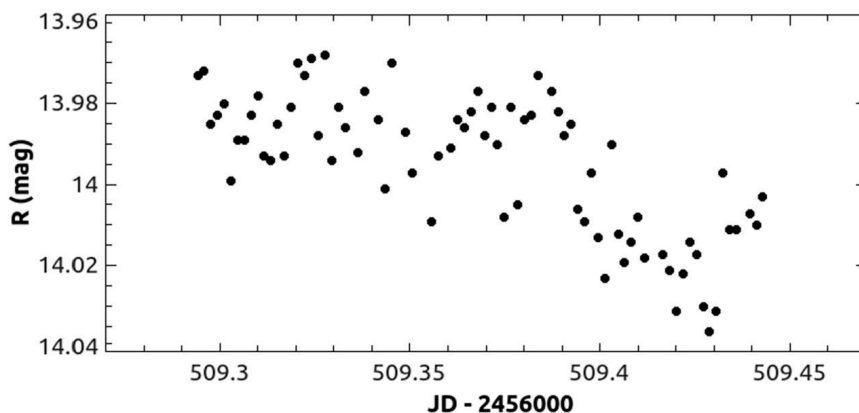


Рис. 7. Кривые блеска MASTER-2b по данным наблюдений от 04.08.2013

Выводы

В результате пилотного фотометрического обзора неба, проведённого в 2012 г. с помощью телескопа «МАСТЕР-II Урал», обнаружены два объекта, демонстрирующие поведение, свойственное транзитным экзопланетным системам с крупным горячим юпитером на низкой орбите. Несмотря на то что найденные объекты активно изучаются, в настоящий момент невозможно что-либо точно сказать о природе затмевающих тел. Природа родительских звёзд также выясняется, проведены спектроскопические наблюдения обоих кандидатов с целью уточнения их спектральных классов и характера движения, результаты которых будут освещены в последующих публикациях. С целью получения более чёткой картины транзитов в будущем также планируется ряд прецизионных фотометрических наблюдений с использованием крупных телескопов.

Тем не менее первый опыт поиска кандидатов в экзопланетные системы с помощью телескопов малого диаметра «МАСТЕР-II» можно считать удачным.

Список литературы

1. Two Transiting Exoplanet Candidates in Cygnus from the MASTER Project / A. Burdanov [et al.] // *Variable Stars*. – 2013. – N 2.
2. CoRoT mission [Elektronik resource]. – URL: <http://www.esa.int/esaMI/COROT/index.html>
3. Everett M. A. Technique for Ultrahigh-Precision CCD Photometry / M. Everett, S. Howell // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 2001. – Vol. 113, iss. 789. – P. 1428–1435.
4. Deep MMT Transit Survey of the Open Cluster M37. II. Variable Stars / J. Hartman [et al.] // *The Astrophysical Journal*. – 2008. – Vol. 675, iss. 2. – P. 1254–1277.
5. KEPLER mission [Elektronik resource]. – URL: <http://kepler.nasa.gov/>

6. Kovács G. A box-fitting algorithm in the search for periodic transits / G. Kovács, S. Zucker, T. Mazeh // *Astronomy and Astrophysics*. – 2002. – Vol. 391. – P. 369–377.
7. Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images/ D. Lang [et al.] // *The Astronomical Journal*. – 2010. – Vol. 139, iss. 5. – P. 1782–1800
8. MASTER Robotic Net / V. Lipunov [et al.] // *Advances in Astronomy*. – 2010. – Vol. 2010. – article id. 349171.
9. Estimating transiting exoplanet masses from precise optical photometry / D. Mislis [et al.] // *arXiv:1112.2008v1*. – 2011.
10. Perryman M. *The Exoplanet Handbook* / M. Perryman. – N. Y. : Cambridge University Press, 2011. – 410 p.
11. Extrasolar Planet Transits Observed at Kitt Peak National Observatory / P. Sada [et al.] // *arXiv:1202.2799v1*. – 2012.
12. Skrutskie M. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) / M. Skrutskie [et al.] // *The Astronomical Journal*. – 2006. – Vol. 131, iss. 2. – P. 1163–1183.
13. Tody D. IRAF in the Nineties // *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*, A. S. P. Conference Series. – 1993. – Vol. 52. – P. 173.

Photometric follow-up observations of MASTER-1bandMASTER-2b transiting exoplanet candidates

K. I. Ivanov, A. Y. Burdanov, A. A. Popov, V. V. Krushinsky

Annotation. Exoplanetary astronomy is a fast growing area of modern astronomy which objects of research are extrasolar planets and systems they form. Among the problems solved within this area, searching of new exoplanetary systems will shed light on processes of the birth and evolution of planets of our Solar system including the Earth. In this article we present results of first follow-up observations of transiting exoplanet candidates discovered using «MASTER-II» telescope. Follow-up observations allowed us to estimate periods more precisely, however further photometric and spectroscopic researches are necessary for clarification of true objects nature.

Key words: exoplanet, transit method, photometry, MASTER-1b, MASTER-2b.

Иванов Кирилл Ильич
Иркутский государственный университет
 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
 научный сотрудник
 тел.: 8 (3952) 27–12–94

Ivanov Kirill Ilyich
Irkutsk State University
 1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
 researcher
 tel.: 8 (3952) 27–12–94

Бурданов Артем Юрьевич
аспирант
Уральский федеральный университет
 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
 тел.: 8 (343) 261–74–45

Burdanov Artem Yurevich
Postgraduate Student
Ural State University
 19, Mira st., Yekaterinburg, 620002
 tel.: 8 (343) 261–74–45

*Попов Александр Андреевич
Уральский федеральный университет
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
ведущий инженер
тел.: 8 (343) 261-74-45*

*Popov Alexander Andreevich
Ural State University
19, Mira st., Yekaterinburg, 620002
engineer
tel.: 8 (343) 261-74-45*

*Крушинский Вадим Владимирович
Уральский федеральный университет
620002, Екатеринбург, улица Мира, 19
заведующий отделом
астрономического приборостроения тел.: 8
(343) 261-74-45*

*Krushinsky Vadim Vladimirovich
Ural State University
19, Mira st., Yekaterinburg, 620002
principal engineer
tel.: 8 (343) 261-74-45*