

## Алгоритм исследования кандидатов в транзитные экзопланеты с помощью Глобальной сети роботов-телескопов МАСТЕР

А.Н. Тарасенков,<sup>1,2,\*</sup> В.М. Липунов,<sup>1,3,†</sup> А.С. Кузнецов,<sup>1</sup> Н.М. Буднев,<sup>4</sup> А.Г. Тлатов,<sup>5</sup> В.В. Юрков<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ)

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, астрономическое отделение, кафедра экспериментальной астрономии  
Россия, 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>4</sup>Иркутский государственный университет, Россия, 664003, Иркутск, бульвар Гагарина, д. 10

<sup>5</sup>Кисловодская солнечная станция РАН, Россия, 347700, Кисловодск, ул.Гагарина, д. 100

<sup>6</sup>Благовещенский государственный педагогический университет, Россия, 675004, Благовещенск, ул.Ленина, д. 104  
(Поступила в редакцию 31.12.2023; после доработки 05.09.2024; подписана в печать 16.12.2024)

В работе представлены основные принципы фотометрического исследования кандидатов в экзопланеты путем анализа архивных широкопольных изображений, полученных на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ. Разработан и применен алгоритм исследования кандидатов в транзитные экзопланеты, не нарушающий выполнение основных задач сетью МАСТЕР — обнаружение оптических компонентов астрофизических источников высоких энергий и исследование происходящих в них процессов на различных временных масштабах. Был исследован ряд кандидатов из поля микроквара V404 Cyg. Для кандидата TOI-3570.01 получена кривая блеска во время транзита предполагаемой экзопланеты, согласующаяся с расчетными эфемеридами.

PACS: 95.45.+i УДК: 524.827

Ключевые слова: экзопланеты, фотометрия, транзит, роботизированные телескопы МАСТЕР.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2530802

### ВВЕДЕНИЕ

Для обнаружения экзопланет размером порядка Юпитера необходимы длинные ряды наблюдений звезд с большой точностью. Космический телескоп TESS [1] был запущен для выявления и исследования кандидатов в экзопланеты. Оптическую поддержку на Земле ему оказывают различные обсерватории<sup>1</sup>, ограниченные длительностью ночного времени, погодными условиями, видимостью над горизонтом многих кандидатов TESS и т.д. Для анализа источников TESS преимущество имеют архивные данные широкопольных телескопов, распределенных по земному шару и проводящих синоптические обзоры несколько десятилетий, единственным наиболее полным вариантом которых является Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ, обладающая рядом преимуществ, кроме архива однородных данных наблюдений в единой фотометрической системе для северного неба с 2006 г. и для южного с 2012 г.

### 1. ВОЗМОЖНОСТИ ТЕЛЕСКОПОВ-РОБОТОВ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ МАСТЕР МГУ

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ [2–4] представляет многофункциональную сеть полностью роботизированных обсерваторий МАСТЕР-II с идентичным приемным оборудованием, равномерно распределенных по земному шару в 9 пунктах на 4 континентах и применяемую в многоволновых и многоканальных экспериментах по исследованию астрофизических источников, находящихся в экстремальных условиях, в их числе гамма-всплесков, детектируемых орбитальными обсерваториями Swift, Fermi, MAXI, Lomonosov, GECAM и др., источники гравитационных волн, регистрируемых на детекторах коллаборации LIGO/VIRGO [5, 6], нейтрино сверхвысоких энергий, исследуемых на обсерваториях IceCube и ANTARES/KM3Net [4, 7], источники быстрых радиовспышек (FRB) и другие переменные явления ближнего и дальнего космического пространства [4].

Полностью роботизированные телескопы сети МАСТЕР обладают рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с управляемыми вручную инструментами.

\* E-mail: tarasenkov.an20@physics.msu.ru

† E-mail: lipunov2007@gmail.com

<sup>1</sup> <https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>

1. Автономность каждой обсерватории (независимость от присутствия наблюдателя, автоматическое слежение за эфемеридами Солнца и Луны и погодными условиями, автоматическое получение калибровочных изображений, первичный самостоятельный план наблюдений с учетом снятых к текущему моменту площадок актуально, например, на случай непредвиденных обстоятельств у провайдера Интернета, в случае прихода алертов — перераспределение площадок максимальной вероятности между обсерваториями с учетом высоты над горизонтом и времени доступности для наблюдений, автоматический контроль качества получаемых изображений, автоматический контроль бесперебойной работы оборудования и др.).
2. Быстрота отклика (автоматические алертные наведения со скоростью до  $30^\circ/\text{с}$ ).
3. Обработка изображений в режиме реального времени (102 мин после считывания с приемника) с полной идентификацией и первичным анализом всех оптических источников на изображениях.
4. Контроль ближнего и дальнего космического пространства в режиме реального времени 24 ч в сутки.
5. Выполнение широкого круга наблюдательных задач гамма-астрономии, гравитационно-волновой астрономии, нейтринной астрономии, радиоастрономии, астрометрии и других:

- локализация оптического компонента в поле ошибок, полученном от гравитационно-волновых (пример — Килоновая MASTER OTJ130948.10-232253.3/SSS17a от источника слияния двух нейтронных звезд GW 170817), гамма- и рентгеновских обсерваторий [8–10] и др.; нейтринных детекторов (TXS 0506+056 [11] и др.;
- обнаружение переменной поляризации собственного оптического излучения гамма-всплесков;
- обнаружение переменности блазара в первые минуты после регистрации нейтринного события IC 170922 — самое быстрое наведение и первые изображения источника;
- обнаружение всплеска-сироты на ранней стадии;
- раннее обнаружение сверхновых и катаклизмических переменных на стадии начала развития взрыва;
- обнаружение оптических транзиентных объектов различной природы;

- получение многодневных, от нескольких дней до нескольких месяцев, многоцветных кривых блеска вспыхнувших объектов;
- синоптический обзор всего звездного неба до 19–20 звездной величины;
- автоматическое определение новых астероидов и комет с вычислением параметров орбиты;
- определение формы астероидов на примере ТВ145 и др.

На каждой обсерватории Глобальной сети МАСТЕР установлены два широкопольных телескопа оптической системы Гамильтона с полем зрения  $2^\circ \times 2^\circ$  каждый и возможностью разведения и увеличения поля зрения до  $8^\circ$ . Он оснащен ПЗС-матрицами APOGEE ALTA U16M и фотометром собственной разработки с набором фотометрических и поляризационных фильтров [12].

Наблюдения транзитных экзопланет с помощью сети МАСТЕР производились и ранее. Например, была реализована программа поиска экзопланет на телескопе МАСТЕР-Урал [13, 14]. Однако подобная задача требует наблюдений большой длительности и не может гарантировать открытия сразу после обработки кадров первой наблюдательной кампании. Поэтому была разработана новая программа по изучению экзопланет, не требующая проведения наблюдений и, следовательно, не нарушающая выполнение основных задач сетью МАСТЕР.

## 2. АЛГОРИТМ ПОИСКА И ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКЗОПЛАНЕТ

Стратегия поиска подходящих для исследования кандидатов в экзопланеты в рамках разработанной программы основана на принципе максимальной экономии вычислительных мощностей серверов Глобальной сети МАСТЕР. Кандидаты отбирались по следующим критериям:

1. Попадание в площадку размером  $2^\circ \times 2^\circ$  (поле зрения одного из телескопов-роботов каждой обсерватории МАСТЕР) с центром в точке местонахождения транзиентного события, для которого изначально получены кадры.
2. Наличие для кандидата рядов наблюдений, покрывающих целиком хотя бы один предсказанный транзит. Предпочтение отдавалось многоцветным одновременным рядам данных.
3. Предпочтительными были кандидаты ярче  $V = 13$  m и с априорной оценкой глубины транзита 10 ppt или больше.

Схематичное изображение основных этапов алгоритма исследования кандидатов в транзитные экзопланеты по кадрам из архива сети МАСТЕР показано на рис. 1: сначала выбираются площадки, которые наблюдались роботом-телескопом непрерывно в течение нескольких часов и более. Далее отбираются соответствующие вышеописанным критериям кандидаты в экзопланеты и проверяются априорные эфемериды для их транзитов. Объекты, для которых предсказанное время транзита пересекается с временем наблюдения, отбираются для фотометрии.

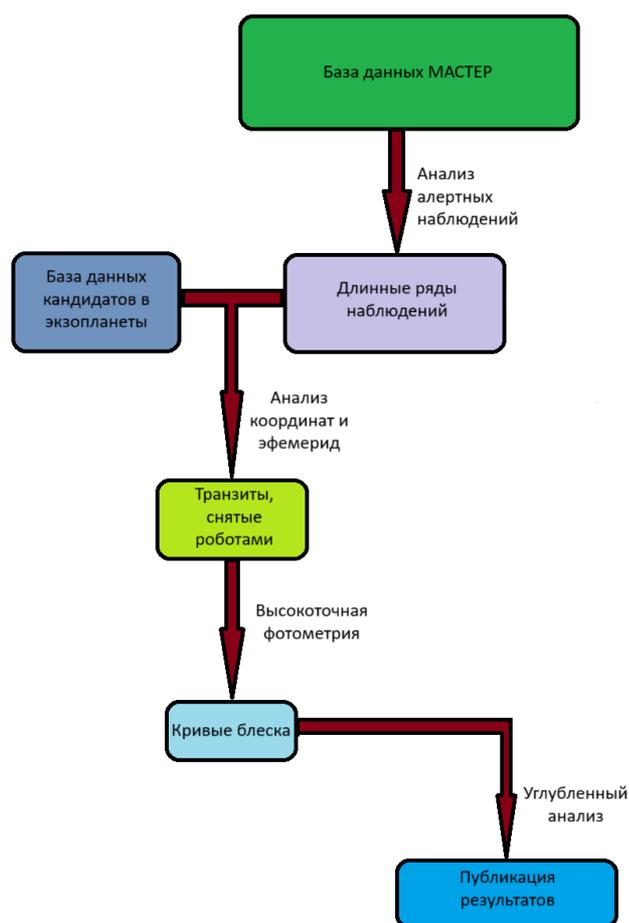


Рис. 1. Схематичное изображение алгоритма исследования кандидатов в транзитные экзопланеты по кадрам из архива сети МАСТЕР

Учитывая, что архив сети МАСТЕР охватывает промежуток времени с 2006 г. по настоящее время, а космическая миссия TESS [1] и программы её наземной поддержки начались в 2018 г., данная программа позволяет получить для кандидатов TESS кривые блеска, полученные роботами-телескопами МАСТЕР задолго до их обнаружения и идентификации. Это позволяет значительно уточнить эфемериды транзитов (в ряде случаев на несколько порядков).

Среди длинных рядов наблюдений сети МАСТЕР наибольшее количество соответствует наблюдениям по алертам с космической миссии

SWIFT [15]. Наблюдения таких полей ведутся до захода объекта за горизонт либо до восхода Солнца и продолжаются обычно от одного до восьми часов, что позволяет покрыть наблюдениями транзит целиком или значительную его часть. Подобных площадок снято более 900, что, с учетом концентрации кандидатов TESS, позволяет получить десятки кривых блеска транзитов.

### 3. ОБРАБОТКА ОБНАРУЖЕННЫХ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ ТРАНЗИТОВ

Для обработки транзитных событий отбирались площадки, которые наблюдались роботом-телескопом непрерывно длительное время (несколько часов и более). В каждой площадке для каждого кандидата из каталога TOI рассчитывались эфемериды с помощью планировщика Tapir [16]. Если в предсказанный для транзита временной интервал попадало большое число наблюдений в одной из полос, то событие отбиралось для последующей фотометрической обработки и анализа.

Апертурная фотометрия проводилась с помощью программы AstroimageJ [17]. Программа, разработанная специально для прецизионной фотометрии экзопланетных транзитов, позволяет учесть особенности ПЗС-матрицы телескопа (Gain, шум считывания), неоднородность фона по кадру и атмосферное поглощение. Программа производит фитирование кривой блеска с учетом температуры и размера звезды, потемнения звезды к краю, предполагаемого орбитального периода и эксцентриситета орбиты планеты.

### 4. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

В 18:31:38 UT 15 июня 2015 г. телескоп Swift Burst Alert [18–23] обнаружил вспышку V404 Cyg, которая ознаменовала вступление в новый период рентгеновской активности [24]. Оптические телескопы Глобальной сети МАСТЕР первыми определили координаты оптического источника рентгеновской вспышки [25] после оповещения (прихода алерта) от детектора Swift-BAT с орбитальной обсерватории Swift [23]. В течение следующих нескольких недель роботизированные телескопы МАСТЕР-ИАС, МАСТЕР-SAAO, МАСТЕР-Тунка и МАСТЕР-Кисловодск выполнили 20 наведений на V404 Cyg по алертам. Летом и зимой 2015 г. сеть МАСТЕР получила несколько тысяч ПЗС-кадров в полосах В, V, R, I (система Джонсона/Бесселя) и поляризационных фильтрах. Полный список наблюдений приведен в работе [26, 27].

В результате поиска кандидатов в данной площадке была отобрана и исследована система TOI 3570, лежащая в поле V404 Cyg. Звезда TIC 136122328 (TOI 3570) имеет видимую звездную величину  $V=13.594\pm 0.149$  и характеризуется до-

## TIC 212957629.01 UT2015.06.29

MATER-IAC ( P filter, 180 exp, fap 7-10-18 )

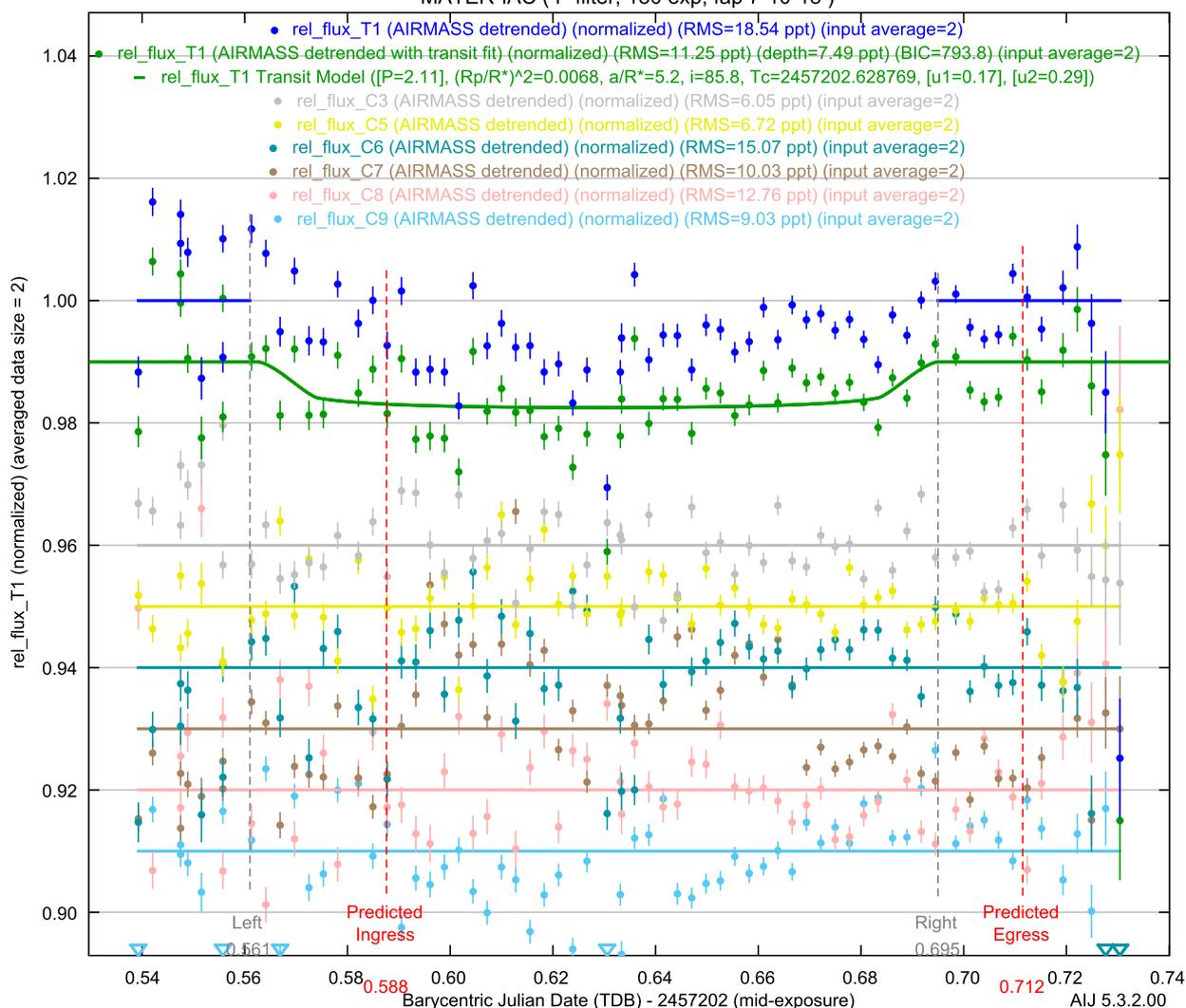


Рис. 2. Кривая блеска TOI-3570.01 в полосе P от 29 июня 2015 г., полученная телескопом MASTER-IAC. Длительность экспозиций 180 с, усреднение по 2 точки. Синие точки показывают результаты фотометрии, зеленые — результат исправления данных за поглощение в атмосфере, зеленая кривая показывает модель транзита, построенную программой AstroimageJ. Полученные из модели характеристики планеты указаны в верхней части графика

статочны необычными для звезд-хозяек экзопланет параметрами. Ее эффективная температура  $10984 \pm 130$  К при радиусе 1.35 солнечных и поверхностной гравитации  $\log(g) = 4.64$  (по данным TFOR<sup>2</sup>). Это, вместе с периодом экзопланетного кандидата TOI 3570.01 2.108 суток, делает эту систему достаточно необычной. Оценка эффективной температуры планеты составляет 3226 К. Подобных систем (типа KELT-9) ныне насчитывается около десятка.

Для системы TOI-3570 на ряд алертных наблюдений наложился несколько транзитов, что позволило извлечь необходимые для фотометрии транзита

кадры. Но не все из них позволили получить кривые блеска требуемой точности. Экспозиций длительностью 10 с в фильтрах В и V недостаточно для выявления транзитного события. Также часть рядов была получена при плохих погодных условиях. Однако ряд, снятый 29 июня 2015 г. в полосе P с экспозициями 180 с, показал высокую точность и позволил качественно прописать кривую блеска. Результаты фотометрии данного ряда представлены на рис. 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана новая программа по изучению экзопланет, не требующая проведения наблюдений и, следовательно, не нарушающая выполнение ос-

<sup>2</sup> <https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>

новых задач сетью МАСТЕР. Она базируется на исследовании архивных кадров Сети, составляющих длительные и однородные ряды наблюдений. Стратегия поиска подходящих для исследования кандидатов в экзопланеты основана на принципе максимальной экономии вычислительных мощностей серверов Глобальной сети МАСТЕР. Для системы TOI 3570 удалось построить кривую блеска с высокой фотометрической точностью, что гово-

рит о высокой эффективности данной программы.

МАСТЕР-Тунка поддержан государственным заданием Минобрнауки FZZE-2023-0004. Авторы благодарят за поддержку ректора МГУ В.А. Садовниченко и Программу развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

- [1] *Ricker G., Winn J., Vanderspek R. et al. // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. 1, id. 014003 (2015).*
- [2] *Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E. et al. // Advances in Astronomy. 2010, 30 (2010).*
- [3] *Lipunov V., Vladimirov V., Gorbovskoy E. et al. // Astronomy Letters. 63, 293 (2019).*
- [4] *V. Lipunov, V. Kornilov, K. Zhirkov et al. // Universe. 8, 271 (2022).*
- [5] *Abbott B., Abbott R., Abbott T. et al. // The Astrophys. J. Lett. 848, N 2. L12 (2017).*
- [6] *Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E. et al. // The Astrophysical Journal Letters. 850, L1 (2017).*
- [7] *Aartsen M., Ackerman M., Adams J. et al. // Astronomy & Astrophysics. 607, A115 (2017).*
- [8] *Sadovnichiy V., Panasyuk M., Svertilov S. et al. // The Astrophysical Journal. 861, 48 (2018).*
- [9] *Troja E., Lipunov V., Mundell C. et al. // Nature. 850, L1 (2017).*
- [10] *Laskar T., van Eerten H., Schadi P. et al. // The Astrophysical Journal. 884, 121 (2019).*
- [11] *Lipunov V., Kornilov V., Zhirkov K. et al. // The Astrophysical Journal Letters. 896, L19 (2020).*
- [12] *Kornilov V., Lipunov V., Gorbovskoy E. et al. // Experimental Astronomy. 33, 17 (2012).*
- [13] *Burdanov A., Popov A., Krushinsky V. et al. // Peremennye Zvezdy. 33, 2 (2013). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013PZ....33....2B/abstract>*
- [14] *Burdanov A., Benni P., Krushinsky V. et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 461, 3854 (2016).*
- [15] *Gehrels N., Chincarini G., Giommi P. et al. // The Astrophysical Journal. 611, 2 (2004).*
- [16] *Jensen E. // Astrophysics Source Code Library. ascl:1306.007 (2013). <https://ascl.net/1306.007>*
- [17] *Collins K., Kielkopf J., Stassun K. et al. // The Astronomical Journal. 153, 77 (2017).*
- [18] *Barthelmy S., Butterworth P., Cline T. et al. // AIP Conference Proceedings. 428, 99 (1998).*
- [19] *Barthelmy S. // AIP Conference Proceedings. 428, 129 (1998).*
- [20] *Parsons A., Barthelmy S., Barbie L. et al. // Bulletin of the American Astronomical Society. 31, 729 (1999). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999HEAD....4.2612P/abstract>*
- [21] *Parsons A., Barthelmy S., Barbie L. et al. // Bulletin of the American Astronomical Society. 31, 1473 (1999). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999AAS...195.7102P/abstract>*
- [22] *Barthelmy S. // SPIE Proceedings. 4140, 50 (2000).*
- [23] *Parsons A., Barthelmy S., Barbie L. et al. // Bulletin of the American Astronomical Society. 32, 1261 (2000). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000HEAD....5.4315P/abstract>*
- [24] *Barthelmy S., D’Ai A., D’Avanzo P. et al. // GCN Circular. 17929, 1 (2015). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015GCN.17929....1B/abstract>*
- [25] *Ivanov K., Gress O., Budnev N. et al. // GCN Circular. 17956, 1 (2015). <https://gcn.nasa.gov/circulars/17956>*
- [26] *Lipunov V., Kuznetsov A., Gorbovskoy E. et al. // Astronomy Reports. 63, 7. 534 (2019).*
- [27] *Lipunov V., Gorbovskoy E., Kuznetsov A. et al. // New Astronomy. 72, 42 (2019).*

## An algorithm for study transiting exoplanet candidates by the MASTER global robotic telescope net

A. N. Tarasenkov<sup>1,3,a</sup>, V. M. Lipunov<sup>1,2,b</sup>, A. S. Kuznetsov<sup>1</sup>, N. M. Budnev<sup>4</sup>, A. G. Tlatov<sup>5</sup>, V. V. Yurkov<sup>6</sup>

<sup>1</sup>*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia*

<sup>2</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

<sup>3</sup>*Experimental Astronomy Department, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia*

<sup>4</sup>*Irkutsk State University, Institute of Applied Physics, Irkutsk, 664003 Russia*

<sup>5</sup>*Kislovodsk Mountain Astronomical Station, Main Astronomical Observatory of RAS, Kislovodsk, 357700 Russia*

<sup>6</sup>*Blagoveshchensk State Pedagogical University, Blagoveshchensk, 675000, Russia*

E-mail: <sup>a</sup>[tarasenkov.an20@physics.msu.ru](mailto:tarasenkov.an20@physics.msu.ru), <sup>b</sup>[lipunov@sai.msu.ru](mailto:lipunov@sai.msu.ru)

The paper presents the basic principles of photometric research of exoplanet candidates through the analysis of archival wide-field images obtained on robotic telescopes of the MASTER global network of Moscow State University. An algorithm for studying candidates for transiting exoplanets was proposed and applied to study

and search for candidates for transiting exoplanets. It which does not interfere with the performance of the main tasks of the MASTER network - detection of optical components of high-energy astrophysical sources and study of the processes occurring in them on various time scales. A number of candidates from the field of microquasar V404 Cyg were studied. For the candidate TOI-3570.01, a light curve was obtained during the transit of a putative exoplanet with a high photometric accuracy.

PACS: 95.45.+i

*Keywords:* Exoplanets, photometry, transit, MASTER robotic telescopes.

*Received 31 December 2023.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2025. 80, No. . Pp. .*

#### Сведения об авторах

1. Тарасенков Александр Николаевич — вед. инженер; студент; тел.: (495) 939-50-63, e-mail: [tarasenkov.an20@physics.msu.ru](mailto:tarasenkov.an20@physics.msu.ru).
2. Липунов Владимир Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел: (495) 939-50-63, e-mail: [lipunov@sai.msu.ru](mailto:lipunov@sai.msu.ru).
3. Кузнецов Артем Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник ГАИШ МГУ; тел: (495) 939-50-63, e-mail: [akuznetsov@sai.msu.ru](mailto:akuznetsov@sai.msu.ru).
4. Буднев Николай Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор, декан; тел: (495) 939-50-63; e-mail: [nbudnev@api.isu.ru](mailto:nbudnev@api.isu.ru).
5. Тлатов Андрей Георгиевич — доктор физ.-мат. наук, директор Кисловодской солнечной станции РАН; тел: (495) 939-50-63, e-mail: [tlatov@sai.msu.ru](mailto:tlatov@sai.msu.ru).
6. Юрков Владимир Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент БПИУ; тел: (495) 939-50-63, e-mail: [yurkov@sai.msu.ru](mailto:yurkov@sai.msu.ru).