

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОПЛАНЕТ НА ТЕЛЕСКОПАХ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ МАСТЕР

© 2024 г. В. М. Липунов^{1,2,*}, А. Н. Тарасенков², А. С. Кузнецов², П. В. Балануца^{2,3},
Г. А. Антипов², Я. Ю. Кечин², Н. В. Тюрина², Е. С. Горбовской², Д. Бакли⁴, К. Франсиле⁵,
Ф. Подеста⁵, А. Г. Тлатов⁶, Р. Реболо Лопез⁷, Н. М. Буднев⁸, О. А. Гресс⁸, В. В. Юрков⁹

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

³Научно-исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

⁴Южно-Африканская Астрономическая обсерватория (SAAO), Кейптаун, ЮАР

⁵Астрономическая обсерватория Феликса Агилара (OFA),
Национальный университет Сан-Хуана, Аргентина

⁶Главная Астрономическая Обсерватория,
Кисловодская горная астрономическая станция Российской академии наук (КАС ГАО РАН), Кисловодск, Россия

⁷Институт астрофизики Канарских островов (IAC), Ла-Лагуна (Тенерифе), Испания

⁸Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

⁹Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия

*E-mail: lipunov@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024

После доработки 17.04.2024 г.

Принята в печать 23.04.2024 г.

В работе представлен разработанный метод для обнаружения экзопланет в архиве изображений, полученных на телескопах Глобальной сети МАСТЕР МГУ с 2002 г. Уникальный архив представляет собой однородные фотометрические данные, полученные за 20 лет для северного (МАСТЕР-Амур, МАСТЕР-Тунка, МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Таврида, MASTER-IAC, MASTER-OAGH) и за 11 лет для южного неба (MASTER-OAFA, MASTER-SAAO). Особенности наблюдения полей ошибок гамма-всплесков на широкопольных телескопах МАСТЕР позволяют детектировать явления транзита и находить экзопланеты в архивных данных. В статье приведены результаты фотометрического анализа кандидата в экзопланеты TESS TOI–3570.01.

Ключевые слова: экзопланеты, транзитный метод, роботизированные телескопы, Глобальная сеть МАСТЕР МГУ

DOI: 10.31857/S0004629924060021 **EDN:** JMOBOK

1. ВВЕДЕНИЕ

С момента обнаружения первых экзопланет [1, 2]) уже обнаружено более 5000 таких объектов¹. Существуют различные методы поиска экзопланет, такие как гравитационное микролинзирование, измерения доплеровских смещений спектральных линий, пульсарный тайминг, транзиты [3–6]. Наибольшее число известных на данный момент экзопланет открыто специализированными космическими миссиями: CoRoT [7], Kepler [8], TESS [9]. Все эти аппараты используют эффективный метод детектирования

внесолнечных планет — фотометрию транзитов. Предложенный еще в эпоху фотографических наблюдений [10, 11], транзитный метод обладает рядом преимуществ. Во-первых, он основан на фотометрических методиках, которые являются достаточно дешевыми и простыми по сравнению со спектроскопическими. Во-вторых, он может быть реализован на широкопольных инструментах, позволяющих проводить мониторинг блеска сотен тысяч звезд одновременно в одной фотометрической системе. Кроме того, он позволяет определить важнейшую характеристику экзопланеты — ее радиус.

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

С помощью транзитного метода можно исследовать атмосферы экзопланет по результатам многополосной фотометрии [12], изучить активность звезды, анализируя кривую блеска на предмет прохождения планеты по пятнам [13]. Разновидностями транзитного метода является TTV-мониторинг, то есть обнаружение других планет в системе методом тайминга транзитов [14], а также его спектроскопическое приложение — спектроскопия в моменты транзита и вне его на специально приспособленных для этого инструментах, например JWST [15]. Прецизионная фотометрия экзопланетных транзитов позволяет также выявить такие тонкие детали, как несферичность планеты, наличие колец, спутников, «кометного» хвоста от испаряющейся атмосферы [16].

В настоящее время наблюдается тенденция перехода от открытия экзопланет к детальному исследованию их физических характеристик. Для этого используется целый комплекс инструментов, как наземных, так и космических. Но при этом малые фотометрические телескопы не теряют своей актуальности, поскольку для подтверждения экзопланеты нужны многочисленные фотометрические ряды наблюдений.

Особенный интерес для обнаружения экзопланет или определения параметров транзита представляет собой анализ многолетних архивов однородных данных, полученных на широкопольных телескопах, систематически проводящих алертные, инспекционные наблюдения целеуказаний и регулярный обзор неба в одной фотометрической системе, как это реализовано в Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР [17–24]. Особенности проведения алертных наблюдений МАСТЕРом позволяют детектировать параметры затмений, характерных для явлений транзита экзопланет.

2. ГЛОБАЛЬНАЯ СЕТЬ ТЕЛЕСКОПОВ-РОБОТОВ МАСТЕР

Для обнаружения и исследования астрофизических источников высоких энергий с 2002 г. [25] учеными Московского университета создавалась Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР [17–36], ключевыми особенностями которой являются: полная роботизация контроля оборудования и условий наблюдений; программное обеспечение обработки и анализа в режиме реального времени широкопольных изображений, получаемых на идентичном приемном оборудовании, распределенном по земному шару для контроля ближнего

и дальнего космического пространства и возможности сопровождения целеуказания 24 часа в сутки [20, 21]; быстрота наведения по заранее известным координатам (до $30^\circ/\text{с}$ [36]); полная роботизация процесса наблюдений до момента формирования научной публикации для обнаруженных явлений [33–35]. Все телескопы сети МАСТЕР объединены общими целями и задачами [26–31], что позволяет анализировать впоследствии длинные ряды однородных данных, находя среди них транзитные явления [37–39].

На каждой обсерватории Глобальной сети МАСТЕР установлены два широкопольных телескопа оптической системы Гамильтона с полем зрения $2^\circ \times 2^\circ$ каждый и с возможностью разведения и увеличения поля зрения до 8 квадратных градусов. Он оснащен ПЗС-матрицами APOGEE ALTA U16M и фотометром собственной разработки с набором фотометрических (*BVRI*, *W*(белый)) и поляризационных фильтров на каждой обсерватории [20]). Такая конструкция позволяет одновременно осуществлять наблюдения одного объекта в двух различных фотометрических полосах в режиме сведенных труб [20, 21] или в разных поляризационных фильтрах [21, 22, 26].

Все эти особенности показали эффективность при исследовании источников гамма-всплесков [22–36], гравитационно-волновых всплесков [23, 30, 31], нейтрино высоких энергий [24], быстрых радиовспышек [19]. Для гамма-всплесков, регистрируемых детекторами с малым полем зрения SWIFT (до 2020 г. регистрировал порядка 100 всплесков в год), Fermi-LAT (порядка одного события в месяц), Integral и MAXI (несколько штук в год) разработан специальный режим наблюдений до момента захода объекта за горизонт (или восхода Солнца). Такие серии (несколько часов непрерывных наблюдений одной площадки размером 4 квадратных градуса) наблюдений удобно использовать при поиске транзитов экзопланет [39].

Исследования точности фотометрии показали, что в режиме наблюдения без фильтра телескопом МАСТЕР-400 легко обнаруживается транзит глубиной в 1% у звезды $V = 13.5^m$ при экспозициях 180 с (см. рис. 1). В случае наблюдения в фильтрах аналогичная точность достигается для звезд $12 - 12.5^m$.

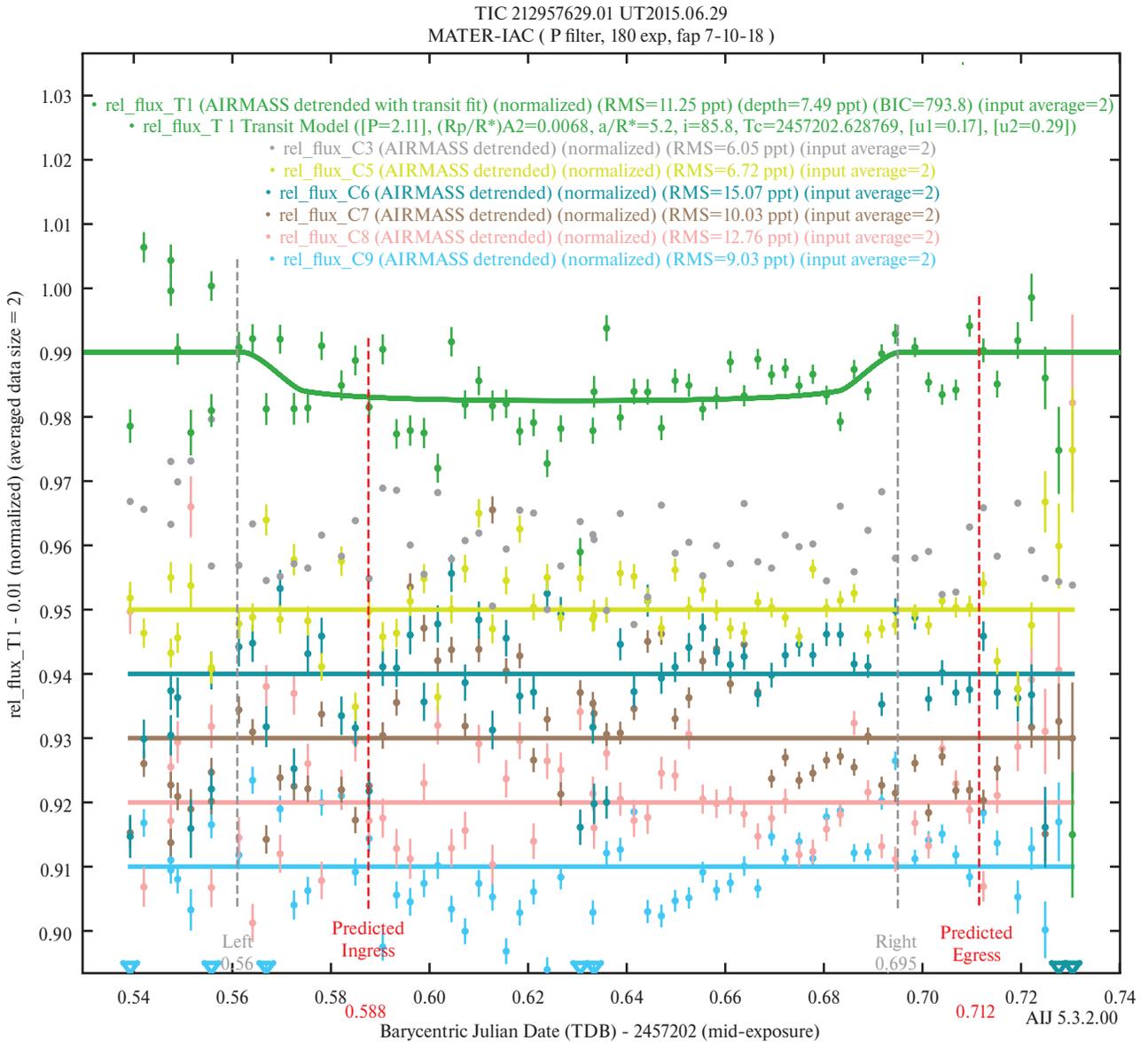


Рис. 1. Кривая блеска TOI–3570.01 в полосе *P* от 29 июня 2015 г., полученная телескопом MASTER-IAC. Длительность экспозиций 180 с, усреднение по две штуки (т. е. 360 с). Зеленые точки — результаты фотометрии, исправленные за поглощение в атмосфере, зеленая кривая показывает модель транзита, построенную программой AstroimageJ. Цветные точки внизу, аппроксимированные прямыми, представляют фотометрию звезд сравнения. Серые вертикальные линии указывают фактические начало и конец транзита, а красные — эфемериды, рассчитанные пакетом *Trig*. Полученные из модели характеристики планеты указаны в верхней части рисунка.

3. ПРОГРАММА ПОИСКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ МЕТОДОМ ТРАНЗИТА В АРХИВЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ МАСТЕР

Исследования экзопланет транзитным методом с помощью сети МАСТЕР проводились и ранее. Например, была реализована программа поиска экзопланет на телескопе МАСТЕР-Урал [37, 38]. Она была основана на последовательном наблюдении нескольких площадок на небе с последовательным перенаведением между ними. В результате были

обнаружены два кандидата [38]. Однако подобные программы требуют наблюдений большой длительности и не могут гарантировать открытия сразу после обработки кадров первой наблюдательной кампании.

Поэтому была разработана новая программа по поиску и изучению экзопланет, не требующая проведения наблюдений и, следовательно, не нарушающая выполнение основных задач Сетью МАСТЕР [39, 40]. Она основана на исследовании кадров из

архива сети МАСТЕР. В рамках предложенного метода изучаются плотные ряды наблюдений длительностью несколько часов в одном фильтре. Такой продолжительности достаточно для обнаружения транзита целиком, поскольку транзит экзопланеты обычно длится от десятков минут до нескольких часов. Архив Сети МАСТЕР содержит сотни подобных рядов, полученных более чем за 20 лет работы сети. Представленная программа состоит из двух основных частей: исследования известных кандидатов в транзитные экзопланеты и поиска новых экзопланет.

3.1. Исследования известных кандидатов в архиве МАСТЕРа

В настоящее время накоплено достаточно большое количество кандидатов в транзитные экзопланеты, обнаруженных космическими миссиями Kepler и TESS [8, 9]. Для их подтверждения или опровержения требуются в том числе длительные ряды фотометрических наблюдений транзитов. Обычно их получают путем наблюдения звезд-кандидатов на малых телескопах во время предполагаемого транзита [41]. В настоящем исследовании фотометрические ряды извлекаются из архива Глобальной сети МАСТЕР, специальных наблюдений не требуется. Получение кадров производится по следующему алгоритму:

1) Исследуется архив Глобальной сети МАСТЕР [40]. Отбираются площадки, которые наблюдались роботом-телескопом непрерывно длительное время (несколько часов и более [21, 32, 36]). Предпочтение отдается многоцветным одновременным рядам данных [22, 24].

2) Из каталога кандидатов в транзитные экзопланеты отбираются объекты, попадающие в площадку размером $2^\circ \times 2^\circ$ (поле зрения каждой из двух труб телескопов-роботов обсерваторий МАСТЕР) с центром в точке местонахождения транзитного события, для которого изначально получены кадры.

3) Среди попавших в поле кандидатов отбираются те, для которых режим съемки площадки позволяет достичь точности фотометрии, достаточной для обнаружения транзита. Отбор выполняется с использованием специальной метрики. Она позволяет отбросить слишком слабые звезды, для которых точность фотометрии слишком низка для обнаружения транзита. Слишком яркие звезды также отбрасываются, поскольку на большинстве кадров они перенакоплены. Также метрика учитывает, что точность фотометрии для ярких звезд выше, чем для слабых: чем ярче звезда, тем меньше пороговая

глубина транзитов, которые отбрасываются из-за невозможности детектирования слишком неглубоких событий.

4) Далее проверяются априорные эфемериды транзитов. Если транзит или большая его часть пересекается со временем съемки площадки, то такое событие отмечается как пригодное для дальнейших исследований. Эфемериды рассчитывались с помощью специального планировщика Tapir [42].

5) Для окончательно отобранных событий производится запрос в базу данных Сети МАСТЕР для получения необходимых кадров. Обычно извлекаются части кадров размером $15' \times 15'$ с центром на координатах звезды-кандидата. Все кадры при извлечении проходят стандартную калибровку конвейером МАСТЕР за токи смещения (BIAS), темновые токи (DARK) и «неоднородность чувствительности» (FLAT Field) [19–22].

3.2. Поиск новых экзопланет

В случае поиска новых кандидатов исследования проводятся по следующей схеме:

1) В архиве МАСТЕР выделяются ряды данных для площадок, которые наблюдались роботом-телескопом непрерывно длительное время. Приоритет отдается площадкам вне зоны сканирования TESS. Исследуемые площадки должны быть достаточно плотно заполнены звездами, чтобы увеличить вероятность открытия. При этом слишком плотные поля (например, вблизи центра Галактики) отбрасываются, так как их обработка затруднена.

2) Площадка разделяется на части размером $15' \times 15'$ для уменьшения нагрузки на вычислительные мощности. Края площадок отбрасываются, поскольку они подвержены искажениям из-за неточности наведения, аббераций и артефактов калибровки. Все извлекаемые части кадров при извлечении проходят стандартную калибровку конвейером МАСТЕР с коррекцией за токи смещения (BIAS), темновые токи (DARK) и «неоднородность чувствительности» (FLAT Field), как и в предыдущем случае.

3) Проводится обнаружение всех фотометрически переменных объектов в извлеченных кадрах. Для первичной обработки используется программный комплекс VaST [43]. Среди выделенных переменных отбираются все события, имеющие кривые блеска, соответствующие по форме и глубине транзиту.

4) Выявленные кандидаты направляются на подтверждение аналогично кандидатам TESS (см. раздел 4). Фотометрическая поддержка может выпол-

Таблица 1. Пример наблюдения транзитов экзопланет для поддержки TESS

Объект	Зв. величина TESS	Дата	Фильтр	Обсерватория МАСТЕР	Поле
TOI–3570.01	13.20	2015–06–29	<i>P</i>	IAC	V404 Cyg
HATS–72 b	11.39	2019–10–19	<i>W, P</i>	Кисловодск, Тунка, SAAO	SWIFT Alert
TOI–4609.01	10.41	2022–10–29	<i>W</i>	Кисловодск, Тунка	SWIFT Alert

няться, например, на телескопе МАСТЕР в Тунке, а спектроскопические наблюдения — на мощностях проекта EXPLANATION [44].

Важно отметить, что данный алгоритм исследований позволяет также обнаружить большое число переменных звезд и других переменных объектов. Для их подтверждения и каталогизации используется методика кросс-идентификации по различным архивам высокоточной фотометрии, предложенная в работе [45]. Предполагаемые переменные звезды, не указанные в качестве известных в базе данных VSX², отбираются для дальнейшего изучения. Длины рядов, скважности и точности фотометрии МАСТЕР в большинстве случаев достаточно для определения типа переменности обнаруженных объектов. Для контроля привлекаются различные архивы, например, могут использоваться данные ZTF [41, 46], ATLAS [47] и TESS [9], которые обрабатываются с использованием алгоритмов библиотеки Lightkurve [48]. Периоды и начальные эпохи определяются с помощью программы WinEfk³ [49], разработанной В. П. Горанским. Переменные звезды, имеющих одинаковые периоды по данным ZTF и TESS и отсутствующие в каталогах, считаются подтвержденными. Каждая из них отождествляется с источником Gaia DR3 [50].

Методика обработки площадок также предполагает возможность выявления событий гравитационного микролинзирования. Эти события могут дополнять уже известные ряды OGLE и KMT, и могут быть использованы для уточнения характеристик открытых этими проектами экзопланет. Кроме того, могут быть выявлены новые события, и открыты экзопланеты методом микролинзирования. Характерная длительность события микролинзирования — несколько месяцев. Однако важнейшая его деталь, вызываемая наличием именно планеты в системе, имеет продолжительность несколько часов, поэтому вклад в её исследования длинного

фотометрического ряда из мониторинга МАСТЕР может быть решающим для определения параметров планеты.

3.3. Результаты примененного метода

В результате анализа архива МАСТЕР выяснено, что за время работы Глобальной сети МАСТЕР было получено 903 не перекрывающихся по координатам и времени наблюдений рядов для алертов с аппарата SWIFT [51]. После получения алерта SWIFT-BAT МАСТЕР ведет наблюдения поля гамма-всплеска до захода объекта за горизонт либо до восхода Солнца, что обусловлено некоторыми особенностями блеска оптических источников всплесков [22–36].

В результате анализа этих полей по предложенному алгоритму выяснено, что во всех наблюдавшихся МАСТЕРом площадках в совокупности зафиксировано 148 транзитов у кандидатов TESS и 22 — у известных экзопланет (в центральной области площадью в квадратный градус), удовлетворяющих критериям отбора. Образец результатов обработки некоторых из них приведены в табл. 1.

4. НАБЛЮДЕНИЯ ТРАНЗИТОВ КАНДИДАТОВ В ЭКЗОПЛАНЕТЫ В РАМКАХ НАЗЕМНОЙ ПОДДЕРЖКИ TESS

На телескопах МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Таврида, МАСТЕР-Тунка и МАСТЕР-SAAO Глобальной сети МАСТЕР МГУ с конца декабря 2023 г. проводятся наблюдения транзитов экзопланет-кандидатов в рамках наземной поддержки миссии TESS (TFOP [52]). Для подтверждения кандидатов TESS необходимы спектроскопические наблюдения с целью определения массы предполагаемой планеты, получение изображений высокого качества, позволяющих избежать ошибочной идентификации переменности одного из компонентов визуально-двойной системы как транзита, а также высокоточная фотометрия транзитов. Все подобные наблюдения координируются рабочей группой TFOP. Специаль-

² <https://www.aavso.org/vsx/>

³ <http://www.vgoranskij.net/software/WinEfkVers2015-09-08.zip>

Таблица 2. Список кандидатов в экзопланеты, для которых были проведены наблюдения транзитов

Объект	Зв. величина TESS	Дата	Фильтр	Обсерватория МАСТЕР
TOI–3661.01	12.83	2023–12–29	$V + R$	Кисловодск
TOI–3770.01	13.47	2023–12–29	$V + R$	Кисловодск
TOI–6386.01	13.08	2023–12–30	BLANK	Таврида
TOI–3854.01	13.23	2024–01–06	$R + I$	Кисловодск
TOI–4436.01	11.89	2024–01–06	$R + I$	Кисловодск
TOI–3779.01	13.42	2024–01–06	$R + I$	Кисловодск
TOI–3689.01	11.89	2024–01–07	$R + I$	Кисловодск
TOI–3788.01	11.33	2024–01–10	$R + I$	Кисловодск
TOI–2836.01	11.47	2024–01–13	$B + I$	SAAO
TOI–5615.01	13.07	2024–01–21	W	Тунка
TOI–3922.01	12.25	2024–01–21	W	Тунка
TOI–1875.01	12.94	2024–02–02	W	Тунка

ный сервис Tarig [42] позволяет получить эфемериды транзитов у кандидатов TESS для любой точки Земли: координаты звездной системы (со вторым компонентом-кандидатом в экзопланеты), момента начала и конца транзита и рекомендуемым моментам начала и конца наблюдений, азимут, высота и расстояние до Луны для каждого момента времени. Каждому объекту приписан приоритет для наблюдений (1 — максимальный, 5 — минимальный). Для каждого источника даются приоритетные фотометрические полосы для проведения наблюдений и её требуемая точность, а также информация о близких звездах, вносящих ошибки в наблюдаемые характеристики транзита в случае недостаточно хорошего качества изображения.

Список кандидатов в экзопланеты, для которых мы провели наблюдения транзитов, представлен в табл. 2, пример кривых блеска в разных фильтрах избранного транзита представлен на рис. 2. Все обработанные наблюдения загружаются на сайт программы поддержки ExoFOP-TESS⁴.

5. ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Фотометрия всех транзитов производилась в специализированной программе AstroimageJ, разработанной специально для получения кривых блеска транзитов экзопланет. Размер фотометрической апертуры рассчитывался, исходя из FWHM фотометрируемой звезды. Для улучшения точности расчетов были учтены характеристики ПЗС-матрицы теле-

скопа (gain, шум считывания), неоднородность фона по кадру и атмосферное поглощение. Программа моделирует кривую блеска в транзите с учетом температуры и размера звезды, потемнения звезды к краю, предполагаемого орбитального периода и эксцентриситета орбиты планеты, и производит аппроксимацию моделью результатов фотометрии (см. табл. 1 электронного Приложения; дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI статьи). В процессе обработки исследовано фотометрическое поведение звезд сравнения, переменные звезды исключены из анализа. На рис. 1 представлена кривая блеска с биннингом 2. Зеленые точки — это кривая блеска с учетом высоты над горизонтом (исправленная за воздушную массу [53]). Зеленая кривая показывает модель транзита, рассчитанную с учетом параметров звезды: температуры, радиуса, потемнения к краю, а также периода транзитной экзопланеты. Цветные точки внизу, аппроксимированные прямыми, представляют фотометрию звезд сравнения (см. табл. 1 из электронного Приложения). Серые вертикальные линии показывают фактические начало и конец транзита, а красные — эфемериды, рассчитанные пакетом Tarig.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

В эпоху детального исследования экзопланет транзитный метод является одним из основных способов изучения этих объектов. Он позволяет точно измерять радиусы экзопланет, исследовать их атмосферы по результатам многополосной фотометрии, изучать активность звезды, а также обнаруживать

⁴<https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>

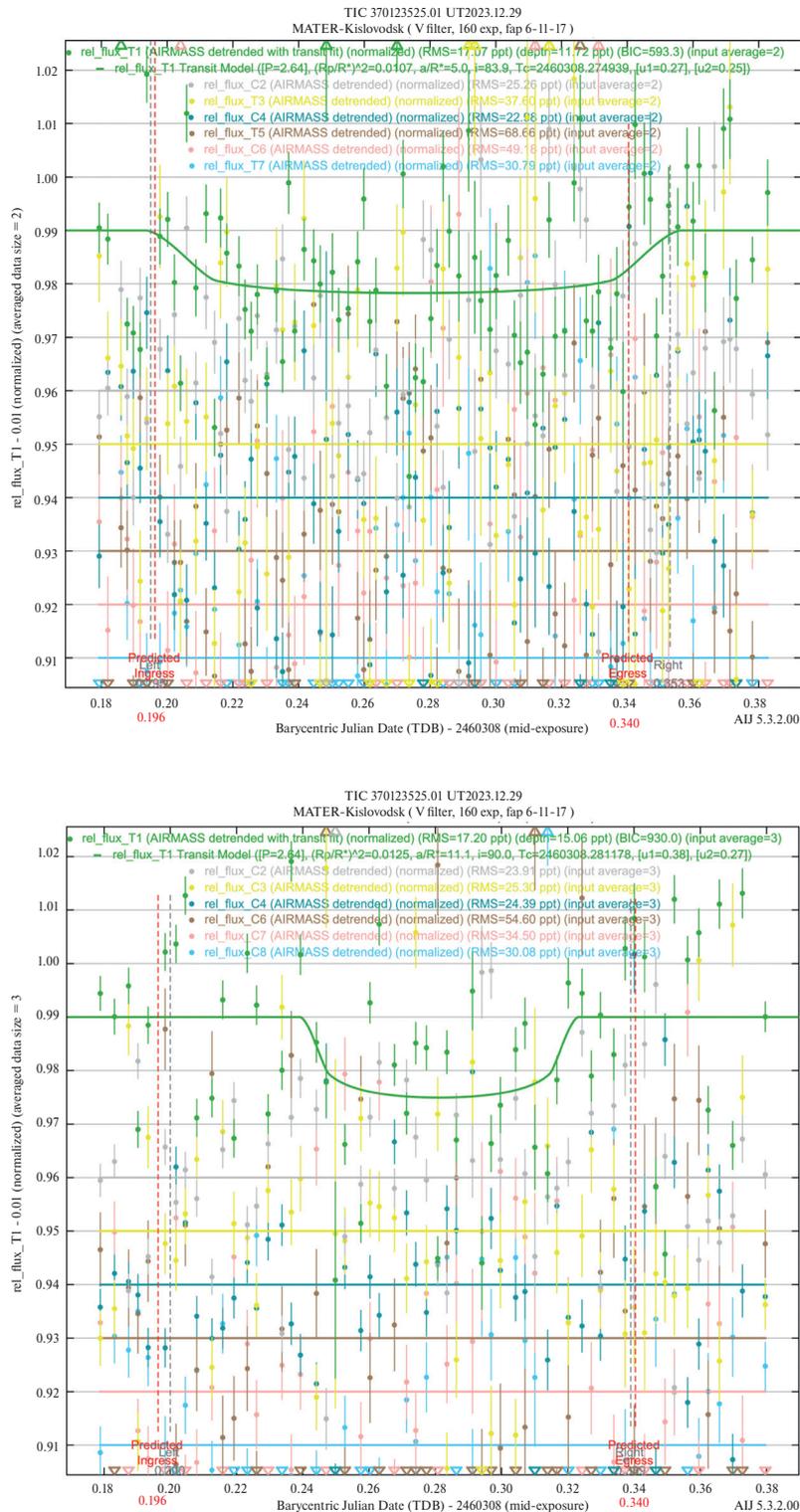


Рис. 2. Кривая блеска TOI-3661.01 в полосах *V* и *R* от 29 декабря 2023 г., полученная телескопом MASTER-Кисловодск (западный (*V*) и восточный (*R*) каналы). Длительность экспозиций 60 с, усреднение по 2 точки в полосе *V* и по 3 точки в полосе *R*. Зеленые точки — результаты фотометрии, исправленные за поглощение в атмосфере, зеленая кривая показывает модель транзита, построенную программой AstroimageJ. Цветные точки внизу, аппроксимированные прямыми, представляют фотометрию звезд сравнения. Серые вертикальные линии указывают фактические начало и конец транзита, а красные — эфемериды, рассчитанные пакетом Tarig. Полученные из модели характеристики планеты указаны в верхней части рисунка.

другие планеты в системе методом тайминга транзитов. Однако для достижения высокой точности измерений необходимы многочисленные наблюдения каждой системы. Они могут быть организованы специально в рамках программ наземной поддержки (ЕхoFOP-Kepler, ЕхoFop-K2, ЕхoFOP-TESS и т. д.). Однако существует другой, более эффективный метод получения кривых блеска транзитов внесолнечных планет. Он основан на анализе архивных рядов наблюдений. Ключевыми параметрами архивных кадров в этом случае являются размер поля зрения и длительность непрерывного ряда наблюдений. Среди обзорных широкопольных инструментов Глобальная сеть роботов-телескопов МАСТЕР МГУ является наиболее эффективной для поиска экзопланет в архиве наблюдений. Во-первых, роботы-телескопы Сети обеспечивают поле зрения $2^\circ \times 2^\circ$. Во-вторых, они могут производить мониторинг одного объекта одновременно в двух фотометрических полосах. Также, архив Сети МАСТЕР содержит уникально большой объем данных, полученных за 20 лет работы. Это позволяет развернуть высокоэффективную кампанию по исследованию архива Глобальной сети МАСТЕР как с целью исследования кандидатов в экзопланеты в дополнение к наблюдательным программам поддержки, так и поиска новых внесолнечных планет. В рамках данной кампании будут получены десятки высокоточных кривых блеска транзитов, открыты сотни новых переменных звезд, а также могут быть обнаружены ранее неизвестные внесолнечные планеты.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана альтернативная программа поиска и исследования экзопланет по архиву Глобальной сети МАСТЕР МГУ. Она основана на исследовании архива и выделении в рядах данных, полученных роботами-телескопами, транзитов как известных кандидатов в экзопланеты, так и новых внесолнечных планет. Были проведены исследования архива на предмет длинных рядов наблюдений и выделено более 900 таких уникальных рядов. Начато изучение экзопланет-кандидатов, обнаруженных космической обсерваторией TESS в этих полях.

Также Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР активно подключилась к наблюдениям транзитов экзопланет в рамках программы ЕхoFOP-TESS. На телескопах МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Таврида, МАСТЕР-Тунка и МАСТЕР-SAAO были проведены наблюдения транзитов-кандидатов в рамках данной программы. Результаты фотометрического анализа кандидатов в экзопланеты TESS

ТОI–3661.01, ТОI–3922.01, ТОI–1875.01, ТОI–5615.01, ТОI–2836.01, ТОI–3788.01, ТОI–3689.01, ТОI–3779.01, ТОI–4436.01, ТОI–3854.01, ТОI–6386.01, ТОI–3770.01 загружены в базу данных ЕхoFOP. В электронном Приложении к настоящей статье представлена фотометрия транзита ТОI–3570.01.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Оборудование Глобальной сети МАСТЕР частично поддержано Программой развития МГУ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа была проведена с использованием данных ЕхoFOP-TESS.

Авторы благодарят А. В. Тутукова и А. Ф. Захарова за ценные замечания и советы. Авторы признательны В. П. Горанскому за предоставление программы WinEfk. Авторы благодарны рецензенту за ценные замечания и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. Wolszczan*, Bull. Amer. Astron. Soc. 23, 1347 (1991).
2. *M. Mayor and D. Queloz*, Nature 378(6555), 355 (1995).
3. *A. Zakharov*, New Astron. Rev. 53(7–10), 202 (2009).
4. *G. Ingrosso, S. Calchi Novati, F. de Paolis, P. Jetzer, A. A. Nucita, and A. F. Zakharov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 399(1), 219 (2009).
5. *A. F. Zakharov, G. Ingrosso, F. de Paolis, A. A. Nucita, F. Strafella, S. Calchi Novati, and P. Jetzer*, Adv. Space Research 54(7), 1319 (2014).
6. *A. F. Zakharov*, J. Physics. Conf. Ser. 678, id. 012010 (2016).
7. *A. Baglin, M. Auvergne, P. Barge, M. Deleuil, E. Michel, and CoRoT Exoplanet Science Team*, Proc. IAU Symp. 253 Transiting Planets (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009), p.71.
8. *W. J. Borucki, D. Koch, G. Basri, N. Batalha, et al.*, Science 327(5968), 977 (2010).
9. *G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, D. W. Latham, et al.*, J. Astron. Telesc. Instrum. and Systems 1, id. 014003 (2015).
10. *O. Struve*, Observatory 72, 199 (1952).
11. *A. V. Tutukov*, Nauchnye Informatsii 63, 161 (1987).
12. *J. Schneider*, Astrophys. Space Sci. 212(1–2), 321 (1994).
13. *B. M. Morris, L. Hebb, J. R. A. Davenport, G. Rohn, and S. L. Hawley*, 846(2), id. 99 (2017).

14. *E. Agol, D. Fabrycky*, in Handbook of Exoplanets, edited by J. A. Belmonte and H. Deeg (Springer Cham., 2017), p. 797, https://doi.org/10.1007/978-3-319-55333-7_7.
15. *B. J. Hord, E. M.-R. Kempton, T. Evans-Soma, D. W. Latham, et al.*, *Astron. J.* 167(5), id. 233 (2024).
16. *M. Khodachenko, O. Arkhypov, and M. Güdel*, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, held 15–20 September 2019 in Geneva, Switzerland, Abstracts 13, id. EPSC-DPS2019-121-1 (2019).
17. *V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, N. Shatskij, et al.*, *Adv. Astron.* 2010, id. 349171 (2010).
18. *V. M. Lipunov, V. V. Vladimirov, E. S. Gorbovskey, A. S. Kuznetsov, et al.*, *Astron. Rep.* 63(4), 293 (2019).
19. *V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, K. Zhirkov, A. Kuznetsov, et al.*, *Universe* 8(5), id. 271 (2022).
20. *V. G. Kornilov, V. M. Lipunov, E. S. Gorbovskey, A. A. Belinski, et al.*, *Exp. Astron.* 33(1), 173 (2012).
21. *V. M. Lipunov, E. S. Gorbovskey, A. Kuznetsov, D. Vlasenko, et al.*, *New Astronomy* 72, 42 (2019).
22. *V. M. Lipunov, E. Gorbovskey, V. Kornilov, V. Krushinskiy, et al.*, 833(2), id. 198 (2016).
23. *V. Lipunov, E. Gorbovskey, V. G. Kornilov, N. Tyurina, et al.*, *Astrophys. J. Letters* 850(1), id. L1 (2017).
24. *V. Lipunov, V. Kornilov, K. Zhirkov, E. Gorbovskey, et al.*, *Astrophys. J. Letters* 896(2), id. L19 (2020).
25. *V. Lipunov, A. Krylov, V. Kornilov, G. Borisov, D. Kuvshinov, M. Kuznetsov, and S. Patanin*, GRB Coordinates Network Circ. 1770, № 1 (2002).
26. *E. Troja, V. M. Lipunov, C. G. Mundell, N. R. Butler, et al.*, *Nature* 547, 425 (2017).
27. *B. O'Connor, E. Troja, G. Ryan, P. Beniamini, et al.*, *Science Advances* 9(23), id. eadi1405 (2023).
28. *S. Dichiara, E. Troja, V. Lipunov, R. Ricci, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 512(2), 2337 (2022).
29. *V. M. Lipunov, V. A. Sadovnichiy, M. I. Panasyuk, I. V. Yashin, et al.*, 943(2), id. 181 (2023).
30. *V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, N. Tyurina, et al.*, *Astron. Rep.* 66(12), 1118 (2022).
31. *V. M. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, D. A. H. Buckley, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 465(3), 3656 (2017).
32. *V. A. Sadovnichiy, M. I. Panasyuk, S. I. Svertilov, V. M. Lipunov, et al.*, 861(1), id. 48 (2018).
33. *D. Buckley, V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, et al.*, GRB Coordinates Network Circ. № 35313 (2023).
34. *V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, K. Zhirkov, et al.*, GRB Coordinates Network Circ. № 34476 (2023).
35. *V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, K. Zhirkov, et al.*, GRB Coordinates Network Circ. № 32634 (2022).
36. *O. A. Ershova, V. M. Lipunov, E. S. Gorbovskey, N. V. Tyurina, et al.*, *Astron. Rep.* 64(2), 126 (2020).
37. *A. Burdanov, A. Popov, V. Krushinsky, and K. Ivanov*, *Peremennye Zvezdy* 33(2), 1 (2013).
38. *A. Y. Burdanov, P. Benni, V. V. Krushinsky, A. A. Popov, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 461(4), 3854 (2016).
39. *A. Tarasenkov, V. Lipunov, et al.*, *Moscow University Phys. Bull.* 79, in press (2024).
40. *A. Tarasenkov, V. Lipunov, et al.*, *Lobachevskii J. Math.* 8, in press (2024).
41. *M. J. Graham, S. R. Kulkarni, E. C. Bellm, S. M. Adams, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 131(1001), 078001 (2019).
42. *E. Jensen*, *Astrophys. Source Code Library*, record ascl:1306.007 (2013).
43. *K. V. Sokolovsky and A. A. Lebedev*, *Astron. and Comput.* 22, 28 (2018).
44. *G. Valyavin, G. Beskin, A. Valeev, G. Galazutdinov, et al.*, *Astrophys. Bull.* 77(4), 495 (2022).
45. *A. Tarasenkov, A. M. Zubareva, N. Maslennikova, and A. Belinskii*, *Peremennye Zvezdy Prilozhenie* 24(1), 1 (2024).
46. *F. J. Masci, R. R. Laher, B. Rusholme, D. L. Shupe, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 131(995), 018003 (2019).
47. *J. L. Tonry, L. Denneau, A. N. Heinze, B. Stalder, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 130(988), 064505 (2018).
48. *J. V. Cardoso, C. Hedges, M. Gully-Santiago, N. Saunders, et al.*, *Astrophys. Source Code Library*, record ascl:1812.013 (2018).
49. *A. V. Khruslov, A. V. Kusakin, E. A. Barsukova, V. P. Goranskij, A. F. Valeev, and N. N. Samus*, *Res. Astron. and Astrophys.* 15(7), id. 1005 (2015).
50. *A. Vallenari, A. G. A. Brown, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 674, id. A1 (2023).
51. *N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi, K. O. Mason, et al.*, 611(2), 1005 (2004).
52. NExScI Collaboration, IPAC, DOI 10.26134/EXOFOF5, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/doi.html>, <https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>
53. *K. A. Collins, J. F. Kielkopf, K. G. Stassun, and F. V. Hessman*, *Astron. J.* 153(2), id. 77 (2017).

THE DETECTION AND INVESTIGATION OF EXOPLANETS WITH MASTER GLOBAL NETWORK TELESCOPES

V. M. Lipunov^{1,2}, A. N. Tarasenkov², A. S. Kuznetsov², P. V. Balanutsa^{2,3},
G. A. Antipov², Ya. Yu. Kechin², N. V. Tyurina², E. S. Gorbovskoy²,
D. Buckley⁴, C. Francile⁵, F. Podesta⁵, A. G. Tlatov⁶, R. Rebolo Lopez⁷,
N. M. Budnev⁸, O. A. Gress⁸, V. V. Yurkov⁹

¹*Lomonosov Moscow State University, Physics Department, Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

³*Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

⁴*South African Astronomical Observatory (SAAO), Cape Town, South Africa*

⁵*Observatorio Astronomico Felix Aguilar (OAFa), National University of San Juan, Argentina*

⁶*Kislovodsk Mountain Astronomical Station, Main Astronomical Observatory of RAS, Kislovodsk, Russia*

⁷*Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), La Laguna (Tenerife), Spain*

⁸*Irkutsk State University, Institute of Applied Physics, Irkutsk, Russia*

⁹*Blagoveshchensk State Pedagogical University, Blagoveshchensk, Russia*

The paper presents the method for detecting exoplanets in the archive of images obtained on telescopes of the MASTER Global Network since 2002. The unique archive represents homogeneous photometric data obtained during over 20 years for the northern (MASTER-Amur, MASTER-Tunka, MASTER-Kislovodsk, MASTER-Tavrida, MASTER-IAC, MASTER-OAGH) and for 11 years for the southern sky (MASTER-OAFa, MASTER-SAAO). Algorithm of gamma-ray burst error box observation on the MASTER wide-field telescopes make it possible to detect transit phenomena and find exoplanets in archival data. The article presents the results of a photometric analysis of the TESS exoplanet candidate TOI–3570.01.

Keywords: exoplanets; transit method; robotic telescopes; MASTER Global Robotic Net