УДК 523.44

ГЛОБАЛЬНАЯ СЕТЬ ТЕЛЕСКОПОВ-РОБОТОВ МАСТЕР: НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДА NEA 2015 ТВ145

© 2019 г. Д. С. Зимнухов¹, В. М. Липунов^{1,2}, Е. С. Горбовской¹, В. Г. Корнилов^{1,2},
 Н. В. Тюрина¹, В. В. Чазов¹, А. В. Габович^{1,3}, П. В. Балануца^{1,2}, В. В. Владимиров¹,
 О. А. Гресс^{1,4}, А. С. Кузнецов¹, Р. Реболо Лопез⁵, М. Серра-Рикарт⁵,
 В. Юрков³, Д. М. Власенко^{1,2}, Н. М. Буднев⁴, Ю. П. Сергиенко³

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, 119234 Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, 119991 Россия

³Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск, 675000 Россия

⁴Иркутский государственный университет, Институт прикладной физики, Иркутск, 664003 Россия

⁵Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna, Tenerife, Spain

Поступила в редакцию 27.02.2019 г.; после доработки 21.06.2019 г.; принята к публикации 25.06.2019 г.

Представлены результаты фотометрии в белом свете уникально длиной серии (13.5 часов наблюдений, 1124 измерения) близкого астероида NEA (AC3) 2015 ТВ145, полученные на широкопольных телескопах-роботах МАСТЕР-Амур и МАСТЕР-Таврида Глобальной сети МАСТЕР МГУ, расположенных в Крыму и в Благовещенске. За время наблюдений объект прошел более 120°. Астероид прошел точку наибольшего сближения с Землей, т.е. наблюдения велись как на встречном курсе, так и вдогонку. Таким образом, за счет геометрии пролета наш временной ряд наблюдений содержит информацию об астероиде с принципиально разных углов и намного лучше подходит для определения именно формы объекта. Проведено математическое моделирование кривой блеска и астрометрических положений (код Asteroids3D), в результате которого получены вероятная форма астероида (коническая) и период вращения вокруг оси 5.9 часов (что в пределах ошибок совпадает с удвоенным периодом 2.9 часа, полученным другими наблюдателями, опубликованным ранее), а также ориентация оси вращения в эклиптических координатах: долгота $\lambda = 53^\circ$, широта $\beta = -20^\circ$.

DOI: 10.1134/S0004629919120119

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены результаты наблюдений астероида NEA(AC3) 2015 ТВ145 [1], сближавшегося с Землей в октябре 2015 г. Наблюдения выполнены на телескопах-роботах Глобальной сети MACTEP МГУ, которые также открывают потенциально-опасные астероиды [2].

Астероид NEA 2015 ТВ145 был обнаружен 10 октября 2015 г. телескопом PanSTARRS [1] как двигающийся объект 20-й видимой звездной величины^{1,2,3}. 31 октября 2015 г. астероид пролетал на минимальном расстоянии от Земли 0.00326 а.е. (это был самый близкий пролет известных крупных астероидов до 2027 г.⁴) и имел максимальный блеск 10^m [3, 4], что позволило получить его фотометрию и оценить форму⁵, размер и другие параметры [1, 3–10].

Астероиды, которые при пролете мимо Земли приближаются к ней на расстояние меньше 1.3 а.е., называются NEA (The Near-Earth Asteroid/AC3), что и дало название исследуемому нами NEA 2015 TB145. По оценкам эксперимента WISE [9] из 8000 известных околоземных астероидов 5200 имеют характерный размер больше 100 метров,

¹https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=2015TB145;cad=1 ²https://cneos.jpl.nasa.gov/tools/ast_size_est.html

³Астероид получил название "Хэллоуин" (Halloween) изза совпадения двух факторов: первое — его форма, восстановленная по изображениям в радиодиапазоне, полученным на телескопе Обсерватории Аресибо, похожа

на череп человека, и второе — время пролета совпало с одноименным праздником [1].

⁴https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/2009FD/2009FD_ planning.html

⁵https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4760

а количество астероидов с размером более 1 км оценивается⁶ более чем в 1100 (с оценкой [9], что свыше 90% уже известны). На момент обнаружения ТВ145 программа наблюдения за безопасностью околоземного пространства NASA насчитывала 1605 обнаруженных потенциально опасных астероидов, и исследуемый астероид был классифицирован как потенциально опасный (на сайте MPC^7) на основании оценок параметров сближения [3]. В октябре 2015 г. ТВ145 пролетал на расстоянии, равном 1.3 расстояний до Луны, что было самым близким его приближением к Земле на 500 лет вперед. Следующие ожидаемые сближения таковы: 29 октября 2023 г. астероид пройдет в пределах 0.064 а.е. (9600000 км) от Земли, а в следующий раз такой близкий пролет ожидается⁸ 1 ноября 2088 г. [2,3].

Исследования TB145 проводили несколько групп наблюдателей в различных диапазонах длин волн⁹, например:

в оптическом диапазоне МАСТЕР (1124 фотометрических измерения за 10 ч непрерывных наблюдений 31 октября и 3.5 ч непрерывных наблюдений 29 октября 2015 г., подробнее представлены далее в статье) и телескопы [5]:

а) обсерваторий Тейде и Ла Пальма Института астрофизики Канарских островов

— IAC80 (диаметр 0.8 м; приемник CAMELOT с полем зрения 10', в полосе R), время наблюдений 5 ч в ночь с 28 на 29 октября 2015 г. и 5 ч в ночь с 29 на 30 октября 2015 г., авторы отмечают недостаточное качество полученных изображений [5];

— **ORM-INT** (диаметр 2.5 м, WFC ПЗС-камера с полем 22' × 11', в полосе г_Sloan), суммарное время 3 ч в ночь с 27 на 28 октября 2015 г., авторы отмечают, что этого времени не достаточно для определения периода [5];

b) AIRA **Buc-T50** (диаметр 0.5 м, SBIG ПЗС, поле 16' × 11', в белом свете), суммарное время 11 ч за три ночи с 28 по 31 октября 2015 г.;

c) **IAO-T35** (диаметр 0.36 м, SBIG STE1001е, поле 25' × 25', в фильтрах V_Johnson, r_Sloan),

⁹http://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_ object?utf8=?&object_id=2015+TB145 суммарное время 4 ч в ночь с 29 на 30 октября 2015 г.) [5].

- в ИК диапазоне на телескопе VLT обсерватории ESO (спектральный и фотометрический приемник VLT-VISIR, в полосе 8– 13 мкм (полоса N), наблюдение проходило сериями в фильтрах J8.9 (8:72 мкм), SIV_2 (10.77 мкм) и PAH2_2 (11.88 мкм): 05:44– 07:58 UT, 08:25–09:10 UT 30 октября 2015 г. (суммарное время порядка 3 ч [3]);
- в радиодиапазоне на радиотелескопах Green Bank Telescope (GBT, диаметр антенны 100 м, рабочий диапазон от 2.6 мм до 3.0 м) и Arecibo (диаметр антенны 304 м, рабочий диапазон от 3 см до 1 м) — одна из лучших реализаций программы NASA радарных наблюдений астероидов с разрешением до 2 метров на пиксель [3].

Размеры астероида вместе с формой и альбедо были свободными параметрами в моделях NEATM [3] и, по их оценкам, составили порядка 625– 700 м (альбедо 5.1%), поверхность пятнистая, форма близка к сферической [3]. В этой же работе приводятся две оценки периода: 2.939 ч и 4.779 ч.

Орбита NEA 2015 ТВ145 имеет следующие параметры [3]: эксцентриситет e = 0.86, наклон $i = 39.7^{\circ}$ (большую часть времени проводит значительно ниже плоскости эклиптики), большая полуось a = 2.11 а.е.

31 октября 2016 г. в 11:00 UT астероид находился в созвездии Тельца на угловом расстоянии 9° от Луны и двигался со скоростью 3.4°/ч [5]. Во время сближения астероид находился в созвездии Большой Медведицы в 56° от Луны и двигался со скоростью 14.7°/ч [5] (рис. 1).

Мы проводили наблюдения на телескопахроботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ [11], расположенных на Дальнем Востоке (МАСТЕР-Амур) и в Крыму (МАСТЕР-Таврида).

2. СЕТЬ МАСТЕР И ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНЗИЕНТОВ

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ является сейчас единственной развитой сетью телескопов, расположенных в Северном и Южном полушариях и объединенных общей задачей [11–15]. Ключевые особенности — идентичное приемное оборудование, географическая распределенность по земному шару, собственное программное обеспечение обработки широкопольных изображений в режиме реального времени (1–2 мин

⁶https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA14734

⁷https://www.minorplanetcenter.net/iau/Dangerous.html
⁸https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=2015TB145;cad=
=1#cad



Рис. 1. Расположение астероида 2015 ТВ145 в момент начала наблюдений.

после считывания с приемника), централизованное объединение баз данных изображений и результатов наблюдений всех телескопов сети МАСТЕР, что дает возможность проводить наблюдения одного объекта (целеуказания) до 24 ч в сутки в одной фотометрической системе и увеличивает эффективность исследования больших областей локализации алертов (например, тысячи квадратных градусов полей ошибок LIGO/Virgo).

Каждая обсерватория МАСТЕР — это двойной широкопольный (2 × 4 квадратных градуса в основном оптическом канале и 800 квадратных градусов — сверхширокопольный) цветной (BVRI + PP) поляризационный роботизированный телескоп.

Телескопы Глобальной сети МАСТЕР работают максимально автономно: программное обеспечение МАСТЕР автоматически отслеживает метеоусловия, эфемериды Солнца, получает калибровки, проводит обзор неба, в режиме реального времени (пока длится следующая экспозиция) проводит первичную обработку изображений (шум считывания BIAS, темновой ток DARK, учет неравномерности чувствительности приемника FlatField), выделяет и отождествляет все оптические источники на каждом изображении, автоматически фотометрирует их в системе VBRI или в белом свете, где звездная величина калибруется как W = = 0.2B + 0.8R по каталогу USNO-B1 — наиболее полному однородному каталогу северного и южного неба. Для калибровки берутся значения звездных величин R2, B2, при их отсутствии — R1, В1). Также система самостоятельно находит неизвестные раннее источники (стационарные и движущиеся) — оптические транзиенты (ОТ). Часть таких ОТ автоматически отсылается программным обеспечением MACTEP в международные центры соответствующих тематик. Например, информация об астероидах, в том числе новых потенциальноопасных, отсылается в центр исследования Малых планет NASA MPC (IAU) [2]. Некоторые надежно установленные оптические двойники гаммавсплесков автоматически публикуются в центре исследования гамма-всплесков NASA GCN [16, 17].

Среди кандидатов в транзиенты (быстропеременные объекты), предлагаемых роботом MA-СТЕР (программным обеспечением обработки широкопольных изображений), встречаются новые объекты, вспышки на известных (каталогизированных) источниках или случаи шумов (блики, не до конца считанный с предыдущего изображения заряд ПЗС камер на местах ярких звезд и пр.), которые могут остаться после автоматической фильтрации в базе данных объектов. В такой ситуации визуальный контроль кандидатов в ОТ является необходимым этапом исследования.

Кроме того, для некоторых типов объектов (сверхновых, новых, карликовых новых, антитранзиентов, килоновых и т.д.) требуется дополнительный астрофизический анализ с помощью интерактивных инструментов, предлагаемых роботом (созданным астрономами группы MACTEP). Такой анализ осуществляется высококвалифицированными специалистами, имеющими максимально широкий кругозор в наблюдательной астрономии. В работе Глобальной сети MACTEP такие исследователи называются: "искателями". Искатели могут работать и со стационарными, и со двигающимися быстропеременными объектами. Поведение этих объектов сразу после начала вспышки или, например, по мере приближения к Земле (для двигающихся объектов), подлежит немедленному исследованию астрономами разных научных групп. Поэтому крайне важно немедленно сообщить об этом научной общественности и опубликовать информацию об открытии такого объекта. В таких условиях важнейшей частью математического программного обеспечения Глобальной сети MACTEP явилось создание эффективных интерактивных инструментов анализа обнаруженного объекта и его публикации в электронных циркулярах GCN, ATel и пр.

Процесс анализа происходит следующим образом. Программное обеспечение MACTEP отождествляет все оптические источники на широкопольных (2 × 4 квадратных градуса) или сверхширокопольных (порядка 800 квадратных градусов) изображениях с каталогом, выделяет на изображении некаталогизированный объект или объект, изменивший свою яркость на несколько величин, и предлагает его искателю.

Искатель в режиме реального времени открывает страницу с обнаруженным на широкопольных изображениях роботом MACTEP стационарным или движущимся (астероиды, кометы и др. тела Солнечной системы, напр., [2]) переменным объектом. Стационарный транзиент — это вспыхнувший на пустом месте объект или известный источник, изменивший яркость на несколько звездных величин, см., напр., [18–20].

Для проведения анализа искателем на МАСТЕ-Ре были созданы инструменты виртуальной обсерватории, которые содержат следующие сведения: внутренний идентификационный номер объекта, его координаты, время начала экспозиции, звездную величину объекта, автоматический предел на изображении, при наличии в пределах нескольких радиусов — галактику и расстояние до нее, доступ в PGC каталог к ее известным параметрам; классификатор объекта и имя пользователя, который его анализировал.

Возможности классификации кандидата созданы для развития нейронной сети МАСТЕР. Искатель определяет следующие значения: Транзиент (Yes), не транзиент (No), звезда неявной переменности (S), галактика (G), шум/блик от звезды/другой артефакт (Noice), BS (близко расположенные звезды), известный переменный объект (V), астероид/комета (на случай изменения формата в центре сбора данных по малым планетам NASA MPC), долгопериодическая переменная (напр., Мирида), другой случай, а также предоставляет возможность отправки на анализ другому искателю и возможность формирования телеграммы для отправки в ATel, GCN, IAUC, TNS.

Для анализа каждого стационарного транзиента искателю доступны (рис. 2а):

1) Изображения.

- изображение объекта на поле МАСТЕР часть кадра размером 6' × 6' (размеры выводимой части кадра, уровни яркости, координаты, сам fits-файл могут при необходимости меняться искателем в режиме реального времени);
- изображение со второй трубы МАСТЕРа в тот же момент времени (если есть, т.е. трубы были сведены и наблюдения проводились в параллельном режиме) или изображение с этой же трубы в другой момент времени за ночь;
- логарифм лучшего кадра за ночь (что актуально для сверхновых, проецирующихся на ядро галактики или для расположенных рядом ярких звезд);
- архивный снимок МАСТЕРа с текущей обсерватории (старше 4 мес.);
- масштабированное изображение 6' × 6' с оцифрованных Паломарских пластинок (Rфильтр, т.к. используемые МАСТЕРом ПЗС камеры имеют максимум чувствительности в красной области оптического спектра);
- возможность сделать разность (сразу показывается, если уже была сделана) текущего и архивного кадров;
- и (при наличии) масштабированное изображение этой области Слоуновского обзора.

2) Доступ в базы данных изображений по всем обсерваториям МАСТЕРа (-Амур, -Тунка, -Урал, -Кисловодск, -Таврида, -SAAO, -IAC, -OAFA), включая и центральную (физически расположена в Москве) — доступ к архиву изображений, каждое из которых при запросе обрабатывается за ~20 с.

3) Доступ к кривой блеска (возможность ее построения по каждой обсерватории отдельно занимает порядка 10-20 с и порядка 10-40 с по всей сети — в зависимости от количества данных в фотометрической базе данных).

4) Доступ к открытым источникам: несколько зеркальных источников VIZIER, SIMBAD, MPC,

ГЛОБАЛЬНАЯ СЕТЬ ТЕЛЕСКОПОВ-РОБОТОВ МАСТЕР



Рис. 2. Интерактивные веб-инструменты автоматического программного обеспечения MACTEPa, разработанные в группе MACTEP, для а) стационарных и б) двигающихся объектов. Панель инструментов позволяет искателю изменить статус объекта на один из возможных вариантов. Показаны три последовательных изображения астероида, полученных в текущую ночь наблюдений.

анализируя которые искатель исследует показатели цвета и сами потоки в оптическом и других диапазонах — ультрафиолетовом (GALEX), инфракрасном (WISE, ALLWISE, 2MASS), рентгеновском (Swift, Fermi, CHANDRA), радио-, а также автоматически проверяет координаты кандидата в транзиенты в центре сбора данных по телам Солнечной системы (MPC). 5) Проверка, не опубликован ли он в списке сверхновых или как переменная звезда (AAVSO) другими поисковыми проектами (CRTS, ASASSN, Gaia, ATLAS и др).

Подтверждая вспышку (или детектирование другого характера переменности объекта), искатель отправляет его руководителю проекта или текущему старшему наблюдателю (MASTER advocate) для подтверждения и дальнейшей срочной публикации (ATel, GCN).

МАСТЕР одновременно занимается решением нескольких ключевых задач современной астрофизики (исследование оптических источников гаммавсплесков, сверхновых, новых, карликовых новых, вспышек квазаров и т.д.), гравитационно-волновой астрономии (в коллаборации с LIGO/Virgo), нейтринной астрономии (в коллаборации с IceCube, ANTARES, Баксанской нейтринной обсерваторией), радиоастрономии (короткие радиовспышки FRB) и прикладных задач современной астрономии. Это современная физика, где сообщать об обнаружении нового объекта нужно немедленно, чтобы к исследованию процессов могли подключаться научные исследовательские центры с оборудованием в различном диапазоне длин волн для этого созданы центры оперативной публикации GCN, ATel, MPEC.

Поэтому, ввиду огромного ежедневного потока данных для обработки и анализа, процесс публикации научных телеграмм также максимально автоматизирован. Созданные в группе MACTEP инструменты виртуальной обсерватории позволяют автоматически формировать текст телеграммы для стационарных транзиентов с параметрами обнаруженного объекта, результатами первичного анализа, привлечением кривой блеска, возможностью запрашивать и автоматически подгружать на сервер изображения с момента обнаружения и исторических (архивных) снимков MACTEPa и подписи к ним.

Движущиеся объекты анализируются таким же образом программным обеспечением MACTEP и отправляются в MPC самостоятельно (автоматически [21–25]). Также есть возможность отправления телеграммы в MPC непосредственно авторизованным старшим искателем (текущим адвокатом).

Для анализа движущихся объектов наблюдателю доступны все вышеперечисленные возможности (рис. 2a, б), а также суммарный кадр в видеоформате для оценки достоверности обнаруженного объекта и возможности классификации: Star — обычная звезда, Noise — шум, Asteroid новый астероид, Comet — Комета, NotSure — требует дополнительного исследования, Defined — известный астероид. Робот МАСТЕР определяет параметры и направление движения объекта, автоматически формирует телеграмму и предлагает искателю возможность ее корректировки и отправки в MPC одной кнопкой.

Нами опубликованы десятки циркуляров в Центре малых планет Международного астрономического союза МРЕС, МРС¹⁰. В большинстве случаев наблюдений малых тел Солнечной системы роботы-телескопы МАСТЕР отправляют информацию автономно (автоматически), без вмешательства человека. На сайте МРС роботами сети МА-СТЕР опубликовано 1 611 623 измерений координат и блеска малых планет.

В настоящей работе мы представляем результаты наблюдений малых тел Солнечной системы в режиме автоматических наведений телескопов на быстролетящий астероид по заранее рассчитанным эфемеридам объекта.

3. НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДА 2015 ТВ145 НА ТЕЛЕСКОПАХ-РОБОТАХ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ МАСТЕР МГУ

Наблюдения потенциально опасного астероида 2015 ТВ145 проводились на телескопах-роботах МАСТЕР-Таврида и МАСТЕР-Амур Глобальной сети МАСТЕР [11-15] в белом свете (W = 0.2B + + 0.8R USNO-B1, см. также раздел 2).

Первая серия наблюдений 2015 ТВ145 была проведена на телескопе МАСТЕР-Таврида 29 сентября 2015 г., за 2 дня до максимального сближения с Землей. В этот день астероид находился на удалении ~5 млн. км, имел угловую скорость $\sim 3-5'/ч$ и звездную величину $\sim 14^{\rm m}$, поэтому для этих предварительных наблюдений использовался телескоп МАСТЕР-Таврида, расположенный на Крымской станции ГАИШ и работавший в тот момент в тестовом режиме. Так как скорость астероида была мала относительно последующих наблюдений, а пройденный им расчетный путь полностью укладывался в поле зрения телескопа МАСТЕР-Таврида, наблюдения производились на фиксированных координатах, и мы наблюдали последовательное движение объекта по кадру (см. рис. 3; сумма кадров в видеоформате дана по ссылhttp://master.sai.msu.ru/static/2015TB145 ке MASTER-Tavrida.gif, неравномерность фона связана с облачным слоем во время наблюдений, калибровки BIAS, Dark, FlatField учтены).

Наблюдения начались 29 октября 2015 г. в 19:02:42 UT на высоте 15° в условиях легкой облачности, которая не позволила зарегистрировать объект. Объект был уверенно обнаружен в 20:19:39 UT (по улучшению погодных условий) и наблюдался в течение 3.5 ч до 23:46:30 UT. Всего в ходе наблюдений было получено 150 экспозиций длительностью 60 с.

Второй и главный сет наблюдений был выполнен во время максимального сближения астероида 2015 ТВ145 с Землей. Согласно эфемеридным расчетам, на минимальном расстоянии от Земли астероид должен был пройти в момент времени в 17:01 UT11 31 октября 2015 г.: из условий видимости, наблюдения могли проводиться на востоке России. По погодным условиям в конкретный

¹⁰http://observ.pereplet.ru/aqr2019.htm



Рис. 3. Композиционное изображение астероида 2015 ТВ145 (прерывистая линия сверху вниз), полученное на телескопе МАСТЕР-Таврида. Изображение получено путем сложения каждого третьего снимка в серии наблюдений. Наблюдения астероида выстраиваются в "вертикальную" линию из точек. Сплошная линия — случайно попавший в поле зрения ИСЗ. Сложенные кадры (анимация наблюдений) доступны по ссылке http://master.sai.msu.ru/static/2015TB145_MASTER-Tavrida.gif. Размер поля зрения на представленном фрагменте 0.70° × 0.35° относительно центральной точки с координатами RA, Dec(2000) = 04^h28^m29908 + 01^d16^m06950.

день была выбрана обсерватория MACTEP-Амур в Благовещенске.

В отличие от наблюдений 20 октября на телескопе МАСТЕР-Таврида, 31 октября 2015 г. скорость астероида составляла уже 15''/c (= $15^{\circ}/4$). поэтому объект (при характерном размере поля в $2^{\circ} \times 2^{\circ}$) покидал пределы кадра за время порядка 5-10 мин и существенно смещался за время любой экспозиции. Для наблюдения такого быстродвижущегося объекта был задействован специальный, не стандартный для наблюдений на телескопах МАСТЕР, "следящий" режим наблюдений, при котором телескоп позиционировался (с небольшим упреждением) на объект перед каждой экспозицией. С целью съемки прохода данного астероида вся наблюдательная ночь телескопа МАСТЕР-Амур была выделена под наблюдение данного объекта. В силу большой скорости перемещения экспозиция каждого кадра была установлена 5 с.

Наблюдения 2015 ТВ145 начались через 1 ч после наступления ночи. В момент первой регистрации (после восхода) в 11:13:41 UT астероид в Благовещенске находился на высоте 5° над горизонтом и в 700 581 км от Земли. В дальнейшем на протяжении 10 ч телескоп-робот МАСТЕР-Амур сопровождал астероид 2015 ТВ145 и производил съемку длинной серией экспозиций. Момент, когда объект имел наименьшее расстояние до Земли, пришелся на 452 экспозицию серии, начатую в 16:59:15 UT (см. рис. 4). Последняя регистрация объекта была произведена в 21:11:14 UT при высоте Солнца – 11° (в утренних сумерках), когда объект находился в 776 161 км от Земли. Блеск астероида за время наблюдений на телескопе МАСТЕР-Амур изменялся в пределах от ${\sim}10^{\rm m}$ в начале наблюдений до ${\sim}13^{\rm m}$ в конце.

В общей сложности было получено более 1000 изображений астероида 2015 ТВ145 в момент, до и после максимального сближения с Землей на протяжении 10 ч. Астрометрические измерения были отправлены в МРС стандартной телеграммой. Результаты фотометрических исследований будут рассмотрены далее.

4. ТРАЕКТОРИЯ

Наблюдения, проведенные нашей группой, кардинально отличаются от большинства наблюдений этого и других астероидов, выполненных другими авторами.

Чаще всего наблюдения проводятся [3, 5] на значительном удалении астероида от Земли, когда угол между осью вращения астероида и лучом зрения практически не изменяется. При таких наблюдениях главную роль в кривой блеска играет период вращения астероида. На далеких расстояниях, из периода в период астероид будет попадать практически в одинаковые условия видимости, и влияние особенностей формы объекта будет проявляться только на больших временных масштабах.

В случае наблюдения астероида 2015 ТВ 145 телескопом-роботом МАСТЕР-Амур все наоборот. За время этих наблюдений астероид прошел точку наибольшего сближения с Землей, т.е. наблюдения велись, условно говоря, как на встречных курсах, так и вдогонку. Таким образом, за счет геометрии пролета, наш 10-часовой временной ряд



Рис. 4. Пример изображения астероида 2015 ТВ145 (в центре кадра) на телескопе MACTEP-Амур в момент максимального сближения с Землей. Размер поля зрения на изображении $1^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Полное поле зрения MACTEP-Амур $2.05^{\circ} \times 2.05^{\circ}$. Полная запись наблюдения доступна по адресу http://master.sai.msu.ru/static/2015TB145_q10_1_min.mpg.



Рис. 5. Траектория движения 2015 ТВ145 по небу во время сближения с Землей 31 октября 2015 г. за время его наблюдений телескопом роботом MACTEP-Амур в Благовещенске.

наблюдений содержит информацию об астероиде с принципиально разных углов и намного лучше остальных подходит для определения именно формы объекта, однако такой метод мало чувствителен к периоду (см. рис. 5).

5. ФОТОМЕТРИЯ И АСТРОМЕТРИЯ

Автоматическая обработка астрономических изображений системы МАСТЕР позволяет производить астрометрическую и фотометрическую привязку полученных изображений (кадров) и последующий поиск транзиентных явлений. Тем не менее фотометрическая точность данной автоматической обработки ограничена, что связано с тем, что за основу принимаются звездные величины из каталога большого числа звезд в поле, которые как имеют собственную переменность, так и подвержены систематическим неточностям каталога. Свои ограничения накладывают и погодные условия. Даже с учетом всех возможных коррекций точность абсолютной фотометрии составляет порядка 0.05 — 0.2^m (в зависимости от яркости объекта и предела на кадре).

В силу того, что в данном случае важны относительные изменения блеска, абсолютная привязка не особенно критична. Однако за время наблюдений объект прошел по небесной сфере более 120°, и даже относительная фотометрия приобретает определенные сложности, в первую очередь потому, что опорные объекты должны меняться со временем.

Еще одним фактором является форма изображения объекта, которая не только отличается от звездной, но еще и меняется со временем.

Выделение объектов на кадрах телескопов MA-СТЕР производится в автоматическом режиме с помощью программы sExtractor. Таким образом, фотометрия астероида 2015 ТВ145 представляет собой нетривиальную задачу, и использование стандартной автоматической абсолютной фотометрии телескопов MACTEP здесь неприменимо по следующим причинам.

1. Форма объекта вытянута (на кадре он представляет собой "полоску") и значительно отличается от формы всех опорных звезд.

2. Скорость объекта, а значит и его форма (длина полоски) меняются со временем.

3. За время наблюдения объект прошел очень большое расстояние на небесной сфере, из-за чего невозможно использовать один набор опорных звезд для всех кадров серии наблюдений. Каждые 5–10 кадров нужно выбирать новый набор опорных звезд.

4. На каждом кадре серии наблюдений телескоп позиционировался таким образом, чтобы объект находился в центре кадра, поэтому даже на соседних кадрах опорные звезды попадают на разные части поля зрения и могут иметь разную форму за счет дисторсии.

Привязка звездной величины движущегося объекта к звездным величинам опорных звезд из каталога USNO-B1 на каждом кадре приводила к большим ошибкам в фотометрии, так как объект прошел десятки градусов и внутренние ошибки каталога на разных участках неба приводили к большим неточностям. Поэтому для решения проблемы выбора опорных звезд последовательно для каждых двух соседних кадров выбирался набор ярких одиночных звезд, расположенных близко к объекту, по этой совокупности нормировался нуль пункт фотометрической системы для каждого кадра.

Для решения проблемы с формой объекта была выполнена апертурная и PSF фотометрия с разными PSF-моделями и апертурой. Наилучший результат показали два метода:

1. PSF фотометрия, с использованием метода оценки главных моментов изображения из работ [34, 35].

2. Апертурная фотометрия с маленькой апертурой, скорректированная на скорость движущегося объекта.

PSF-фотометрия дает более точный результат, однако ее нельзя применять в последние два часа наблюдений, так как объект находится на пределе регистрации и невозможно точно определить длину "полоски", иногда она определяется как два отдельных объекта. Поскольку для последующих попыток оценить форму астероида требуется высокое качество фотометрических данных, мы отбрасываем точки, когда соотношение сигнал/шум для объекта становится меньше 20 и точность фотометрии становится хуже 5%.

Апертурная фотометрия с апертурой радиусом порядка 2-3 пикселей дает удовлетворительные результаты до самого конца серии наблюдений, но в целом имеет больший разброс, а также требует априорного знания скорости объекта из эфемерид. Апертура устанавливается в центре полосы двигающегося объекта и перекрывает (соответственно измеряет) не полный инструментальный поток от вытянутого объекта (как в случае с PSF). а лишь его часть. Так как съемка велась фиксированными экспозициями, а угловая скорость перемещения объекта по небу в процессе наблюдений сильно изменялась, то при использовании заранее заданной, фиксированной, апертуры будет изменяться и доля энергии, ею (апертурой) измеряемая. В таком случае можно говорить, что экспозиция (эффективная экспозиция) для астероида на каждом конкретном кадре меньше реальной экспозиции кадра и составляет время, необходимое астероиду для пролета через нее. Поскольку такая эффективная экспозиция зависит только от угловой скорости объекта и размера апертуры, ее можно вычислить из эфемерид и ввести соответствующую коррекцию в измеряемый при помощи апертурной фотометрии инструментальный поток (см. рис. 6).

При помощи специально разработанной программы набор опорных звезд "двигался" от кадра к кадру. Поскольку поле зрения каждого из телескопов сети МАСТЕР составляет более 4 квадратных градусов, мы имеем возможность получить очень большой набор опорных звезд, порядка 2000 звезд на кадр, которые одновременно присутствуют на двух или более последовательных кадрах, чтобы максимально уменьшить влияние постепенного изменения данного набора. Даже в моменты с максимальной скоростью перемещения за время между двумя соседними экспозициями объект смещался не более чем на 20% от кадра. Поэтому каждая звезда, единожды попав в поле зрения, появится еще на 5 и более изображениях. Это позволяет выбирать между двумя соседними кадрами большое



Рис. 6. а) Два варианта относительной фотометрии астероида 2015 ТВ145 во время сближения с Землей 31.10.2015, полученные телескопом роботом МАСТЕР-Амур в Благовещенске. Данные скорректированы за трендовое изменение яркости объекта, обусловленное приближением и удалением астероида от точки наблюдения. Зеленым цветом показана апертурная фотометрия, фиолетовым — PSF фотометрия. Видно, что внутренняя точность PSF фотометрии лучше, однако ее использование ограничено только первыми 8 ч, когда яркость "полоски" достаточна для качественного определения формы объекта. б) Фотометрия астероида 2015 ТВ145, полученная тестовым телескопом роботом МАСТЕР-Таврида 29.10.2015. Первый час наблюдений не использовался для анализа.

количество (более 2000) одинаковых звезд удовлетворительной яркости (со статистической точностью фотометрии более 1%) и требовать, чтобы ансамбль этих звезд оставался постоянным. При переходе к следующему кадру ансамбль упорных звезд изменится, но не более чем на 20%. Таким образом, каждый раз от кадра к кадру требуя неизменности ансамбля опорных звезд, мы привязываем один кадр к другому.

В среднем, одна конкретная звезда является опорной для 10 кадров. Хотя подобные процедуры не нужны для фотометрии наблюдений, полученных в более раннюю эпоху телескопом MACTEP-Таврида, аналогичная процеду-



Рис. 7. Результаты моделирования с целью определения периода вращения астероида. По оси X отложен рассматриваемый период, в часах. По оси Y минимально возможное среднеквадратичное отклонение модельной кривой блеска при заданном периоде. В результате было определено значение периода с наименьшим отклонением 5.9 ч, что примерно равно удвоенному периоду 2.9 ч [34], опубликованному в других работах.

ра была произведена и для этих наблюдений. В случае наблюдений МАСТЕР-Таврида набор опорных звезд, естественно, оставался постоянным. Сумма изображений доступна по адресу http://master.sai.msu.ru/static/2015TB145_q10_ 1 min.mpg

В итоге для определения параметров 2015 ТВ145 использовалась PSF-фотометрия без учета последних 2 ч наблюдений.

6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Для определения основных физических свойств астероидов (периодов вращения, ориентаций осей вращения и форм) по набору фотометрических данных существует метод инверсии кривых блеска, который основан на моделировании интегрированных по диску кривых блеска [26, 27]. В работах [27–29] было показано, что на основе данных с космических аппаратов, лабораторных моделей и изображений, полученных при помощи адаптивной оптики с Земли, модели, полученные этим методом, являются хорошим приближением к реальной форме астероидов.

В стандартном подходе метод инверсии кривых блеска применяется к набору, как правило, десятков кривых блеска, наблюдаемых в течение по меньшей мере трех или четырех появлений. Только тогда можно однозначно получить состояние вращения и соответствующую форму (этот вывод относится, прежде всего, к астероидам главного пояса). Тем не менее Каасалайнен [30] показал, что для получения уникальной физической модели не обязательно иметь плотные кривые блеска, т.е. измерения, при которых блеск исследуемого астероида изменяется в течение полного оборота. Кроме того, в работе [31] авторы показали, что метод также может быть использован для моделирования разделенных данных, состоящих из нескольких точек в ночь. Как правило, разреженные данные состоят максимум из нескольких измерений за ночь. Набор из более чем ста калиброванных измерений, разбросанных по времени, полностью достаточен для моделирования, если фотометрическая точность данных лучше, чем $\pm 5\%$. На реальных примерах метод был опробован в работе [32].

Из сказанного выше видно, что рассматриваемый метод может быть применен к нашим данным. Поэтому для построения моделей был использован код Asteroids3D, основанный на базе данных астероидных моделей, полученных техникой фотометрической инверсии DAMIT [33].

В целях нахождения более устойчивого решения в многомерном пространстве параметров мы разбили задачу их поиска на 2 части. Вначале по кривой блеска были построены модели для разных значений периода и ориентации оси вращения. Для каждого из возможных периодов мы находили форму и начальное положение осей вращения, при которых модельная кривая наилучшим образом соответствует наблюдательной. График полученных при этом минимальных невязок представлен на рис. 7.

Рассматривался период от 2 до 11 ч с шагом 0.1 ч и 24 разные ориентации оси вращения, равномерно распределенные по сфере. При этом значение периода было фиксированным параметром,



Рис. 8. Результаты моделирования кривой блеска в Asteroids3D. Голубая линия — наблюдательные данные, желтая — модель.



Рис. 9. Форма астероида, полученная по результатам моделирования. Астероид имеет неправильную форму, которая в некоторых проекциях напоминает коническую (заметен скос). Из-за этого скоса форма плохо аппроксимируется стандартными фигурами вращения. Судя по форме, можно предположить, что астероид 2015 ТВ145 является осколком более крупного тела.

оно не изменялось в процессе работы программы, а ориентация оси была свободным параметром, как и форма объекта, ее значение подбиралось для наилучшего соответствия наблюдениям. Создатели кода Asteroids3D рекомендуют использовать 5—10 различных ориентаций оси. Для каждого значения периода и ориентации оси генерировалась модельная кривая блеска для периода наблюдений и вычислялась суммарная квадратичная ошибка между наблюдаемым и модельным значением блеска. В результате было определено значение периода с наименьшим отклонением: 5.9 ± 0.1 ч, что соответствует удвоенному периоду 2.9 ч [34], опубликованному в других работах. Ориентация оси вращения в эклиптических координатах: долгота $\lambda = 53^{\circ}$, широта $\beta = -20^{\circ}$.

Результаты моделирования кривой блеска в Asteroids3D представлены на рис. 8. Далее значение периода и ориентации оси использовались как фиксированные параметры, и модель (форма объекта) была уточнена за счет кратного увеличения сложности модели. Модельная кривая астероида полученной формы очень хорошо описывает

Ориентация оси вращения в эклиптических координатах: долгота $\lambda = 53^{\circ}$, широта $\beta = -20^{\circ}$.

наблюдаемую кривую блеска. Полученная форма

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ний астероида 2015ТВ 145 двумя телескопами се-

ти МАСТЕР: МАСТЕР-Таврида (Крымская аст-

рономическая станция МГУ) и МАСТЕР-Амур

(Благовещенск) во время рекордно близкого про-

лета мимо Земли в октябре 2015 г. Наблюдения

проводились 13.5 ч: 3.5 ч непрерывно 29 октября

2015 г. и 10 ч непрерывно 31 октября 2015 г. во

время максимально близкого прохождения. Пол-

ные данные по фотометрии и астрометрии пред-

120°. Астероид прошел точку наибольшего сбли-

жения с Землей, т.е. наблюдения велись как на

встречном курсе, так и вдогонку. Таким образом,

за счет геометрии пролета, наш 10-часовой вре-

менной ряд наблюдений содержит информацию об

астероиде с принципиально разных углов и намного

лучше подходит для определения именно формы

объекта, чем выполненные другими наблюдателя-

Для определения основных физических свойств

астероидов (периодов вращения, ориентаций осей

вращения и форм) по набору фотометрических дан-

ных мы использовали метод инверсии кривых блес-

ка, который основан на моделировании интегриро-

ванных по диску кривых блеска. Для построения

модели астероида использовался открытый пакет

рис. 8) на основе 3D моделирования позволили

рассчитать форму усеченного конуса и период об-

ращения астероида 5.9 ч, что не противоречит удво-

енному значению 2.939 ± 0.00 ч, опубликованному

ранее в работе [3] в качестве наиболее вероятного.

Другое значение периода вращения, полученное

другими наблюдателями [3,34], и равное 4.779 ±

 ± 0.01 ч [3], несовместимо с имеющимися измере-

Наши наблюдения астероида 2015 ТВ 145 (см.

программ код Asteroids3D [33].

ми [3-5], однако он малочувствителен к периоду.

За время наблюдений объект прошел более

В статье представлены результаты наблюде-

представлена на рис. 9.

ставлены в Приложении 1.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР поддержана Программой развития МГУ и МО "Оптика" (оборудование). Работа проведена при поддержке гранта РФФИ (17-52-80133).

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за ряд замечаний, позволивших существенно улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. R. J. Wainscoat, C. Wipper, and M. Micheli. Minor Planet Electronic Circ. No. 2015-T86 (2015).
- M. Schwartz, P. R. Holvorcem, J. Spagnotto, V. Lipunov, et al. Minor Planet Electronic Circ., No. 2015-V01 (2015); http://adsabs.harvard.edu/ abs/2015MPEC....V...01S.
- 3. T. G. Muller, A. Marciniak, M. Butkiewicz-Bak, R. Duffard, et al. Astron. and Astrophys. **598**, 63 (2017).
- 4. B. D. Warner, A. Carbognani, L. Franco, and J. Oey. Minor Planet Bull. **43**, 141 (2016).
- 5. O. Vaduvescu, A. Macias, A. Aznar, V. Tudor, et al. Earth, Moon, and Planets **120**, 41 (2017).
- 6. M. Micheli, R. Wainscoat, and L. Denneau. Minor Planet Bull. 43, 141 (2016).
- E. Bowell, B. Hapke, D. Domingue, K. Lumme, J. Peltoniemi, and A. W. Harris. In "Asteroids II" (University of Arizona Press, 1989, p. 524-556).
- 8. A. Harris and A. Harris. Icarus 126, 450 (1997).
- 9. A. Mainzer, T. Grav, J. Bauer, J. Masiero, et al. Astrophys. J. **743**, 156 (2011).
- 10. A. U. Tomatic, Minor Planet Electronic Circ. No. 2018-W41 (2018).
- V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, E. S. Gorbovskoy, N. Shatskij, et al. Advances in Astronomy, id. 349171 (2010).
- V. G. Kornilov, V. M. Lipunov, E. S. Gorbovskoy, A. A. Belinski, et al. Experimental Astronomy 33, 173 (2012).
- S. Gorbovskoy, V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, A. A. Belinski, et al. Astronomy Reports 57, 233 (2013).
- V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, E. S. Gorbovskoy, N. V. Tiurina, et al., Rev. Mex. Astron. Astrof. Conf. Ser. 48, 42 (2016).
- V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, A. V. Krylov, N. V. Tyurina, et al., Astronomy Reports 51, 1004 (2007).
- S. D. Barthelmy, P. Butterworth, T. L. Cline, N. Gehrels, G. J. Fishman, C. Kouveliotou, and C. A. Meegan. Astrophys. Space Sci. 231, 235 (1995).
- 17. V. Yurkov, Yu. Sergienko, D. Varda, E. Sinyakov, et al. GCN Circular 20063, 1 (2016).
- 18. P. Balanutsa, V. Lipunov, A. Tlatov, V. Kornilov, et al. Astron. Tel. 12524, 1 (2019).
- 19. P. Balanutsa, O. Gress, V. Lipunov, D. Buckley, et al. Astron. Tel. 12424, 1 (2019).
- 20. A. Chasovnikov, V. Lipunov, D. Kornilov, E. Gorbovskoy, et al. Astron. Tel. 12275, 1 (2018).
- V. Lipunov, E. Gorbovskoy, R. Rebolo, M. Serra-Ricart, et al. Minor Planet Electronic Circ. No. 2015-Q28 (2015).
- 22. V. Lipunov, E. Gorbovskoy, N. Tiurina, P. Balanutsa, et al. Minor Planet Electronic Circ. No. 2014-S14 (2014).

- G. Lehmann, A. Knoefel, P. Balanutsa, V. Lipunov, et al. Minor Planet Electronic Circ. No. 2013-S74 (2013).
- L. Buzzi, M. Serra-Ricart, M. Rodriguez, J. M. Bosch, et al. Minor Planet Electronic Circ. No. 2016-0266 (2016).
- 25. M. Kaasalainen and L. Lamberg, Inverse Problems 22, 749 (2006).
- 26. M. Kaasalainen and J. Torppa, Icarus 153, 24 (2001).
- 27. M. Kaasalainen, J. Torppa, and K. Muinonen. Icarus 153, 37 (2001).
- 28. S. Kaasalainen, M. Kaasalainen, and J. Piironen. Astron. and Astrophys. 440, 1177 (2001)
- F. Marchis, M. Kaasalainen, E. F. Y. Hom, J. Berthier, J. Enriquez, D. Hestroffer, D. Le Mignant, and I. de Pater. Icarus 185, 39 (2006).

- 30. M. Kaasalainen. Astron. and Astrophys. **422**, L39 (2004).
- 31. J. Durech, M. Kaasalainen, and B. D. Warner. BAAS **39**, 468 (2007).
- 32. J. Durech, M. Kaasalainen, B. D. Warner, M. Fauerbach, et al. Astron. and Astrophys. **493**, 291 (2009).
- 33. J. Durech, V. Sidorin, and M. Kaasalainen. Astron. and Astrophys. **513**, 46 (2010).
- T. Müller, A. Marciniak, C. Kiss, R. Duffard, et al. European Planetary Science Congress, EPSC2017-474 (2017).
- 35. E. Bertin and S. Arnouts. Astron. and Astrophys. Supp. 117, 393 (1996).
- 36. R. G. Kron. Astrophys. J. Supp. Ser. 43, 305 (1980).