

УДК 52-13

**Р. И. Гумеров², И. М. Хамитов¹, Л. А. Гудкова³, Н. В. Майгурова³,
Г. И. Пинигин³, О. М. Кочетова⁴, Ю. А. Чернетенко⁴, З. Аслан⁵,
А. В. Помазан³, В. Ф. Крючковский³**

¹Национальная обсерватория Турции
Тубитак, Анталия, Турция, 07058

²Казанский федеральный университет
ул. Кремлевская 18, Казань, Россия, 420008

³Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»
ул. Обсерваторная 1, Николаев, Украина, 54030
nadija@mao.nikolaev.ua

⁴Институт прикладной астрономии РАН
наб. Кутузова 10, Санкт-Петербург, Россия, 191187

⁵Университет культуры
Стамбул, Турция, 1427

Результаты наблюдений астероидов на российско-турецком телескопе РТТ-150 в 2004—2013 гг.

Представлены результаты анализа массива 13834 топоцентрических положений 231 астероида, полученных из наблюдений на российско-турецком телескопе РТТ-150, (Тубитак, Турция) в 2004—2013 гг. Положения астероидов вычислялись методом дифференциальной редукции в системе ICRS с использованием опорных каталогов серии UCAC. Программа наблюдений включала астероиды главного пояса, которые имели тесные сближения с другими астероидами, и астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). Средняя квадратичная ошибка одного положения составила 84 мсд по прямому восхождению и 68 мсд по склонению для астероидов главного пояса, для АСЗ — 160 и 120 мсд соответственно. Полученный массив положений астероидов расширяет дугу наземных наблюдений этих тел, что представляет важным для уточнения элементов их орбит. Кроме того, наблюдения астероидов главного пояса в периоды тесных сближений являются ценным материалом для решения задачи определения и уточнения масс астероидов динамическим методом. Показано, что добавление представляемых в статье наблюдений к входному набору данных при

решении задачи определения масс приводит к уменьшению погрешности определения массы возмущающего астероида и параметров орбит возмущаемых тел.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ АСТЕРОЇДІВ НА РОСІЙСЬКО-ТУРЕЦЬКОМУ ТЕЛЕСКОПІ РТТ-150 У 2004—2013 РР., Гумеров Р. І., Хамітов І. М., Гудкова Л. О., Майгурова Н. В., Пінігін Г. І., Кочетова О. М., Чернетенко Ю. А., Аслан З., Помазан А. В., Крючковський В. Ф. — Представлено результати аналізу масиву 13834 топозентричних положень 231 астероїда, отриманих із спостережень на російсько-турецькому телескопі РТТ-150, (Тубітак, Туреччина) в 2004—2013 рр. Положення астероїдів обчислювалися методом диференціальної редуції в системі ICRS з використанням опорних каталогів серії UCAC. Програма спостережень включала астероїди головного поясу, які мали тісні зближення з іншими астероїдами, і астероїди, які зближуються із Землею (А33). Середня квадратична похибка одного положення склала 84 мсд по прямому сходженню і 68 мсд по схиленню для астероїдів головного поясу, для А33 — 160 і 120 мсд відповідно. Отриманий масив положень астероїдів розширює дугу наземних спостережень цих тіл, що є важливим для уточнення елементів їхніх орбіт. Крім того, спостереження астероїдів головного поясу в періоди тісних зближень є цінним матеріалом для вирішення задачі визначення та уточнення мас астероїдів динамічним методом. Показано, що додавання спостережень до вхідного набору даних при вирішенні задачі визначення мас призводить до зменшення похибки маси астероїда, що обурює і параметрів орбіт обурених тіл.

THE ASTEROID OBSERVATIONS AT RUSSIAN-TURKISH TELESCOPE RTT-150 in 2004—2013, by Gumerov R. I., Khamitov I. M., Hudkova L. A., Maigurova N. V., Pinigin G. I., Kochetova O. M., Chernetenko Yu. A., Aslan Z., Pomazan A. V., Kryuchkovskiy V. F. — The analysis results of the array of 13834 topocentric positions of 231 asteroids are presented. These positions were obtained from observations at the Russian-Turkish Telescope RTT-150 (TUBITAK, Turkey) during 2004—2013. The asteroids positions were calculated by differential reduction method in the ICRS system with usage of reference catalogs of UCAC series. The main belt asteroids, which had close approach with other asteroids, and near-Earth asteroids (NEA) were included to the program of observations. The mean square errors of one position were 84 mas in right ascension and 68 mas in declination for main belt asteroids, for NEAs — 120 mas and 160 mas in right ascension and declination respectively. The resulting array of the asteroids positions extends arc of the ground-based observations of these bodies, that is important to clarify the elements of their orbits. In addition, observations of the main belt asteroids during close encounters are valuable for the asteroid mass determination with dynamic method. It is shown, that uncertainties of mass estimates of perturbing asteroid and orbital parameters of

perturbed bodies are decreased when these observations are added to the input data set for solving the task of the asteroid mass determination.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительный прогресс в наблюдениях тел Солнечной системы новыми техническими средствами, такими как радиолокационная, лазерная и космическая техники, наземные оптические наблюдения до сих пор не утратили своей актуальности и являются основным источником получения точных координат и блеска. Это связано с тем, что для построения современных моделей движения небесных тел важна не только точность отдельных положений, но и длина интервала времени наблюдений.

Все наблюдения астероидов, которые обсуждаются ниже, получены на российско-турецком телескопе РТТ-150 в рамках научного сотрудничества между Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Национальной обсерваторией Турции и Николаевской астрономической обсерваторией.

РТТ-150 [1] — 1.5-м зеркальный телескоп типа АЗТ-22, изготовленный в 1995 г. на АО ЛОМО (Санкт-Петербург) и установленный в 1998 г. в Национальной обсерватории Турции на высоте 2.5 км над уровнем моря. Телескоп имеет все необходимое оборудование для высокоточной астрометрии и фотометрии. Представляемый нами массив позиционных наблюдений астероидов получен с использованием двух современных ПЗС-камер: камеры ANDOR-DW436 (2К 2К, 13.5 13.5 мкм, 8.2 8.2 FOV, 0.24 /pix) и камеры TFOC (2К 2К, 15 15 мкм, 13 13 FOV, 0.39 /pix). Наблюдения выполнялись с использованием двух систем фотометрических фильтров: набора фильтров BVR_I , близких к системе Бесселя, и блока фильтров системы SDSS (g, r, i). Точная привязка моментов наблюдений на телескопе осуществлялась с помощью GPS-приемника. Следует отметить, что этот телескоп уже использовался для получения точных астрометрических наблюдений. В 2001—2003 гг. на нем был получен массив наблюдений более 300 внегалактических радиоисточников списка ICRF. Средняя точность оптических положений исследуемых объектов составила менее 60 мсд по обеим координатам [14].

ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ

Программа наблюдений астероидов на телескопе РТТ-150 включала два вида объектов: избранные астероиды главного пояса, которые имели тесные сближения с другими астероидами, и потенциально опасные астероиды, сближающиеся с Землей.

Наличие близких прохождений одного астероида относительно другого является одним из благоприятных условий определения массы более массивного астероида динамическим методом. Метод основан на учете изменений орбит возмущаемых тел в результате гравитационного воздействия на них более массивного (возмущающего) астероида. Формирование программы наблюдений астероидов производилось с учетом предварительных расчетов обстоятельств сближения, выполненных в работах [7—10, 13, 18]. Для наблюдений отбирались возмущаемые астероиды, вычисленные разности положений которых на возмущенной и невозмущенной орбите в наблюдаемых координатах превышали 50 мсд хотя бы по одной из координат. С учетом проникающей способности телескопа и условий видимости объектов нами было отобрано в конечном итоге 96 астероидов, которые имели тесные сближения с 28 возмущающими астероидами в период 2004—2013 гг. Список пар астероидов (возмущающий — возмущаемый) приведен в табл. 1. Как показано в работе [7], наибольшее от-

Таблица 1. Список пар астероидов, включенных в программу наблюдений на телескопе РТТ-150 в 2004—2013 гг.

Возмущающий астероид		Номера возмущаемых астероидов
Номер	Диаметр*, км	
1 Церера	952	5303, 1847, 4325, 5564, 8038, 8610, 13801, 15518, 43170, 46938, 52708, 57917, 71071, 88041, 97442
4 Веста	530	535, 17, 113, 15828, 30309, 42965, 71343, 93094
6 Геба	185	50561
9 Метиды	190	175, 18163, 42798, 56011
10 Гигея	407	75, 410, 209, 983, 3946, 6006, 11215, 24433, 465, 828, 3630, 6104, 19177, 30051, 49573, 165123
11 Парфенопа	153	28625
13 Эгерия	208	14689
14 Ирена	152	28701, 74483
15 Эвномия	255	765, 14401, 19028, 45467
16 Психея	253	60, 316, 468, 1054, 1082, 12621, 17794, 85665
24 Фемида	198	4366, 8970, 34519
29 Амфитрита	212	987
31 Евфросина	256	965
45 Евгения	215	834, 4959, 673, 47013
52 Европа	302	110, 124, 58, 6210, 8150
64 Ангелина		4000, 9921, 41858
72 Ферония	86	11349
87 Сильвия	261	846, 8976
88 Фисба	232	33578
94 Аврора	205	99042, 161165
128 Немезида	188	41756, 89949
268 Адорея	140	23578
423 Диотима	209	72812, 115432
511 Давида	326	1295, 11985, 82732
690 Вратиславия	135	257606
704 Интерамния	317	253, 977
762 Пулкова	137	14685
790 Претория	170	43488

*Размеры астероидов взяты с сайта JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>).

клонение орбиты в наблюдаемых координатах не соответствует моменту, когда астероиды находятся на минимальном расстоянии друг от друга. Поэтому крайне важным является получение продолжительной дуги наблюдений рассматриваемой пары астероидов, включающей не только момент тесного сближения, но и периоды до и после этого момента.

Программа наблюдений астероидов, сближающихся с Землей, формировалась на основе списка АСЗ, размещенного на сайте Minor Planet Center (MPC) (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/CloseApp.html>). Поскольку число этих объектов достаточно велико, в наблюдательный список включались только объекты, сближающиеся с Землей на расстояние менее 0.1 а. е., и АСЗ, которые являются кандидатами для обнаружения эффекта Ярковского из оптических наблюдений, согласно расчетам, выполненным в работе [5]. В настоящей работе мы не оценивали эффект Ярковского, но полученные результаты обработки наблюдений астероидов 1943, 2201 и 4179 [15] показывают перспективность использования наземных оптических наблюдений для решения этой задачи. Список АСЗ, для которых были получены наблюдения на РТТ-150 в период 2004—2013 гг., представлен в табл. 2.

Таблица 2. Астероиды, сближающиеся с Землей в массиве наблюдений РТТ-150

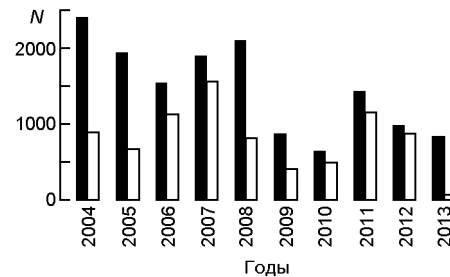
Астероид	Дата сближения*	Расстояние до Земли, а. е.*	Период наблюдений
433	2012-01-31	0.17868	2011-08-13
1036	2011-10-13	0.35910	2011-08-12
1943	2014-06-08	0.27395	2009-08-04 — 2009-08-19
2201	2012-03-11	0.36989	2009-08-19
4179	2004-09-29	0.01036	2004-07-21 — 2004-07-25
4179	2008-11-09	0.05025	2008-06-27 — 2008-12-02
4450	2008-02-19	0.04082	2008-01-22
7889	2005-01-28	0.25566	2005-04-21
23187	2006-03-06	0.02034	2006-03-29
35107	2008-08-15	0.04577	2008-05-012 — 2008-07-04
66063	2004-09-26	0.09213	2004-07-25
85640	2004-09-14	0.06429	2004-07-22
90403	2008-01-15	0.40128	2008-01-21 — 2008-01-23
99942	2013-01-09	0.09666	2013-01-22 — 2013-05-02
136617	2009-06-10	0.01684	2009-08-08
137170	2005-02-24	0.29552	2005-04-21
152770	2005-03-29	0.05681	2005-04-19
185851	2008-09-10	0.05787	2008-11-30
363116	2005-04-30	0.08649	2005-04-15 — 2005-04-19
2005AB	2005-03-28	0.17532	2005-04-21
2005NB7	2008-04-17	0.04222	2008-05-01 — 2008-07-04
2005GO22	2005-03-31	0.16662	2005-04-21
2005TF49	2006-04-16	0.05173	2006-03-29
2004XL14	2006-12-20	0.02786	2006-12-20

*Даты сближений и расстояния до Земли взяты с сайта JPL <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?>

НАБЛЮДЕНИЯ

За период 2004—2013 гг. было получено 1157 серий с наблюдениями 231 астероида общей численностью 13834 кадра. По программе определения масс возмущающих астероидов было получено более 8000 кадров с изображениями 96 возмущаемых астероидов, что составило около 60 % от всех полученных наблюдений. Массив наблюдений астероидов, сближающихся с Землей на потенциально опасные расстояния, содержит 60 серий 23 объектов (1409 кадров). Кроме этого, в представляемый позиционный массив вошли наблюдения 52 астероидов для других научных исследований и положения 60 астероидов, случайно попавших в поле зрения телескопа вместе с программными объектами. Распределение количества ПЗС-кадров с наблюдениями астероидов на РТТ-150 в 2004—2013 гг. представлено на рис. 1.

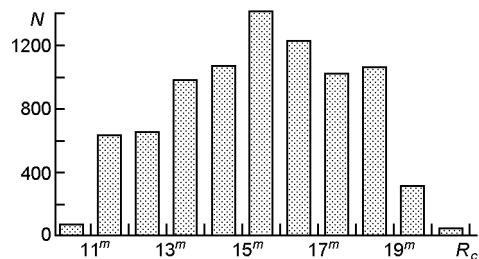
Рис. 1. Количество наблюдений астероидов полученных на РТТ-150 в 2004—2013 гг.: темные столбики — общее количество ПЗС-кадров; светлые — количество кадров, использованных для определения масс астероидов



Наблюдения астероидов выполнялись сериями по несколько кадров. Обычно в течение ночи получалось несколько серий наблюдений программного астероида с использованием разных фильтров. Среднее число кадров в серии наблюдений (медиана распределения) одного астероида составляет шесть, но для отдельных астероидов были получены продолжительные по времени серии наблюдений, содержащие более 100 кадров. Поскольку кроме кадров с программными объектами регулярно получались кадры смещения, темнового тока и плоских полей, этот наблюдательный материал представляет ценность и для фотометрических исследований.

Диапазон блеска программных астероидов составлял более 11^m . На рис. 2 приведена гистограмма распределения астероидов по видимой звездной величине в полосе R_c . Широкий диапазон блеска и использование различных цветных фильтров накладывали ограниче-

Рис. 2. Распределение количества N кадров по видимой звездной величине астероидов в полосе R_c



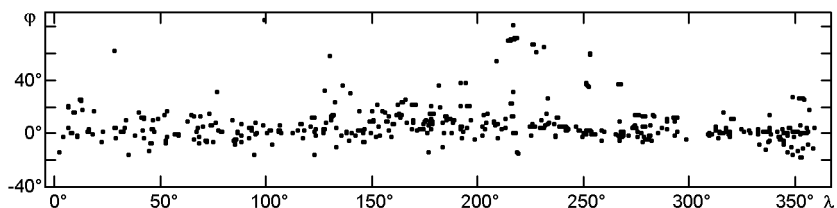


Рис. 3. Распределение наблюдений астероидов по небесной сфере в эклиптических координатах

ния на длительность экспозиции. Минимальная продолжительность экспозиции составляла 5 с для ярких объектов до 12^m в полосе R_c , максимальная экспозиция для слабых объектов в полосе B — 300 с.

Зона наблюдаемых склонений программных астероидов находилась в интервале от -30 до $+72$. На рис. 3 представлено распределение полученных наблюдений по небесной сфере в эклиптических координатах. Поскольку основную часть программных объектов составляли астероиды главного пояса, 92.5 % наблюдений находится в зоне ± 25 от плоскости эклиптики и достаточно равномерно покрывает весь диапазон эклиптических долгот. Исключение составляет группа АСЗ, объекты которой имеют довольно вытянутые орбиты и удаляются от эклиптики на значительные расстояния.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ РЕДУКЦИИ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Астрометрическая редукция наблюдательного материала выполнялась по стандартной схеме с помощью двух программных пакетов: «Astrometrica» (<http://www.astrometrica.at/>) и Izmccd [11]. Это связано с выбором различных функций для аппроксимации профиля изображений объектов на кадрах, полученных с использованием камер ANDOR-DW436 и TFOSC. Профиль изображения объектов на кадрах, полученных с камерой ANDOR-DW436, достаточно хорошо аппроксимируется сферически-симметричной функцией Гаусса (пакет «Astrometrica»), а для изображений, полученных с камерой TFOSC, наиболее подходящей моделью является функция Моффата. На рис. 4 приведены сравнительные результаты обработки наблюдений астероидов 2010 г. с камерой TFOSC (442 кадра, 75 серий) двумя пакетами в виде взаимного распределения средних значений разностей ($O - C$) и их средних квадратичных ошибок. Разности $O - C$ — это разности между положением астероида, полученным на кадре из редукций (O), и эфемеридным значением на момент середины экспозиции кадра (C), вычисленным с использованием сервиса HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>). Средние значения разностей, представленные на рис. 4, вычислены по сходимости отдельных значений $O - C$ в серии наблюдений одного объекта.

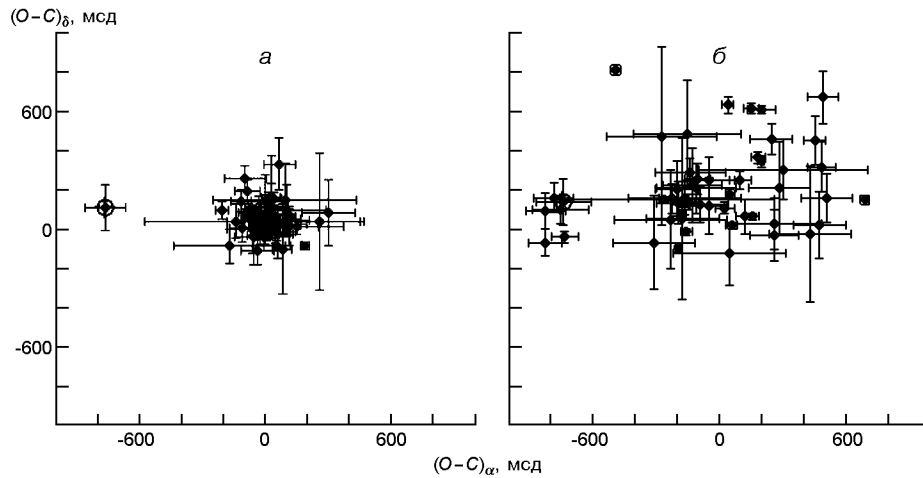


Рис. 4. Разности $(O - C)$ и их средние квадратичные ошибки, полученные в результате обработки наблюдений 2010 г. (камера TFOSC) программными пакетами: *a* — Izmccd, *б* — «Astrometrica»

Как можно видеть из рис. 4, *a*, использование функции Моффата при обработке кадров, полученных с камерой TFOSC, позволило улучшить точность измерений. Средние значения средних квадратичных ошибок разностей $(O - C)$ составляют 90 и 130 мсд по обеим координатам при обработке программными пакетами Izmccd и «Astrometrica» соответственно. Для отдельных слабых объектов достигнуто улучшение точности более чем в два раза. Полученный результат указывает на важность правильного выбора вида функции аппроксимации инструментального профиля изображений.

Как уже отмечалось, ПЗС-камеры, которые использовались для наблюдений, имеют небольшое поле зрения, поэтому в качестве модели связи измеренных и тангенциальных координат выбиралась линейная модель с шестью постоянными. Одной из главных проблем астрометрических редуций продолжительных рядов наблюдений является проблема выбора опорного каталога. На сегодняшний день в базе MPC собраны положения астероидов, полученные с использованием более 40 опорных каталогов. Несмотря на то что все они номинально получены в системе ICRS, систематические разности между ними могут быть весьма значительными, особенно это касается каталогов серии USNO, которые долгое время оставались единственным выбором для выполнения дифференциальных редуций в малых полях ПЗС-кадров. Первоначально обработка небольшой части представляемых наблюдений была выполнена с использованием каталога USNO-B1.0 [12], в системе склонений которого впоследствии были обнаружены значительные систематические ошибки, что привело к необходимости заново обработать эти наблюдения. В результате работ по расширению опорной системы каталога HIPPARCOS в область слабых звездных величин появился целый ряд точных и плотных каталогов звезд, которые позволили отказаться от использования каталогов USNO в качестве опорных каталогов. Для обработки представляемого массива

наблюдений мы использовали каталоги серии UCAC по мере их появления и доступности: UCAC2 (2004 г., [21]), UCAC3 (2010 г., [19]) и UCAC4 (2012 г., [20]). Мы не переводили все наблюдения в систему каталога UCAC4, так как исследования взаимных каталожных разностей положений и собственных движений показали, что величина систематических разностей между различными версиями этих каталогов меньше величины случайной ошибки наших измерений [20]. Обнаруженные ошибки в системе собственных движений каталога UCAC3 не оказывают существенного влияния на полученные нами положения, так как эпоха наших наблюдений достаточно близка к эпохе исходных наблюдений каталога UCAC. Время наблюдения серий кадров одного объекта обычно не превышало 30 мин, поэтому положения объекта в серии кадров, полученных в течение одной ночи, вычислялись с неизменным набором опорных звезд и практически в одной точке орбиты. Эти обстоятельства исключают систематическую составляющую, связанную с опорным каталогом и орбитальным движением, и позволяют использовать среднюю квадратичную ошибку (СКО) разностей $O - C$ внутри одной серии наблюдений в качестве оценки внутренней точности наших измерений. На рис. 5 представлен график зависимости усредненных значений СКО положения астероида по прямому восхождению и склонению от его видимой звездной величины в полосе R_c . Как уже отмечалось ранее, в течение одного вечера для каждого астероида обычно получалось 2-3 серии кадров в разных цветовых полосах. Основная часть представляемых положений получена с использованием фильтров B (10 %), V (20 %), и R_c (65 %).

Для построения графика использовались звездные величины объектов, полученные методом дифференциальной фотометрии в системе звезд опорного каталога. Вид полученной зависимости несколько отличается от экспоненциального закона, поскольку использовались различные экспозиции при наблюдениях слабых и ярких объектов. Резкое ухудшение точности для объектов слабее 19^m связано с тем, что эту группу составляют астероиды с низким отношением сигнал/шум, случайно попавшие в поле зрения телескопа вместе с программными объектами и АСЗ. АСЗ часто имеют большие скорости видимого движения, что приводит к вытянутости изображений и ограничениям времени экспозиции.

Среднее значение СКО положения для астероидов главного пояса составило 84 мсд по прямому восхождению и 68 мсд по склонению, для АСЗ — 160 и 120 мсд соответственно.

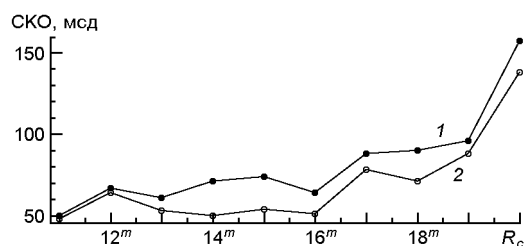


Рис. 5. Зависимости СКО положения астероида от звездной величины (1 — прямое восхождение, 2 — склонение)

Таблица 3. Внутренние (,) и внешние (,) погрешности наблюдений

Номер астероида	Количество серий	Количество кадров	Период наблюдений	σ_x , мсд	σ_y , мсд	σ_z , мсд	$\sigma_{\dot{x}}$, мсд	R_c
121	6	244	2004.9 — 2006.5	50	47	82	82	13.1 — 13.9 ^m
133	18	444	2006.4 — 2009.0	67	57	94	88	12.7 — 14.4
253	17	164	2004.5 — 2007.3	65	45	86	78	12.1 — 15.9
465	19	284	2008.9 — 2012.8	78	82	139	111	13.3 — 16.2
1042	6	171	2004.9 — 2005.5	70	64	93	117	15.2 — 16.4
4179	10	171	2004.5 — 2008.9	103	67	138	107	13.8 — 17.4
35107	10	351	2008.4 — 2008.6	110	66	126	96	15.8 — 16.9
43488	16	126	2009.7 — 2012.1	90	60	120	84	18.1 — 18.8

Для отдельных астероидов было получено несколько ночей наблюдений, разнесенных по орбите на значительные временные промежутки. СКО средних значений разностей $O - C$, полученных по серии наблюдений за одну ночь, для таких астероидов может рассматриваться как мера внешней ошибки наших измерений, которая отражает ошибки наблюдений, опорного каталога и теории движения. В табл. 3 представлены средние значения внутренних (,) и внешних (,) ошибок положений астероидов, для которых было получено более шести серий наблюдений. Как можно видеть из табл. 3, случайная (внутренняя) ошибка измерений составляет значительную часть общей (внешней) ошибки наблюдений (от 55 до 87 %).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННОГО МАССИВА ПОЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС АСТЕРОИДОВ

В результате наблюдений астероидов на телескопе РТТ-150 за 10 лет было получено более 8000 положений 96 астероидов, которые имели тесные сближения с 28 крупными астероидами. Следует отметить, что в рамках данной работы не ставилась задача получения новых уточненных значений масс. Основной целью этой работы было получение астрометрических положений возмущаемых астероидов (в период их сближений с возмущающими астероидами) как для дополнения имеющихся рядов наблюдений в МРС, так и для последующего расширения дуги наблюдений этих астероидов высокоточными данными космического спутника Gaia. Для того чтобы оценить влияние наших данных на точность определения массы возмущающего астероида, было выполнено два варианта решения с использованием разных входных массивов данных. Массивы были сформированы следующим образом:

— *массив 1* включает все наблюдения возмущаемых астероидов из табл. 1, которые содержались в базе данных МРС по состоянию на июль 2014 г.;

— *массив 2* состоит из массива 1, к которому добавлены наблюдения, полученные на телескопе РТТ-150 в 2004—2013 гг.

Таблица 4. Схемы назначения весов для используемых наблюдений из базы MPC

Период, гг.	Схема весов			
	V3	V2	V1	V0
1885—1900	1/16	1/9	1/9	1
1901—1950	1/9	1/9	1/4	1
1951—1996	1/4	1/2	1	1
1996—2014	1	1	1	1

Наблюдения базы данных MPC были исправлены за систематические разности опорных каталогов по методике, описанной в работе [6]. Для решения системы условных уравнений использовался взвешенный метод наименьших квадратов.

В табл. 4 приведены схемы весов, которые применялись к наблюдениям в процессе получения различных вариантов решений.

Модель движения включала гравитационные возмущения от всех больших планет, а также Цереры, Паллады и Весты. В качестве источника координат и масс больших планет использовалась эфемериды DE405 [17]. Возмущения от Земли и Луны учитывались отдельно. Оценка массы возмущающего астероида проводилась на основе анализа отклонений наблюдаемых положений возмущаемых астероидов от вычисленных. Поправки к орбитальным параметрам возмущаемых астероидов и к массе возмущающего астероида вычислялись из совместного решения системы условных уравнений. Для вычисления коэффициентов условных уравнений совместно с уравнениями движения интегрировались уравнения в вариациях. Решение системы условных уравнений выполнялось методом наименьших квадратов.

Результаты расчетов приведены в табл. 5. Данные, приведенные в табл. 5, получены со схемой весов V3. Первая графа таблицы содержит номер возмущающего астероида, список возмущаемых астероидов совпадает с программным списком, приведенным в табл. 1.

Как можно видеть из табл. 5, добавление наших наблюдений к массиву данных MPC уменьшило погрешность определения масс в среднем на 12 % по сравнению с результатами вычислений только по данным MPC. Сами же значения масс для большинства планет, приведенных в табл. 5, не всегда определяются уверенно, кроме того для пяти астероидов получены отрицательные значения масс. По нашему мнению, основной причиной такого результата является неоптимальный выбор набора возмущаемых астероидов. Для вычислений значений масс, представленных в таблице, были использованы положения только тех астероидов, которые наблюдались на РТТ-150 в указанный период. Это сделано для того, чтобы не уменьшать долю наших наблюдений во входном массиве данных и получить внешнюю оценку их точности, поскольку, как уже отмечалось ранее, в рамках этой работы задача уточнения и получения новых значений масс астероидов не ставилась. Так как критерий отбора (в нашем случае это было

Таблица 5. Оценки масс возмущающих астероидов (*O3* — отрицательное значение)

Номер возмущающего астероида	Массив 1		Массив 2	
	$M, 10^{-12}M_{\odot}$	$\sigma, 10^{-12}M_{\odot}$	$M, 10^{-12}M_{\odot}$	$\sigma, 10^{-12}M_{\odot}$
1	474	1.03	473	0.97
4	121	0.42	121	0.38
9	37	6.5	37	5.9
10	41	0.84	41	0.74
11	2.6	0.041	2.6	0.039
13	3.0	1.8	3.1	1.7
15	13.8	1.46	12.5	1.34
16	2.19	2.31	3.98	2.17
24	<i>O3</i>	4.43	<i>O3</i>	4.12
31	<i>O3</i>	9.5	<i>O3</i>	8.2
45	<i>O3</i>	5.83	<i>O3</i>	4.47
52	12.3	1.43	12.5	1.28
64	1.9	0.70	0.16	0.60
72	<i>O3</i>	9.4	<i>O3</i>	8.2
87	5.9	2.7	4.2	2.2
423	<i>O3</i>	3.72	<i>O3</i>	3.34
511	25.7	16.9	24.2	16.0
704	11.7	5.27	14.0	4.85
762	6.46	3.76	5.21	3.04
790	2.14	6.86	4.17	5.36

значение разности положений на возмущенной и невозмущенной орбите в наблюдаемых координатах более 50 мсд) является определяющим фактором при создании списка возмущаемых астероидов, то для улучшения полученных значений масс, возможно, нужно ужесточить отбор (до 100 мсд и более) или воспользоваться другим критерием. Одним из критериев отбора возмущаемых астероидов может служить величина ошибки возмущающей массы, определяемой по наблюдениям одного возмущаемого астероида. Этот критерий используется в работе [2]. Анализ табл. 1 с учетом этого критерия показал, что для некоторых астероидов наблюдаемые нами возмущаемые астероиды дают минимальные значения ошибок масс. Так, для астероида 64 Ангелина возмущаемый астероид 9921 обеспечивает наименьшую ошибку массы: $0.54 \cdot 10^{-12}M_{\odot}$ по массиву 1 и $0.49 \cdot 10^{-12}M_{\odot}$ по массиву 2. Ошибки массы астероида 64, полученные по другим возмущаемым астероидам, составили $1.44 \cdot 10^{-12}M_{\odot}$ (по астероиду 244), $1.61 \cdot 10^{-12}M_{\odot}$ (42420) и $3.87 \cdot 10^{-12}M_{\odot}$ (4619).

Астероид 64 — это небольшой астероид, относящийся к редкому спектральному классу E. Его диаметр долгое время считался завышенным из-за высокого альбедо. Принятое в настоящее время значение диаметра было установлено по результатам, полученным во время покрытия астероидом звезды [16]. Впоследствии этот результат был подтвержден радарными наблюдениями, согласно которым астрофизическая оценка массы этого астероида составляет около $0.07 \cdot 10^{-12}M_{\odot}$. Эта оценка массы получена на основании результатов моделирования

Таблица 6. СКО разностей ($O - C$), полученных при определении масс астероидов 15, 16, 704

Астероид	Код	N	MPC		MPC+A84	
			, мсд	, мсд	, мсд	, мсд
15	F51	79	0.13	0.14	0.12	0.12
15	G96	127	0.28	0.27	0.28	0.26
15	A84	309	—	—	0.12	0.20
15	All(48)	3878	0.68	0.58	0.58	0.54
16	F51	111	0.11	0.15	0.10	0.14
16	G96	378	0.28	0.29	0.27	0.27
16	A84	480	—	—	0.23	0.16
16	All(112)	6638	0.75	0.68	0.72	0.66
704	F51	42	0.16	0.23	0.16	0.23
704	G96	36	0.26	0.19	0.25	0.18
704	A84	213	—	—	0.09	0.16
704	All(84)	2859	0.52	0.55	0.48	0.53

формы астероида и нуждается в уточнении, поэтому динамическая оценка массы может представлять научный интерес. Для такой оценки решалась система условных уравнений методом регуляризации Тихонова [3]. В качестве входного массива использовались наблюдения базы данных MPC, дополненные наблюдениями астероида 9921, полученными на РТТ-150. Для двух вариантов схемы весов ($V3$ и $V2$) методом регуляризации были получены значения массы $0.073 \cdot 10^{-12} M_{\odot}$ и $0.065 \cdot 10^{-12} M_{\odot}$ соответственно, которые согласуются с астрофизической оценкой. В то же время методом наименьших квадратов получаются слишком неточные значения массы: $(0.310 \pm 0.499) \cdot 10^{-12} M_{\odot}$ и $(0.263 \pm 0.497) \cdot 10^{-12} M_{\odot}$, которые не могут приниматься в расчет.

В процессе решения задачи определения масс происходит уточнение орбитальных параметров возмущаемых тел. Анализ СКО разностей координат между вычисленными значениями и значениями, полученными из наблюдений, показал, что включение наших наблюдений в массив входных данных позволяет уменьшить эти значения практически для всех обсерваторий, данные которых использовались для формирования входных массивов. В табл. 6 на примере обсерваторий F51 (PanStarr1, Haleakal) и G96 (Mt Lemmon Survey) показано влияние включения наших наблюдений на СКО разностей $O - C$ по прямому восхождению и склонению (α , δ) при решении задачи определения масс трех астероидов. Обсерватории F51 и G96 выбраны в качестве примера для сравнения как обсерватории, которые ведут регулярные астрометрические наблюдения астероидов. В таблице также приведены средние значения СКО для всего входного массива (All) и значения СКО, для наблюдений РТТ-150 (код обсерватории Тубитак — A84), в скобках приведено общее число обсерваторий, наблюдения которых были включены во входной массив при уточнении возмущающей массы, N — количество используемых наблюдений.

Выполненные расчеты показывают уменьшение значений СКО как для всего массива в целом, так и для выбранных обсерваторий, что подтверждает высокую точность наблюдений астероидов, полученных на РТТ-150 и перспективность его использования в дальнейшем для уточнения и получения новых оценок масс астероидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обработки наблюдений 2004—2013 гг. получен массив астрометрических топоцентрических положений астероидов, который передан в базу данных MPC. Для некоторых астероидов полученные положения существенно увеличивают общее количество наблюдений этих объектов, что чрезвычайно важно для уточнения элементов их орбит. Анализ положений показал высокую точность наблюдений на РТТ-150, которая сравнима с точностью лучших наземных наблюдений. Это делает возможным использование наших данных для изучения и моделирования ряда важных задач, связанных с движением тел в Солнечной системе.

Добавление нашего массива данных для определения масс крупных астероидов показало уменьшение погрешности определения массы, что делает перспективным использование полученных наблюдений в качестве наземной поддержки космической миссии GAIA (2013—2018 гг.), для успешного решения задачи определения масс крупных астероидов.

Авторы благодарят Турецкую Национальную обсерваторию (Тубитак, Турция), Институт космических исследований (Москва, Россия) и Казанский (Приволжский) федеральный университет за выделенное время на телескопе РТТ-150 для выполнения проекта (TUG, № 998), Министерство образования и науки Украины, а также Российский фонд фундаментальных исследований за выделенные гранты во время выполнения научной работы.

1. Гумеров Р. И., Хамитов И. М., Пинигин Г. И. и др. Телескоп РТТ-150 в международных проектах по исследованию малых тел Солнечной системы // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. физ.-матем. науки.—2013.—**155**, Кн. 1.—С. 164—177.
2. Кочетова О. М., Чернетенко Ю. А. Массы 27 астероидов, найденные динамическим методом // Астрон. вестник.—2014.—**48**, № 4.—С. 318—324.
3. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В. и др. Численные методы решения некорректных задач. — М: Наука, 1990.—
4. Aslan Z., Gumerov R., Hudkova L., et al. Observational programs and first results of selected asteroid observations at RTT150 within international cooperation // *Roman. Astron. J. Suppl.*—2006.—N 16.—P. 11—31.
5. Chernetenko Y. A. The Yarkovsky effect in the motion of NEAs // *Proc. of the International Conf. Asteroid-Comet Hazard 2009.*—2010.—P. 289—293.
6. Chesley S. R., Bayer J., Monet D. G. Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations // *Icarus.*—2010.—**210**, N 1.—P. 158—181.

7. *Fienga A., Bange J. F., Bec-Borsenberger A., Thuillot W.* Close encounters of asteroids before and during the ESA GAIA mission // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**406**, N 2.—P. 751—758.
8. *Galad A.* Asteroid candidates for mass determination // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**370**, N 4.—P. 311—319.
9. *Galad A., Gray B.* Asteroid encounters suitable for mass determinations // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**391**, N 9.—P. 1115—1122.
10. *Hestroffer D., Thuillot W., Mouret S., et al.* Ground-based observations of solar system bodies in complement to Gaia // *Proc. Annu. Meet. Fr. Soc. Astron. and Astrophys.*—(SF2A—2008).—P. 21.
11. *Izmailov I. S., Khovricheva M. L., Khovrichev M. Yu., et al.* Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory // *Astron. Lett.*—2010.—**36**, N 5.—P. 349—354.
12. *Monet D. G., Levine S. E., Casian B., et al.* The USNO-B Catalog // *Astron. J.*—2003.—**125**.—P. 984—993.
13. *Mouret S., Hestroffer D., Mignard F.* Asteroid mass determination with the Gaia mission. A simulation of the expected precisions // *Planet. Space Sci.*—2008.—**56**.—P. 1819—1822.
14. *Pinigin G., Shulga A., Maigurova N. V., et al.* Refinement of linking optical/radio reference frames on the base of coordinated observations in observatories of Ukraine, China and Russia // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2003.—N 3.—P. 59—63.
15. *Pomazan A. V., Maigurova N. V.* Optical observations of selected asteroids with measurable Yarkovsky effect // *Adv. Astron. and Space Phys.*—2013.—**3**.—P. 113—115.
16. *Shevchenko V. G., Tedesco E. F.* Asteroid albedos deduced from stellar occultations // *Icarus*.—2006.—**184**.—P. 211—220.
17. *Standish E. M.* JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405 // *Jet Propulsion Laboratory Memorandum IOM 312.*—F-98-048.—1998.
18. *Thuillot W., Bec-Borsenberger A., Rapaport M., et al.* Observational programs for asteroid mass determination // *Proc. of Ceres 2001 Workshop (9—12 October 2001, Paris, France)*. — Paris, 2001.—P. 125—130.
19. *Zacharias N., Finch C., Girard T., et al.* The third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3) // *Astron. J.*—2010.—**139**.—P. 2184—2199.
20. *Zacharias N., Finch C. T., Girard T. M., et al.* The fourth U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // *Astron. J.*—2013.—**145**.—P. 44—57.
21. *Zacharias N., Urban S. E., Zacharias M. I., et al.* The second U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2) // *Astron. J.*—2004.—**127**.—P. 3043—3059.

Статья поступила в редакцию 08.09.15