

УДК 523.44;520.82

ИССЛЕДОВАНИЕ АСТЕРОИДА (13553) MASAAKIKOYAMA

© 2020 г. Д. Л. Горшанов^{а, *}, А. В. Девяткин^а, А. В. Иванов^а, К. Н. Наумов^а, С. Н. Петрова^а,
С. А. Русов^а, В. Н. Львов^а, С. Д. Цекмейстер^а

^аГлавная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН), Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: dengorsh@mail.ru

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.

После доработки 11.07.2019 г.

Принята к публикации 01.08.2019 г.

В Пулковской обсерватории с помощью наблюдений, выполненных на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М в августе–сентябре 2018 г., проведено исследование астероида (13553) Masaakikoyama. По наблюдаемым отрезкам кривой блеска с привлечением наблюдений В.Д. Уорнера определен новый период осевого вращения астероида: 97.2 ± 0.3 ч. Определение периода было затруднено близкой соизмеримостью его значения с сутками. На кривой блеска присутствуют признаки “вращения с кувырканием”, а также указания на сложную форму астероида. С помощью полученных астрометрических положений астероида улучшена его орбита.

Ключевые слова: астероид, кривая блеска, период вращения, улучшение орбиты

DOI: 10.31857/S0320930X20010028

ВВЕДЕНИЕ

Астероид (13553) Masaakikoyama (1992 JE) был открыт в 1992 г. в японской обсерватории Геисеи. Он относится к астероидам, сближающимся с Землей, к типу “амурцев”. Параметр MOID этого астероида для Земли составляет 0.189213 а. е., для Марса – 0.0533416 а. е. (http://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=13553).

В работе (Krugly и др., 2007) период осевого вращения астероида 13553 был определен как “>30 ч”.

В базе данных астероидов JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>), помимо элементов его орбиты и других орбитальных параметров, содержатся оценки только двух физических параметров: абсолютной звездной величины ($H = 16.4^m$) и периода осевого вращения. До наблюдений 2018 г. (вблизи последнего противостояния) приводилось его значение 38 ч, после – 58 ч (см. ниже). Причем в примечании по поводу этого периода приведена стандартная фраза “Result based on less than full coverage, so that the period may be wrong by 30 percent or so” (результат основан не на полном покрытии периода, поэтому ошибка может составлять до 30%).

В архиве физических параметров астероидов, который создан в чешской обсерватории Ондржеев (<http://www.asu.cas.cz/~ppravac/newres.txt>) для (13553) Masaakikoyama содержатся оценки большего числа параметров. В частности, приводятся абсолютная звездная величина в полосе R

($H_R = 16.22^m \pm 0.12^m$) и параметр наклона фазовой зависимости ($G = 0.24 \pm 0.11$). Период вращения указан такой же (38 ч), и в примечании написано “NPA rotator”. Это означает, что астероид вращается не вокруг главной оси инерции – так называемое “вращение с кувырканием” (“tumbling rotation”). При этом индекс “PAR” (Principal Axis Rotation), обозначающий надежность определения либо простого вращения, либо “кувыркания”, указан в диапазоне от -2 до -3 ; т.е. вращение не вокруг главной оси установлено, но периоды точно не определены. Амплитуда изменения блеска в полосе $R - 1.1^m$.

Новое значение периода (58 ч) было получено В.Д. Уорнером и опубликовано в базе данных кривых блеска астероидов, которую поддерживает Центр исследований Солнечной системы (Center for Solar System Studies, см. http://www.planetarysciences.org/PHP/CS3_Lightcurves.php). В соответствующей таблице приведено новое значение периода вращения астероида равное 58 ± 3 ч. В работе (Warner, Stephens, 2019), помимо этого периода, приведены еще два значения: 32 ± 2 и 39.1 ± 0.1 ч. Однако на приведенных в статье графиках ни один из периодов не показывает непротиворечивой кривой блеска, что авторы объясняют наличием двух периодов (т.е. вращения с кувырканием).

В работе (Ieva и др., 2014) Masaakikoyama изучался в числе астероидов – возможных целей для будущих космических миссий, и его таксономи-

Таблица 1. Характеристики телескопов и ПЗС-камер

| Телескоп | ЗА-320М | МТМ-500М |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Диаметр апертуры | 32 см | 50 см |
| Экв. фокусное расстояние | 320 см | 410 см |
| Масштаб | 64"/мм | 50"/мм |
| ПЗС-камера | SBIG STX-16803 | SBIG STL-1001E |
| Размеры ПЗС-матрицы | 36.8 × 36.8 мм | 24.5 × 24.5 мм |
| Число пикселей | 4096 × 4096 | 1024 × 1024 |
| Угловой размер пиксела | При биннировании 3 × 3 1".7 × 1".7 | 1".2 × 1".2 |
| Поле зрения | 39' × 39' | 20'.5 × 20'.5 |

ческий класс был определен как Cg. Там же приводятся абсолютная звездная величина $H = 16.71$, альbedo $p_V = 0.03$ и диаметр 3.49 км.

В "Бюллетене малых планет" ("The Minor Planet Bulletin") MasaakikoYama указан в списке астероидов, для которых очень желательно получить наблюдения в 2018 г. с целью уточнения периодов их вращения (см. Warner и др., 2018).

В июле 2018 г. были запланированы радарные наблюдения этого астероида обсерваторией Голдстоун, но затем были отменены (https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/goldstone_asteroid_schedule.html).

Противостояние 2018 г. происходило вблизи перигелия орбиты астероида, что является благоприятным условием для наблюдений в силу наименьшего взаимного расстояния Земли и астероида в этот период. В период наблюдений, использованных в настоящей работе, расстояние до астероида изменялось от 0.218 до 0.233 а. е.

НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Для уточнения периода осевого вращения (13553) MasaakikoYama в ГАО РАН в августе–сентябре 2018 г. были проведены фотометрические наблюдения этого астероида. Они выполнялись на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М. Телескоп ЗА-320М расположен в Пулковской обсерватории, он имеет оптическую схему Кассегрена с диаметром главного зеркала 320 мм (Девяткин и др., 2004). Телескоп МТМ-500М находится на Горной астрономической станции ГАО РАН на северо-востоке Кавказа на высоте 2100 м над уровнем моря; он имеет оптическую схему Максудова–Кассегрена и диаметр входной апертуры 500 мм (Кулиш и др., 2009). Телескопы оборудованы ПЗС-камерами фирмы SBIG. Некоторые характеристики этих инструментов представлены в табл. 1.

Определение столь длинного периода вращения астероида (как ожидалось, он должен был составлять около 38 ч) требует нескольких ночей

наблюдения, поскольку за одну ночь или даже за две–три невозможно покрыть наблюдениями весь период и составить полную кривую блеска. Но, помимо этого затруднения, возникло еще одно. Наблюдения в течение первых нескольких ночей показали, что искомым период как-то соизмерим с сутками, т.е. с интервалом между наблюдениями. Данные, полученные в таких условиях, плохо поддаются частотному анализу, так как наблюдения, выполненные в разные ночи, попадают приблизительно на одни и те же фазы кривой блеска, и каждое новое наблюдение мало что добавляет к предыдущим. Поэтому приходится проводить много сеансов наблюдений, которые должны быть распределены на длинном интервале времени; в нашем случае – всего 42 сеанса в течение почти двух месяцев.

Наблюдения представляли собой получение серий ПЗС-кадров без использования светофильтров (точнее, через прозрачное бесцветное стекло – "clear filter"), т.е. в интегральных фотометрических полосах инструментов. По таким сериям строились фрагменты кривой блеска астероида. На телескопе ЗА-320М астероид наблюдался в течение 33 ночей с 1 августа по 28 сентября; на телескопе МТМ-500М – в течение 9 ночей с 21 августа по 5 сентября. Количество кадров, получаемых за ночь, сильно различалось: от 3 до 276. Всего для построения кривой блеска было использовано 2844 значения блеска астероида.

До 7 сентября блеск астероида колебался в пределах 14.3^m – 15.2^m , затем начал спадать. После 13 сентября он находился в пределах между 15^m и 16.5^m , что привело к понижению точности фотометрических измерений и увеличению разброса данных. Значительная часть наблюдений выполнялась при плохих погодных условиях, временами даже при наличии тонкой облачности. В целом точность фотометрии получилась невысокой (особенно для телескопа ЗА-320М) и сильно различающейся от ночи к ночи: внутренняя точность изменяется от 0.015^m до 0.15^m . Однако боль-

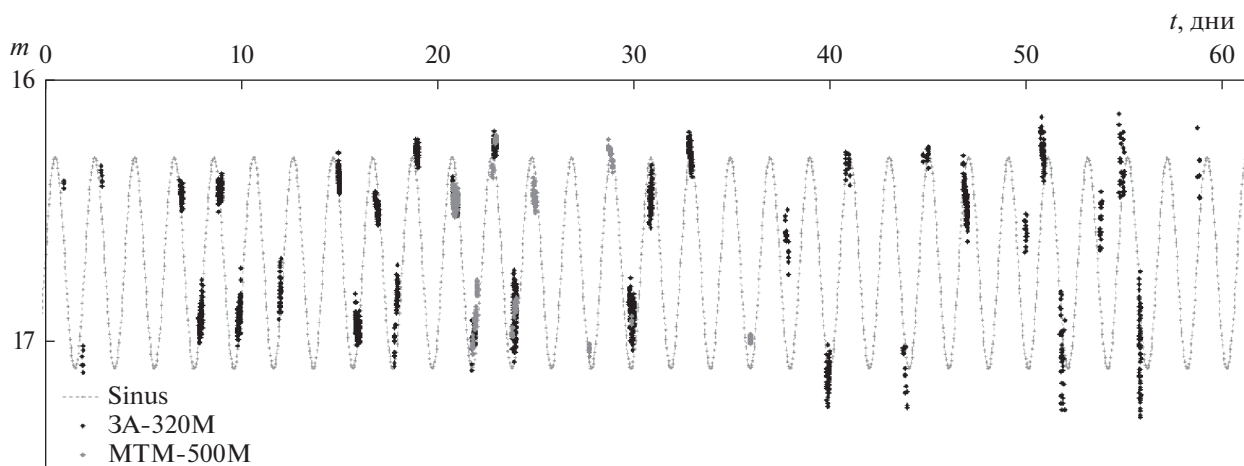


Рис. 1. Фрагменты кривой блеска астероида (13553) Masaakikoyama, полученные по наблюдениям на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М и исправленные за топоцентрическое и гелиоцентрическое расстояния и угол фазы. По оси абсцисс отложено время t в днях, отсчитываемое от 0 ч 1 августа 2018 г. по шкале UTC (MJD 58331.0). На график наложена синусоида с периодом 48.6 ч.

шой размах колебаний блеска астероида (около одной звездной величины) и большое количество наблюдений позволили получить искомый результат.

Фазовый угол астероида за период наблюдений уменьшился от 33° 1-го августа до 9° 13-го сентября и затем вновь увеличился до 14° к 28-му сентября. Обстоятельства наблюдений при получении отрезков кривой блеска представлены в табл. 2.

Из-за соизмеримости главного периода колебаний блеска с сутками большая часть наблюдаемых отрезков кривой блеска попадала на области вблизи максимумов и минимумов, а промежутки между ними оставались почти незаполненными. Поэтому необходимо было использовать наблюдения всех ночей, поскольку даже результаты ночи с низкой точностью и большим разбросом, могут указать на то, как проходит кривая блеска. В результате, на построенной кривой блеска отрезки, измеренные вблизи максимумов (около 14.5^m), имеют умеренный разброс, а вблизи минимумов (слабее 15^m) – большой. Также большой разброс показывают данные, полученные в середине и в конце сентября, когда блеск астероида ослабел.

Обработка ПЗС-кадров выполнялась с помощью программного пакета АПЕКС-II, разработанного в Пулковской обсерватории (Девяткин и др., 2010). После калибровки кадров, т.е. учета темного сигнала и плоского поля, звездные величины объектов на кадрах определялись методом PSF-фотометрии с аппроксимацией профилей изображений двумерной функцией Гаусса. В качестве опорного фотометрического каталога использовался инфракрасный обзор 2MASS; блеск звезд в инфракрасных полосах пересчитывался

вался в оптический диапазон по методике, описанной в работе (Warner, 2007).

Полученные значения блеска астероида и соответствующие моменты времени были исправлены за изменение его расстояний от Земли и Солнца и за угол фазы. Эфемеридные значения топоцентрического и гелиоцентрического расстояний и угла фазы для (13553) Masaakikoyama вычислялись с помощью программного пакета ЭПОС, также созданного в Пулковской обсерватории (Львов, Цекмейстер, 2012). За угол фазы блеск исправлялся по методике, описанной в работе (Lagekvist, Williams, 1987), значение параметра наклона фазовой зависимости ($G = 0.24$) было взято с Интернет-сайта обсерватории Ондржеев (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.txt>).

На рис. 1 показаны значения блеска астероида Masaakikoyama, полученные из наблюдений с телескопами ЗА-320М и МТМ-500М и подвергнутые вышеописанным редукициям.

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО РЯДА

Полученный таким образом ряд значений блеска был исследован с помощью частотного анализа по методу Скаргла (Scargle, 1982). На созданной этим методом периодограмме выделяются три высоких пика, соответствующие периодам $P_1 = 48.04$, $P_2 = 15.98$ и $P_3 = 9.59$ ч и еще один небольшой пик $P_4 = 6.84$ ч. Обнаруженные периоды связаны между собой целочисленными отношениями: $P_1 = 3P_2$, $P_1 = 5P_3$ и $P_1 = 7P_4$ с невязками 0.10, 0.09 и 0.16 ч соответственно. Это говорит о том, что все выявленные пики являются нечетными гармониками одного периода. Среди них глав-

Таблица 2. Обстоятельства наблюдений отрезков кривой блеска астероида Masaakikoyama. Приведено: модифицированная юлианская дата (MJD) для среднего момента отрезка (шкала UTC); Δt – продолжительность отрезка в часах; N – число ПЗС-кадров, m – среднее значение блеска; α – угол фазы астероида; телескоп, на котором выполнялись наблюдения (ЗА – ЗА-320М, МТМ – МТМ-500М); $\lambda_{\text{РАВ}}$ и $\beta_{\text{РАВ}}$ – эклиптические долгота и широта биссектора фазового угла

| Дата вечера (гггг-мм-дд) | Ср. момент (MJD) | Δt , ч | N | m | α , ° | Телескоп | $\lambda_{\text{РАВ}}$, ° | $\beta_{\text{РАВ}}$, ° |
|-----------------------------|---------------------|----------------|-----|------|--------------|----------|----------------------------|--------------------------|
| 2018-08-01 | 58331.9507 | 0.1 | 3 | 14.5 | 32.6 | ЗА | 322.0 | 18.7 |
| 2018-08-02 | 58332.9269 | 1.6 | 6 | 15.2 | 32.2 | ЗА | 322.8 | 18.5 |
| 2018-08-03 | 58333.8995 | 1.3 | 7 | 14.5 | 31.8 | ЗА | 323.6 | 18.2 |
| 2018-08-07 | 58337.9391 | 3.2 | 67 | 14.5 | 29.9 | ЗА | 326.7 | 17.3 |
| 2018-08-08 | 58338.9301 | 4.7 | 151 | 15.0 | 29.4 | ЗА | 327.5 | 17.0 |
| 2018-08-09 | 58339.9291 | 4.7 | 163 | 14.5 | 28.9 | ЗА | 328.2 | 16.7 |
| 2018-08-10 | 58340.9248 | 4.3 | 102 | 15.0 | 28.3 | ЗА | 328.9 | 16.5 |
| 2018-08-12 | 58342.9966 | 1.8 | 33 | 14.9 | 27.1 | ЗА | 330.4 | 15.9 |
| 2018-08-15 | 58345.9954 | 2.1 | 82 | 14.4 | 25.2 | ЗА | 332.4 | 15.0 |
| 2018-08-16 | 58346.9244 | 5.8 | 191 | 15.0 | 24.6 | ЗА | 333.1 | 14.7 |
| 2018-08-17 | 58347.9331 | 5.3 | 73 | 14.6 | 24.0 | ЗА | 333.7 | 14.4 |
| 2018-08-18 | 58348.9107 | 4.4 | 68 | 14.9 | 23.3 | ЗА | 334.3 | 14.1 |
| 2018-08-19 | 58349.9751 | 3.4 | 129 | 14.4 | 22.6 | ЗА | 335.0 | 13.8 |
| 2018-08-21 | 58351.9240 | 6.2 | 82 | 14.6 | 21.2 | ЗА | 336.2 | 13.2 |
| | 58351.9368 | 6.0 | 276 | 14.6 | 21.2 | МТМ | 336.2 | 13.2 |
| 2018-08-22 | 58352.8533 | 3.4 | 32 | 15.1 | 20.6 | ЗА | 336.7 | 12.9 |
| | 58352.9211 | 5.5 | 78 | 15.0 | 20.5 | МТМ | 336.8 | 12.9 |
| 2018-08-23 | 58353.9189 | 5.2 | 41 | 14.4 | 19.8 | МТМ | 337.3 | 12.6 |
| 2018-08-23 | 58353.9404 | 2.9 | 48 | 14.4 | 19.9 | ЗА | 337.4 | 12.6 |
| 2018-08-24 | 58354.9261 | 6.3 | 96 | 15.0 | 19.1 | ЗА | 337.9 | 12.3 |
| | 58354.9359 | 5.2 | 61 | 15.0 | 19.1 | МТМ | 337.9 | 12.3 |
| 2018-08-25 | 58355.9713 | 3.3 | 69 | 14.6 | 18.4 | МТМ | 338.5 | 11.9 |
| 2018-08-28 | 58358.7542 | 0.4 | 12 | 15.2 | 16.5 | МТМ | 340.0 | 11.1 |
| 2018-08-29 | 58359.8417 | 5.5 | 39 | 14.4 | 15.7 | МТМ | 340.6 | 10.7 |
| 2018-08-30 | 58360.9153 | 6.3 | 94 | 15.1 | 15.0 | ЗА | 341.1 | 10.4 |
| | 58360.9154 | 0.4 | 12 | 15.1 | 15.0 | МТМ | 341.1 | 10.4 |
| 2018-08-31 | 58361.8590 | 4.5 | 61 | 14.6 | 14.4 | ЗА | 341.6 | 10.1 |
| 2018-09-02 | 58363.9010 | 3.8 | 92 | 14.5 | 13.1 | ЗА | 342.6 | 9.5 |
| 2018-09-05 | 58366.9586 | 0.5 | 14 | 15.3 | 11.4 | МТМ | 344.1 | 8.6 |
| 2018-09-07 | 58368.8457 | 4.0 | 20 | 14.9 | 10.5 | ЗА | 345.0 | 8.1 |
| 2018-09-09 | 58370.9278 | 3.5 | 55 | 15.5 | 9.7 | ЗА | 345.9 | 7.5 |
| 2018-09-10 | 58371.9407 | 5.9 | 22 | 14.7 | 9.4 | ЗА | 346.4 | 7.2 |
| 2018-09-13 | 58374.8562 | 4.7 | 19 | 15.6 | 9.0 | ЗА | 347.7 | 6.4 |
| 2018-09-14 | 58375.9102 | 7.2 | 17 | 14.8 | 9.0 | ЗА | 348.1 | 6.2 |
| 2018-09-16 | 58377.9484 | 5.5 | 120 | 15.1 | 9.1 | ЗА | 349.0 | 5.6 |
| 2018-09-19 | 58381.0093 | 1.6 | 16 | 15.4 | 9.8 | ЗА | 350.3 | 4.9 |
| 2018-09-20 | 58381.8637 | 4.9 | 55 | 15.1 | 10.1 | ЗА | 350.6 | 4.7 |
| 2018-09-21 | 58382.8888 | 5.8 | 43 | 16.0 | 10.5 | ЗА | 351.0 | 4.5 |
| 2018-09-23 | 58384.8566 | 2.4 | 21 | 15.6 | 11.3 | ЗА | 351.9 | 4.1 |
| 2018-09-24 | 58385.8905 | 5.8 | 27 | 15.4 | 11.7 | ЗА | 352.3 | 3.9 |
| 2018-09-25 | 58386.8385 | 3.4 | 73 | 16.2 | 12.1 | ЗА | 352.7 | 3.7 |
| 2018-09-28 | 58389.8805 | 4.6 | 9 | 15.7 | 13.5 | ЗА | 353.9 | 3.1 |

ным, по-видимому, является наибольший пик с периодом P_1 .

Для проверки найденных периодов выполнялось приведение наблюдательного ряда к каждому из них — все точки ряда приводились с соответствующей фазой к одному периоду. При этом рассматривались значения периодов, найденные по периодограмме, а также их удвоенные значения: из предположения, что кривая главных колебаний блеска имеет два максимума и два минимума, что типично для большинства астероидов.

Ни для одного испробованного значения не удалось получить четкую форму кривой блеска. Так на графиках, построенных с периодами 9.59 и 15.98 ч и с их удвоенными значениями, облака точек в максимумах и минимумах блеска перекрывались друг с другом по времени — кривая блеска не прорисовывалась. А для периода $P_1 = 48.04$ ч (пик наибольшей мощности) и для его удвоенного значения максимумы и минимумы хорошо разделялись. На графике одинарного периода P_1 все точки собираются в два облака: одно в максимуме, другое в минимуме. На графике удвоенного периода ($2P_1 = 96.08$ ч) получается два максимума и два минимума, немного отличающихся друг от друга по глубине, что соответствует предположению о “двугорбой” форме кривой блеска. Можно предварительно заключить, что период главных колебаний блеска астероида *Masaakikoyama* составляет около 96 ч.

Однако на графике для удвоенного значения главного пика периодограммы (96.08 часа), как и на всех остальных, в областях максимумов и минимумов данные образуют неструктурированные облака точек, складывающиеся из результатов наблюдений, проведенных в разные ночи, с разбросом по блеску, превышающим точность результатов отдельных ночей. Промежутки между максимумами и минимумами остаются незаполненными.

Этот период почти точно равен четырем суткам. Истинный период, по-видимому, очень близок к этому значению, то есть почти соизмерим с интервалом между наблюдениями (сутками). Это обстоятельство, скорее всего, и привело к тому, что на периодограмме отобразился не истинный период, а ближайший соизмеримый с сутками.

ДОПОЛНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТАМИ НАБЛЮДЕНИЙ ДРУГОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Для того чтобы попытаться преодолеть это затруднение, мы дополнили наши данные результатами наблюдений астероида *Masaakikoyama*, заимствованными из базы данных кривых блеска (<http://alcddef.org>), которую поддерживает Центр малых планет (MPC). Эти наблюдения были вы-

полнены B.D. Warner на обсерватории Палмер Дивайд (“CS3 – Palmer Divide Station”, США, Калифорния, код MPC – U82) в течение семи ночей с 19 по 26 августа 2018 г. (т.е. внутри интервала наших наблюдений). Warner представил эти данные в виде “абсолютизированных” значений блеска в полосе *V*. В большинстве случаев точность его фотометрии лучше, чем нашей. Это видно и по разбросу данных, и по точности отдельных кадров, приводимой автором: $0.007^m - 0.033^m$.

Данные Warner были подвергнуты нами точно таким же редуцированием, описанным выше, как результаты наших наблюдений. Несмотря на то, что Warner представил результаты в полосе *V*, а наши наблюдения выполнены без фильтра, по уровню звездных величин они хорошо совпали между собой, что демонстрирует рис. 2. В большинстве случаев отрезки кривой блеска, полученные Warner и нами, являются продолжением друг друга с небольшим зазором по времени, так как наши обсерватории находятся в разных полушариях Земли: восточном и западном. Особенно хорошо это видно на рис. 2 в диапазонах времени 478–492 ч (20 августа), 523–540 ч (22 августа) и 547–564 ч (23 августа).

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ОБЪЕДИНЕННОГО РЯДА

Периодограмма, построенная методом Скаргла по объединенному ряду, состоящему из значений блеска астероида, полученных в настоящей работе и Warner, почти не отличается от периодограммы, полученной только по пулковским наблюдениям. Относительная мощность главного пика увеличилась по сравнению с остальными, которые стали ниже его более чем в два раза. Это подтверждает то, что первый период является главным. Незначительно изменилось значение этого периода: $P_1 = 47.98$ ч, значения остальных периодов остались прежними. При новом значении P_1 точнее выполняются соотношения $P_1 = 3P_2$, $P_1 = 5P_3$ и $P_1 = 7P_4$: невязки 0.04, 0.03 и 0.10 ч соответственно. На рис. 3 представлена периодограмма, построенная по объединенному ряду в интервале частот от 0.0005 до 0.2 ч^{-1} , что соответствует интервалу искомым периодов от 2000 до 5 ч соответственно.

Было выполнено приведение объединенного ряда ко всем найденным периодам, к их удвоенным значениям и к периодам, предположенным по предыдущим исследованиям (32, 38, 39.1 и 58 ч). Ни в одном случае график не показал четкой кривой блеска. На рис. 4 приведен пример наиболее четкого графика — построенного с удвоенным значением главного периода. На нем пулковские наблюдения собраны в неструктурированные облака в максимумах и минимумах, а наблюдения Warner располагаются между ними.

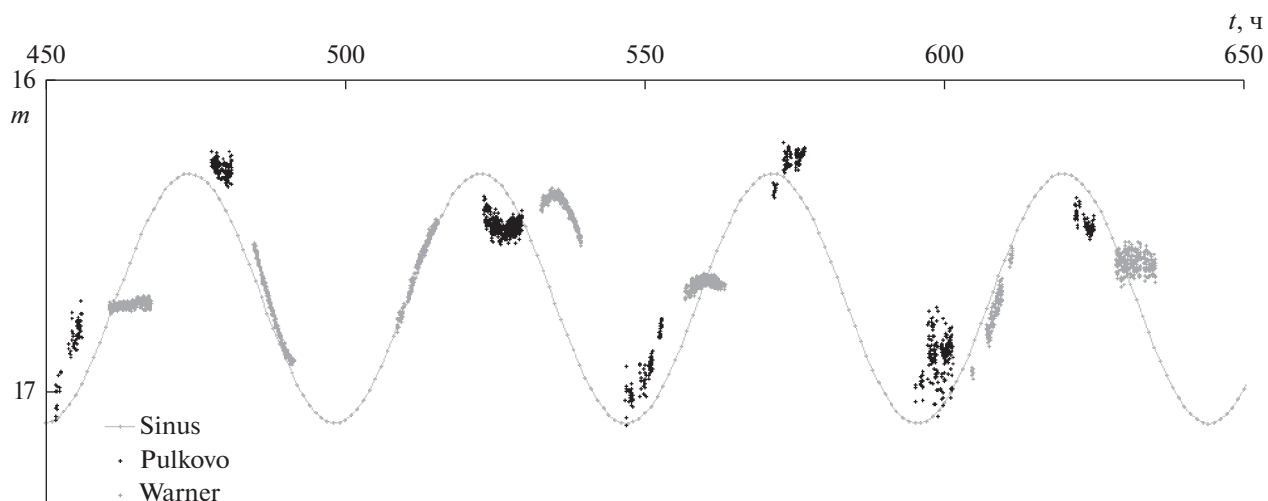


Рис. 2. Объединенная кривая блеска (13553) MASAAKIKOYAMA по наблюдениям Пулковской обсерватории и Warner на общем интервале наблюдений. Время t по оси абсцисс отсчитывается в часах от 0 ч 31 июля 2018 г. по UTC. На график наложена синусоида с периодом 48.6 ч.

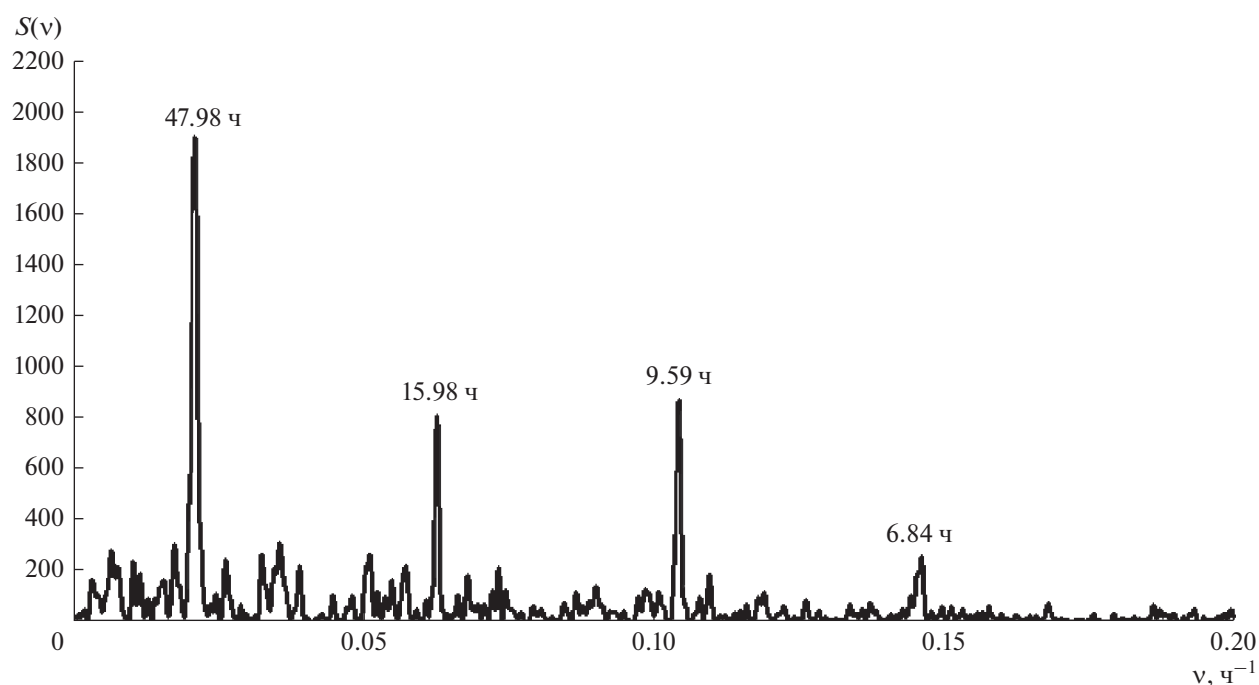


Рис. 3. Периодограмма, полученная методом Скаргла по объединенному (Пулково + Warner) ряду фотометрических наблюдений астероида (13553) MASAAKIKOYAMA. По оси абсцисс отложена частота $\nu = 1/P$, выраженная в единицах ч^{-1} , по оси ординат – мощность сигнала $S(\nu)$ в относительных единицах. У наиболее выдающихся пиков подписаны соответствующие им значения периода P (в ч).

Таким образом, дополнение наших наблюдений результатами Warner не позволило преодолеть затруднение, вызванное близкой соизмеримостью периода с сутками.

Тогда нами было предпринято ручное варьирование периода вблизи всех вышеперечислен-

ных значений. Лишь в одном случае удалось добиться того, что данные в областях максимумов и минимумов (одновременно всех) выстроились в волнообразную структуру, а часть точек, относящихся к пулковским результатам, попала на “склоны” между экстремумами. Это происходит при значениях периода 97.2 ± 0.3 ч (см. рис. 5).

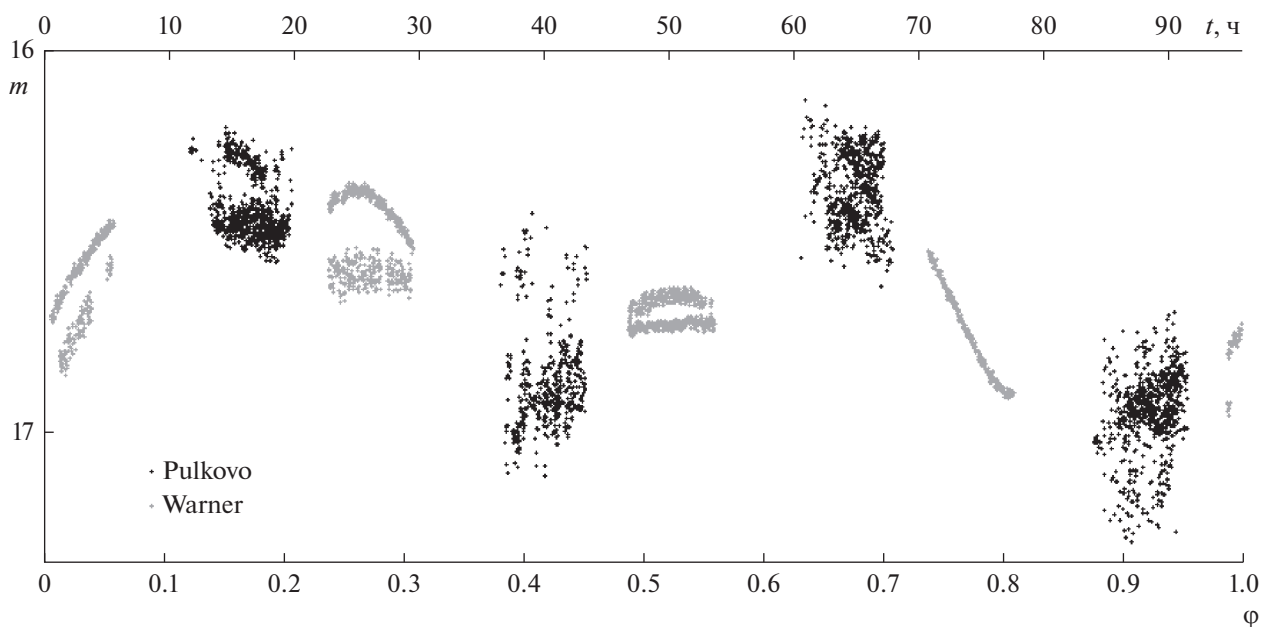


Рис. 4. Объединенная кривая блеска (13553) Masaakikoyama по наблюдениям Пулковской обсерватории и Warner, приведенная к периоду 95.96 ч. По верхней оси абсцисс отложено время t в ч, по нижней — фаза ϕ колебаний блеска астероида (интервал фазы 0–1 соответствует длительности указанного периода), по оси ординат — звездная величина m .

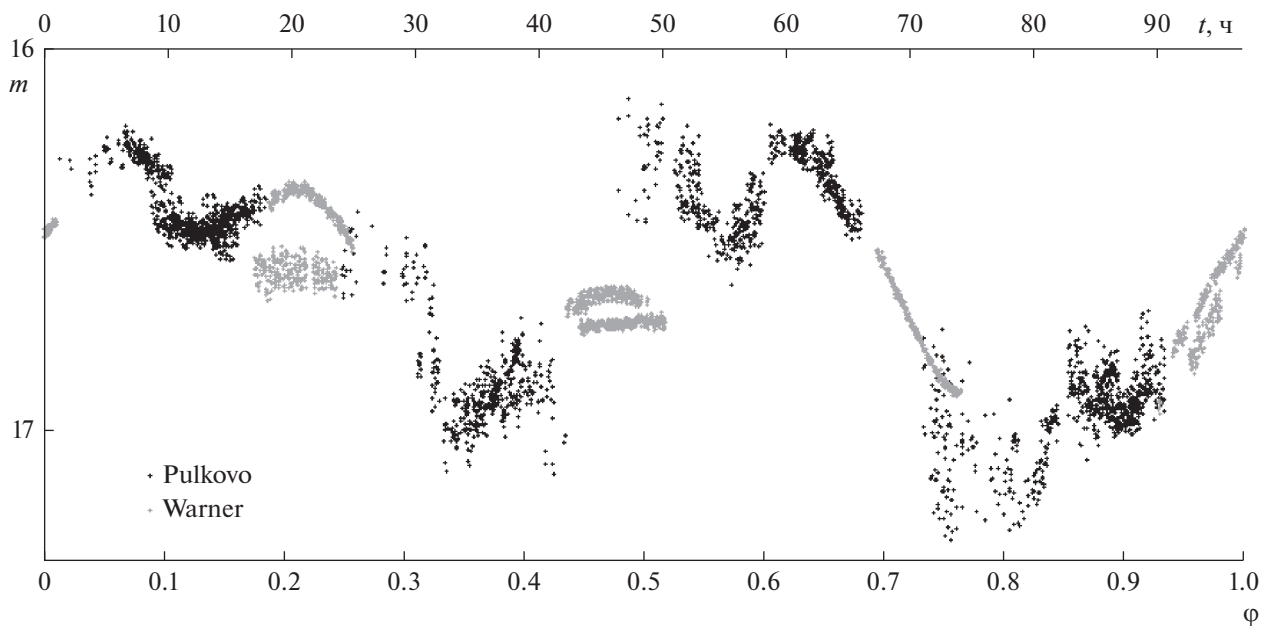


Рис. 5. Объединенная кривая блеска (13553) Masaakikoyama по наблюдениям Пулковской обсерватории и Warner, приведенная к периоду 97.2 ч. Обозначения такие же, как и на рис. 4.

При таком периоде отрезки кривой блеска, полученные Warner, почти полностью заполняют промежутки в нашей кривой, при этом они удачно подходят по уровню звездной величины. Промежутки между отрезками, полученными нами и Warner в течение одних суток, заполняются нашими результатами, наблюденными в других

циклах (сравните промежутки 478–492 ч и 525–540 ч на рис. 2 с соответствующими им промежутками 60–74 ч и 10–25 ч на рис. 5). Хорошо стыкуются наблюдения Warner, полученные 21 августа, (промежуток 508–515 ч на рис. 2) с нашими наблюдениями, полученными в другие даты, см. промежутков 90–0–5 ч на рис. 5.

Таблица 3. Элементы начальной орбиты астероида Masaakikoyama на эпоху JD2458000.5 и орбиты MPC на эпоху JD2458600.5

| | Начальные (JD2458000.5) | MPC (JD2458600.5) |
|-------------------|----------------------------|----------------------|
| $M, ^\circ$ | 261.97734 | 84.52854 |
| $\omega, ^\circ$ | 109.89701 | 109.91655 |
| $\Omega, ^\circ$ | 193.52461 | 193.49940 |
| $i, ^\circ$ | 5.87457 | 5.87434 |
| e | 0.4641520 | 0.4639282 |
| $a, \text{a. e.}$ | 2.18915870 | 2.18933550 |
| $q, \text{a. e.}$ | 1.17305631 | 1.17364102 |

Синусоида с периодом 48.6 ч (равным половине найденного: в предположении о двугорбой форме кривой блеска) наложена на графики результатов наблюдений на рис. 1 и 2.

Однако отрезки, полученные Warner в разных циклах, но приходящиеся на одну фазу, не совпадают друг с другом по уровню блеска (см. на рис. 5 интервалы 90–0–1, 17–25 и 42–50 ч). То же относится и к результатам пулковских наблюдений, например, в интервалах 30–40 и 80–90 ч.

Такая картина вполне соответствует предположению о вращении астероида с кувырканием, проявляющемся в одновременном наличии на кривой блеска двух периодов: вращения астероида вокруг оси и вращения (прецессии) самой оси. У “кувыркающихся” астероидов кривая блеска не повторяет свою форму в точности от цикла к циклу. Поэтому, если приводить ее к одному из периодов, то отрезки кривой с одинаковой фазой, но полученные в разные циклы, не совпадают друг с другом по уровню звездной величины (см. Pravac и др., 2005), и получаются графики, похожие на рис. 5.

Полный размах изменений блеска составляет примерно 0.9^m , что может объясняться вытянутой формой астероида с отношением осей фигуры примерно 2.3.

Волнообразные колебания блеска в областях максимумов, достигающие 0.3^m , могут вызываться сложной формой астероида (крупными выпуклостями и впадинами). Такие же колебания угадываются и в других частях графика, но из-за большого разброса данных уверенно говорить об их наличии нельзя.

УЛУЧШЕНИЕ ОРБИТЫ АСТЕРОИДА MASAAKIKOYAMA С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБЛЮДЕНИЙ ПУЛКОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

Наблюдения астероида (13553) Masaakikoyama, выполненные на телескопах Пулковской обсерватории, были использованы также для получения точных астрометрических координат астероида, которые, в свою очередь, позволили провести улучшение его орбиты.

Астрометрическая обработка ПЗС-кадров выполнялась также с помощью программного пакета АПЕКС-II (Девяткин и др., 2010). В качестве опорного астрометрического каталога использовался каталог UCAC-4. Астрометрическая редукция выполнялась методом восьми постоянных. Всего из пулковских наблюдений было получено 2923 астрометрических положения астероида.

Улучшение орбиты астероида выполнялось дифференциальным методом с помощью программы Orbimpr из программного пакета ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012).

Помимо пулковских результатов, использовались также данные наблюдений обсерваторий всего мира, собранные на сайте Центра малых планет (IAU Minor Planet Center – MPC, https://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=✓&object_id=13553). Из всего массива было сформировано три набора входных данных:

- 1) Все мировые наблюдения плюс пулковские наблюдения (ЗА-320М и МТМ-500М);
- 2) Все мировые наблюдения плюс пулковские (только ЗА-320М);
- 3) Мировые наблюдения, полученные только в 2018 г. (в последнюю оппозицию), плюс пулковские наблюдения (ЗА-320М и МТМ-500М).

Первые два набора включают наблюдения за 1992–2018 гг.

В процессе улучшения орбиты часть входных данных отбрасывалась по критерию “3 сигма”.

В качестве начальной использовалась орбита, построенная на эпоху 17 декабря 2017 г. (JD2458000.5) по предшествующим наблюдениям, общим числом 851. Новые элементы орбиты получались на эту же эпоху, а затем переводились на эпоху JD2458600.5 для сравнения с орбитой MPC. Элементы начальной орбиты и орбиты сравнения даны в табл. 3. В табл. 4 показано количество исходных и использованных данных из трех наборов, а также точность данных относительно исходной и улучшенной орбит. Результаты нашего улучшения орбиты по разным наборам данных и их сравнение представлены в табл. 5–7.

Сравнительный анализ таблиц показывает, что имеется существенное улучшение элементов орбит астероида в тех случаях, когда привлека-

Таблица 4. Характеристики использованных наборов данных и орбит, улучшенных с их помощью

| Набор данных | Использовано данных | RMS исходной орбиты | RMS улучшенной орбиты |
|--------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 3704 | 0".755 | 0".108 |
| 2 | 3177 | 0".664 | 0".120 |
| 3 | 3357 | 0".707 | 0".116 |

Таблица 5. Улучшенные элементы орбиты астероида Masaakikoуama и их сравнение с орбитой MPC. Входные данные – все мировые наблюдения с сайта MPC плюс пулковские наблюдения (ЗА-320М и МТМ-500М)

| | JD2458000.5 | | | JD2458600.5 | |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
| | улучшенные | коррекция | ошибка | улучшенные | улучшенные – MPC |
| $M, ^\circ$ | 261.97732 | -0.00002 | 0.000001 | 84.52854 | 0.00000 |
| $\omega, ^\circ$ | 109.89713 | 0.00012 | 0.000004 | 109.91664 | 0.00009 |
| $\Omega, ^\circ$ | 193.52450 | -0.00011 | 0.000003 | 193.49931 | -0.00009 |
| $i, ^\circ$ | 5.87456 | -0.00001 | 0.000000 | 5.87433 | -0.00001 |
| e | 0.4641520 | 0.0000000 | 0.00000000 | 0.4639283 | 0.0000001 |
| $a, \text{ а. е.}$ | 2.18915868 | -0.00000002 | 0.000000000 | 2.18933555 | -0.00000005 |
| $q, \text{ а. е.}$ | 1.17305623 | | | 1.17364089 | -0.00000012 |

Таблица 6. То же, что и в табл. 5, но входные данные – все мировые наблюдения с сайта MPC плюс наблюдения только ЗА-320М

| | JD2458000.5 | | | JD2458600.5 | |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
| | улучшенные | коррекция | ошибка | улучшенные | улучшенные – MPC |
| $M, ^\circ$ | 261.97732 | -0.00002 | 0.000001 | 84.52854 | 0.00000 |
| $\omega, ^\circ$ | 109.89713 | 0.00012 | 0.000004 | 109.91664 | 0.00009 |
| $\Omega, ^\circ$ | 193.52450 | -0.00011 | 0.000003 | 193.49931 | -0.00009 |
| $i, ^\circ$ | 5.87456 | -0.00001 | 0.000000 | 5.87433 | -0.00001 |
| e | 0.4641520 | 0.0000000 | 0.00000000 | 0.4639283 | 0.0000001 |
| $a, \text{ а. е.}$ | 2.18915868 | -0.00000002 | 0.000000000 | 2.18933555 | 0.00000005 |
| $q, \text{ а. е.}$ | 1.17305623 | | | 1.17364089 | 0.00000013 |

лись наблюдения, полученные в ГАО РАН. В целом использование новых наблюдений 2018 г. уменьшило RMS с $\approx 0''.7$ до $\approx 0''.1$. Также необходимо отметить, что использование только новых наблюдений 2018 года позволило получить орбиту астероида, которая близка к орбите, полученной за весь период наблюдений этого астероида.

ВЫВОДЫ

По объединенному ряду значений блеска астероида (13553) Masaakikoуama, полученных на телескопах Пулковской обсерватории и по наблюдениям Warner (http://alcdef.org/alcdef_GenerateALCDEFPage.php), методом частотного анализа Скаргла был выделен период колебаний блеска астероида равный 47.98 ч. Еще три пика,

выделяющихся на периодограмме Скаргла, являются гармониками этого периода.

Период осевого вращения астероида, по-видимому, близок к удвоенному значению найденного периода (95.96 ч). Кривая блеска, приведенная к этому периоду, имеет двугорбую форму (рис. 4), но точки в областях минимумов и максимумов лежат в широком диапазоне звездных величин, образуя неструктурированные облака.

Однако ручной подбор периода вблизи указанного выше значения позволил найти такое его значение (97.2 ± 0.3 ч), при котором фазированная кривая блеска получает структурированную форму (рис. 5). Правда, расхождение отрезков кривой, полученных на разных циклах, частично сохраняется.

Таблица 7. То же, что и в табл. 5 и 6, но входные данные – мировые наблюдения только за 2018 год с сайта MPC плюс пулковские наблюдения (ЗА-320М и МТМ-500М)

| | JD2458000.5 | | | JD2458600.5 | |
|--------------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------------|
| | улучшенные | коррекция | ошибка | улучшенные | Улучшенные – MPC |
| $M, ^\circ$ | 261.97737 | 0.00003 | 0.000010 | 84.52851 | -0.00003 |
| $\omega, ^\circ$ | 109.89706 | 0.00005 | 0.000009 | 109.91657 | 0.00002 |
| $\Omega, ^\circ$ | 193.52454 | -0.00007 | 0.000006 | 193.49935 | -0.00005 |
| $i, ^\circ$ | 5.87456 | -0.00001 | 0.000001 | 5.87433 | -0.00001 |
| e | 0.4641522 | 0.0000002 | 0.00000002 | 0.4639284 | 0.0000002 |
| $a, \text{ а. е.}$ | 2.18915934 | 0.00000064 | 0.000000137 | 2.18933621 | -0.00000071 |
| $q, \text{ а. е.}$ | 1.17305628 | | | 1.17364094 | -0.00000009 |

Объяснение такой кривой блеска может иметь два варианта.

Либо астероид совершает простое вращение с периодом около 97.2 ч без прецессии, а расхождения отдельных отрезков кривой вызваны неточностью наблюдений и их обработкой.

Либо прецессия оси вращения существует и проявляется в несовпадении отрезков кривой, но ее период значительно больше периода осевого вращения астероида. Такой период пока не может быть обнаружен в силу недостаточной длительности общего интервала наблюдений.

Никаких других периодов (включая ранее предполагавшиеся значения около 32, 38, 39.1 и 58 ч) частотный анализ не обнаружил.

Сложности в определении периода вращения астероида MASAAKIKOYAMA вызваны следующими причинами.

Во-первых, большой длительностью главного периода (около 97 ч).

Во-вторых, близкой соразмерностью периода с сутками (около 4 сут), т.е. со средним интервалом между наблюдениями.

В-третьих, возможным присутствием на кривой блеска еще одного периода (возможное вращение с кувырканием).

В-четвертых, наличием на кривой блеска дополнительных колебаний (похоже, непериодических) с амплитудой до примерно 1/3 от амплитуды основного периода, вызванных, по-видимому, сложной формой астероида.

Также по полученным на пулковских телескопах астрометрическим положениям астероида проведена процедура улучшения его орбиты. Наблюдения, полученные в ГАО РАН, позволили существенно улучшить элементы орбиты астероида.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-02-01183.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С. Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320. II // Изв. ГАО РАН. 2004. № 217. С. 505–530.
- Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты “Апекс-I” и “Апекс-II” для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 1. С. 74–87. (Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Verestchagina I.A. Apex I and Apex II software packages for the reduction of astronomical CCD observations // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. № 1. P. 68–80.)
- Кулиш А.П., Девяткин А.В., Рафальский В.Б., Ибрагимов Ф.М., Куприянов В.В., Верещагина И.А., Шумахер А.В. Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М // Изв. ГАО РАН. 2009. № 219. Вып. 1. С. 192–218.
- Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 190–192. (Lvov V.N., Tsekmeister S.D. The use of the EPOS software package for research of the Solar System objects // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 177–179.)
- Ieva S., Dotto E., Perna D., Barucci M.A., Bernardi F., Fornasier S., De Luise F., Perozzi E., Rossi A., Brucato J.R. Low delta-V near-Earth asteroids: A survey of suitable targets for space missions // Astron. and Astrophys. 2014. V. 569. A59.
- Krugly Yu.N., Gafonyuk N.M., Belskaya I.N., Chiorny V.G., Shevchenko V.G., Velichko F.P., Lupishko D.F., Konovalenko A.A., Falkovich I.S., Molotov I.E. Kharkiv study of near-Earth asteroids // Proc. IAU Symp. № 236: “Near Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk” (Prague, Czech Republic, August 14–18, 2006) / Eds Milani A., Valsecchi G.B., Vokrouhlický D. 2007. P. 385–389.
- Lagekvist C.-I., Williams I.P. Physical studies of asteroids. XV. Determination of slope parameters and absolute magnitudes for 51 asteroids // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1987. V. 68. P. 295–315.

- Pravec P., Harris A.W., Scheirich P., Kušnirák P., Šarounová L., Hergenrother C.W., Mottola S., Hicks M.D., Masi G., Krugly Yu.N., Shevchenko V.G., Nolan M.C., Howell E.S., Kaasalainen M., Galád A., Brown P., DeGraff D.R., Lambert J.V., Cooney Jr. W.R., Foglia S.* Tumbling asteroids // *Icarus*. 2005. V. 173. P. 108–131.
- Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 835–853.
- Warner B.D.* Initial results from a dedicated H-G project // *Minor Planet Bull.* 2007. V. 34. P. 113–119.
- Warner B.D., Harris A.W., Ďurech J., Benner L.A.M.* Light-curve photometry opportunities: 2018 July–September // *Minor Planet Bull.* 2018. V. 45. № 3. P. 304–309.
- Warner B.D., Stephens R.D.* Near-Earth asteroids lightcurve analysis at the Center for Solar System studies: 2018 July–September // *Minor Planet Bulletin*. 2019. V. 46. № 1. P. 27–40.
- <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>
- <http://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.txt>
- http://alcdef.org/alcdef_GenerateALCDEFPage.php
- http://www.planetarysciences.org/PHP/CS3_Lightcurves.php
- https://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=✓&object_id=13553
- https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/goldstone_asteroid_schedule.html