

УДК 523.44, 520.82

АСТРОМЕТРИЯ И ФОТОМЕТРИЯ АСТЕРОИДА (367943) 2012 DA14 НА ТЕЛЕСКОПАХ ГАО РАН

*Девяткин А. В.¹, Горшанов Д. Л.², Наумов К. Н.³, Петрова С. Н.⁴,
Мартюшева А. А.⁵, Львов В. Н.⁶, Цекмейстер С. Д.⁷, Мельников А. В.⁸*

ASTROMETRY AND PHOTOMETRY OF (367943) 2012 DA14 ASTEROID WITH TELESCOPES OF PULKOVO OBSERVATORY

Devyatkin A. V., Naumov K. N., Gorshanov D. L., Vereshchagina I. A., Petrova S. N., Martysheva A. A., L'vov V. N., Tsekmeister S. D., Melnikov A. V.

Astrometric and photometric observations of 2012 DA14 asteroid during its close approach to Earth were made with ZA-320M and MTM-500M telescopes of Pulkovo observatory. The evolution of its orbit was investigated; axial period and some other properties of the asteroid were estimated.

Keywords: asteroids, astrometry, photometry, light-curves, orbits.

Введение

Сближающийся с Землёй астероид (367943) 2012 DA14 является потенциально опасным. Он был открыт 23 февраля 2012 г. в испанской обсерватории La Sagra Sky Survey (J75). За всю историю наблюдений данный астероид является наиболее крупным объектом из когда-либо подходивших так близко к поверхности Земли. 15 февраля 2013 г. он приблизился к Земле на расстояние 27,7 тыс. км.

Наблюдения этого астероида вблизи момента сближения продолжались на телескопе ЗА-320М с 16 по 21 февраля, а на телескопе МТМ-500М — с 15 по 19 февраля 2013 г. Целью наблюдений было:

– получение астрометрических положений астероида для уточнения его орбиты и её изменений после близкого взаимодействия с Землёй;

– определение показателей цвета;

– построение кривых блеска астероида для определения характеристик его вращения.

Телескоп ЗА-320М [1] имеет оптическую схему Кассегрена, диаметр зеркала 320 мм и эквивалентное фокусное расстояние 3200 мм. Он установлен в Пулковской обсерватории на краю Санкт-Петербурга. В настоящее время телескоп оснащён ПЗС-камерой SBIG STL-16803 (4096×4096 пикселей по 9×9 мкм); с нею поле зрения инструмента составляет около 40'×40'. Большая часть наблюдений ведётся в режиме биннирования пик-

¹Девяткин Александр Вячеславович, д-р физ.-мат. наук, заместитель директора Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: adev@gao.spb.ru.

²Горшанов Денис Леонидович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: dengorsh@mail.ru.

³Наумов Константин Николаевич, научный сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: knnaumov@mail.ru.

⁴Петрова Светлана Николаевна, стажер-исследователь Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: stalkered@yandex.ru.

⁵Мартюшева Александра Андреевна, стажер-исследователь Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: alex.mart13@gmail.com.

⁶Львов Виктор Николаевич, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: eros-gao@mail.ru.

⁷Цекмейстер Светлана Дмитриевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: eros-gao@mail.ru.

⁸Мельников Александр Викторович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН; e-mail: sunny_melnikov@mail.ru.

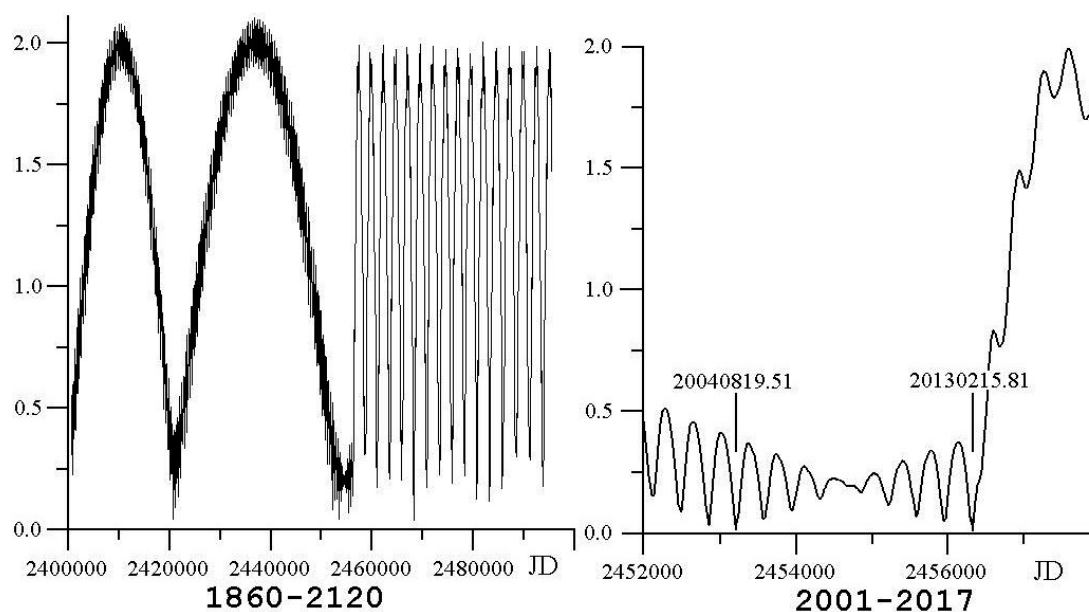


Рис. 1. Геоцентрическое расстояние астероида 2012 DA14

селов 3×3 . Телескоп MTM-500M [2] имеет оптическую схему Максута с апертурой 500 мм и эквивалентным фокусным расстоянием 4100 мм. Он установлен на Горной астрономической станции ГАО РАН на Северном Кавказе близ города Кисловодска на высоте 2100 м над уровнем моря. Телескоп оснащён ПЗС-камерой SBIG STX-1001E (1024×1024 пикселей по 24×24 мкм), с которой поле зрения составляет примерно $21' \times 21'$. Оба телескопа оснащены наборами фильтров международной широкополосной фотометрической системы *BVR*. Оба инструмента автоматизированы и могут работать как автоматически, так и в режиме удалённого управления.

1. Позиционные измерения

По наблюдениям, выполненным на телескопах ЗА-320М и MTM-500М, было получено 436 астрометрических положений. Астрометрическая обработка выполнялась с опорой на каталог UCAC-3. Средняя точность астрометрии составила: по прямому восхождению — $0'',43$, по склонению — $0'',26$. Результаты были отправлены в Международный центр малых планет.

2. Моделирование эволюции орбиты

Для астероида 2012 DA14 с помощью программы ЭПОС, разработанной в Пулковской

обсерватории [3], было выполнено моделирование эволюции орбиты в период с 1860 по 2017 гг. Результаты представлены на рис. 1–3.

На рис. 1 прослеживается изменение геоцентрического расстояния астероида 2012 DA14 на интервале 1860–2120 гг. (слева) и в увеличенном масштабе (справа) — на интервале 2001–2017 гг., в котором имели место два сближения с Землёй, причём одно из них — рекордное. На рис. 2 в том же масштабе показано изменение трёх элементов орбиты: наклона, эксцентриситета и большой полуоси. Скачки на графиках соответствуют моментам, особо отмеченным на рис. 1.

Движение астероида 2012 DA14 относительно Земли представлено на рис. 3а, 3б, построенных в режиме «Два неподвижных центра» программы ЭПОС (Солнце — в центре рисунка, Земля — справа). Цифрами указаны положения астероида в начале и в конце интервалов времени, отмеченных в подписях к рисункам.

2012 DA14 совершал прямое движение по циркулирующей (относительно Земли) орбите до 18.02.1916. Затем он двигался в обратном направлении по подковообразной орбите до 2004 г. Далее до сверхтесного сближения 15.02.2013 он являлся квазиспутником Земли. После этого он опять находится в прямом движении по циркулирующей орбите. (Примечание: признаком квазиспутника является

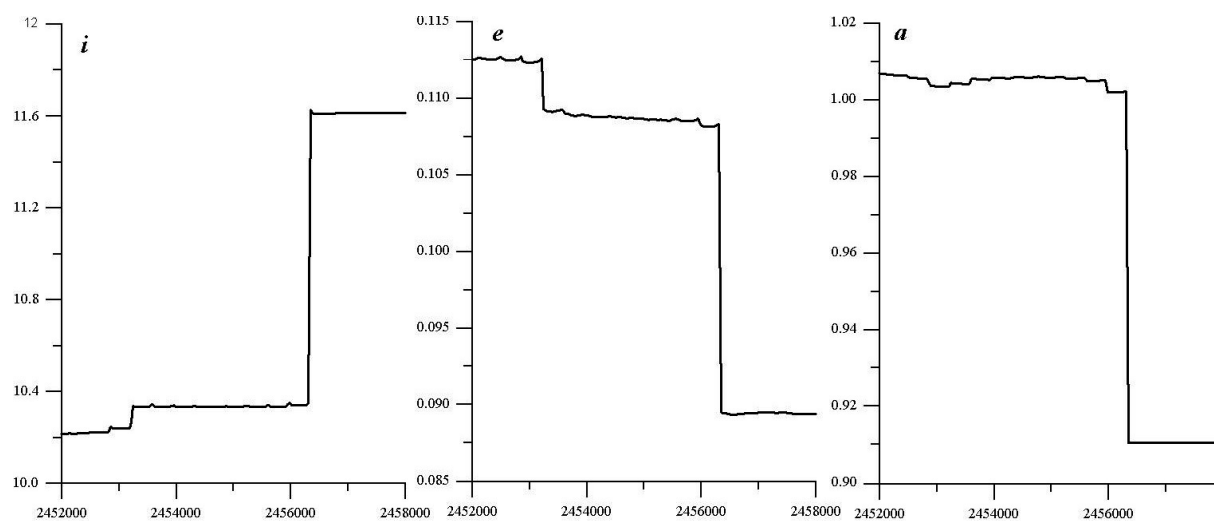


Рис. 2. Изменение элементов орбиты астероида 2012 DA14 с 2001 по 2017 гг.

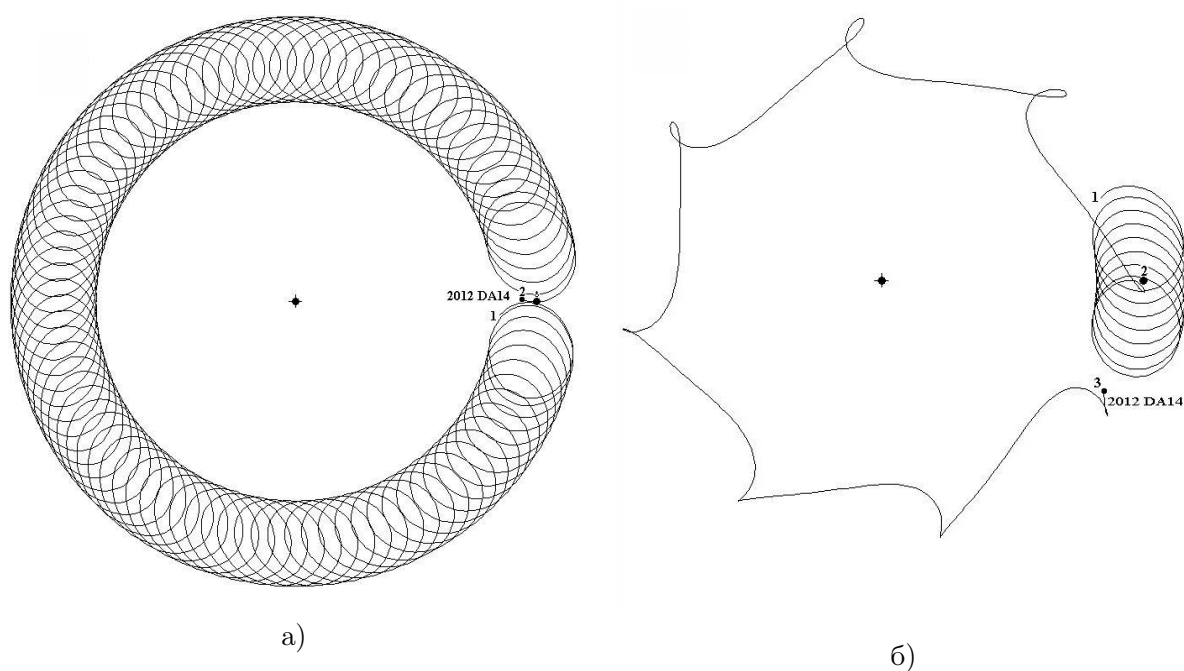


Рис. 3. а) Подковообразная орбита (1-2) за период 1916–2004 гг.;
 б) 1-2 — квазиспутниковая орбита (2004–2013); 2-3 — циркулирующая орбита (после 15.02.2013)

Смещение	альbedo 0,44	альbedo 0,80 (светлое тело)	альbedo 1,0 (абсолютно белое тело)
Вдоль радиус-вектора	18 км	20,4 км	21,8 км
Вдоль орбиты	223,4 км	253,4 км	270,4 км
Полное	224 км	254 км	271 км

то, что он описывает эпицикл вокруг планеты в подвижной гелиоцентрической системе координат, ось X проходит через планету.)

3. Исследование влияния светового давления и эффекта Ярковского

Для астероида 2012 DA14 были вычислены величины отклонений в его орбитальном движении под действием силы светового давления. Вычисления производились с помощью специально разработанной программы, в которой совместное численное интегрирование уравнений движения системы тел основано на методе Эверхарта [4].

Параметры астероида 2012 DA14, использованные для учета светового давления (<http://ssd.jpl.nasa.gov/>): радиус $D = 30$ м, масса $m = 1,3 \cdot 10^8$ кг, плотность $\rho = 2000$ кг/м³, большая полуось $a = 0,910323$ а.е., эксцентриситет $e = 0,089401$, абсолютная звездная величина $H_V = 24,106^m$, оптический коэффициент $k = 1,19$, $p = 0,44$ — альbedo астероида в полосе V , полученное с использованием абсолютной звездной величины и диаметра астероида по формуле $\lg D = 3,122 - 0,5 \lg p - 0,2 H_V$ [5].

В ближайшие 10 лет максимальное отклонение астероида 2012 DA14, обусловленное световым давлением, указано в таблице.

Таким образом, при использовании *светлого покрытия* поверхности астероида, до следующего сближения 2012 DA14 с Землей в 2046 году (через 33 года), возможное отклонение под действием сил светового давления составит около 840 км.

Для оценки эффекта Ярковского, помимо вышеперечисленных параметров, были использованы также следующие: наклон оси вращения астероида к плоскости орбиты $\gamma = 11^\circ$, гелиоцентрическое расстояние астероида на момент сближения (15–16.02.2013) $r = 0,98$ а.е., среднее суточное движение астероида (взятое с сайта MPC) $n = 1,13477770^\circ/\text{сут.}$ В работе [6] класс астероида 2012 DA14 в классификации SMASSII определен как L, т.е. его поверхность сло-

жена преимущественно кремнием. В связи с этим были приняты следующие параметры: теплопроводность $K = 149$ Вт/(м·К), теплоемкость $C = 0,678$ кДж/(м³·К), плотность поверхностных слоев $\rho_s = 2330$ кг/м³, коэффициент эмиссии (степень черноты) $\varepsilon = 0,9$ и поглощательная способность $\alpha = 0,9$ поверхности астероида.

Использовался аналитический подход вычисления эффекта Ярковского по модели [7]. Сила Ярковского для астероида 2012 DA14 оказалась очень мала и составила $F = 0,00016$ Н в случае допущения, что разница температур ночной и дневной сторон $\Delta T = 100$ К, а средняя температура астероида $T = 165$ К (как у (387) Аквитании, представительницы L-класса). В случае допущения $T = 260$ К, $F = 0,00063$ Н.

4. Определение показателей цвета

Для определения показателей цвета астероида 2012 DA14 16 февраля 2013 г. были проведены наблюдения на телескопе MTM-500M в полосах $BVRI$ международной фотометрической системы. Смена фильтров производилась в последовательности $BVBVB-VRVRV-RIRIRI$.

Следуя методу, описанному в статье [8], фотометрическая привязка к окружающим звёздам производилась с использованием инфракрасного каталога 2MASS. Блеск звёзд в полосах $BVRI$ определялся из их блеска в полосах J и K , приведённого в этом каталоге.

Из нескольких полученных таким образом значений показателей цвета определялись средневзвешенные; они имеют следующие значения:

$$B - V = 0^m, 86 \pm 0^m, 15,$$

$$V - R = 0^m, 39 \pm 0^m, 04,$$

$$R - I = 0^m, 36 \pm 0^m, 03.$$

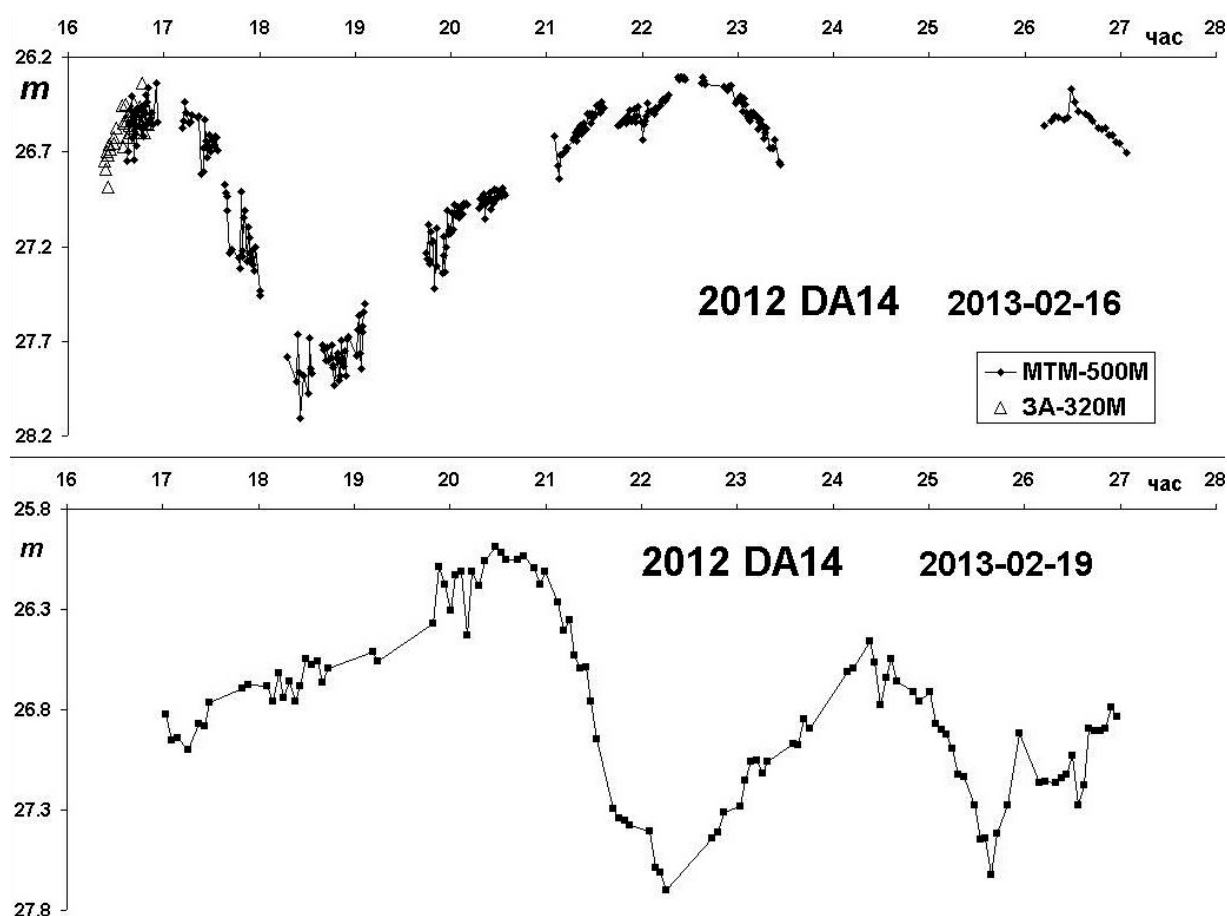


Рис. 4. Кривые блеска астероида 2012 DA14, полученные 16 и 19 февраля 2013 г. По оси абсцисс приведено время UTC от 0 часов соответствующей даты (в часах). По оси ординат отложена звёздная величина, приведённая к единичным гелиоцентрическому и топоцентрическому расстояниям, но без учёта фазового угла

5. Наблюдения кривых блеска, определение периода вращения и странный сдвиг фазы некоторых кривых

16 и 19 февраля 2013 г. на телескопе MTM-500M были проведены наблюдения кривой блеска астероида 2012 DA14 в интегральной полосе инструмента (без фильтров) длительностью около 10 часов. Кроме того, на телескопе 3A-320M 16 февраля удалось пронаблюдать короткий отрезок кривой блеска длительностью около получаса. На рис. 4 приведены полученные кривые блеска.

По форме этих кривых можно заключить, что каждая из них охватывает приблизительно один период вращения астероида длительностью 9–9,5 часа. Сопоставляя эти два отрезка кривой блеска, полученные с интервалом трое суток — около девяти

периодов, можно было бы определить период вращения астероида с высокой точностью. Однако сделать это не удалось: между одинаковыми максимумами этих отрезков не укладывалось целое число периодов подобной длительности.

Тогда для прояснения ситуации мы привлекли наблюдения, полученные на других обсерваториях. В сети Интернет было найдено несколько отрезков кривой блеска астероида 2012 DA14, полученных в интервале 15–19 февраля 2013 г. Из них два отрезка также охватывают целый период вращения астероида [6, 9].

На рис. 5 приведены все собранные нами отрезки кривой блеска, включая наши. По оси абсцисс отложено время UTC в часах, отсчитываемое от 0 часов 16 февраля 2013 г. По оси ординат — звёздная величина, приведённая к единичным гелиоцентрическому и топоцентрическому расстояниям. Все на-

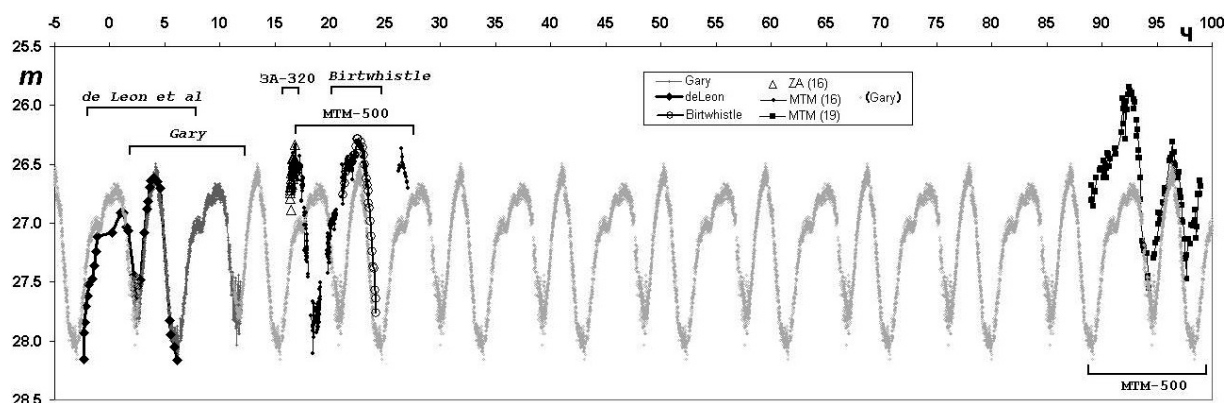


Рис. 5. Отрезки кривой блеска астероида 2012 DA14, полученные на разных обсерваториях мира. Пояснения см. в тексте

блюдения были выполнены на разных обсерваториях в различных фотометрических полосах. Поскольку задачей являлось сопоставление отрезков кривой блеска по фазе и по форме, то приведение наблюдений к единой фотометрической системе не выполнялось. Вместо этого к значениям блеска каждой кривой добавлялся произвольный нуль-пункт так, чтобы привести их приблизительно к одному уровню.

За основу была взята кривая, полученная Б. Гэри [9], т.к. она является наиболее плотной и длительной; на рис. 5 она обозначена тёмно-серым цветом. Автор этих наблюдений оценил период вращения астероида в 9,1 часа. Указанная кривая размножена на рисунке светло-серым цветом со сдвигом кратным периоду 9,22 часа (что дало лучшее совпадение по фазе с далеко отстоящими по времени наблюдениями MTM-500M 19 февраля).

Кривая блеска астероида на протяжении интервала наблюдений сохраняет особенности своей формы. Чётко выделяются два отличающихся друг от друга максимума: один узкий, острый, почти симметричный; другой широкий, со «ступенькой» на восходящей ветви. Однако с течением времени соотношение высот максимумов меняется: в начале интервала наблюдений широкий максимум заметно ниже узкого, затем постепенно их высоты сравниваются, в конце широкий становится выше узкого. Видимо, это связано с тем, что при близком пролёте астероида мимо Земли быстро изменялся угол аспекта. Промежутки времени между максимумами заметно отличаются: между узким и широким — около 5,5 часа, между широким и узким — около 4 часов; это приблизительно

сохраняется на протяжении всего интервала наблюдений.

Странной особенностью является сдвиг по фазе группы кривых, полученных в ночь с 16-го на 17-е февраля. Положения максимумов смещены относительно кривых, полученных в предыдущую ночь, приблизительно на 3,5 часа — более чем на треть периода. В эту группу входят отрезки, наблюденные на MTM-500M (обозначен на графике чёрными точками) и на ЗА-320M (пустые треугольники). С кривой, полученной на MTM-500M, хорошо совпадает по фазе и по форме отрезок, опубликованный П. Бёртуистлом [10] (обозначен пустыми кружками). Однако наблюдения MTM-500M, выполненные 19-го февраля, вновь хорошо совпадают по фазе с наблюдениями, сделанными в ночь с 15-го на 16-е ([6] — чёрные ромбы и [9] — тёмно-серый цвет).

Такое странное поведение кривой блеска астероида может быть вызвано временным смещением оси его вращения под действием гравитационного возмущения со стороны Земли при близком пролёте около неё [11]. В настоящее время ведётся проверка этого предположения путём компьютерного моделирования такого процесса.

Литература

1. 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.
2. Кулиш А. П., Девяткин А. В., Рафальский В. Б., Ибрагимов Ф. М., Куприянов В. В., Верещагина И. А., Шумахер А. В. Автоматизация комплекса телескопа MTM-

- 500M // Изв. ГАО РАН. 2009. № 219. Вып. 1. С. 192–218.
3. Львов В. Н., Цекмейстер С. Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // Астрономический вестник. 2012. Вып. 46. № 2. С. 190–192.
 4. Everhart E. Implicit Single-Sequence Methods for Integrating Orbits // Celest. Mech., 1974. V. 10. P. 35–55.
 5. Виноградова Т. А., Железнов Н. Б., Кузнецов В. Б. и др. Каталог потенциально опасных астероидов и комет // Труды ИПА РАН. 2003. Вып. 9. С. 43.
 6. de Leon J. et al. Visible and near-infrared observations of asteroid 2012 DA14 during its closest approach of February 15th, 2013 // Astronomy & Astrophysics. 2013. Vol. 555. Id. L2. P. 5.
 7. Lorenz R. D., Spitale J. N. The Yarkovsky effect as a heat engine // Icarus, Vol. 170. Iss. 1. P. 229–233.
 8. Warner B. D. Initial Results from a Dedicated H-G Project // Minor Planet Bulletin. 2007. Vol. 34. P. 113–119.
 9. Gary B. Asteroid “2012 DA14” Rotation Light Curve. [URL] <http://brucegary.net/2012DA14>.
 10. Birtwhistle P. Partial lightcurve for 2012 DA14. [URL] <http://peter-j95.blogspot.ru/2013/02/partial-lightcurve-for-2012-da14.html>.
 11. Батраков Ю. В., Медведев Ю. Д. О вращении астероида при его прохождении вблизи Земли // Труды всесоюз. совещания «Астероидная опасность», ИТА РАН, СПб., 1992. С. 129–133.

Ключевые слова: астероиды, астрометрия, фотометрия, кривые блеска, орбиты.

Статья поступила 3 октября 2013 г.

Главная астрономическая обсерватория, г. Санкт-Петербург, Пулково

© Девяткин А. В., Горшанов Д. Л., Наумов К. Н., Петрова С. Н., Мартюшева А. А., Львов В. Н., Цекмейстер С. Д., Мельников А. В., 2013