

УДК 521.1:523.4

БАЗА ДАННЫХ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДОВ

Уральская В. С., Емельянов Н. В., Вашковьяк С. Н.

DATABASE OF ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF THE BINARY ASTEROIDS

Uralskaya V. S. *, Emelyanov N. V. **, Vashkovyayak S. N. *

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

** Paris observatory, Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides – IMCCE, Paris, France
e-mail: ural@sai.msu.ru

Abstract. A database of astrometric observations of binary asteroids has been created. It organically complements the special database of all the world's observations of natural satellites of the planets, which has been operating for more than 10 years in the Sternberg Astronomical Institute (SAI), Moscow, Russia. The Natural Satellites Service (SAI) is available to all users on the Internet and allows solving a lot of astrometric and celestial-mechanical problems based on observations of satellites.

Observations of asteroids can be used to determine the dynamic parameters of the system, the mass of the components, the shape and oblateness of the main body. In addition, it becomes possible to predict the season of mutual phenomena in the system and the occultation of stars. Some asteroids are triplets, and their observations make it possible to determine the diameters of all three components, their density and porosity, the position of the orbit pole, and other parameters of the system.

Keywords: satellites of asteroids, astrometric observation, database.

К концу XX в. многие исследователи астероидов на основе фотометрических наблюдений блеска пришли к выводу о возможной двойственности астероидов. Так, в 1992 г. в *Астрономическом циркуляре* появилась статья В.В. Прокофьевой и М.И. Демчик [1], в которой на основе частотного анализа кривых блеска с использованием телевизионной техники они пришли к выводу, что (87) *Sylvia* является двойным астероидом. Однако это осталось незамеченным в среде астрономов-наблюдателей.

Только в 1993 году космический аппарат Галилео при его пролете около астероида (243) *Ida* размером 56 км обнаружил его спутник, впоследствии названный *Dactyl* (1.5 км). С тех пор начался интенсивный поиск и от-

крытие спутников или компаньонов астероидов.

В 1999 г. с помощью системы адаптивной оптики на телескопе Канада–Франция–Гавайи (CFHT) был открыт первый спутник астероида (45) *Eugenia* (206 км), названный *Petit-Prince*, диаметром 7 км.

Он движется на расстоянии 1165 км от основного тела, описывая почти круговую орбиту с эксцентриситетом $e \sim 0,0006$. Marchis F. и др. [2] в 2007 г. сообщили об открытии второго спутника S/2004 (45) 1 (диаметром 5 км) в феврале 2004 г. на телескопе Very Large Telescope (VLT) с системой Adaptive Optics (АО) на Европейской Южной обсерватории (European Southern Observatory) (ESO).

Уральская Валентина Семёновна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела небесной механики Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: ural@sai.msu.ru

Емельянов Николай Владимирович, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом небесной механики Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: emelia@sai.msu.ru.

Вашковьяк Софья Николаевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела небесной механики Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: vashkov@sai.msu.ru.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-52-150005-НЦНИ_a).

К октябрю 2017 г. открыты 317 астероидов и транснептуновых объектов с компаньонами, 302 бинарных и 14 тройных систем, одна шестикратная система Плутона, всего 335 компаньонов. Они различаются по своим размерам и расположению. Двойные или бинарные астероиды имеют почти равные массы и вращаются вокруг общего центра масс. Примером может служить (90) Antiope. Два компонента этой системы имеют равные размеры по 95 км. Спутники астероидов примерно в 10–40 раз меньше размеров основного тела. Так, астероид (87) Sylvia размером 286 км имеет два спутника Romulus (10,8 км) и Remus (10,6 км). Спутники астероидов открыты во всех областях Солнечной системы — в Главном поясе, среди околоземных астероидов, в поясе Койпера и среди Кентавров. Среди околоземных астероидов (Near-Earth objects) 64 объекта показывают двойственность, а 3 из них — триплеты. 23 астероида, пересекающих орбиту Марса (Mars crossers), двойные, один — триплет. В Главном поясе (Main belt) 145 астероидов являются двойными (8 имеют по два спутника). Среди троянцев Юпитера 4 бинарные. Самый большой троянец (624) Hektor ($370 \times 195 \times 205$ км), находящийся в точке L4 — впереди Юпитера — контактный бинар, его спутник имеет диаметр 15 км. В точке либрации L5 позади Юпитера находится двойной астероид (617) Patrocle (122 км) с почти равным партнером диаметром 112 км, названным Menoetius.

Первое открытие двойственности объекта 1998 WW31 в поясе Койпера состоялось в 2001 г. группой Veillet на телескопе CFHT (Canada–France–Hawaii Telescope) с адаптивной оптикой. К октябрю 2017 г. известны 82 бинарных транснептуновых объекта (TNO) и два триплета (47171) 1999 TC36 и (136108) Хаумеа (Haumea) со спутниками Ни'иака и Намака. Все открытые карликовые планеты имеют спутники, кроме Цереры. Карликовая планета (134340) Плутон имеет 5 спутников.

Н.М. Гафтонюк, Н.Н. Горькавый [3] изучили основные закономерности богатой базы данных по двойным астероидам. По их исследованию вероятность существования спутника уверенно растет с увеличением скорости вращения астероида. Кроме того, вероятность наличия спутников зависит от размера астероида. Так, она велика для маленьких и крупных астероидов и минимальна для асте-

роидов среднего размера. Кривая двойственности астероидов в зависимости от размеров главного тела показывает минимум двойных астероидов на размерах 10–100 км. Максимум количества астероидов со спутниками приходится на области размеров меньше 10 км и больше 100 км. Все открытые спутники астероидов регулярны, как большинство спутников обычных планет: обращаются в том же направлении, что и центральное тело, и их орбиты расположены вблизи от плоскости его экватора.

Открытие триплетов показало гораздо большее разнообразие в движениях кратных систем. Так, спутники (45) Eugenia движутся не в плоскости экватора астероида, а их орбиты наклонены на 9 и 18 градусов соответственно к плоскости экватора. Двойные астероиды Главного пояса имеют орбиты в несколько раз превосходящие их собственные размеры. Бинары из транснептунового пояса имеют другие особенности: многие из них сравнимого размера, а орбиты раз в 100 превосходят их размеры.

Существуют различные способы определения двойственности астероидов. Как уже упоминалось, первое открытие состоялось с помощью автоматической межпланетной станции Галилео, который следовал к Юпитеру и, пролетая через Главный пояс астероидов, исследовал несколько малых тел и у одного из них обнаружил спутник.

Фотометрический способ состоит в снятии кривой блеска. Световая кривая, или кривая блеска астероида, представляет собой ряд значений звездной величины объекта, полученных в определенные моменты времени. Колебания блеска астероида вызываются большим числом факторов. Это может быть нерегулярное вращение главного несферического компонента, неоднородное альbedo поверхности, вынужденное прецессионное движение, связанное с наличием спутника, взаимные покрытия и затмения в системе двух тел. Часто это величины одного порядка, и разделить причины изменений блеска оказывается невозможно.

Во время покрытий звезд астероидами также проводятся фотометрические наблюдения, состоящие в измерении уменьшения блеска покрываемой звезды. Суть метода состоит в наблюдении за звездой из зоны, находящейся вне расчетной полосы покрытия

астероидом. Такие наблюдения можно проводить с помощью любительских астрономических приборов. Недостатком является то, что спутник астероида должен покрывать зону наблюдателя в момент исследования покрытия звёзд астероидами.

Спектральные наблюдения важны для определения химического состава астероидов.

Спекл-интерферометрия при получении большого количества изображений с короткой экспозицией позволяет в значительной степени исключить искажения в атмосфере и довести разрешающую способность телескопа практически до дифракционной. Этим методом можно наблюдать объекты до 20 звездной величины, но большая разность в яркости астероида и спутника, так называемая контрастность, является препятствием для применения этого метода при изучении двойных астероидов. Единственной работой, применившей способ спекл-интерферометрии к наблюдениям двойных астероидов, является публикация Соковой с соавторами [4] о наблюдениях астероида (22) Kalliope (167 км) и ее спутника Linus (28 км), разность блеска которых составляет 3 звездные величины. Среднее угловое расстояние между компонентами 0,3 секунды дуги. Наблюдения проводились на 6-метровом ВТА телескопе САО РАН. Метод спекл-интерферометрии позволяет получить изображение объекта через возмущенную атмосферу с помощью очень коротких экспозиций порядка 10^{-2} сек. Авторы указывают, что преимуществом спекл-интерферометрии по сравнению с адаптивной оптикой является возможность его применения не только к инфракрасным изображениям, но и к видимой области и близко-ультрафиолету. Оборудование для спекл-интерферометрии значительно дешевле, чем адаптивная оптика для большого телескопа, атмосферные требования условий наблюдения менее требовательны, чем для наблюдений с адаптивной оптикой.

Радиолокационными наблюдениями исследуют астероиды, сближающиеся с Землей (Near-Earth asteroids). Они имеют небольшие размеры — от нескольких сотен метров до нескольких километров. Радарные измерения частоты (доплеровские наблюдения) позволяют установить форму и размеры компонентов с точностью до 10 м с помощью измерения времени запаздывания отражённого сигнала,

а также периоды вращения астероидов. Недостаток радиолокационного метода заключается в малом радиусе действия. С увеличением расстояния до исследуемого объекта точность данных существенно снижается.

Программы радарных наблюдений, организованные Лабораторией реактивного движения НАСА (JPL NASA) и радиообсерваториями в Аресибо (Arecibo) и Голдстоуне (Goldstone), позволили определить двойственность 43 околоземных астероидов и открыли три околоземных триплета.

Для изучения движения спутников астероидов и получения их орбитальных данных и некоторых физических характеристик астероидов и их спутников нужны астрометрические позиционные наблюдения, причем на возможно большем участке орбиты.

Астрометрические наблюдения, проводимые наземными телескопами и космическими телескопами, а именно, Hubble Space Telescope являются основным источником позиционных наблюдений. Эти наблюдения спутников астероидов сталкиваются со значительными трудностями. Двойные астероиды являются слабыми объектами от 14 до 26 звездной величины. Спутники или компаньоны астероидов находятся очень близко к основному телу, и при наблюдениях с Земли видимое разделение компонентов находится в пределах 0,5 секунд дуги. Кроме того, они часто сильно различаются по контрасту. Разность звездных величин основного тела и спутника доходит до 10 звездных величин.

Для наблюдений требуется большое разрешение, которое сейчас обеспечивается адаптивной оптикой. Системы с адаптивной оптикой стоят почти на всех телескопах, в частности на телескопах класса 8–10 м. Это Кеск, Gemini, расположенные на Гавайях (Mauna Kea, Hawaii), VLT (ESO, Chile), поэтому именно они поставляют основную часть наблюдений двойных астероидов. Адаптивная система состоит из ряда линз и электронных средств, с помощью которых во время наблюдений удается минимизировать искажения, связанные с дрожанием земной атмосферы. Благодаря коррекции атмосферной турбулентности на изображениях и спектрах достигается разрешение, близкое к дифракции телескопа.

Основным источником данных о двойных спутниках является работа Johnson [5]. В ин-

тернете все данные о двойных астероидах можно найти на его сайте [6]. Здесь собраны сведения об орбитальных и физических свойствах астероида, об известных орбитах и свойствах спутников или компаньонов, а также вся библиографическая база по данному астероиду. Сами наблюдения, на основе которых определена орбита спутника и суммарная масса системы, можно найти только для транснептуновых объектов (TNO) на сайте W. Grundy [7]. Недостатком этого источника является то, что часто неизвестно, кто и где проводил эти наблюдения.

Остальные наблюдения спутников разбросаны по различным публикациям. Появилась необходимость собрать их вместе и в дальнейшем при определении орбиты спутника использовать все имеющиеся наблюдения на как можно большем интервале времени.

Часто наблюдений так мало, что можно констатировать лишь факт наличия спутника. Эти сведения об открытии спутника астероида появляются в циркулярах Международного астрономического союза (IAUC) или в электронных телеграммах (СВЕТ). Если наблюдений несколько, то удается определить большую полуось орбиты, а, следовательно, и суммарную массу системы.

При достаточном количестве наблюдений определяется орбита спутника, чаще всего используется кеплеровская модель и метод наименьших квадратов. Если наблюдений недостаточно, используется вероятностный метод, когда получаются несколько вариантов орбит и затем выбирается наиболее вероятная.

Итак, наблюдения двойных астероидов дают возможность определить суммарную массу двойной системы, что очень важно для решения задачи определения массы астероидного вещества в Солнечной системе. А это необходимо для обеспечения полетов космических аппаратов, а также для уточнения теорий движения больших планет, в частности, движения Марса. Также с помощью наблюдений удастся определить форму астероидов, в частности, сжатие, массу всех компонентов, положение полюсов орбит и другие данные.

База данных астрометрических наблюдений двойных астероидов была создана в рамках Центра данных естественных спутников планет (Natural Satellites Data Center – NSDC) [8]. Центр разработан и поддерживается в результате сотрудничества Государ-

ственного астрономического института имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ) и Института небесной механики и вычисления эфемерид (Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides — IMCCE, Paris, France) [9]. Служба естественных спутников планет содержит почти все имеющиеся в мире наблюдения спутников планет. Теперь она дополнена наблюдениями спутников астероидов.

Основным источником данных о наблюдениях являются публикации. Согласно правилам NSDC в базу данных ABIN включаются только опубликованные наблюдения в том же виде и формате, что и в публикации, никакие редукции наблюдений не проводятся. Сейчас изучены свыше 200 статей по кратным системам астероидов. Наблюдения содержатся в 90 статьях и других источниках. Это позволило создать нам столько же порций наблюдений для 56 спутников. Для большинства двойных астероидов известен только факт наличия спутника. Некоторые астероиды наблюдались одной или несколькими группами ученых, которые получали из них орбиту спутника и некоторые физические данные. Самое большое количество наблюдений у спутника астероида (22)Kalliope. Они имеются в 5 работах различных авторов, и для дальнейших исследований движения спутника необходимо использовать все имеющиеся наблюдения. Остальные двойные системы наблюдались чаще всего одной или двумя группами наблюдателей

Астрометрические положения спутника относительно основного тела задаются координатами X и Y , которые соответствуют разделению между основным телом и спутником в проекции на небесную сферу:

$$X = \delta(RA) \times \cos(DEC) \text{ и } Y = \delta(DEC),$$

где X положителен, когда спутник расположен к астрономическому востоку от основного тела, а Y положителен, когда он расположен к северу, RA — прямое восхождение, DEC — склонение.

Другое представление наблюдений — это разделение (s) и позиционный угол (PA).

Для каждой порции наблюдений созданы два текстовых файла — точно такие же, что и в Службе естественных спутников планет — Content и Data. Content содержит следующие

сведения: название астероида и его спутника или компаньона, код и название обсерватории, интервал и количество наблюдений, библиографическая ссылка, принятые система координат и шкала времени и формат данных. Файлы Data содержат числовые результаты наблюдений.

К октябрю 2017 г. база данных содержит 90 порций наблюдений спутников 56 астероидов. Работа будет продолжаться по мере поступления новых наблюдений.

Литература

1. Прокофьева В.В., Демчик М.И. Астероид 87 Сильвия является двойным // *Астрономический циркуляр*, 1992. № 1552. P. 27–28.
2. Marchis F., Baek M., Descamps P., Berthier J., Hestroffer D., Vachier F. *IAU Circ.* 2007. No. 8817, Vol. 1. Edited by Green, D.W.E.
3. Н.М. Гафтонюк, Н.Н. Горькавый. Asteroids with satellites: Analysis of observational data // *Solar System Research*. 2013. Vol. 47. Iss. 3. P. 196–202.
4. Sokova I.A., Sokov E.N., Roschina E.A., Rastegaev D.A., Kiselev A.A., Balega Yu.Yu., Gorshanov D.L., Malogolovets E.V., Dyachenko V.V., Maksimov A.F. The binary Asteroid 22 Kalliope: Linus orbit determination on the basis of speckle interferometric observations. *Icarus*. 2014. Vol. 236. P. 157–164.
5. Johnston W.R. Binary Minor Planets V9.0. 2016. *NASA Planetary Data System, EAR-A-COMPIL-5-BINMP-V9.0*.
6. Johnston W.R. Asteroids with Satellites. Режим доступа: <http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html> (дата обращения 31 октября 2017 г.).
7. Orbit Status of Known Binary TNOs. Режим доступа: <http://www2.lowell.edu/users/grundy/tnbs/status.html> (дата обращения 31 октября 2017 г.).
8. Служба естественных спутников планет. Режим доступа: <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/indexr.htm> (дата обращения 31 октября 2017 г.).
9. Arlot J.-E., Emelyanov N. V. The NSDB natural satellites astrometric database. *Astronomy and Astrophysics*. 2009. Vol. 503. P. 631–638.

References

1. Prokof'eva V.V., Demchik M.I. Asteroid 87 Sylvia is binary. *Astronomicheskii Tsirkulyar* [Astronomical Circular], 1992, no. 1552, pp. 27–28.
2. Marchis F., Baek M., Descamps P., Berthier J., Hestroffer D., Vachier F. *IAU Circ.* 2007. No. 8817, 1. Edited by Green, D.W.E.
3. Gaftonyuk N.M., Gorkavyi N.N. Asteroids with satellites: Analysis of observational data. *Solar System Research*, 2013, vol. 47, iss. 3, pp. 196–202.
4. Sokova I.A., Sokov E.N., Roschina E.A., Rastegaev D.A., Kiselev A.A., Balega Yu.Yu., Gorshanov D.L., Malogolovets E.V., Dyachenko V.V., Maksimov A.F. The binary Asteroid 22 Kalliope: Linus orbit determination on the basis of speckle interferometric observations. *Icarus*. 2014, vol. 236, pp. 157–164.
5. Johnston W. R. Binary Minor Planets V9.0. 2016. *NASA Planetary Data System, EAR-A-COMPIL-5-BINMP-V9.0*.
6. Johnston W.R. Asteroids with Satellites. URL: <http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html> (accessed 31 October 2017).
7. Orbit Status of Known Binary TNOs. URL: <http://www2.lowell.edu/users/grundy/tnbs/status.html> (accessed 31 October 2017).
8. Natural satellite service. URL: <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/indexr.htm> (accessed 31 October 2017).
9. Arlot J.-E., Emelyanov N. V. The NSDB natural satellites astrometric database. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, vol. 503, pp. 631–638.