

**Н.В. Иваненко, А.А. Базей**

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина,  
тел.: +38 (048) 723-35-15

## НЕКОТОРЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОЙНЫХ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ



Определены приливные ускорения со стороны планет земной группы и Юпитера и вычислены орбитальные резонансы для оценки устойчивости движения в системах двойных астероидов. Вычислен радиус сферы Хилла, окружающей главный компонент, в приближении планетоидной задачи трех небесных тел — Солнце, главный компонент, спутник. Найдены скорости убегания с поверхности спутников астероидов, сделан вывод о возможности потери вещества.

*Ключевые слова:* резонанс, двойные АСЗ, сфера Хилла.

В настоящее время активно проводятся наблюдения [1] и изучение эволюции астероидных систем как части объектов Солнечной системы, так и динамики отдельных астероидных систем [2, 3].

Среди нескольких тысяч потенциально опасных астероидов, сближающихся с Землей, к настоящему времени открыто 59 двойных и среди них два тройных астероида [4].

Процессы образования и эволюции двойных и кратных астероидов начались еще во времена формирования Солнечной системы. Поэтому открытие и исследование как можно большего их числа может иметь важное значение для понимания космогонических процессов, происходящих в Солнечной системе. При сближении с планетами астероиды могут существенно изменять свои орбиты. При этом возможны изменения и в параметрах движения внутри самой астероидной системы или даже ее распад. Поэтому исследование двойных астероидов имеет большое значение для предотвращения возможного столкновения Земли с такими объектами.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На астероидную систему могут воздействовать три основных фактора, которые ведут к дестабилизации орбит спутника. *Первый* — это гравитационные возмущения со стороны больших планет, *второй* связан со столкновениями внутри астероидной системы, а *третий* — с приливной эволюцией [5].

Устойчивость двойного астероида определяется гравитационными возмущениями со стороны Солнца и планет. Большое влияние оказывает приливное взаимодействие самих компонентов двойной системы. Особенно сильно это взаимодействие сказывается на небесных телах с невысокой степенью жесткости типа «*rubble pile*» [6]. Астероиды, сближаясь с планетами, подвергаются их приливному воздействию [7]. В процессе эволюции это может привести к ситуации, когда периоды обращения астероида и планеты становятся кратными: за 1, 2, 3 или 4 обращения астероида планета совершает целое число оборотов вокруг Солнца, иными словами — возможно появление соизмеримостей в движениях астероида и планеты. Характерным примером этого является движение Плутона и Нептуна: за три обращения

Нептуна вокруг Солнца Плутон делает почти точно два оборота. Согласно современным исследованиям динамики Солнечной системы можно сделать вывод о том, что ее структуру в значительной мере определяют различные резонансные явления [8].

Целью нашей работы является оценка некоторых динамических характеристик систем двойных астероидов, сближающихся в настоящее время с Землей со стороны больших планет. Мы определили наибольшие приливные ускорения в системах двойных АСЗ, радиусы сфер Хилла для главных компонентов астероидных систем, возможность движения вблизи орбитальных резонансов с планетами земной группы и Юпитером.

### ОСНОВНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Удобной моделью для оценки устойчивости орбиты спутника астероида является ограниченная задача трех тел (Солнце — астероид — спутник) [8]. Нами было определено, насколько сильно главный компонент и спутник связаны взаимным притяжением: выполнен поиск орбитальных резонансов с планетами земной группы и Юпитером, вычислены наибольшие приливные ускорения в астероидных системах со стороны Венеры, Земли и Марса и оценена устойчивость движения по Хиллу для всех известных 59 двойных и кратных АСЗ.

Для вычисления наибольших приливных ускорений использовалась классическая формула [8]:

$$a_{\text{ПРИЛИВ}} = GM_{\text{ПЛАНЕТЫ}} \frac{4a_s}{r_{\text{min}}^3}, \quad (1)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $r_{\text{min}}$  — наименьшее расстояние между орбитами астероидной системы и большой планеты. Это расстояние вычислялось для каждой пары *планета — двойной астероид* методом последовательного перебора расстояний между точками орбит. В вычислениях использованы массы больших планет  $M_{\text{ПЛАНЕТЫ}}$  и большие полуоси орбит спутников астероидов  $a_s$ , заимствованные из [4].

В результате вычислений по формуле (1) было найдено, что наибольшие приливные ускорения со стороны Венеры не превышают  $10^{-12}$  м/с<sup>2</sup>, Земли —  $10^{-12}$ , Марса —  $10^{-12}$ , Юпитера —  $10^{-14}$ . Величина приливного ускорения определяется, в первую очередь, минимальным расстоянием между астероидной системой и приливообразующей планетой. Поэтому приливы, создаваемые притяжением Юпитера, на два порядка меньше приливов от планет земной группы.

Если периоды обращения двух или более небесных тел относятся как целые небольшие натуральные числа, то такие тела движутся в орбитальном резонансе. В результате эти тела периодически сближаются, находясь в определённых точках своих орбит. Возникающие вследствие этого регулярные изменения гравитационных ускорений могут либо стабилизировать их орбиты, либо привести к распаду системы.

Для определения отношений периодов вращений необходимо использовать как можно более точные их значения. Нами были выбраны астероидные системы, для которых значения периодов известны с абсолютной погрешностью не более 0,0001 суток [4]. По этому критерию отобраны двойные астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), и для них выполнен поиск орбитальных резонансов с планетами земной группы и Юпитером.

Вычисления орбитальных резонансов выполнялись по классической методике [8]:

$$T_1 \times N_1 - T_2 \times N_2 \approx 0, \quad (2)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — сидерические периоды двух объектов,  $N_1$  и  $N_2$  — небольшие натуральные числа.

Нами были найдены три астероидные системы, которые движутся вблизи орбитальных резонансов с большими планетами (см. таблицу). Погрешность составляет от 0,04 (0,013 %) до 1,87 (0,138 %) суток.

Поскольку гелиоцентрические орбиты всех двойных АСЗ имеют значительный эксцентриситет, то при вычислениях использовалась модель планетоидной задачи трех тел [8]. Для оценки устойчивости движения спутника от-

**Орбитальные резонансы  
кратных астероидов с планетами**

Название астероида	Период вращения, сутки	Планета	Значение резонанса	Погрешность, сутки
(5646) 1990 TR	1145,17	Марс	3:5	-0,47
(5381) Sekhmet	336,85	Венера	4:6	-1,87
(363599) 2004 FG11	730,72	Земля	1:2	0,04

носителем главного компонента применялся критерий Хилла. Для этого были вычислены радиусы сфер Хилла для каждой астероидной системы вблизи перигелиев их орбит.

Результаты вычислений показали, что спутники во всех 59-и астероидных системах находятся глубоко в сферах Хилла: например, спутник в системе (5143) Heracles движется по орбите с большой полуосью 4 км относительно главного компонента, в то время как радиус сферы Хилла равен 348 км.

Далее рассматривалось движение спутников в двойных системах, для которых известен период осевого вращения: (5381) Sekhmet, (66391) 1999 KW4, (175706) 1996 FG3, (285263) 1998 QE2, (311066) 2004 DC, (363027) 1998 ST27, (399307) 1991 RJ2, (399774) 2005 NB7. Сравнение центробежного и гравитационного ускорений на поверхности этих спутников в предположении сферической формы показало, что на всей поверхности спутника астероида, исключая полюса, центробежное ускорение существенно превышает гравитационное: например, для астероида (5381) Sekhmet на экваторе центробежное ускорение превышает гравитационное в 100 раз.

### ВЫВОДЫ

Были рассчитаны приливные ускорения в системах двойных АСЗ при текущем расположении их орбит со стороны планет земной группы и Юпитера. Они оказались пренебрежимо малыми. Таким образом, эти планеты не могут

оказать существенного влияния на движение в астероидной системе и привести к ее распаду.

В результате вычислений были получены радиусы сфер Хилла для главных компонентов астероидных систем. Все двойные АСЗ оказались устойчивы по Хиллу.

С использованием известных радиусов и периодов осевого вращения спутников астероидов были оценены величины центробежных ускорений на их поверхности. Для большей части поверхности центробежное ускорение на один—два порядка превышает гравитационное. Вещество на поверхности спутников астероидов очень слабо связано с ней силами тяжести, что может приводить к потере поверхностных слоев.

Следующим этапом исследований станет построение численной модели движения пылевых частиц, покидающих поверхность спутника астероида, в околоастероидном пространстве. Возможно, это позволит лучше понять образование пылевых колец вокруг астероидов [9].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Troianskyi V., Bazyey O., Kashuba V., Zhukov V., Korzhavin S. Method for calculating orbits of near-Earth asteroids observed with telescope OMT-800. *Odessa Astronomical Publications*. 2014. 27(2): 154–155.
2. Margot J.L., Brown M.E. A Low-Density M-type Asteroid in the Main Belt. *Science*. 2003. 300(5627): 1939–1942.
3. Troianskyi V., Bazyey O., Kashuba V., Zhukov V. *Determination of the small Solar system bodies orbital elements from astrometric observations with OMT-800 telescope*. In Proc. GAIA-FUN-SSO No. 3. November 24-26, 2014, Paris Observatory.
4. Johnston's Archive on line. URL: <http://johnstonsarchive.net/>.
5. Van Flandern T., Tedesco E., Binzel R. *Asteroids*. Ed. T. Gehrels: Tuscon Univ. of Arizona, 1979.
6. Walsh K.J., Richardson D.C., Michel P. Spin-up of rubble-pile asteroids: Disruption, satellite formation, and equilibrium shapes. *Icarus*. 2012. 220(2): 514–529.
7. Chavineau B., Mignard F., Farinella P. The lifetime of binary asteroids vs gravitation encounters and collisions. *Icarus*. 1991. 94(2): 299–310.
8. Murray K., Dermott C. *Solar System dynamics*. Cambridge, 2010.
9. Braga-Ribas F., Sicardy B., Ortiz J.L., Snodgrass C., Rques F., Vieira-Martins R., Camargo J.I.B., Assafin M., Duffard R., Jehin E., Pollock J., Leiva R., Emilio M., Machado D.I., Colazo C., Lellouch E., Skottfelt J., Gillon M.,

Ligier N., Maquet L., Benedetti-Rossi G., Ramos Gomes A., Kervella P., Monteiro H., Sfair R. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*. 2014. 508. P. 72–75.

#### REFERENCES

1. Troianskyi V., Bazyey O., Kashuba V., Zhukov V., Korzhavin S. Method for calculating orbits of near-Earth asteroids observed with telescope OMT-800. *Odessa Astronomical Publications*. 2014. 27(2): 154–155.
2. Margot J.L., Brown M.E. A Low-Density M-type Asteroid in the Main Belt. *Science*. 2003. 300(5627): 1939–1942.
3. Troianskyi V., Bazyey O., Kashuba V., Zhukov V. *Determination of the small Solar system bodies orbital elements from astrometric observations with OMT-800 telescope*. In Proc. GAIA-FUN-SSO No. 3. November 24-26, 2014, Paris Observatory.
4. *Johnston's Archive* on line. URL: <http://johnstonsarchive.net/>.
5. Van Flandern T., Tedesco E., Binzel R. *Asteroids*. Ed. T. Gehrels: Tuscon Univ. of Arizona, 1979.
6. Walsh K.J., Richardson D.C., Michel P. Spin-up of rubble-pile asteroids: Disruption, satellite formation, and equilibrium shapes. *Icarus*. 2012. 220(2): 514–529.
7. Chavineau B., Mignard F., Farinella P. The lifetime of binary asteroids vs gravitation encounters and collisions. *Icarus*. 1991. 94(2): 299–310.
8. Murray K., Dermott C. *Solar System dynamics*. Cambridge, 2010.
9. Braga-Ribas F., Sicardy B., Ortiz J.L., Snodgrass C., Riques F., Vieira-Martins R., Camargo J.I.B., Assafin M., Duffard R., Jehin E., Pollock J., Leiva R., Emilio M., Machado D.I., Colazo C., Lellouch E., Skottfelt J., Gillon M., Ligier N., Maquet L., Benedetti-Rossi G., Ramos Gomes A., Kervella P., Monteiro H., Sfair R. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*. 2014. 508. P. 72–75.

N.V. Ivanenko, O. A. Bazyey

Odessa I.I. Mechnikov National University,  
2, Dvoryanskaya St., Odessa, 65082, Ukraine,  
tel.: +38 (048) 723-35-15

#### SOME DYNAMIC CHARACTERISTICS OF BINARY NEAR-EARTH ASTEROIDS

Tidal acceleration exerted by the terrestrial planets and Jupiter's are determined, orbital resonances to evaluate the motion stability in binary asteroid systems are calculated. Radius of the Hill sphere surrounding the main component in approximation of the planetary three-body problem – the Sun-main component-satellite is calculated. Escape velocities from the surface of the asteroid satellites are found and the conclusion on the possibility of substance loss is made.

*Keywords:* resonance, binary NEA, Hill sphere.

Н.В. Іваненко, О.А. Базей

Одеський національний університет  
ім. І.І. Мечникова,  
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна,  
тел.: +38 (048) 723-35-15

#### ДЕЯКІ ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДВІЙНИХ АСТЕРОЇДІВ, ЩО ЗБЛИЖУЮТЬСЯ З ЗЕМЛЕЮ

Визначені приливні прискорення з боку планет земної групи і Юпітера та обчислені орбітальні резонанси для оцінки стійкості руху в системах подвійних астероїдів. Обчислено радіус сфери Хілла, що оточує головний компонент, у наближенні планетоїдної задачі трьох небесних тіл – Сонце, головний компонент, супутник. Знайдені другі космічні швидкості з поверхні супутників астероїдів, зроблено висновок про можливість втрати речовини.

*Ключові слова:* резонанс, подвійні АСЗ, сфера Хілла.

Стаття надійшла 21.11.16