

УДК 521.172; 523.214

СБЛИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА 2006 RH 120 С ЗЕМЛЕЙ¹*Емельяненко Н. Ю.*², *Нароенков С. А.*³

APPROACHES OF ASTEROID 2006 RH 120 WITH EARTH

Emelyanenko N. Yu., Naroenkov S. A.

In the paper evolution of orbit of the asteroid 2006 RH 120 is investigated. The close approaches with Earth in the past and in the future are found. The approaches are accompany of the temporary satellite captures in the Hill sphere.

Keywords: low-velocity close approaches, temporary satellite captures of asteroid.

Среди задач, рассматриваемых теоретической астрономией, выделяется задача гравитационного захвата малого тела планетой.

При исследовании фиктивных малых тел, орбиты которых имеют незначительный наклон к плоскости эклиптики и размеры, близкие к размерам орбит Юпитера или Сатурна, Эверхартом были выявлены случаи перехода малого тела на оскулирующую эллиптическую планетоцентрическую орбиту [1]. Это явление он назвал временным спутниковым захватом (ВСЗ) малого тела Юпитером или Сатурном.

В работе [2] пребывание малого тела на эллиптической планетоцентрической орбите (без ограничений на длительность и удаленность от планеты во время события, на число минимумов функции планетоцентрического расстояния в области сближения) называется временным спутниковым захватом малого тела планетой в смысле Эверхарта и обозначается ВСЗ.

В последние десятилетия внимание небесных механиков привлекла задача о переходе малого тела в семейство спутников планеты. Существование интеграла Якоби в ограниченной круговой задаче трех тел позволяет указать области пространства, где движение малого тела возможно в рамках этой задачи. Форма и размеры этих областей (обла-

стей Хилла) существенно зависят от величин масс притягивающих тел и от энергии тела малой массы, то есть от её начального положения и начальной скорости.

Рассмотрим систему Солнце – Земля – малое тело в рамках ограниченной круговой задачи трех тел.

Для малого тела в окрестности Земли существует обособленная сфера Хилла, если постоянная Якоби тела C удовлетворяет условию

$$C > 3,0009264. \quad (1)$$

Если постоянная Якоби тела удовлетворяет условию

$$3,0009227 < C \leq 3,0009264, \quad (2)$$

области Хилла вокруг Солнца и Земли соединены перемычкой в окрестности точки либрации L_1 , позволяющей телу совершать движение в обеих областях.

Если постоянная Якоби тела удовлетворяет условию

$$3,0000156 < C \leq 3,0009227, \quad (3)$$

имеется перемычка в окрестности точки L_2 , позволяющая телу совершать движение в областях вокруг Солнца и Земли и в области, внешней относительно кривой, расположенной за пределами всех точек либрации.

¹Работа выполнена при поддержке Программы 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

²Емельяненко Наталья Юрьевна, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН; e-mail: nyemel@inasan.ru.

³Нароенков Сергей Александрович, к-т физ.-мат. наук, научный сотрудник Института астрономии РАН; e-mail: snaroenkov@inasan.ru.

С уменьшением величины C до значений:

$$C < 3,0000156, \quad (4)$$

перемычки в окрестностях точек L_1, L_2 быстро расширяются, и поверхность Хилла уже не образует вокруг Земли обособленной области. Значения постоянной Якоби в условиях (1)–(4) заимствованы из монографии [3].

Движение малого тела считается устойчивым по Хиллу, если постоянная Якоби относительно центрального тела такова, что граничная поверхность Хилла замкнута (выполнено условие (1)), а тело находится внутри неё [4].

Если два тела движутся по эллипсам вокруг их общего центра масс (ограниченная эллиптическая задача трех тел), то интеграла Якоби не существует. В работе [5] показано: если эксцентриситет эллиптической орбиты мал (γ Земли $e = 0,017$), результаты, полученные для круговой задачи, применимы к эллиптической задаче на интервале нескольких периодов обращения двух тел конечной массы.

Применим результаты, полученные в ограниченной круговой задаче, для интерпретации движения астероида 2006 RH120 в окрестности Земли. Исследуем его движение на устойчивость по Хиллу.

В работах [6,7] предложены области ω_P — области орбит малых тел на плоскости (a, e) , допускающие низкоскоростные сближения с планетами. Выделены части этих областей, орбиты которых способствуют временному гравитационному захвату малого тела в сфере Хилла — ВГЗ. В работе [7] подробно излагается и обосновывается выбор границ области ω_P для произвольной планеты. Верхняя граница области e_2 задается функцией

$$e = \sqrt{1 - \frac{a_P}{4a} \left(T_P^{\text{lim}} - \frac{a_P}{a} \right)^2}. \quad (5)$$

Для Земли величина $T_E^{\text{lim}} = 2,996$. Нижняя граница области e_1 задается функцией

$$e = \frac{|a_P - a|}{a_P + a}. \quad (6)$$

На этой линии и выше нее расположены орбиты, на которых есть точки низкоскоростного касания с планетой. Вертикальные границы области определяются из неравенства

$$\frac{a_P - 6R_H^P}{a_P + 6R_H^P} a_P \leq a \leq \frac{a_P + 6R_H^P}{a_P - 6R_H^P} a_P, \quad (7)$$

где $6R_H^P$ — область низкоскоростного сближения с планетой [8], R_H^P — радиус сферы Хилла планеты. Для Земли левая и правая границы области — это линии: $a_l = 0,887$ а.е., $a_r = 1,128$ а.е.

В момент открытия орбита астероида 2006 RH120 принадлежит области ω_E — области орбит с особенностями в сближениях с Землей. Положение орбиты астероида на плоскости (a, e) допускает длительный ВГЗ [2].

Мы провели численное интегрирование уравнений движения астероида 2006 RH120, восьми планет и Плутона на промежутке времени в 400 лет. Применялся интегратор Эверхарта RADAU [9] из пакета MERCURY [10]. Учитывались возмущения от Луны, 2-ой и 4-ой зональных гармоник потенциала Земли.

Анализ результатов показал, что на исследованном промежутке времени астероид 2006 RH120 имел многочисленные низкоскоростные сближения с Землей, в том числе с временным спутниковым захватом в смысле Эверхарта, в трех сближениях это был ВГЗ. Наиболее продолжительный ВГЗ с физическими кратными минимумами имел место в сближении 2006 г., в котором и был открыт астероид.

Проведем качественный анализ этого сближения.

Астероид 2006 RH120 — это астероид с высоким значением параметра Тиссерана T_E , который на каждом шаге интегрирования вычислялся по формуле [11]

$$T = \frac{a_E}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_E}(1 - e^2)} \cos i, \quad (8)$$

где a, a_E — большие полуоси орбит астероида и Земли; e, i — эксцентриситет и наклон орбиты астероида. Использовалась орбита из каталога астероидов Лаборатории реактивного движения НАСА [12].

На всем исследованном промежутке времени его орбита принадлежит области ω_E . В дальнейшем изложении мы будем анализировать положения орбиты астероида на плоскости (a, e) в области сближения. Для сокращения описания анализа дадим следующее определение. Последовательность точек, соответствующих положению орбиты небесного тела на плоскости (a, e) в течение сближения или какого-либо другого промежутка времени назовем треком орбиты тела.

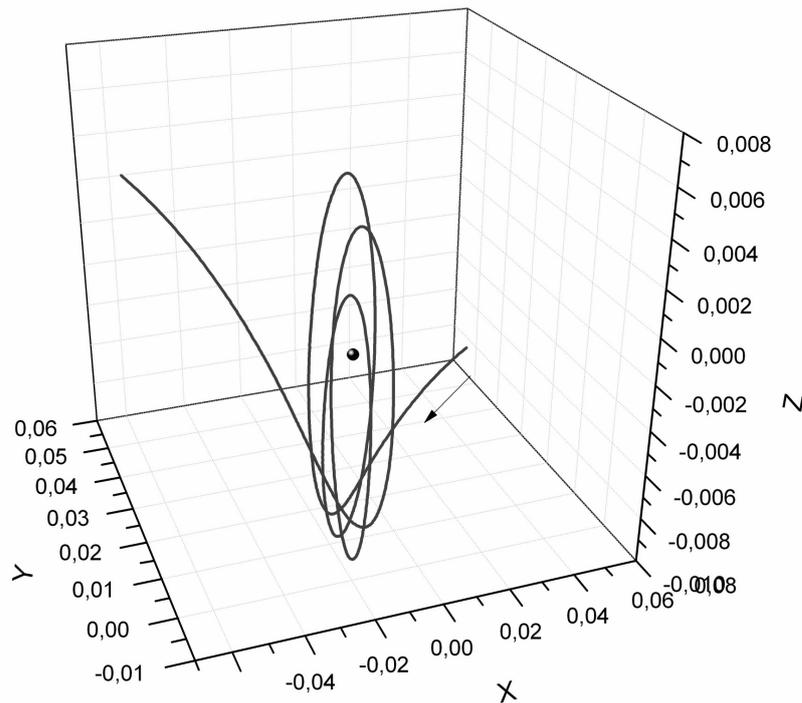


Рис. 1. Геоцентрическая траектория астероида 2006 RH120

1. Сближение 2006 г.

Это самое длительное сближение на исследованном промежутке времени. Полтора года астероид находился в области сближения с Землей ($R_E \leq 0,06$ а.е. [8]). Сближение сопровождалось временным спутниковым захватом в смысле Эверхарта ($\Delta\tau = 385$ сут.). ВСЗ начинается и заканчивается в окрестностях точек низкоскоростного касания орбит [2] на расстоянии $r_\tau^b = 0,013$ а.е., $r_\tau^e = 0,015$ а.е. Так же как и во всех предыдущих сближениях, оно вызвано геометрическими причинами (векторы гелиоцентрических скоростей Земли и астероида приблизительно равны на низкоскоростных касательных участках их орбит). Большую часть времени $\Delta\tau$ истинные аномалии астероида и точки низкоскоростного касания орбит очень близки. В сфере Хилла ($R_H^E = 0,0101$ а.е.) они отличаются не более чем на 5° . Сравнивая величины r_τ^b , r_τ^e и R_H^E , убеждаемся, что ВСЗ астероида действительно вызван геометрическими причинами (начинается и заканчивается за пределами сферы Хилла). Но он входит в сферу Хилла (тесное сближение) и совершает там три обращения вокруг Земли (рис. 1). Время пребывания в сфере Хилла

$\Delta t_H = 306$ сут. Астероид находится на нестабильной геоцентрической орбите. Имеет место некоторая симметричность в форме орбиты и ее положении в пространстве относительно глобального (второго) минимума. Гелиоцентрическая орбита более стабильна. Ее положения на плоскости (a, e) в начальный и конечный моменты сближения практически тождественны (рис. 2). Близки и положения орбит в первом и третьем минимумах, а также их глубина и расположение относительно Земли: они происходят в моменты времени, когда астероид находится за Землей. Во втором минимуме астероид ближе к Солнцу по сравнению с Землей. Все минимумы — физические, так как в той части области ω_E , где расположен трек орбиты, геометрические кратные минимумы не возможны. На протяжении всего сближения параметр Тиссерана относительно Земли изменяется мало. Он незначительно возрастает при продвижении к глобальному минимуму. Но и в нем его значение остается меньше тех значений, которые необходимы для того, чтобы исчезли перемычки в окрестностях точек либрации L_1 и L_2 , и поверхность Хилла вокруг Земли для астероида 2006 RH120 замкнулась. Итак, в течение всего сближения перемычки

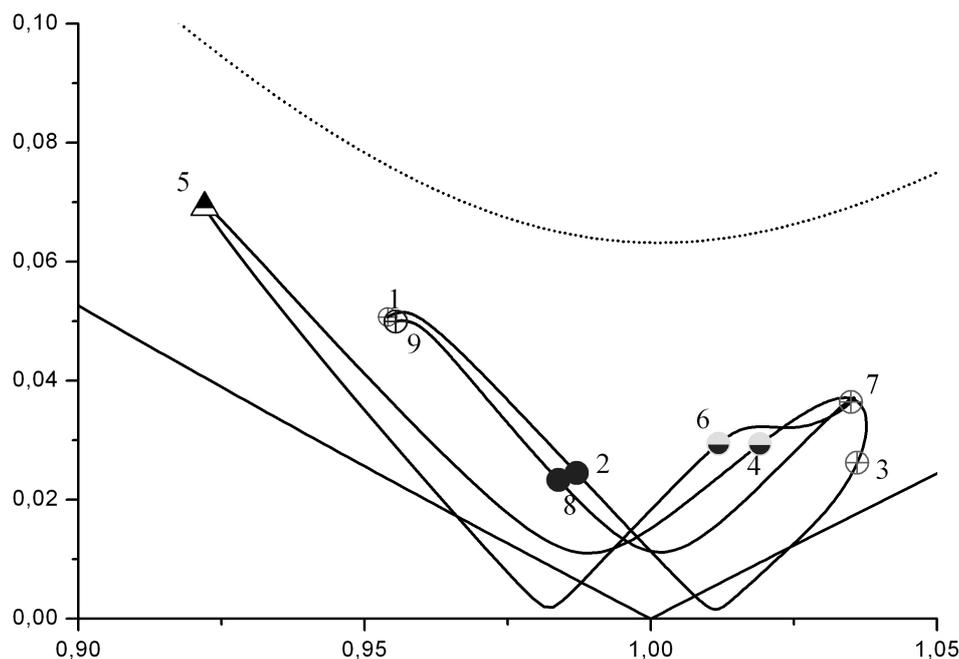


Рис. 2. Трек орбиты астероида 2006 RH120 на плоскости (a, e) (точки на треке: 1 — начало сближения; 2 — вход в сферу Хилла; 3 — ρ_1 ; 4 — первый максимум (f_1); 5 — ρ_2 ; 6 — f_2 ; 7 — ρ_3 ; 8 — выход из сферы Хилла; 9 — конец сближения)

ки открыты. Астероид входит в поверхность Хилла в окрестности точки либрации L_1 , совершает три обращения вокруг Земли и выходит также в окрестности точки L_1 . Форма гелиоцентрической орбиты астероида близка к круговой на протяжении всего сближения. Но формально имели место четыре реверсии линии апсид (рис. 2).

2. Сравнение с Луной

Проведен сравнительный анализ положения гелиоцентрических орбит астероида 2006 RH120 и Луны на плоскости (a, e) . Были построены графики изменения положения гелиоцентрической орбиты Луны в течение лунного месяца (рис. 3) и сароса (18 лет) (рис. 4).

Из рис. 2–4 видно, что гелиоцентрические орбиты астероида 2006 RH120 и Луны на указанных промежутках времени принадлежат области ω_E , т.е. на орбитах этих тел есть точки низкоскоростного касания с орбитой Земли. Поэтому астероид 2006 RH120 испытывает ВСЗ и ВГЗ на исследованном промежутке времени. Точки низкоскоростного касания M_i на орбитах астероида и Луны изменяют свое положение в области ω_E . Орбиты Луны в течение сароса заполняют на плоскости

(a, e) сплошную полосу. Максимальный размах колебаний по эксцентриситету составил 0,035, по большой полуоси — 0,16 а.е. У астероида $\Delta e_A = 0,032$, $\Delta a_A = 0,082$ а.е. По эксцентриситету размах колебаний орбит астероида и Луны сопоставим, по большой полуоси он в два раза больше у Луны. Все учитываемые возмущения практически компенсируются за синодический период и за сарос (положения орбиты Луны на плоскости (a, e) в начале и в конце лунного месяца и сароса на рис. 3, 4 почти совпадают). Положения орбиты астероида в начале и в конце сближения тоже очень близки.

Перечислим основные выявленные различия.

Луна вращается вокруг Земли в плоскости эклиптики; наклон орбиты астероида испытывает большие изменения. Точки M_i всегда присутствуют на орбите Луны. На треке астероида имеются участки, расположенные ниже линии e_1 , где нет таких точек (рис. 2). Каждый лунный месяц орбита Луны испытывает две реверсии линии апсид и два экстремума функции геоцентрического расстояния: максимум и минимум. Все экстремумы имеют место глубоко в сфере Хилла. Орбита астероида испытывает четыре реверсии и пять экстремумов: три минимума

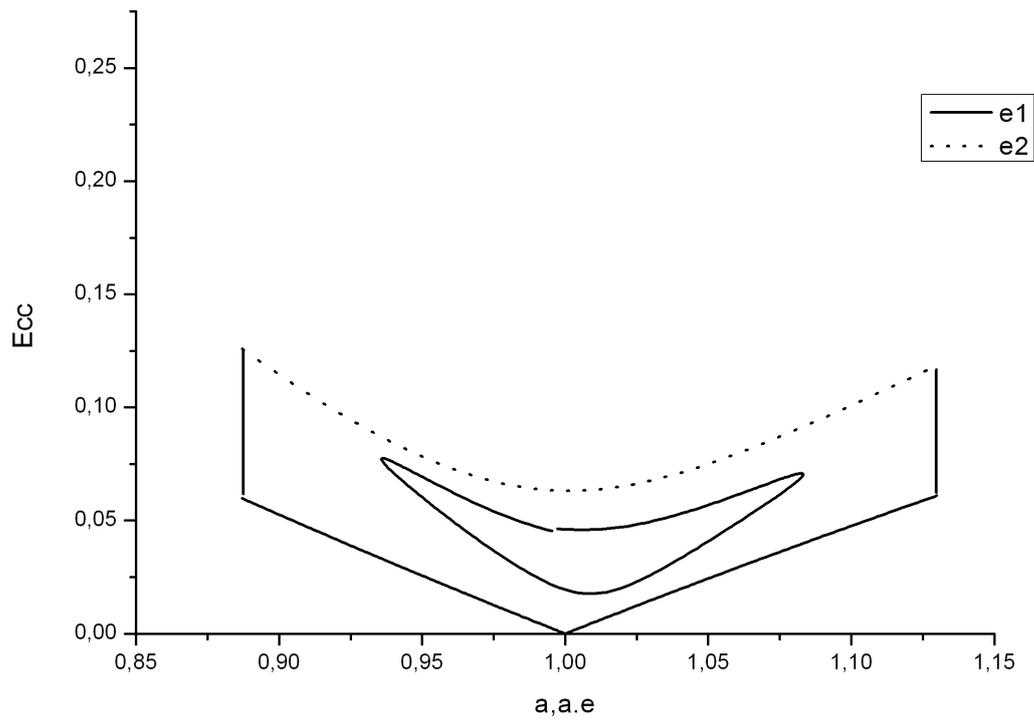


Рис. 3. Трек орбиты Луны за синодический период

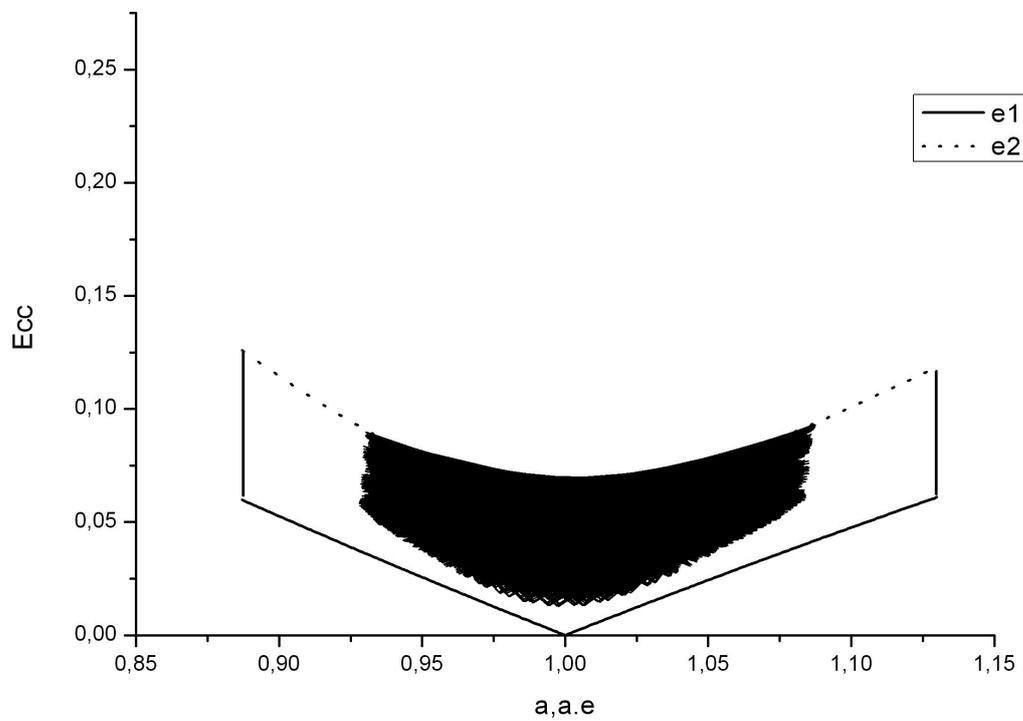


Рис. 4. Трек орбиты Луны за сарос

и два максимума за сближение. Минимумы астероида неоднородны по величине, но всего лишь в 1,25–2,6 раза превосходят среднее расстояние Луны от Земли. В течение всего исследованного промежутка времени, включая экстремумы функции геоцентрического расстояния, Луна находится глубоко внутри сферы Хилла. Движение Луны устойчиво по Хиллу. Максимумы астероида происходят на границе сферы Хилла. Движение астероида неустойчиво по Хиллу. Все эти различия явились основной причиной, по которой гравитационный захват астероида оказался временным.

Заключение

В работе исследована эволюция элементов орбит астероида 2006 RH120 на промежутке времени 400 лет и его сближение с Землей в 2006 г. Показано, что сближение сопровождалось временным гравитационным захватом в сфере Хилла и тремя физическими минимумами функции геоцентрического расстояния. Проведено сравнение движения астероида и Луны. Установлено, что движение астероида было неустойчиво по Хиллу, что послужило основной причиной выхода астероида из сближения.

Литература

1. *Everhart E.* Horseshoe and Trojan orbits associated with Jupiter and Saturn // *Astron. J.* 1973. Vol. 76. No. 4. P. 316–328.
2. *Емельяненко Н. Ю.* Временный спутниковый захват комет Юпитером // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 3. С. 195–208.
3. *Шарлье К.* Небесная механика. М.: Наука, 1966. 627 с.
4. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968. 798 с.
5. *Рой А. Е.* Движение по орбитам. М.: Мир, 1981. 544 с.
6. *Емельяненко Н. Ю.* Качественный анализ и модели низкоскоростных сближений комет с Юпитером. Челябинск.: Издат. центр Южно-Уральского гос. ун-та, 2010. 165 с.
7. *Емельяненко Н. Ю.* Поиск области орбит малых тел с особенностями в сближениях с планетами // *Известия ГАО в Пулкове.* №220. Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково – 2012», Санкт-Петербург, 2013. С. 231–236.
8. *Емельяненко Н. Ю.* Классификация сближений малых тел по глобальному минимуму функции планетоцентрического расстояния // *Известия ГАО в Пулкове,* №220, Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково – 2012», Санкт-Петербург, 2013. С. 225–230.
9. *Everhart E.* Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* 1974. Vol. 10. No. 1. P. 35–55.
10. *Chambers J. E.* A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies // *MNRAS.* 1999. Vol. 304. P. 793–799.
11. *Carusi A., Kresakova M., Valsecchi G. B.* Perturbations by Jupiter of the Particles Ejected from Comet Lexell // *Astron. Astrophys.* 1982. No. 116. P. 201–209.
12. Каталог астероидов Лаборатории реактивного движения НАСА. Электронный источник <http://ssd.jpl.nasa.gov>, дата обращения – 24.10.2013.

Ключевые слова: низкоскоростные сближения, временный спутниковый захват астероида.

Статья поступила 12 ноября 2013 г.

Институт астрономии РАН, г. Москва

© Емельяненко Н. Ю., Нароенков С. А., 2013