

УДК 523.44

РОЛЬ МЕХАНИЗМА ЛИДОВА–КОЗАИ В ПРЕВРАЩЕНИИ АСТЕРОИДОВ С БОЛЬШИМИ НАКЛОНАМИ ОРБИТ В ОКОЛОЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Виноградова Т. А.

ROLE OF THE LIDOV–KOZAI MECHANISM IN TRANSFORMATION OF HIGH-INCLINED ASTEROIDS INTO NEAR-EARTH OBJECTS

Vinogradova T. A.

Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Science, St. Petersburg, 191187, Russia
e-mail: vta@iaaras.ru

Abstract. The Lidov–Kozai mechanism induces coupled long-period oscillations in the inclination and eccentricity of asteroid orbits depending on the argument of the perihelion ω . When the inclination decreases, the eccentricity increases and reaches a maximum at the points $\omega = 90^\circ, 270^\circ$. Both circulation and libration of the argument of the perihelion can take place. The amplitude of the eccentricity oscillations in the case of large inclination can be very large. In this work, the possibility of transformation of main belt asteroids into near-Earth objects under the influence of this perturbation was investigated. Numerical integration of 139 selected asteroid orbits was performed with Jupiter in circular orbit as a perturbing body. As a result, it was found that some high-inclined asteroids which move far from the Earth orbit can be transformed into near-Earth objects at large time scales.

Keywords: celestial mechanics, asteroids, impacts, secular perturbations, Lidov-Kozai mechanism.

Список астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) [1], насчитывает в настоящее время более 16 тыс., и кажется, что этот список может пополняться только вновь открытыми астероидами, но это не совсем так. Действие вековых возмущений от больших планет может заставить некоторые из давно известных астероидов главного пояса приблизиться к орбите Земли на опасное расстояние. Но следует сказать, что под действием тех же возмущений опасный астероид может также и удалиться далеко от орбиты Земли. Вековые возмущения — это самые долгопериодические возмущения, их период составляет десятки и сотни тысяч лет. Существует два типа вековых возмущений: классические вековые возмущения [2] и механизм Лидова-Козаи [3, 4].

Цель настоящей работы — показать, что механизм Лидова-Козаи (ЛКМ) может превратить астероиды, перигелии орбит которых лежат в настоящее время за орбитой Марса, в астероиды, сближающиеся с Землей.

1. Классические вековые возмущения

Под действием классических вековых возмущений орбиты астероидов прецессируют, в

результате чего узлы их орбит постоянно движутся попятно по эклиптике. При этом наклоны орбит i испытывают долгопериодические колебания в зависимости от долготы восходящего узла Ω . Перигелии орбит астероидов под действием этих возмущений совершают прямое движение, и колебания эксцентриситета e зависят от долготы перигелия ϖ .

Амплитуда колебания эксцентриситета под действием этого возмущения, как правило, не очень велика, она равна приблизительно 0,04 [5]. Таким образом, в результате действия этого возмущения, астероиды главного пояса не могут превратиться в сближающиеся с Землей, если они не находятся в резонансе средних движений с Юпитером.

Классические возмущения хорошо видны на распределениях оскулирующих элементов (i, Ω) , (e, ϖ) (рис. 1) благодаря существованию семейств астероидов. Семейства — это популяции, возникшие в результате дробления астероидов при столкновениях. Множество орбит отдельного семейства представляет орбиту родительского тела на разных этапах ее эволюции. Плотные волны на распределениях

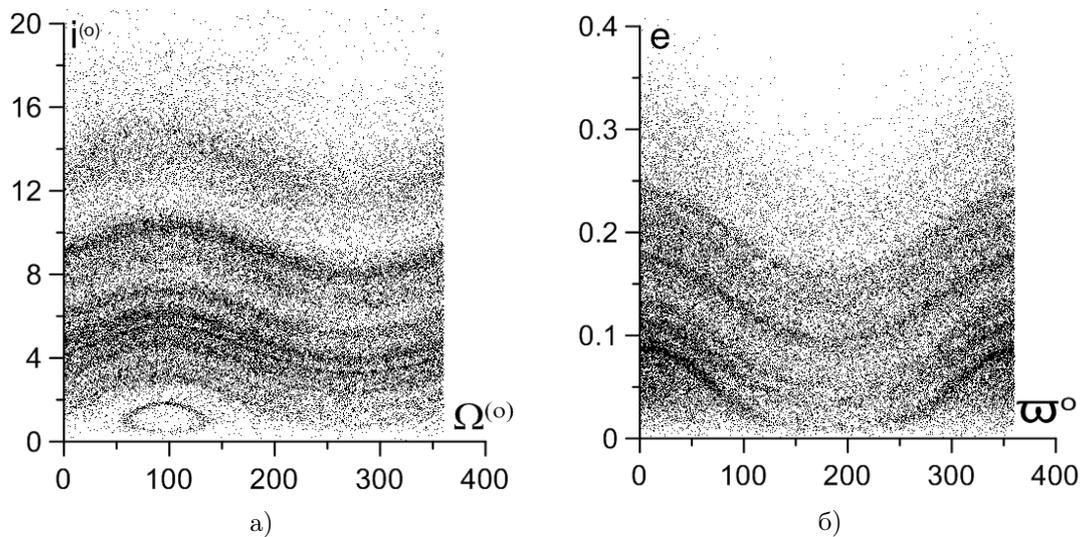


Рис. 1. Распределение оскулирующих элементов орбит астероидов с большими полуосями из интервала 2,7–2,8 а.е.: а) (i, Ω) ; б) (e, ϖ)

элементов образованы отдельными семействами.

Эти распределения элементов позволяют оценить амплитуду колебаний наклонов и эксцентриситетов. Для наклонов орбит амплитуда равна примерно 1° , а для эксцентриситетов, как уже было сказано, 0,04. Орбиты подавляющего большинства астероидов главного пояса характеризуются малыми наклонами и эксцентриситетами. Для них амплитуда колебаний элементов под действием классических вековых возмущений значительно превосходит амплитуду колебаний под действием механизма Лидова–Козаи. Но в случае больших наклонов и эксцентриситетов преобладает возмущение Лидова–Козаи.

2. Механизм Лидова–Козаи

Механизм Лидова–Козаи индуцирует согласованные долгопериодические колебания наклона и эксцентриситета орбит астероидов в зависимости от аргумента перигелия ω . Наклон i и эксцентриситет e под действием ЛКМ меняются согласованно, так как связаны условием $(1 - e^2) \cos^2(i) = h^2$, где $h = \text{const}$. При уменьшении наклона эксцентриситет возрастает и достигает максимума в точках $\omega = 90^\circ, 270^\circ$, в то время, как наклон достигает минимума. Амплитуда колебаний эксцентриситета в случае больших наклонов может быть очень велика. Под действием этого возмущения возможны два типа изменения элементов: циркуляция и либрация аргумента перигелия.

В случае циркуляции аргумент перигелия пробегает все значения от 0° до 360° , и на этом интервале наклон и эксцентриситет имеют два максимума и два минимума. Графики колебания наклона и эксцентриситета показаны на рис. 2. Изображенные графики получены в результате численного интегрирования уравнений движения астероида (2)Pallas под действием возмущений только от Юпитера, эксцентриситет орбиты которого предполагается равным нулю. Орбита астероида (2)Pallas в настоящее время имеет наклон около 35° и эксцентриситет 0,23. Известно, что этот астероид имеет свое семейство. Амплитуда колебаний наклона и эксцентриситета под действием ЛКМ для различных семейств исследовалась в работе [6]. Распределение элементов орбит астероидов из семейства (2)Pallas приведено на рис. 3. Можно видеть, что распределение элементов орбит соответствует результатам численного интегрирования. Это говорит о том, что интегрирование в рамках такой ограниченной модели вполне отражает суть явления.

При больших наклонах орбит имеет место либрация аргумента перигелия, когда он колеблется в некотором интервале вблизи значений $\omega = 90^\circ$ или 270° . Колебания наклона и эксцентриситета в этом случае выглядят так, как показано на рис. 4. Графики получены численным интегрированием уравнений движения астероидов (3040)Kozai и (376779)2000LU25. В первом случае либрация аргумента перигелия происходит около значения 270° , во втором — около 90° .

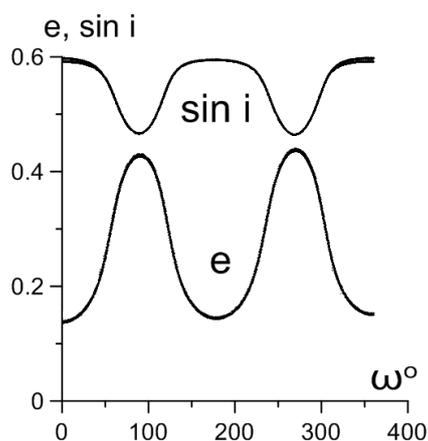


Рис. 2. Изменение наклона и эксцентриситета орбиты астероида (2)Pallas

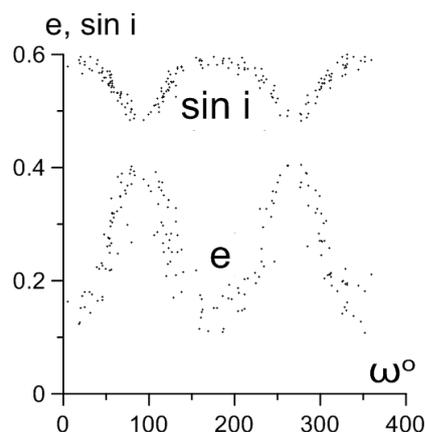


Рис. 3. Распределение элементов орбит астероидов из семейства (2)Pallas

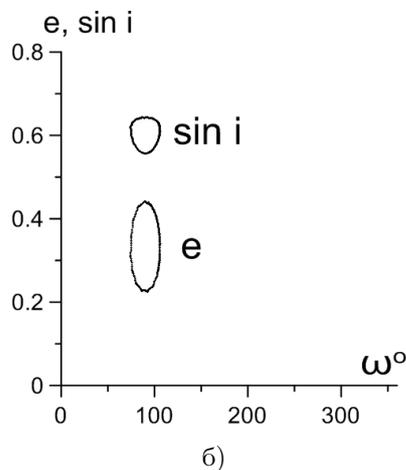
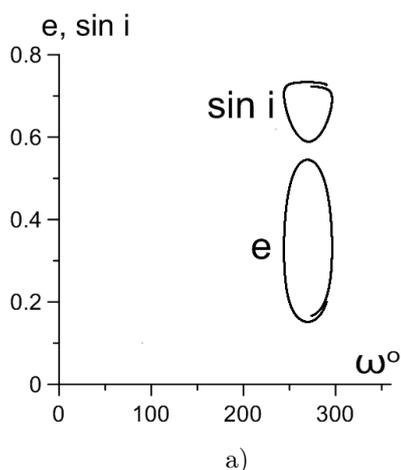


Рис. 4. Изменение элементов орбит астероидов в случае либрации ω : а) (3040)Kozai, либрация около 270° ; б) (376779)2000LU25, либрация около 90°

3. Отбор астероидов, способных превратиться в сближающиеся с Землей

Отбор астероидов для интегрирования был произведен с использованием нескольких условий. Нетрудно показать, что под действием механизма Лидова–Козаи перигелийное расстояние орбиты астероида может достигать значения $< 1,3$ а.е. (условие на АСЗ), только при условии $h^2 < 1 - (1 - 1,3/a)^2$, где a — большая полуось орбиты. Мы рассмотрели астероиды с наклонами орбит больше, чем 25° , и среди них было найдено около 2 тыс. астероидов, удовлетворяющих такому условию. Среди этих астероидов были отобраны те, эксцентриситет орбиты которых в данное время близок к минимальному значению. Отдельно были рассмотрены случаи либрации и

циркуляции аргумента перигелия, поскольку при этом действуют разные условия на элементы. При циркуляции рассматривались астероиды, аргумент перигелия которых находится в пределах $\pm 10^\circ$, от точек $\omega = 0^\circ, 180^\circ$, там, где эксцентриситет минимален. По этому условию были отобраны 112 астероидов. При предположении либрации были отобраны 27 астероидов с аргументом перигелия в пределах $\pm 10^\circ$, от точек $\omega = 90^\circ$ и 270° . Заранее неизвестно, имеет ли эксцентриситет орбиты в настоящее время в этих точках максимум или минимум.

4. Результаты

Орбиты 139 отобранных астероидов были проинтегрированы на интервале времени несколько десятков тысяч лет. Интегрирова-

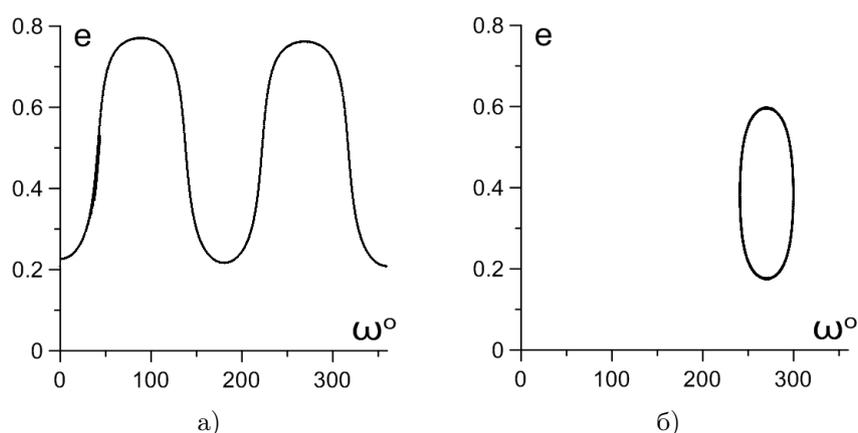


Рис. 5. Большая амплитуда колебаний эксцентриситета в случае а) циркуляции ω для астероида (306976)2001VR78 и б) либрации ω для астероида (22653)1998QW2

Таблица 1. Наиболее интересные астероиды, превращающиеся в АСЗ

Название астероида	a , а.е.	q , а.е.	e	i , °	q_{\min} , а.е.	e_{\max}	i_{\min} , °	Тип
1999 ХК141	2.53	1.67	0.34	43.7	0.89	0.65	26	circ
(488830) 2005QJ11	2.21	1.83	0.17	46.4	0.97	0.56	35	libr
(22653)1998 QW2	2.75	2.25	0.18	45.8	1.06	0.61	31	libr
(306976) 2001 VR78	2.18	1.69	0.23	56.2	0.50	0.77	31	circ
2013 AC20	3.10	1.87	0.39	44.1	0.86	0.72	19	circ

ние производилось по предельно упрощенной схеме, с учетом возмущений только от Юпитера, движущегося по круговой орбите. Интегрирование показало, что амплитуда колебаний эксцентриситета может быть очень большой как при циркуляции (рис. 5а), так и при либрации (рис. 5б) аргумента перигелия.

В результате найдено, что ряд астероидов, орбиты которых имеют большие наклоны, и которые в настоящее время движутся вдали от орбиты Земли, на больших промежутках времени (несколько десятков тысяч лет) превращаются в сближающиеся с Землей астероиды.

Наиболее интересные объекты приведены в табл. 1. В таблице приведены следующие данные: название астероида, большая полуось орбиты (a), перигелийное расстояние (q), эксцентриситет (e) и наклон (i) оскулирующей орбиты. В последующих колонках приведены полученные в результате численного интегрирования минимальное перигелийное расстояние (q_{\min}), максимальное значение эксцентриситета (e_{\max}), минимальное значение наклона орбиты (i_{\min}), и тип движения (циркуляция или либрация) аргумента перигелия.

Ни один из этих астероидов в настоящее время не является АСЗ.

В качестве примера можно рассмотреть астероид 2013АС20. Этот астероид принадлежит внешней области главного пояса. Его орбита характеризуется большой полуосью 3,10 а.е., довольно большим эксцентриситетом $e = 0,39$ и большим наклоном $44,1^\circ$. В настоящее время этот астероид не приближается к Солнцу ближе 1,87 а.е., то есть его перигелий лежит за орбитой Марса. Но когда под действием возмущения ЛКМ наклон его орбиты уменьшится до 19° , а эксцентриситет вырастет до 0,72, тогда перигелийное расстояние станет приблизительно равным 0,86 а.е., то есть перигелий будет располагаться ближе к Солнцу, чем орбита Земли. Такое перигелийное расстояние не обеспечивает пересечение этим астероидом орбиты Земли, так как наклон орбиты остается достаточно большим, и перигелий орбиты расположен далеко от плоскости эклиптики. Тем не менее, по формальному признаку ($q < 1,3$ а.е.), этот астероид превращается в сближающийся с Землей. А вот астероид (306976)2001VR78 с минимальным перигелийным расстоянием 0,5 а.е. действительно сможет пересекать орбиту Земли.

Заключение

В работе изучена возможность превращения астероидов главного пояса в околоземные объекты под действием возмущения Лидова–Козаи. В результате численного интегрирования в рамках максимально ограниченной модели найдено, что ряд астероидов, орбиты которых имеют большие наклоны, и перигелии орбит которых лежат в настоящее время за орбитой Марса, на больших промежутках времени могут превратиться в АСЗ. Отбор астероидов, способных превратиться в сближающиеся с Землей, был произведен довольно условно, поэтому полученный список не претендует на полноту. Целью данной работы было только продемонстрировать такую возможность.

Литература

1. Виноградова Т.А., Заботин А.С. Каталог АСЗ ИПА РАН. В сб.: Тез. докл. Междунар. Конф. «Околоземная астрономия 2007», 2007. С. 23.
2. Brouwer D., van Woerkom A. J. J. The secular variations of the orbital elements of the principal planets // *Astron. Papers Amer. Ephem.*, 1950. P. 99
3. Лидов М.Л. Эволюция орбит искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений внешних тел // *Искусственные спутники Земли*. 1961. № 8. С. 5–45.
4. Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *The*

Astronomical Journal. 1962. Vol. 67. P. 591.

5. Виноградова Т.А. Вычисление вынужденных элементов орбит астероидов // *Труды ИПА РАН*. 2010. Вып. 21. С. 205–210.
6. Vinogradova T. A. Amplitude of the Lidov–Kozai i and e oscillations in asteroid families // *MNRAS*. 2017. Vol. 468. No. 4. P. 4719–4724.

References

1. Vinogradova T. A., Zabolotin A. S. IAARAS NEO catalogue. In: *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi konferencii “Okolozemnaja astronomia 2007”* [Proc. of reports international conf. “Near-Earth astronomy 2007”], 2007, p. 23. (In Russian)
2. Brouwer D., van Woerkom A. J. J. The secular variations of the orbital elements of the principal planets. In: *Astron. Papers Amer. Ephem.*, 1950, p. 99
3. Lidov M. L. The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies. *Planetary and Space Science*, 1962. vol. 9, iss. 10, pp. 719–759.
4. Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. *The Astronomical Journal*, 1962, vol. 67, p. 591.
5. Vinogradova T. A. Vychislenie vynuzhdennyh elementov orbit asteroidov [Calculation of forced elements of asteroid orbits]. *Trudy IPA RAN* [Proc. of the IAARAS], 2010, iss. 21, pp. 205–210. (In Russian)
6. Vinogradova T. A. Amplitude of the Lidov–Kozai i and e oscillations in asteroid families. *MNRAS*, 2017, vol. 468, no. 4, pp. 4719–4724.