

УДК 523.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОБЪЕКТОВ НА УСТОЙЧИВЫХ ОРБИТАХ ГАЛЛЕЕВСКОГО ТИПА

*Шеляков М. А.<sup>1</sup>, Емельяненко В. В.<sup>2</sup>*

INVESTIGATION OF DYNAMICAL EVOLUTION OF OBJECTS ON STEADY HALLEY-TYPE ORBITS

Shelyakov M. A., Emelyanenko V. V.

Consideration of dynamical evolution of objects moving on Halley-type orbits has carried out. Three objects have chosen among them that move on these orbits over a long period of time. More careful investigation of dynamical evolution for these objects has carried. On the basis of integration results possible ways of object crossings on their present orbits have discussed.

Keywords: near-Earth asteroids, Halley-type orbits.

### Введение

На сегодняшний день известно 8 околоземных астероидов, находящихся на орбитах галлеевского типа. Эти объекты объединяет то, что они имеют параметр Тиссерана относительно Юпитера  $T < 2$ . Начальное интегрирование этих объектов выявило 3 объекта, которые находятся на своих орбитах в течение длительного времени по сравнению с остальными объектами. Это следующие объекты: 2005 MW9 ( $a = 3,59$  а.е.,  $e = 0,89$ ,  $i = 55^\circ,82$ ), 2009 HC82 ( $a = 2,53$  а.е.,  $e = 0,81$ ,  $i = 154^\circ,50$ ), 2012 US136 ( $a = 4,30$  а.е.,  $e = 0,91$ ,  $i = 51^\circ,82$ ) (взято с сайта [www.minorplanetcenter.net](http://www.minorplanetcenter.net)).

Помимо того, что орбиты отобранных тел весьма стабильны, они имеют и несколько других общих признаков. На данный момент все эти объекты находятся вблизи орбитальных резонансов с Юпитером (резонансы 3:1, 7:4 и 4:3 для 2009 HC82, 2005 MW9 и 2012 US136, соответственно). Кроме того, объекты имеют близкие и малые значения перигелийных расстояний (от 0,380 а.е. у 2012 US136 до 0,487 а.е. у 2009 HC82).

В работе рассматривается динамическая эволюция отобранных объектов и определяются возможные пути, следуя по которым

они оказались на своих нынешних орбитах. Эволюция объекта 2009 HC82 уже рассматривалась ранее в статье [1]. Однако в ней обсуждались только вопросы перехода объекта на обратную орбиту.

### 1. Общие результаты интегрирования

Для каждого из вышеперечисленных объектов были получены 100 возможных орбит из доверительной области на основе ковариационной матрицы [2] и проведено их численное интегрирование с использованием симплектического интегратора [3]. Интегрирование для каждого отдельно взятого виртуального объекта прерывалось при достижении им значения перигелийного расстояния, меньшего 0,005 а.е., или значения большей полуоси, большего 50 а.е.

По результатам интегрирования объекта 2009 HC82 85 объектов достигли значения  $q < 0,005$  а.е., ни одного объекта не достигло значений  $a > 50$  а.е. Все виртуальные объекты достигали стадий малых перигелийных расстояний. Результаты интегрирования 100 виртуальных объектов для астероида 2009 HC82 представлены на рис. 1.

Первые случаи достижения перигелийных расстояний менее 0,1 а.е. наблюдались

<sup>1</sup>Шеляков Михаил Алексеевич, аспирант Института астрономии РАН; e-mail: mshelyakov@inasan.ru.

<sup>2</sup>Емельяненко Вячеслав Васильевич, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН; e-mail: vvemel@inasan.ru.

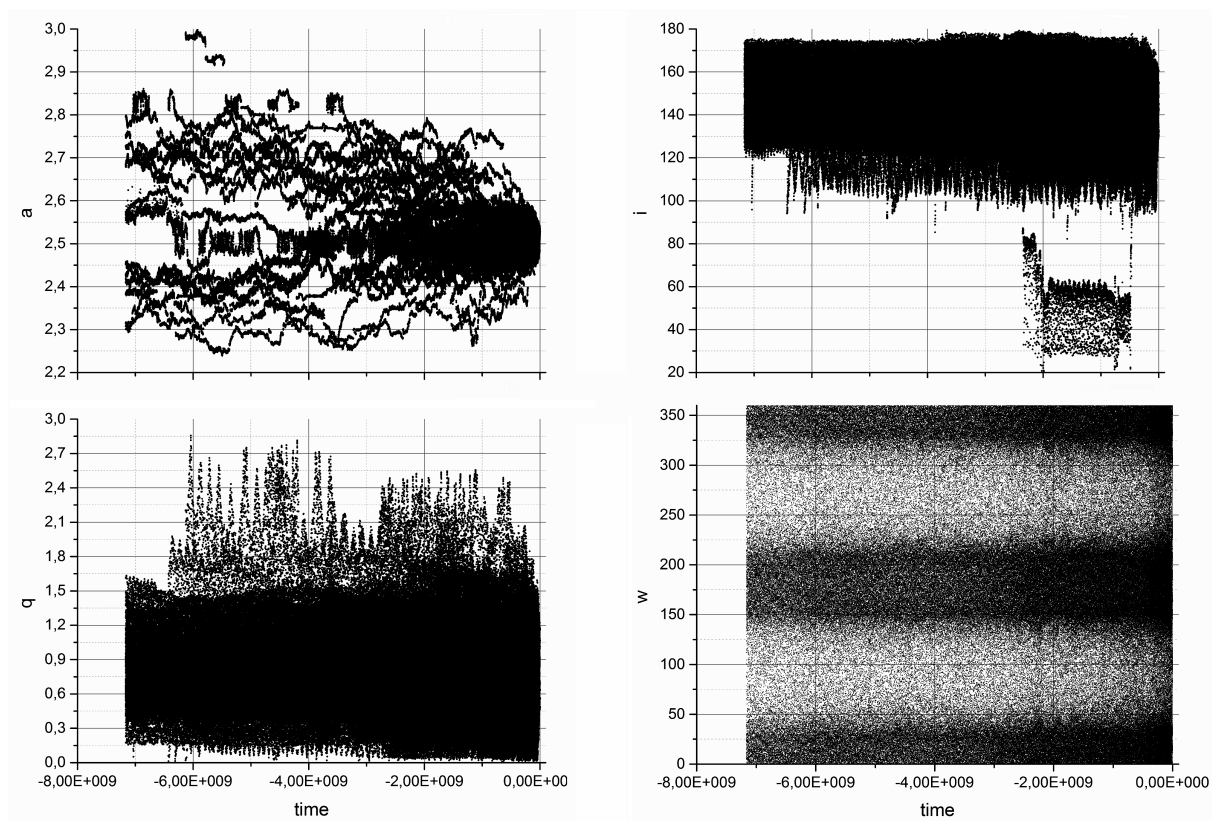


Рис. 1. Результаты интегрирования объекта 2009 HC82

через  $\sim 90\,000$ – $100\,000$  лет. Большинство объектов на всем протяжении процесса интегрирования имеют значение большой полуоси в диапазоне  $\sim 2,4$ – $2,6$  а.е., что соответствует нахождению объекта в окрестности резонанса 1:3 с Юпитером.

За исключением одного случая, все виртуальные объекты на протяжении интегрирования находились на орбитах с наклоном, превышающим  $90^\circ$ . Более подробно единственный случай перехода с прямого движения на обратное будет рассмотрен ниже. Если обратиться к исследованию эволюции объекта 2012 US136, то тут мы можем видеть большее разнообразие в поведении виртуальных объектов на всем протяжении периода интегрирования. Графики изменений орбитальных характеристик для данного случая показаны на рис. 2.

Из 100 виртуальных объектов 36 объектов достигли экстремально малых перигелийных расстояний  $q < 0,005$  а.е. При этом еще 6 объектов достигли значений больших полуосей  $a > 50$  а.е. Среди орбит объектов, достигших малых перигелийных расстояний, наблюдается большее разнообразие в

момент этого достижения, чем в случае с объектом 2009 HC82. Можно выделить два стадии, проходя через которые объект 2012 US136 мог оказаться на нынешней орбите: миграция из областей с  $a > 50$  а.е и стадии с экстремально малыми перигелийными расстояниями.

По графику изменения аргументов перигелия виртуальных объектов можно заметить, что все эти объекты на протяжении практически всего времени интегрирования подвержены либрациям около  $\omega = 270^\circ$ . Подобное поведение аргумента перигелия говорит о нахождении объекта в зоне резонанса Лидова–Козаи [4, 5]. Так же стоит отметить, что наблюдаются случаи перехода объекта с обратного движения на прямое.

Что касается объекта 2005 MW9, то его эволюция сходна с эволюцией объекта 2012 US136 на малых интервалах времени. За время интегрирования из 100 объектов лишь 4 достигли стадии с перигелийным расстоянием менее  $0,005$  а.е. При этом все виртуальные объекты за исключением двух случаев на протяжении всего времени интегрирования находятся в зоне либраций Лидова–Козаи.

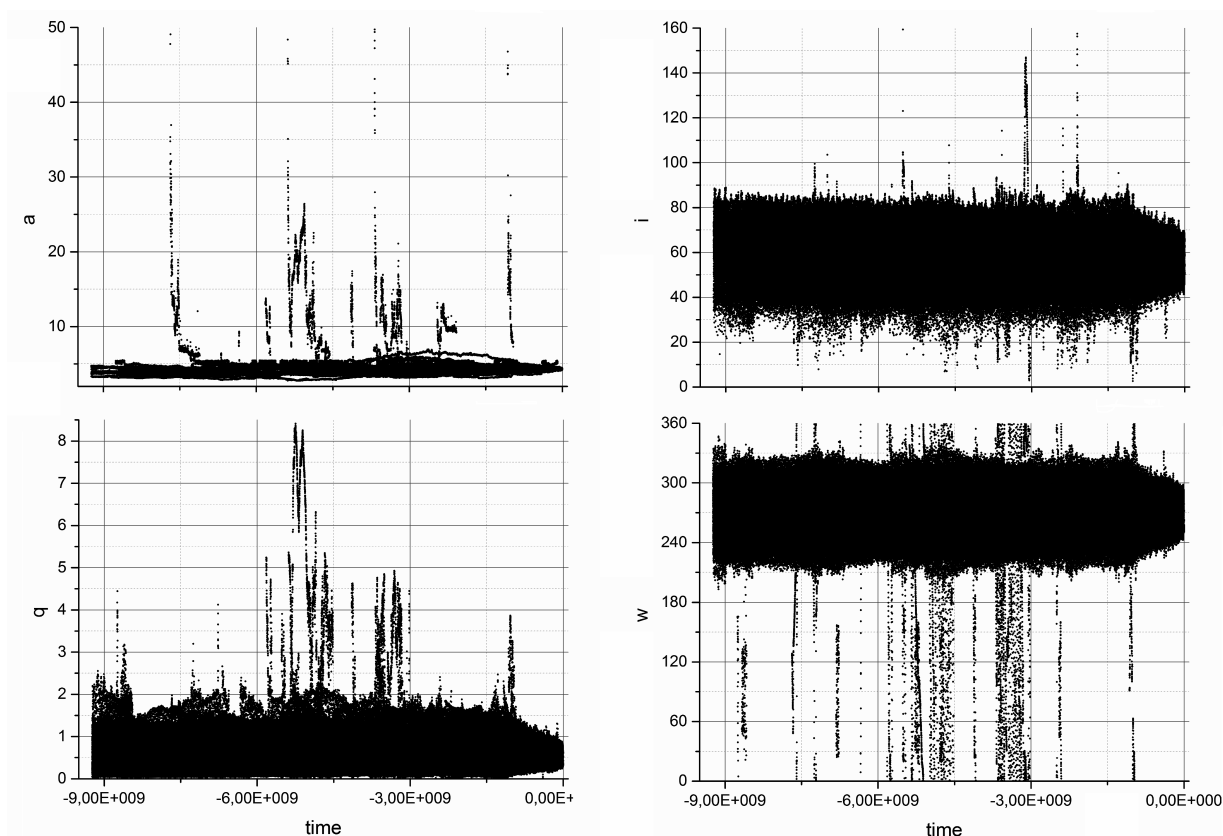


Рис. 2. Результаты интегрирования для объекта 2012 US136

## 2. Стадия миграции из областей с большими значениями большой полуоси

Как было отмечено выше, можно выделить два пути, следуя по которым рассматриваемые объекты могли оказаться на нынешней орбите. Первой будет рассмотрена стадия миграции объекта из областей с большими значениями большой полуоси. Подобное поведение наблюдалось у шести виртуальных объектов астероида 2012 US136. Все эти случаи сходны между собой, поэтому для детального разбора будет представлен один из них (рис. 3).

Объект, обладающий значением большой полуоси около 18 а.е., претерпевает серию тесных сближений с Юпитером. В результате этого он попадает в зону вблизи одного из орбитальных резонансов с Юпитером (в данном случае 1:1). Нахождение объекта вблизи резонанса с Юпитером, приводит к увеличению колебаний перигелийного расстояния, вследствие чего могут достигаться стадии с малыми перигелийными расстояниями. В целом на этой стадии эволюции объект демон-

стрирует типичную кометную динамику при их захвате Юпитером из внешних областей Солнечной системы [6, 7].

## 3. Стадия экстремально малых перигелийных расстояний и возможность перехода с прямого движения на обратное

Как было замечено в пункте 1, интегрирование большинства виртуальных объектов завершилось при достижении ими малых перигелийных расстояний (меньше 0,005 а.е.). В данном пункте будет подробнее рассмотрено, как изменяются орбитальные характеристики объектов при достижении данной стадии и что приводит к ее достижению.

Если обратиться к интегрированию объекта 2009 HC82, то можно отметить, что 79 объектов из 85, достигнувших малых перигелиев ( $< 0,005$  а.е.), имели при этом большие полуоси в диапазоне  $\sim 2,48$ – $2,55$  а.е., что соответствует нахождению объекта вблизи резонанса 1:3 с Юпитером. Четыре из шести объектов, достигших  $q < 0,005$  а.е. при значении большой полуоси не в диапазоне 2,4–2,6 а.е.,

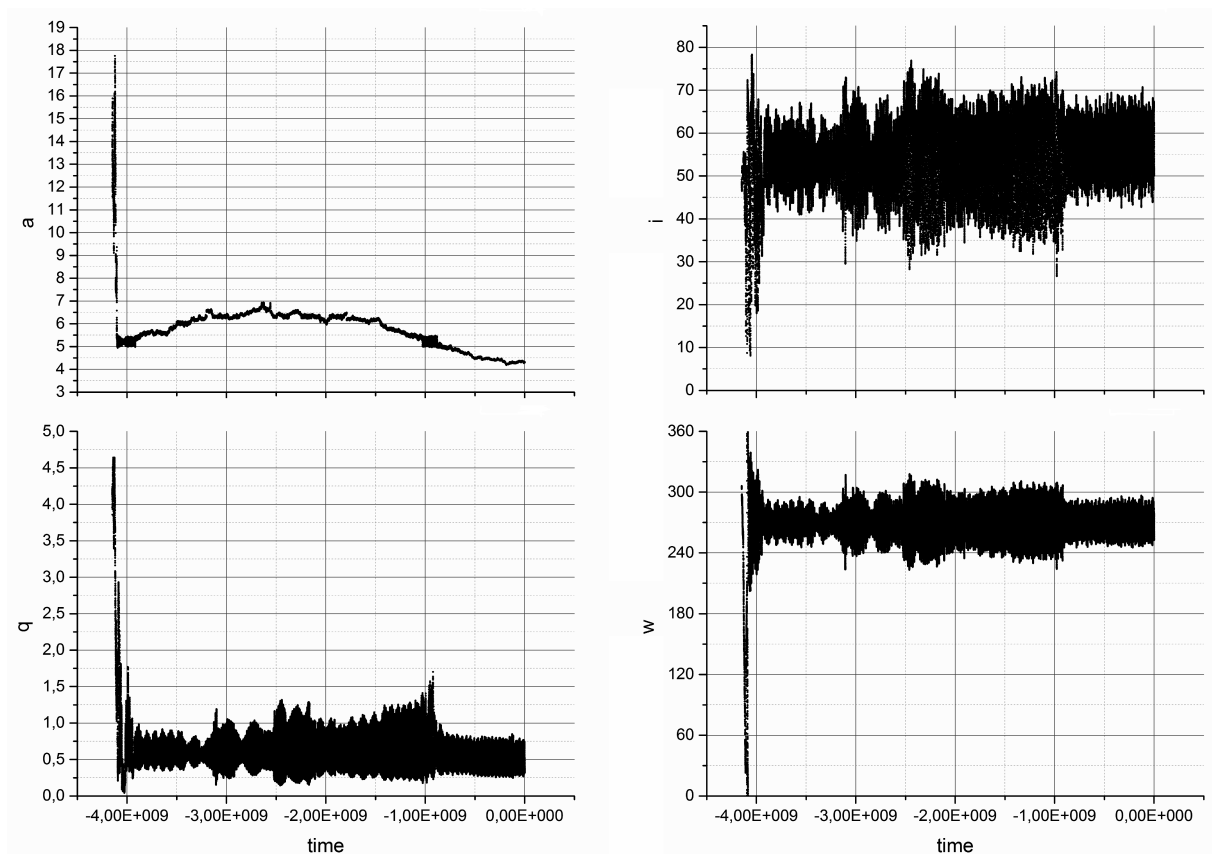


Рис. 3. Миграция виртуального объекта астероида 2012 US136 из области с большим значением большой полуоси

имели большую полуось в диапазоне  $\sim 2,80$ – $2,82$  а.е. Данное значение большой полуоси говорит о нахождении вблизи резонанса 2:5 с Юпитером. Оставшиеся 2 объекта достигли стадии с  $q < 0,005$  а.е. при значении большой полуоси, равной 2,69 а.е. (приблизительно соответствует резонансу 3:8 с Юпитером) и 2,98 а.е. (приблизительно соответствует резонансу 3:7 с Юпитером). Из вышесказанного можно заключить, что объект 2009 HC82 проходил в прошлом стадию с малыми перигелийными расстояниями, причем достижение этой стадии происходит при нахождении объекта в одном из резонансов с Юпитером.

В качестве одного из примеров достижения рассматриваемой стадии можно привести эволюцию одного из виртуальных объектов астероида 2009 HC82 (рис. 4).

Исходя из графиков изменения значений большой полуоси и перигелийного расстояния, можно заключить, что объект достигает самых малых значений перигелийных расстояний в те моменты, когда большая полуось близка к значению 2,5 а.е. Это значение большой полуоси соответствует нахож-

дению объекта вблизи орбитального резонанса с Юпитером 1:3. Подобные выводы можно получить, рассматривая другие виртуальные объекты.

На рис. 4 также виден переход с прямого движения на обратное, а на рис. 5 более подробно показана эволюция объекта вблизи этого перехода.

Как видно на графиках, в момент времени, отмеченный на графиках вертикальной линией, произошло тесное сближение с Юпитером, вследствие чего большая полуось объекта изменилась, и объект попал в зону вблизи резонанса с Юпитером. В этот момент объект также был в зоне резонанса Лидова–Козаи (о чем говорит график изменения аргумента перигелия). Наклонение объекта достигло 80 градусов. Это состояние орбиты оказалось нестабильным, и объект совершил переход на обратную орбиту. Подобное поведение объектов наблюдалось и в других случаях. При этом объект переходил как с прямой орбиты на обратную, так и наоборот.

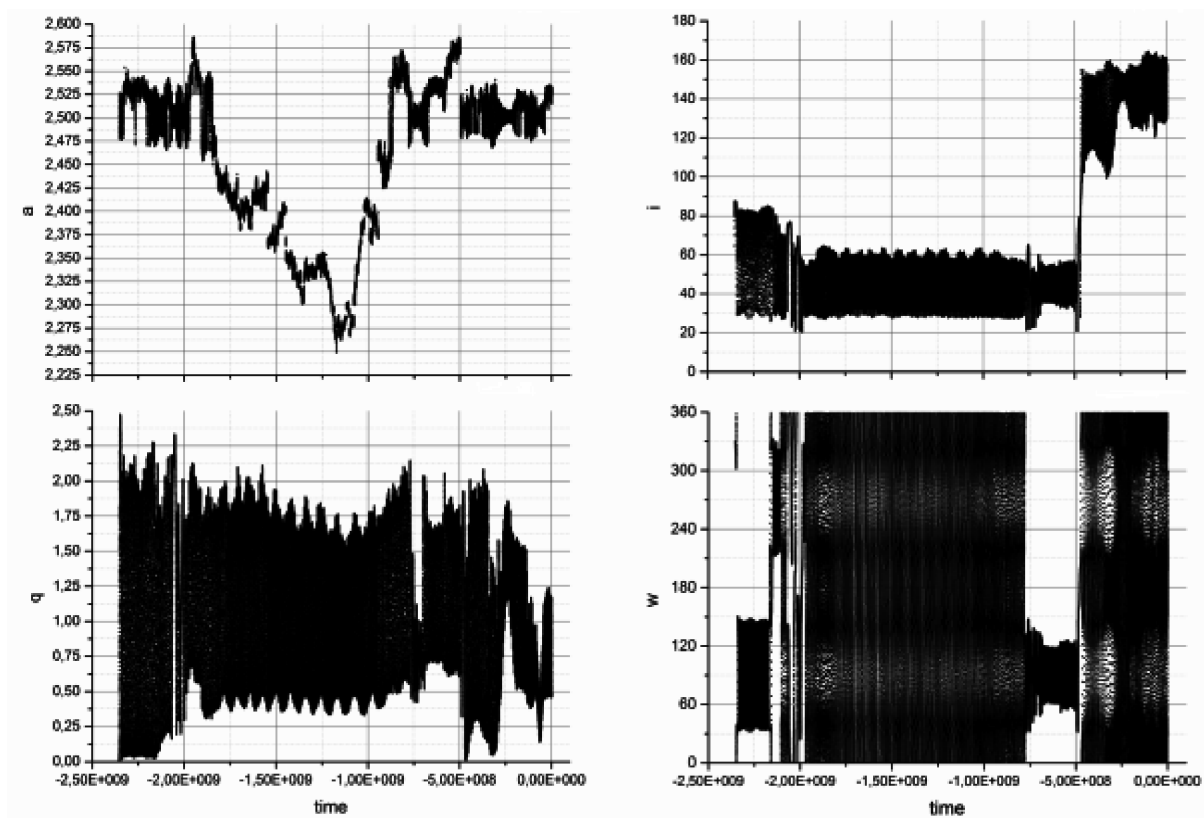


Рис. 4. Эволюция виртуального объекта астероида 2009 HC82

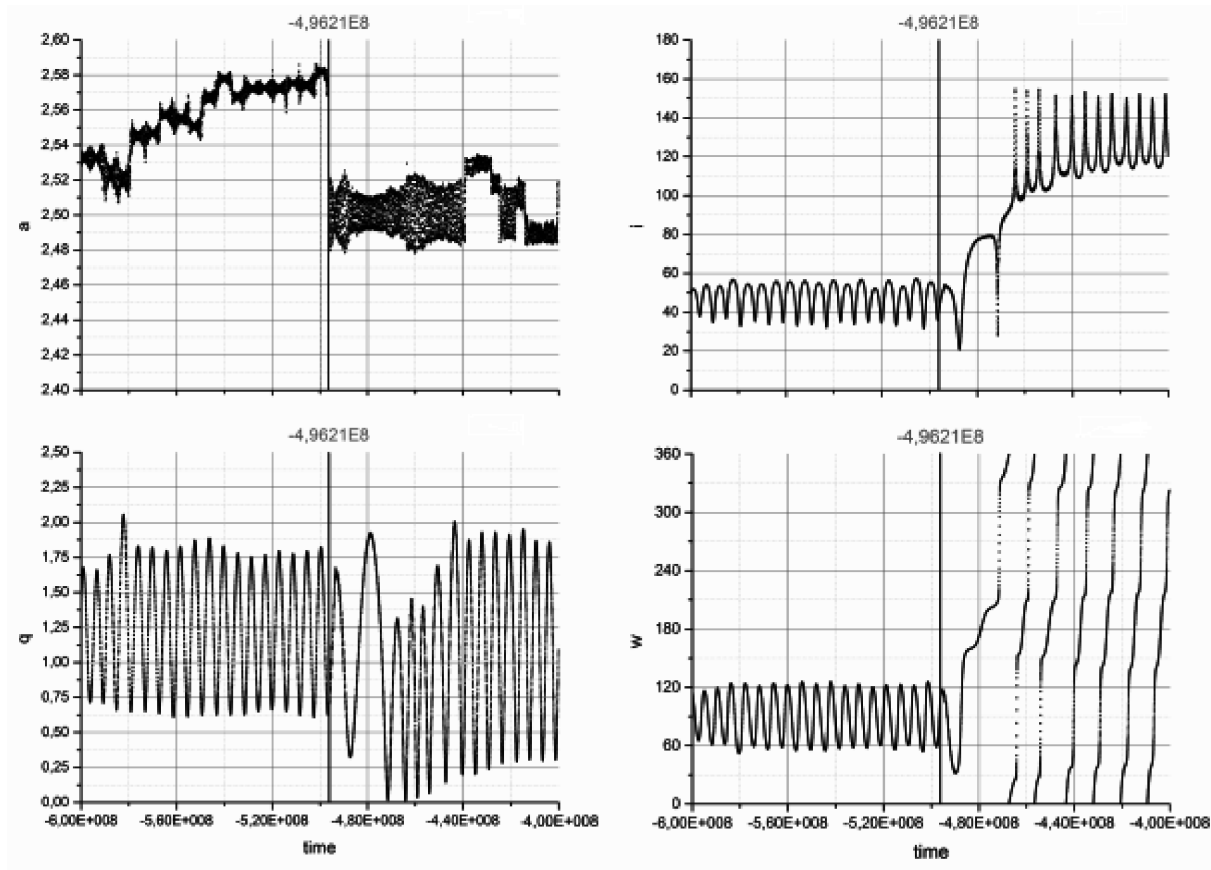


Рис. 5. Переход виртуального объекта на ретроградную орбиту

## Заключение

В работе рассмотрена динамическая эволюция трех объектов на устойчивых орбитах галлеевского типа и выявлены возможные пути появления объектов на подобных орбитах. Два из трех объектов в течение почти всего времени интегрирования находились в зоне резонанса Лидова-Козаи

Выяснено, что хотя такие объекты могли быть захвачены Юпитером из внешних областей Солнечной системы, они имели на одном из этапов своей эволюции стадию с малыми перигелийными расстояниями. Данная стадия достигается при нахождении объекта вблизи одного из орбитальных резонансов с Юпитером.

В процессе рассмотрения эволюции данных объектов был выявлен возможный сценарий, при котором объект может перейти с прямой орбиты на обратную, и наоборот. Обнаружено, что такие переходы возникают при нахождении объекта одновременно в зоне резонанса Лидова-Козаи и вблизи орбитального резонанса с Юпитером.

## Литература

1. *Greenstreet S., Gladman B., Ngo H., Granvik M., Larson S.* Production of Near-Earth Asteroids on Retrograde Orbits // *The Astrophysical Journal Letters*. 2012. Vol. 749. No. 2. L39.
2. *Авдюшев В. А.* Численное моделирование орбит. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. 282 с.
3. *Emel'yanenko V. V.* A method of symplectic integrations with adaptive time-steps for individual Hamiltonians in the planetary N-body problem // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2007. Vol. 98. Iss. 3. P. 191–202.
4. *Kozai Y.* Secular Perturbations of Asteroids with High Inclination and Eccentricity // *The Astronomical Journal*. 1962. Vol. 67. No. 9. P. 591–598.
5. *Лидов М. Л.* Эволюция орбит искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений внешних тел // *Искусственные спутники Земли*. 1961. № 8. С. 5–45.
6. *Emel'yanenko V. V., Bailey M. E.* Capture of Halley-type comets from the near-parabolic flux // *Mon Not. R. Astron. Soc.* 1998. Vol. 298. P. 212–222.
7. *Levison H. F., Dones L., Duncan M. J.* The origin of Halley-type comets: probing the inner Oort cloud // *The Astronomical Journal*. 2001. Vol. 121. P. 2253–2267.

Ключевые слова: околоземные астероиды, орбиты галлеевского типа.

---

Статья поступила 7 октября 2013 г.

Институт астрономии РАН, г. Москва

© Шеляков М. А., Емельяненко В. В., 2013