



МИНОБРНАУКИ РФ
Российский фонд
фундаментальных исследований
Национальный исследовательский
Томский государственный университет
НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета
Физико-технический факультет
Совет молодых учёных ТГУ



**VIII Всероссийская молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики – 2018»
г. Томск, 26–28 ноября 2018 г.**

**VIII All-Russian Scientific Conference
«Current issues of
continuum mechanics and celestial mechanics – 2018»,
November, 26–28, 2018**

Томск-2019

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ОКОЛОЛУННЫХ ОБЪЕКТОВ

Т.В. Бордовицына

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
tvbord@sibmail.com

Ключевые слова: окололунные объекты, динамика, орбитальная эволюция, время жизни, вековые резонансы.

Аннотация. Обсуждаются результаты обширного численного эксперимента по исследованию особенностей динамики окололунных объектов искусственного происхождения. Представлен детальный анализ орбитальной эволюции 5180 модельных объектов, движущихся в гравитационном поле Луны (с учетом второй зональной гармоник) под действием притяжения Земли и Солнца. Показано, что совместное действие апсидально-нодальных резонансов, ассоциируемых с Землей, сопровождается быстрым ростом эксцентриситетов орбит объектов с наклонениями от 70 до 110 градусов. Это, в свою очередь, приводит либо к столкновению объектов с Луной, либо к выбросу их за пределы окололунного пространства. Данные результаты могут быть использованы при выборе стратегии размещения спутниковых систем долговременного использования в окололунном орбитальном пространстве.

THE MAIN FEATURES OF THE NEAR LUNAR OBJECT'S DYNAMICS

Tatiana V. Bordovitsyna

National research Tomsk State University
tvbord@sibmail.com

Keywords: near-moon objects, dynamics, orbital evolution, lifetime, secular resonances.

Abstract. The results of an extensive numerical experiment to study the features of the dynamics of near-moon objects of artificial origin are discussed. The detailed analysis of the features of the orbital evolution for 5180 model objects moving in the gravity field of the Moon (up to the second zonal harmonic) under the influence of the attraction of the Earth and Sun are given. We demonstrate that the combined effect of the apsidal-nodal resonances associated with the Earth can lead to a rapid increase of orbital eccentricities for objects with inclinations from 70 to 110 degrees. This, in turn, leads either to a collision of objects with the Moon, or to throwing them out of the circumlunar space. These results can be used to select a strategy for deploying long-term satellite systems in the near-moon orbital space.

В связи с предстоящим исследованием Луны большой интерес представляет изучение динамической структуры окололунного орбитального пространства. Знание этой структуры необходимо для развития спутниковых систем для обеспечения любых длительных экспериментов на поверхности Луны.

В ряде работ (Song et al., 2010; Gupta and Sharma, 2011) исследовано влияние гравитационного поля Луны и притяжения Земли на низкие спутники Луны. Однако результаты, представленные в этих работах, практически не пересекаются с результатами данной работы. Наибольший интерес, с точки зрения нашего исследования, представляет статья (Tzirti et al., 2014), где вековая динамика лунных спутников изучается методом частотного анализа Прони. При моделировании орбит авторы учитывали гармоники селенопотенциала и влияние Земли и рассматривали высоты до 1000 км над поверхностью Луны.

Мы представляем здесь анализ динамической структуры околорунного орбитального пространства (и вековых частот в том числе) для обширной области околорунного пространства в диапазоне больших полуосей $[1.1 R_L, 15 R_L]$ (R_L есть радиус Луны) и диапазоне наклонов $[0, 180^\circ]$. Эволюция орбит изучается в течение десятилетнего интервала времени. Учитываются влияние несферичности лунного гравитационного поля, а также притяжение Земли и Солнца. Интересно отметить, что для высот 1000 км над поверхностью Луны, где уже заметно действие Земли, результаты, представленные в данном докладе, хорошо совпадают с результатами (Tzirti et al., 2014).

Результаты, приведенные в работах (Rossi, 2008; Bordovitsyna et al., 2012, Daquin et al., 2016), показывают, что вековые резонансы играют важную роль в долгосрочной динамической эволюции спутниковых объектов, прежде всего апсидально-нодальные резонансы, а также геометрический резонанс Лидова–Козаи. Однако влияние этих резонансов на динамику околорунных объектов остается малоизученным. Поэтому здесь мы уделяем особое внимание изучению влиянию апсидально-нодальных резонансов. Представляемые нами результаты были получены с использованием численно-аналитического подхода.

Путем численного интегрирования уравнений движения, записанных с учетом указанных выше возмущений, была построена орбитальная эволюция 5180 околорунных объектов, равномерно распределенных в изучаемом орбитальном пространстве с шагом $0,1 R_L$ по большой полуоси и 5 градусов по наклону.

В обобщенной форме результаты исследования эволюции орбиты для всего набора объектов показаны на рис. 1. Основной особенностью эволюции околорунных объектов является увеличение эксцентриситетов их орбит (рис. 1, а) для начальных орбитальных наклонов от 65 до 115 градусов и больших полуосей, превышающих 7500 км ($4,3 R_L$). Эксцентриситеты для объектов, имеющих большие полуоси менее 5500 км ($3,2 R_L$), растут слабо.

Время жизни объектов показано на рис. 1, б. Как и ожидалось, все объекты с большими полуосями более 7500 км ($4,3 R_L$) и с наклонами от

70 до 110 градусов имеют наименьшее время жизни от 0,1 до 2 лет. Для большинства объектов с небольшими орбитальными наклонениями от 0 до 35 градусов и от 145 до 180 градусов в широком диапазоне больших полуосей эксцентриситеты либрируют с небольшими амплитудами вокруг некоторых значений, незначительно отличающихся от нуля.

Таким образом, мы видим, что околополярные и околоэкваториальные объекты имеют совершенно иной характер эволюции орбит, несмотря на то что имеют одинаковые возмущения. Это можно объяснить только свойствами частотного базиса, создаваемого возмущениями и резонансными взаимодействиями частот.

Известно (Breiter, 1999, 2001a, 2001b, Daquin et al., 2016; Бордовицына, Томилова, 2016; Чувашов et al., 2017), что основной причиной увеличения эксцентриситеты орбит является действие апсидально-нодальных вековых резонансов. Поэтому влияние этих резонансов на орбитальную эволюцию рассматриваемых объектов было изучено весьма тщательно.

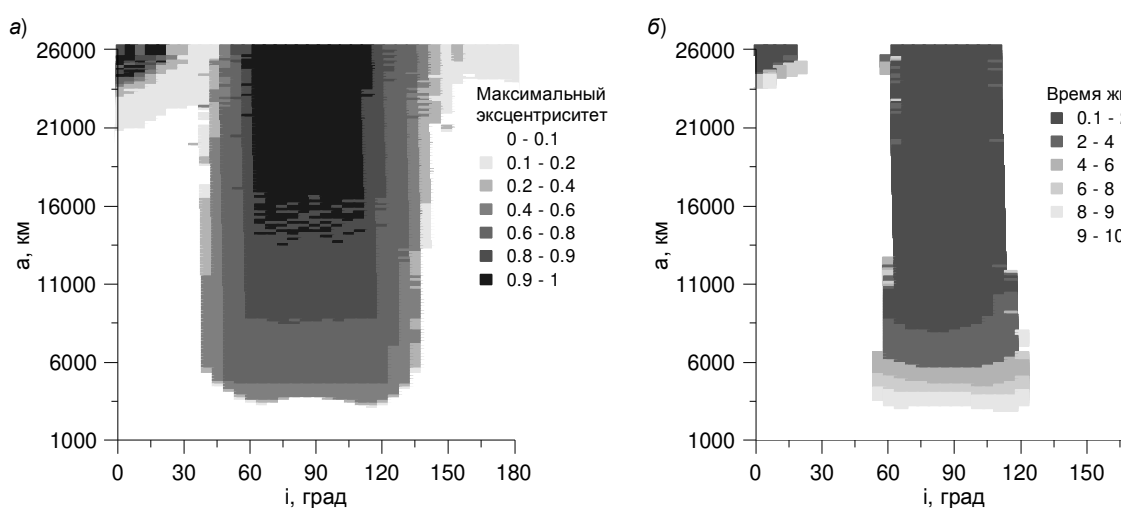


Рис. 1. Особенности орбитальной эволюции: *а* – эволюция эксцентриситетов орбит; *б* – время жизни окололунных объектов

Прежде всего были рассмотрены особенности структуры частотного базиса, возникающего в результате действия возмущений, и изучена зависимость изменения всех компонентов базиса от орбитального наклонения объекта и его большой полуоси. Затем используя методику, изложенную в (Бордовицына et al., 2014), были выведены все апсидально-нодальные резонансные соотношения до шестого порядка.

Совместное исследование поведения резонансных соотношений, их критических аргументов и сопоставление этих результатов с орбитальной эволюцией объектов, позволили сделать ряд интересных выводов.

Изучение орбитальной эволюции 5180 модельных объектов на десятилетнем интервале времени указывает на то, что орбитальные

эксцентриситеты для всех объектов, имеющих наклонения орбит в диапазоне от 70 до 110 градусов, имеют тенденцию к увеличению.

Резонанс Лидова–Козаи (Лидов, 1961; Kozai, 1962) проявляет себя в обширной области окололунного орбитального пространства, ограниченного наклонениями орбит от 30 до 150 градусов. Однако области острого резонанса Лидова–Козаи находятся в области наклонений от 55 до 75 градусов и от 105 до 125 градусов.

Влияние одного резонанса Лидова–Козаи не приводит к быстрому увеличению орбитальных эксцентриситетов. Действие любого единичного резонанса не вызывает катастрофической орбитальной эволюции.

Во всех случаях, когда эволюция орбиты протекает в соответствии с катастрофическим сценарием, большое количество вековых апсидально-нодальных резонансов одновременно действует на орбиту спутника.

Движение околополярных объектов особенно сложно. Эти объекты подвержены действию острого нодального резонанса второго порядка. Резонанс Лидова–Козаи представлен в этой области как стабильный малый знаменатель. Кроме того, незначительность значений нодального резонанса и резонанса Лидова–Козаи, а также отрицательное значение последнего порождают появление других резонансов и малых знаменателей.

Вековые апсидально-нодальные резонансы, связанные с Солнцем, практически не оказывают устойчивого действия на орбитальную эволюцию окололунных объектов.

Представленные в докладе результаты не дают исчерпывающего представления обо всех особенностях динамики окололунных объектов, но уже позволяют сделать выводы о том, какие зоны окололунного орбитального пространства не пригодны для размещения спутниковых систем долговременного использования.

Литература

1. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н.* Вековые резонансы как источник возникновения динамической хаотичности в долговременной орбитальной эволюции неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем // *Астрон. вестн.* 2014. Т.48, № 4. С. 280–289.

2. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Особенности структуры вековых резонансов в динамике околоземных космических объектов // *Изв. вузов. Физика*, 2016, Т. 59. № 3, С. 41–48.

3. *Лидов М.Л.* Эволюция искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений от внешнего тела // *Искусственные спутники Земли*. 1961. Т. 8. С. 5–45.

4. *Чувашов И.Н., Красавин Д.С., Бордовицына Т.В.* Особенности долговременной орбитальной эволюции спутников Эталон-1 и Эталон-2 // *Изв. вузов. Физика*, 2017, Т. 60, № 3 С. 64–69.

5. *Breiter S.* Lunisolar apsidal resonances at lowsatellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 1999. Vol. 74. Pp. 253–274.

6. *Breiter S.* Lunisolar resonances revisited // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001a. Vol. 81. Pp. 81–91.
7. *Breiter S.* On the coupling of lunisolar resonances for Earth satellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001b. Vol. 80. Pp. 1–20.
8. *Daquin J., Rosengren A.J., Alessi E.M., Deleflie F., Valsecchi G.B., Rossi A.* The dynamical structure of the MEO region: long-term stability, chaos, and transport // *Celest Mech Dyn Astr. Celest. Mech. and Dyn. Astr.*, 2016, Vol. 124 (4). Pp. 335–366.
9. *Gupta S., Sharma R.K.* 2011 Effect of Altitude, Right Ascension of Ascending Node and Inclination on Lifetime of Circular Lunar Orbits // *IJAA*, Vol. 1. Pp. 155–163.
10. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *Astron. J.* 1962. Vol. 67. Pp. 591–598.
11. *Rossi A.* Resonant dynamics of Medium Earth Orbits: space debris // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2008. Vol. 100. Pp. 267–286.
12. *Song Y., Park S, Kim H and Sim E.* 2010, Development of Precise Lunar Orbit Propagator and Lunar Polar Orbiter’s Lifetime Analysis // *J. Astron. Space Sci.* Vol. 27. Pp. 97–106.
13. *Tzirti S., Noullez A., Tsiganis K.* 2014, Secular dynamics of a lunar orbiter: a global exploration using Prony’s frequency analysis// *Celest Mech Dyn Astr.* Vol. 118. Pp. 379–397.

References

1. *Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V., and Chuvashov I.N.* Secular resonances as a source of dynamic chaoticity in the long-term orbital evolution of uncontrolled satellites // *Solar System Research*, 2014, Vol. 48, No. 4. Pp. 259–268
2. *Bordovitsyna T.V. and Tomilova I.V.* 2016. Special feature of the structure of secular resonances in the dynamics of near-Earth space object // *Rus. Phys. Jour.* Vol. 59. No. 3. Pp. 365–373.
3. *Lidov M.L.* The evolution of artificial satellites under the influence of gravitational perturbations from the external body // *Artificial Earth’s satellite* 1961. No 8. Pp. 5–45.
4. *Chuvashov I.N., Krasavin D.S., and Bordovitsyna T.* Special feature of long-term orbital evolution of Etalon-1 and Etalon-2 satellites // *Rus. Phys. Jour.* 2017. Vol. 60. No. 3. Pp. 449–454
5. *Breiter S.* Lunisolar apsidal resonances at low satellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 1999. Vol. 74. Pp. 253–274.
6. *Breiter S.* Lunisolar resonances revisited // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001a. Vol. 81. Pp. 81–91.
7. *Breiter S.* On the coupling of lunisolar resonances for Earth satellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001b. Vol. 80. Pp. 1–20.
8. *Daquin J., Rosengren A.J., Alessi E.M., Deleflie F., Valsecchi G.B., Rossi A.* The dynamical structure of the MEO region: long-term stability, chaos, and transport // *Celest Mech Dyn Astr. Celest. Mech. and Dyn. Astr.*, 2016. Vol. 124 (4). Pp. 335–366.
9. *Gupta S., Sharma R.K.* 2011 Effect of Altitude, Right ascension of ascending node and inclination on lifetime of circular lunar orbits // *IJAA*. Vol. 1. Pp. 155–163.
10. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *Astron. J.* 1962. Vol. 67. Pp. 591–598.
11. *Rossi A.* Resonant dynamics of medium earth orbits: space debris // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2008. Vol. 100. Pp. 267–286.
12. *Song Y., Park S, Kim H and Sim E.* 2010, Development of precise lunar orbit propagator and lunar polar orbiter’s lifetime analysis // *J. Astron. Space Sci.* Vol. 27. Pp. 97–106.
13. *Tzirti S., Noullez A., Tsiganis K.* 2014, Secular dynamics of a lunar orbiter: a global exploration using Prony’s frequency analysis// *Celest Mech Dyn Astr.* Vol. 118. Pp. 379–397.