

УДК 521.1

## ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЙ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ И РЕЗОНАНСНЫЕ ВОЗВРАТЫ<sup>1</sup>

*Соколов Л. Л.<sup>2</sup>, Борисова Т. П.<sup>3</sup>, Васильев А. А.<sup>4</sup>, Петров Н. А.<sup>5</sup>*

TRAJECTORIES OF COLLISIONS OF ASTEROIDS WITH THE EARTH AND RESONANT RETURNS

Sokolov L. L., Borisova T. P., Vasilyev A. A., Petrov N. A.

We discuss possible collisions of asteroids with the Earth, connected with resonant returns. The Everhart integrator and DE405 model were applied. Research was carried out using computer resources provided by Resource Center "Computer Center of SPbSU" (<http://cc.spbu.ru>). We have found more than 500 possible collisions of asteroid Apophis in XXI century, more than 150 keyholes are located near nominal Apophis orbit. The keyhole positions demonstrate structure, similar to fractal structure, due to resonant returns. Positions and sizes of keyholes of other asteroids (2011 AG5, 2007 VK184) are discussed too. Our results are in agreement with similar results, presented in NASA publications.

Keywords: asteroids, asteroid-comet hazard, trajectories, collisions.

### Введение

Астероидно-кометная опасность представляет собой одну из проблем, актуальность которых сегодня не вызывает сомнения. Не только ученые, но и политики, правительства ведущих стран, включая Россию, уделяют ей повышенное внимание. Нередко эта проблема обсуждается в средствах массовой информации и вызывает интерес широкой общественности, особенно после падения астероида под Челябинском в феврале 2013 г. Актуальность темы обусловлена не только лучшим пониманием угрозы вследствие развития астрономии, но и тем обстоятельством, что человечество созрело для решения задач, связанных с предотвращением этой угрозы. Решение этих задач не только обеспечит астероидно-кометную безопасность, но и будет способствовать прогрессу и технологическому развитию человечества в различных направлениях. Вся история XX в. свидетельствует об этом.

В настоящей работе мы ограничиваемся одной частной, но важной задачей, неразрывно связанной с проблемой астероидно-кометной опасности.

Речь идет о нахождении траекторий возможных соударений астероидов с Землей. Это стандартная задача небесной механики, но ее решение осложняется для траекторий, имеющих неоднократные сближения с Землей, траекторий резонансных возвратов. Такие движения оказываются практически недетерминированными из-за большой потери точности, для их исследования приходится изобретать специальные приемы.

Исследование опасных траекторий астероидов, связанных с резонансными возвратами, необходимо для обеспечения астероидно-кометной безопасности. Действительно, каждая орбита известна с ограниченной точностью, поэтому наряду с возможными соударениями астероидов с Землей возможны также тесные сближения с ней. При этом происходят переходы на другие орбиты, включая резонансные, со сближениями или со-

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке РФФИ (11-02-00232-а).

<sup>2</sup>Соколов Леонид Леонидович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета; e-mail: lsok@astro.spbu.ru.

<sup>3</sup>Борисова Татьяна Павловна, аспирант кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета; e-mail: tanyaastro@mail.ru.

<sup>4</sup>Васильев Андрей Александрович, младший научный сотрудник лаборатории наблюдательной астрофизики Санкт-Петербургского государственного университета; e-mail: inter@astro.spbu.ru.

<sup>5</sup>Петров Никита Александрович, специалист Центра сопровождения образовательных программ и научных исследований Санкт-Петербургского государственного университета; e-mail: petrov@astro.spbu.ru.

ударениями в недалеком будущем. Таким образом, каждая трубка траекторий, содержащая соударения или тесные сближения, содержит также соударения или тесные сближения через сравнительно небольшое время. В результате для множества начальных данных, ведущих к соударениям, можно ожидать структуру фрактального типа, и мы ее демонстрируем для хорошо известного специалистам одного из самых опасных астероидов — Апофиса.

Астероид Апофис обратил на себя внимание сразу после открытия в 2004 году благодаря тесному сближению с Землей, которое произойдет 13.04.2029. Было время, когда вероятность соударения с Землей в 2029 г. превосходила 3%, что является своеобразным рекордом. Именно этот астероид заставил обратить особое внимание на важность резонансных возвратов. Огромное число научных статей посвящено этому объекту. Долгое время — с 2007 по 2011 г. — условия наблюдения его были неблагоприятны. В конце 2012 и начале 2013 г. наблюдения были наконец проведены, некоторые результаты их обработки и уточнения орбиты обсуждаются ниже.

### 1. Опасные траектории астероида Апофис

Возможности соударений астероида Апофис с Землей, связанные с резонансными возвратами, были обнаружены вскоре после открытия астероида. Тогда точность его орбиты была сравнительно низкой, трубка возможных траекторий — широкой. Она включала в себя множество возможных соударений после 2029 г. По мере уточнения орбиты Апофиса в 2005 г. число их уменьшалось и скоро осталось одно соударение в 2036 г. [1]. Это соударение долгое время (до конца 2012 г.) активно обсуждалось, поскольку не было новых наблюдений, орбита не уточнялась. В частности, в работах [2–4] было найдено множество сближений и соударений, связанных с тесным сближением в 2036 г. и возможным переходом на траектории резонансных возвратов. В работе представителей НАСА [5] были также найдены возможные соударения, связанные с рассеянием траекторий в 2036 г. Общая часть множеств траекторий соударения, найденных независимо, имела практически совпадающие характеристики [3]. Важность этого совпадения независимо полученных результатов невозможно переоценить. Оно свидетельствует, во-первых, о достоверности этих результатов и работоспособности

применяемых методов, во-вторых — об удивительной устойчивости важнейших характеристик возможных соударений (при сильнейшей ляпуновской неустойчивости траекторий). Устойчивость характеристик траекторий соударения исследовалась нами специально в работе [4]. Впоследствии [6] было обнаружено еще больше траекторий соударения, связанных со сближением в 2036 г. Однако соударение 2036 г. находилось (и находится) сравнительно далеко от номинальной орбиты Апофиса. Гораздо ближе к ней находится тесное сближение с Землей в 2051 г. [6]. Соответствующее рассеяние траекторий дает ряд возможных соударений вблизи номинальной орбиты, самое опасное — в 2068 г. [7].

После уточнения орбиты Апофиса по наблюдениям 2012–2013 гг. номинальная орбита сместилась несущественно, но заметно сузилась трубка возможных траекторий (как и следовало ожидать). Предварительные результаты наблюдений Апофиса (до перигея) были выложены на сайт НАСА [neo.jpl.nasa.gov/risk/10.01.2013](http://neo.jpl.nasa.gov/risk/10.01.2013). Тогда же в Интернете появилась работа [8] в своей первой версии. Вторая версия [8] появилась в феврале, в ней были другие вероятности возможных соударений, а основные характеристики ведущих к соударениям щелей те же самые. В итоге после обработки всех наблюдений большинство ранее найденных (в том числе нами) возможных соударений стали невозможными, включая соударение в 2036 году и все связанные с соответствующим тесным сближением. На сайте НАСА в настоящее время (03.10.2013) приведено 12 возможных соударений Апофиса с Землей, из них 9 в текущем столетии. Вероятности каждого соударения больше  $10^{-8}$ , максимальная вероятность  $3,9 \cdot 10^{-6}$  для соударения в 2068 г.

На рис. 1, 2 показаны полученные нами соударения Апофиса: положения щелей — больших полуосей траекторий, ведущих к соударениям относительно номинальной орбиты по оси абсцисс и даты соударений по оси ординат. На рис. 2 выделены соударения вблизи номинальной орбиты. На рис. 3, 4 показаны положения и размеры щелей, ведущих к соударениям. Размеры щелей определялись диапазоном больших полуосей на момент 01.05.2035 ведущих к соударениям траекторий. На рис. 4 выделены соударения вблизи номинальной орбиты. На рис. 3, 4 приведено меньше соударений, чем на рис. 1, 2. Кружками обозначены соударения, которые приведены на сайте НАСА сейчас. Видно, что американские исследователи ограни-

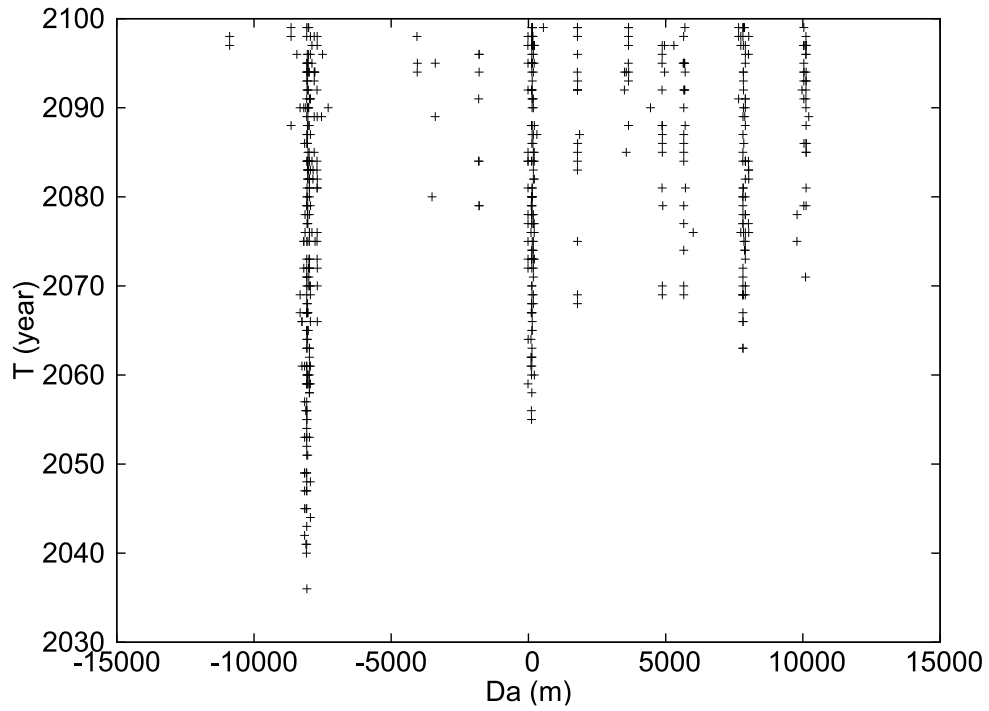


Рис. 1. Относительное положение щелей, ведущих к соударениям, и их даты

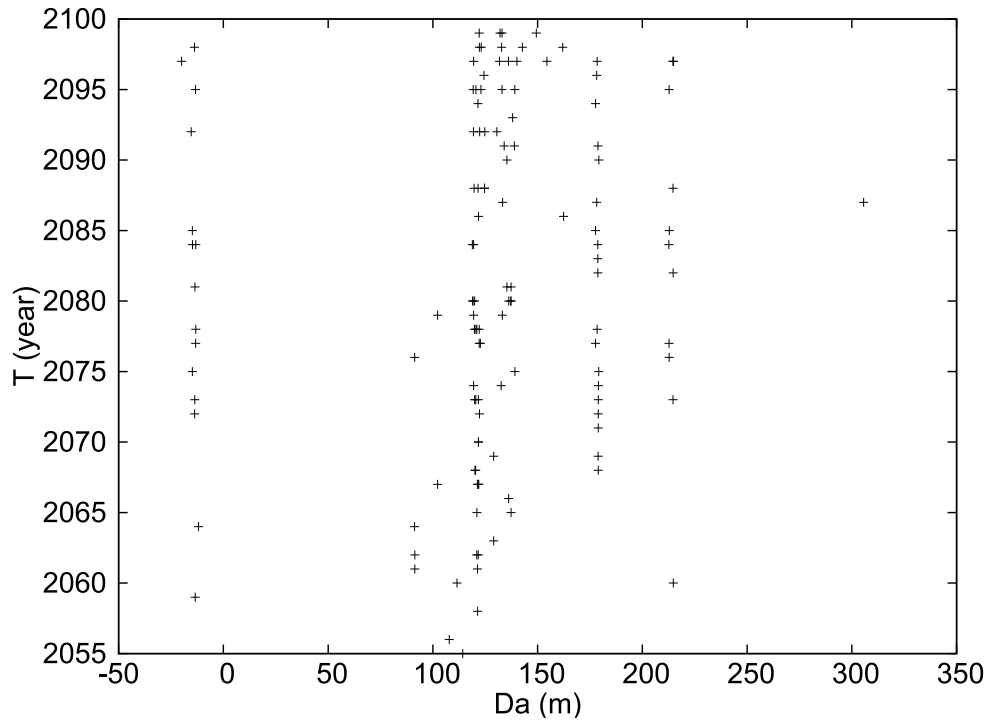


Рис. 2. Относительное положение щелей вблизи номинальной орбиты, и их даты

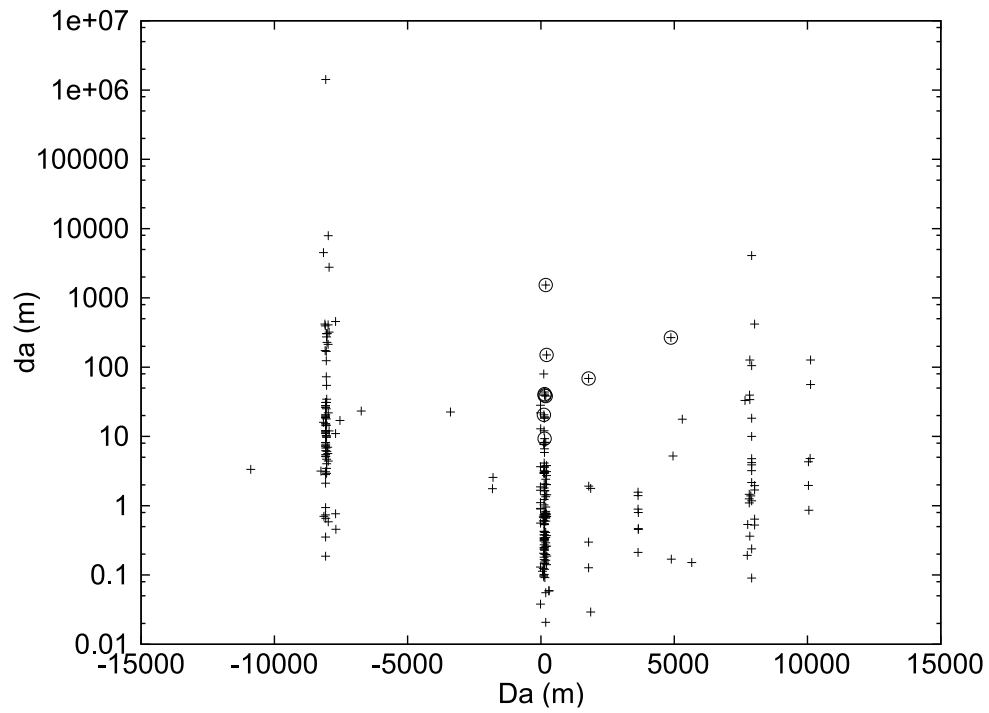


Рис. 3. Относительное положение и размеры щелей, ведущих к соударениям Апофиса с Землей

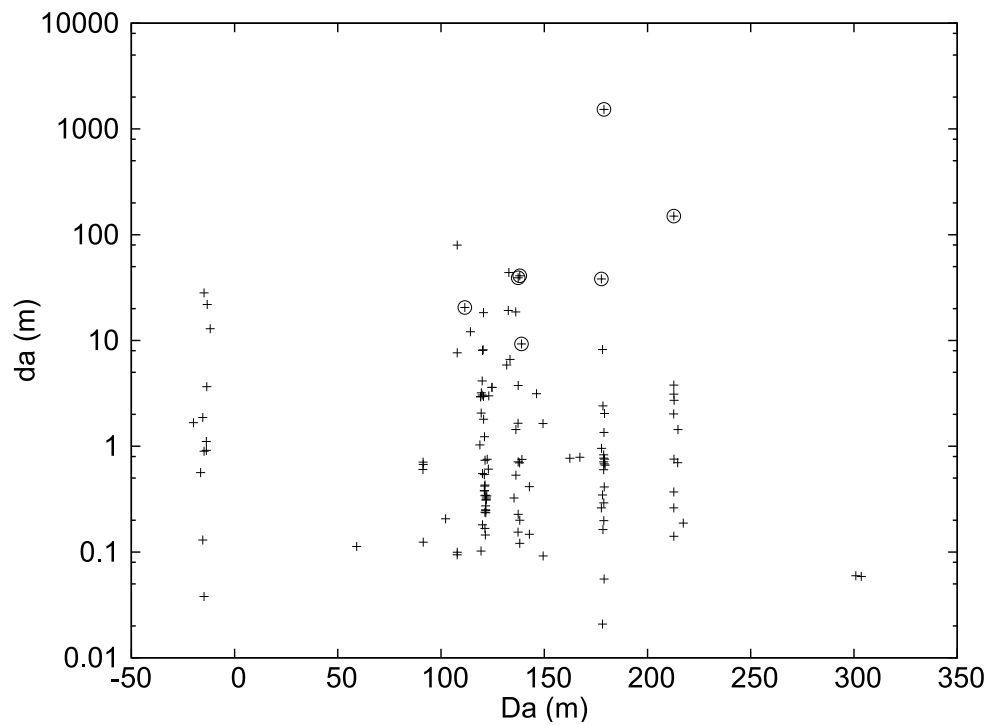


Рис. 4. Относительное положение и размеры щелей вблизи номинала, ведущих к соударениям Апофиса с Землей

## 2007 VK184

$N$	Дата	$r$ , $10^3$ км	$\Delta a$ , км	$r_{48}$ , $10^3$ км	$\delta a$ , м	$\delta r_{48}$ , км
1*	2048	3,5	0,0	3,5	73000,0	
2	2052	0,37	-68,0	11,0	0,91	0,14
3*	2053	3,4	540,0	90,0	15,0	2,5
4*	2055	4,8	1800,0	310,0	100,0	17,0
5*	2057	4,8	-6200,0	1100,0	880,0	160,0
6	2058	1,0	140,0	23,0	0,63	0,10
7	2061	1,4	390,0	64,0	3,7	0,63
8	2065	0,099	240,0	40,0	1,2	0,20

*Примечание.* Обозначения:  $r$  — минимальное расстояние до центра Земли;  $\Delta a$  — относительное положение щели (отклонение от значения большой полуоси, ведущего к соударению в 2048 г.);  $r_{48}$  — минимальное расстояние до Земли в 2048 г.;  $\delta a$  — диапазон начальных значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели);  $\delta r_{48}$  — диапазон минимальных геоцентрических расстояний в 2048 г. для траекторий соударения (ширина щели). Звездочкой отмечены соударения, указанные на сайте НАСА

чиваются самыми большими щелями, на самом деле соударений гораздо больше, в том числе вблизи номинальной орбиты.

Методы, используемые нами для выделения возможных соударений, описаны нами в работах [2, 4, 6]. Мы используем интегратор Эверхарта [9] и модель Солнечной системы DE405 [10]. Отметим еще, что в работе [6] и в настоящей работе мы активно использовали вычислительный кластер СПбГУ, и распараллеливание вычислений показало свою эффективность.

## 2. Возможные резонансные возвраты астероида 2007 VK184

Возможные соударения, связанные с резонансными возвратами, существуют не только у Апофиса, но и у других опасных астероидов. В таблице приведены характеристики найденных нами соударений для одного из самых опасных на сегодня астероидов — 2007 VK184. Приведены значения размеров щелей, ведущих к соударениям, определенные двумя способами независимо. Видна линейная связь между ними, как и должно быть. Как и в случае Апофиса, на сайте НАСА приведены соударения с самыми большими щелями, на самом деле щелей больше.

Недавно на сайте НАСА самым опасным был астероид 2011 AG5. Наиболее вероятное его соударение с Землей — в 2040 г., был также ряд соударений после рассеяния траекторий в 2040 г. Список их, аналогичный приведенному в таблице, дан в нашей статье [6]. Малые щели на сайте НАСА не указаны. После уточнения орбиты 2011 AG5 из наблюдений вероятность соударения в 2040 г. ста-

ла пренебрежимо малой, как и других соударений, и астероид был исключен из списка опасных. В этом смысле Апофис является исключением — и после существенного уточнения орбиты у него осталось множество возможных соударений.

## Заключение

Множество возможных соударений астероида с Землей образует сложную структуру, аналогичную структуре фрактала в пространстве начальных данных. Ее исследование не только увлекательно, но и необходимо для обеспечения астероидно-кометной безопасности. Возможные тесные сближения с Землей не только связаны с угрозой соударения, но и могут быть полезными для целесообразного изменения орбиты астероида. Для астероида Апофис даже после недавнего уточнения орбиты осталось множество соударений со значимыми вероятностями, самое опасное — в 2068 г. Всего нами было получено более 500 соударений Апофиса с Землей, из них более 150 — вблизи номинальной орбиты. Лишь последние могут быть опасны на сегодня, октябрь 2013 г. Они расположены там, где указанные на сайте НАСА соударения, не выходя из области 3,5 сигма согласно этому сайту.

## Литература

1. Chesley S. R. Potential Impact Detection of Near-Earth Astrroids: The Case of 99942 Apophis (2004 MN4). Eds. Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernandes J.A. Asteroids, Comets, Meteors: Proc. IAU Symposium 229<sup>th</sup>, 2005,

- Cambridge: Cambridge University Press, 2006, P. 215–228.
2. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Питъев Н. П.* Особенности движения астероида 99942 Apophis // *Астрон. вестн.* 2008. Т. 42. №1. С. 20–29.
  3. *Sokolov L. L., Pitjev N. P., Shaidulin V. Sh.* About Zones of Resonant Returns of Asteroid Apophis // *Proceedings of the International Conference «Asteroid-Comet Hazard-2009»* A. Finkelstein, W. Huebner, V. Shor (Eds). St.-Petersburg: Nauka, 2010. P. 279–283.
  4. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Борисова Т. П., Петров Н. А., Питъев Н. П., Шайдулин В. Ш.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. №4. С. 311–320.
  5. *Yeomans D. K., Bhaskaran S., Broschart S. B. et al.* Deflecting a Hazardous Near-Earth Object. 1 IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27–30 April 2009, Granada, Spain. 14 p.
  6. *Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А.* Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. №5. С. 441–447.
  7. *Chesley S. R.* Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect // 2011 IAA Planetary Defense Conference: From Threat to Action. 9–12 May 2011, Bucharest, Romania. 19 p.
  8. *Farnocchia D., Chesley S. R., Chodas P. W., Micheli M., Tholen D. J., Milani A., Elliott G. T., Bernardi F.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // arXiv:1301.1607v2 [astro-ph.EP] 19 Feb 2013.
  9. *Everhart E.* Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* 1974. Vol. 10. P. 35–55.
  10. *Standish E. M.* JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405 / Interoffice Memorandum, 1998. Vol. 312. F-98-048. 18 p.

Ключевые слова: астероиды, астероидно-кометная опасность, траектории, соударения.

---

Статья поступила 29 октября 2013 г.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

© Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А., 2013