

# О ПОЛОЖЕНИЯХ ОБЛАСТЕЙ, ВЕДУЩИХ К СОУДАРЕНИЯМ АСТЕРОИДА АПОФИС С ЗЕМЛЕЙ

Н.А. Петров, Л.Л. Соколов, А.А. Васильев

Санкт-Петербургский государственный университет

Всероссийская астрометрическая конференция - 2015

ГАО РАН, Санкт-Петербург, сентябрь 2015

## 2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Заблаговременное обнаружение и исследование возможных соударений и сближений астероидов с Землей. На основе этого исследования - проектирование мероприятий по предотвращению соударений.

### 3. РЕЗОНАНСНЫЕ ВОЗВРАТЫ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

Трудность прогнозирования сближений и соударений, связанных с резонансными возвратами, обусловлена потерей точности при сближениях. Основной пример - астероид Апофис. Устойчивость (надежность) результатов: как меняются основные характеристики опасных траекторий при изменении номинальной орбиты и модели движения планет? Как выглядят опасные (и безопасные) области начальных данных в разные моменты времени?

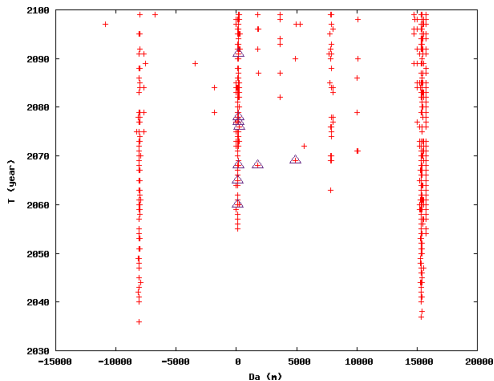
## 4. ПОЧЕМУ АПОФИС

Для этого астероида найдено очень много возможных соударений, связанных с резонансными возвратами. Астероид остается опасным несмотря на существенное уточнение его орбиты из наблюдений в 2012-2013 годах, см. рис. Точность его орбиты весьма высока по сравнению с другими опасными астероидами.

## 5. АПОФИС - МНОЖЕСТВО ВОЗМОЖНЫХ СОУДАРЕНИЙ (ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ СПБГУ), 1

Всего нами было получено порядка тысячи возможных соударений Апофиса с Землей. На рисунке приведена самая широкая область, в которой проводились исследования.

## 6. АПОФИС - МНОЖЕСТВО ВОЗМОЖНЫХ СОУДАРЕНИЙ (ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ СП6ГУ), 2



## 7. АПОФИС - ОСНОВНЫЕ СОУДАРЕНИЯ НА ВЕБСАЙТЕ НАСА, 1

Всего 12 соударений, 9 в текущем столетии, 2 "по краям" с малыми вероятностями, 7 с вероятностями больше 10 в минус седьмой. Хорошее совпадение с нашими результатами.

## 8. АПОФИС - ОСНОВНЫЕ СОУДАРЕНИЯ НА ВЕБСАЙТЕ НАСА, 2

These results were computed on May 06, 2013

### 99942 Apophis (2004 MN4)

#### Earth Impact Table

Date	Distance	Width	Sigma Impact	Sigma LOV	Stretch LOV	Impact Probability	Impact Energy	Palermo Scale	Torino Scale
YYYY-MM-DD.DD	(rEarth)	(rEarth)			(rEarth)		(MT)		
2060-04-12.55	0.64	< 1.e-04	0.000	-0.723	1.44e+07	5.2e-08	7.50e+02	-5.13	0
2065-04-11.77	0.17	< 1.e-04	0.000	-0.700	9.21e+06	1.4e-07	7.49e+02	-4.75	0
2068-04-12.64	0.02	< 1.e-04	0.000	-0.663	3.00e+05	3.9e-06	7.50e+02	-3.32	0
2068-10-15.40	0.51	< 1.e-04	0.000	0.358	8.29e+06	1.5e-07	7.50e+02	-4.75	0
2069-10-15.99	0.02	< 1.e-04	0.000	3.497	3.48e+05	1.1e-08	7.50e+02	-5.89	0
2076-04-13.02	0.11	< 1.e-04	0.000	-0.633	4.05e+06	3.3e-07	7.50e+02	-4.45	0
2077-04-13.45	0.40	< 1.e-04	0.000	-0.664	1.04e+07	1.1e-07	7.50e+02	-4.96	0
2078-04-13.76	0.06	< 1.e-04	0.000	-0.699	1.12e+07	1.2e-07	7.49e+02	-4.90	0
2091-04-13.38	0.83	< 1.e-04	0.000	-0.698	4.95e+06	1.2e-07	7.51e+02	-4.98	0
2103-04-14.44	0.60	< 1.e-04	0.000	-0.665	3.03e+06	3.2e-07	7.50e+02	-4.63	0
2105-04-13.77	0.92	< 1.e-04	0.000	-0.664	7.60e+06	5.3e-08	7.50e+02	-5.42	0
2105-10-16.32	0.14	< 1.e-04	0.000	0.359	3.84e+06	4.0e-07	7.50e+02	-4.54	0



## 9. АПОФИС - ОСНОВНЫЕ СОУДАРЕНИЯ НА ВЕБСАЙТЕ NEODyS

Всего 10 соударений, 7 в текущем столетии: в апреле и октябре 2068 года, в апреле и октябре (2 соударения) 2069 года, в апреле 2077 и 2078 года. Заметные отличия от результатов НАСА и наших результатов.

## 10. О МЕТОДЕ НАХОЖДЕНИЯ СОУДАРЕНИЙ

Метод поиска соударений основывается на варьировании начальных данных; мы ограничиваемся одномерным многообразием. Использовались интегратор Эверхарта и модели Солнечной системы - DE 405 и DE 430. Использовались и старая номинальная орбита Апофиса 2006 года, и новая, 2014 г., НАСА, а также новая, NEODyS (2015). Отличия малы. Для преодоления потери точности использовалось дополнительное варьирование начальных данных в промежуточной точке после 2029 года.

## 11. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАЕКТОРИЙ СОУДАРЕНИЯ

1. Дата и момент соударения. 2. Относительное положение ведущей к соударению щели (большая полуось или минимальное геоцентрическое расстояние в 2051 году). 3. Размер щели (диапазон ведущих к соударению значений большой полуоси в некоторый момент или диапазон ведущих к соударению минимальных геоцентрических расстояний в 2051 году). 4. Минимальное геоцентрическое расстояние в момент соударения.

## 12. НОМИНАЛЬНАЯ ОРБИТА, НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Отличия начальных координат, ведущих к "основному" соударению в 2068 году, полученных по номинальной орбите NEODyS и НАСА - около 100 км.

Неустойчивость. Изменение начальных (2006 г) координат на  $10 \text{ см} = 10^{-4} \text{ км}$  ведет к изменению минимального геоцентрического расстояния в 2029 г на 20 м, в 2051 г на 2 тыс. км, в 2068 г. на  $3 \cdot 10^5 \text{ км}$

## 13. АПОФИС - ОСНОВНЫЕ СОУДАРЕНИЯ, ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ, 1 (номинал НАСА, старый и новый)

N	Дата	$\Delta a \cdot 10^3 (km)$	$\delta a (m)$	$Probability \cdot 10^7 - NASA$
1	2075	43.1 (43.1)	30. (33.)	
2	2064	42.4 (42.4)	12. (15.)	
3	2056	15.8 (15.8)	60. (60.)	
4*	2060	15.0 (15.0)	21. (21.)	1.0
5	2055	14.4 (14.4)	12. (12.)	
6	2074	10.3 (10.3)	21. (21.)	
7	2066	9.49 (9.49)	18. (18.)	
8*	2065	9.23 (9.23)	45. (45.)	2.6
9*	2078	9.06 (9.06)	45. (45.)	2.2

$\Delta a$  - Относительное начальное положение большой полуоси щели 01.05.2035.

$\delta a$  - Размер щели в 2035 г. - диапазон значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели).

## 14. АПОФИС - ОСНОВНЫЕ СОУДАРЕНИЯ, ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ, 2 (номинал НАСА, старый и новый)

N	Дата	$\Delta a \cdot 10^3 (km)$	$\delta a (m)$	$Probability \cdot 10^7 - NASA$
10*	2091	8.88 (8.88)	9.0 (6.0)	2.2
11*	2077	0.28 (0.28)	42. (42.)	1.8
12*	2068	0.00 (0.00)	1500. (1500.)	67.
13*	2076	-7.51 (-7.51)	150. (150.)	5.4

$\Delta a$  - Относительное начальное положение большой полуоси щели в начальный момент (по начальным данным до улучшения орбиты в 2013, DE 405 и по начальным данным после улучшения орбиты в 2013, DE 430 числа совпадают).

$\delta a$  - Размер щели в 2035 г. - диапазон значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели). По начальным данным до улучшения орбиты в 2013, DE 405 - в скобках, по начальным данным после улучшения орбиты в 2013, DE 430 - без скобок.

## 15. АПОФИС - ОСНОВНЫЕ СОУДАРЕНИЯ, ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ, 3 (номиналы NEODyS и NASA)

N	Дата	$\Delta a \cdot 10^3 (km)$	$\delta a (m)$	$r_{min} (km)$
1	2075	43.1 (43.1)	30. (30.)	153.46 (153.92)
2	2064	42.4 (42.4)	15. (12.)	4564.02 (4546.52)
3	2056	15.8 (15.8)	60. (60.)	4192.69 (4175.61)
4*	2060	15.0 (15.0)	21. (21.)	4391.90 (4373.69)
5	2055	14.4 (14.4)	12. (12.)	5908.04 (5888.45)
6	2074	10.3 (10.3)	21. (21.)	44.93 (57.76)
7	2066	9.49 (9.49)	18. (18.)	5224.05 (5201.29)
8*	2065	9.23 (9.23)	39. (45.)	2888.77 (2922.66)
9*	2078	9.06 (9.06)	48. (45.)	360.78 (345.63)

$\Delta a$  - Относительное начальное положение большой полуоси щели 01.05.2035.

$\delta a$  - Размер щели в 2035 г. - диапазон значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели).

## 16. АПОФИС - ОСНОВНЫЕ СОУДАРЕНИЯ, ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ, 4 (номиналы NEODyS и NASA)

N	Дата	$\Delta a \cdot 10^3 (km)$	$\delta a (m)$	$r_{min} (km)$
10*	2091			
11*	2077	0.28 (0.28)	39. (42.)	2471.99 (2454.11)
12*	2068	0.00 (0.00)	1800. (1500.)	139.49 (145.88)
13*	2076	-7.51 (-7.51)	150. (150.)	707.08 (714.73)

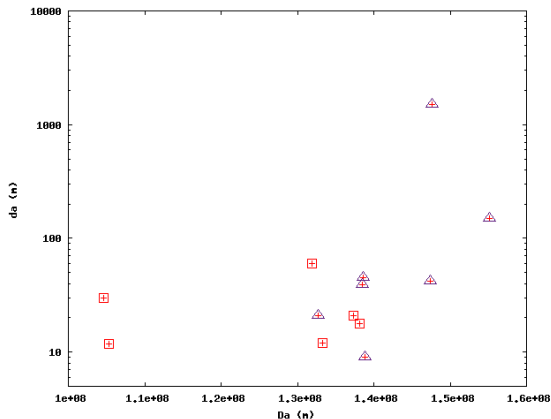
$\Delta a$  - Относительное начальное положение большой полуоси щели в начальный момент (по начальным данным NEODyS и НАСА числа совпадают).

$\delta a$  - Размер щели в 2035 г. - диапазон значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели). По начальным данным НАСА - в скобках, по начальным данным NEODyS - без скобок.

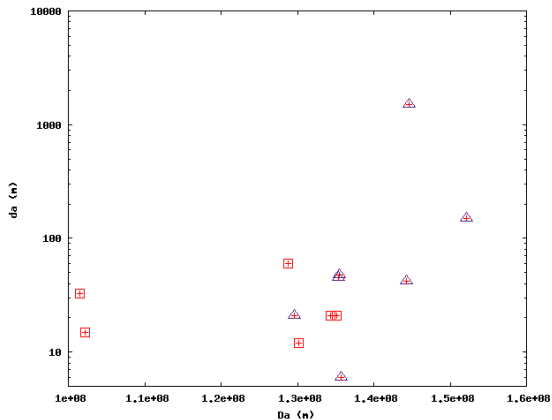
Звездочкой отмечены соударения, указанные на сайте НАСА.



## 17. ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРЫ ЩЕЛЕЙ, ВЕДУЩИЕ К СОУДАРЕНИЯМ, В 2035 г. (из 2006 г.)



## 18. ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРЫ ЩЕЛЕЙ, ВЕДУЩИЕ К СОУДАРЕНИЯМ, В 2035 г. (из 2026 г.)



## 19. ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ И РАЗМЕРОВ ЩЕЛЕЙ, ВЕДУЩИХ К СОУДАРЕНИЯМ, СО ВРЕМЕНЕМ, 1 (разности больших полуосей, метры)

Даты	06.03.2006	08.03.2016	01.05.2026	08.03.2029
2075	-194.	-304.	-1020.	-44000.
2064	-191	-300.	-1010.	-43300.
2056	-71.3	-112.	-376.	-16100.
2060*	-67.4	-106.	-357.	-15300.
2055	-64.8	-102.	-342.	-14700.
2074	-46.3	-72.7	-245.	-10500.
2066	-42.7	-67.0	-226.	-9700.
2065*	-41.6	-65.3	-220.	-9440.
2078*	-40.8	-64.1	-216.	-9260.
2091*	-40.0	-62.8	-212.	-9080.

## 20. ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ И РАЗМЕРОВ ЩЕЛЕЙ, ВЕДУЩИХ К СОУДАРЕНИЯМ, СО ВРЕМЕНЕМ, 2 (разности больших полуосей, метры)

Даты	06.03.2006	08.03.2016	01.05.2026	08.03.2029
2077*	-1.27	-2.00	-6.72	-288.
2068*	0.0	0.0	0.0	0.0
2076*	33.9	53.1	179.	7670.

Ширина щели "основного" соударения (2068 год) по большой полуоси в 2006 г. - 2 см, в 2016 г. - 3 см, в 2026 г. - 10 см, в 2029 г. перед сближением - 4.5 м, в 2035 г. - 1.5 км.

## 20. ВЫВОДЫ

Основные характеристики траекторий, ведущих к соударениям, устойчивы при малых изменениях модели движения.

Расстояния между щелями и их размеры растут со временем. При переходе от 2006 к 2016 все величины умножаются на 1.6, к 2026 - на 5.3, к 08.03.2029 - на 230. После сближения в 2029 размеры увеличиваются на 5 порядков. Эти закономерности следует использовать при проектировании мероприятий по предотвращению соударений.

Спасибо!