

# ВОЗМОЖНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ВОЗВРАТЫ АСТЕРОИДА АПОФИС

Соколов Л.Л.  
Санкт-Петербургский Государственный Университет

# СОУДАРЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ

Частота столкновений астероидов с Землей  
в зависимости от диаметра астероида  $D$ :

$D > 60$  м — 300 лет,

$D > 300$  м —  $10^4$  лет,

$D > 1$  км —  $10^6$  лет,

$D > 10$  км —  $10^8$  лет.

Если  $D > 1$  км, возможна глобальная катастрофа,  
сопоставимая с полномасштабной ядерной войной.

# АПОФИС — ОДИН ИЗ САМЫХ ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ

- Открытие — июнь, 2004. Диаметр — 270 метров.
- Наблюдения Апофиса с поверхности Земли будут возможны только в 2012-2013 г.
- 13 апреля 2029 г. Апофис сблизится с Землей на расстояние 37–38 тысяч километров.
- Возможно соударение Апофиса с Землей 13 апреля 2036 г. Вероятность столкновения порядка  $10^{-5}$  или меньше.
- **Наша цель — нахождение возможных соударений Апофиса с Землей после 2036 года.**

# ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ АПОФИСА

- Рассеяние возможных траекторий астероидов после сближения с планетами ведет к потере точности.
- Разница минимальных геоцентрических расстояний в 2029 году в 1 км соответствует разнице этих минимальных геоцентрических расстояний в 2036 году в 30 тысяч км.
- После тесного сближения Апофиса с Землей в 2036 году возможен его переход на различные резонансные орбиты, включая орбиты соударения.

Таблица: [Рассеяние возможных траекторий Апофиса. Минимальные геоцентрические расстояния \(км\)](#)

	2029	2036	2040
траектория 1	36835.12	101213.68	110184.27
траектория 2	36835.15	99830.42	5709944.81

# СЛУЧАЙ АПОФИСА НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫМ

Апофис демонстрирует важное свойство траекторий АСЗ, которое может быть типичным для опасных объектов. Перед соударением с планетой обычно имеют место сближения с ней, поскольку сближения более вероятны, чем соударения. Вероятность сближения, имеющего прицельное геоцентрическое расстояние менее  $d$ , для неизвестного астероида растет с  $d$  как  $d^2$ .

# ПОИСК ВОЗМОЖНЫХ СОУДАРЕНИЙ, ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Используется метод точечных гравитационных сфер. При „соударении“ происходит мгновенный поворот вектора кеплеровой планетоцентрической скорости и соответствующее преобразование кеплеровой гелиоцентрической орбиты.

$$\vec{V} \Rightarrow \vec{W} \Rightarrow \vec{W}' \Rightarrow \vec{V}',$$

$$|\vec{W}| = |\vec{W}'|, \quad \vec{V} = \vec{U} + \vec{W}, \quad \vec{V}' = \vec{U} + \vec{W}'.$$

$\vec{V}$  — гелиоцентрическая скорость астероида,  $\vec{W}$  — планетоцентрическая скорость астероида,  $\vec{U}$  — гелиоцентрическая скорость планеты.

# ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ОРБИТЫ СОУДАРЕНИЯ АПОФИСА С ЗЕМЛЕЙ ПОСЛЕ 2036 ГОДА

год	резонансы
2037	1/1
2038	1/2, 3/2
2039	2/3, 4/3
2040	3/4, 5/4
2041	3/5, 4/5, 6/5, 7/5
2042	5/6, 7/6
2043	3/7, 4/7, 5/7, 6/7, 8/7, 9/7, 10/7, 11/7
2044	5/8, 7/8, 9/8, 11/8
2045	4/9, 5/9, 7/9, 8/9, 10/9, 11/9, 13/9, 14/9
2046	7/10, 9/10, 11/10, 13/10
2047	5/11, 6/11, 7/11, 8/11, 9/11, 10/11, 12/11, 13/11, 14/11, 15/11, 16/11, 17/11
2048	5/12, 7/12, 11/12, 13/12, 17/12, 19/12
2049	6/13, 7/13, 8/13, 9/13, 10/13, 11/13, 12/13, 14/13, 15/13, 16/13, 17/13, 18/13, 19/13, 20/13
2050	9/14, 11/14, 13/14, 15/14, 17/14, 19/14
2051	7/15, 8/15, 11/15, 13/15, 14/15, 16/15, 17/15, 19/15, 22/15, 23/15
2052	7/16, 9/16, 11/16, 13/16, 15/16, 17/16, 19/16, 21/16, 23/16, 25/16

# ПОИСК ВОЗМОЖНЫХ СОУДАРЕНИЙ АПОФИСА С ЗЕМЛЕЙ, ЧИСЛЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ, ИНТЕГРАТОР

Используется интегратор Эверхарта, модель движения планет DE405, барицентрическая экваториальная система координат, эпоха J2000.0, двойная точность (16 десятичных знаков).



# ПОИСК ВОЗМОЖНЫХ СОУДАРЕНИЙ АПОФИСА С ЗЕМЛЕЙ, ЧИСЛЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ, МЕТОД

Точность прямого численного интегрирования недостаточна для исследования третьего тесного сближения. Области начальных условий в 2006 году, соответствующие соударениям после 2036 года, имеют размеры порядка сантиметра и меньше. Однако если транспортировать эти области вдоль траекторий из 2006 года в 2035 год (например), миллиметровые размеры трансформируются в километровые. В новой большой области начальных данных поиск и исследование траекторий соударения и минимальных геоцентрических расстояний не вызывает принципиальных трудностей.

Для выделения опасных траекторий варьируются начальные данные Апофиса в 2006 и 2035 годах. Достаточно менять только одну переменную (среднее движение, или большую полуось, или, например, одну из координат).

# ВОЗМОЖНЫЕ СОУДАРЕНИЯ АПОФИСА С ЗЕМЛЕЙ

Таблица: Минимальные геоцентрические расстояния

год	$r_{min}$ ( $10^3$ км)	$\Delta a_0$ (м)
2040	2.8	-18
2041	5.7	-35
2041	5.5	-7
2042	2.9	-84
2044	6.2	128
2045	5.0	-25
2047	3.0	-5
2051	2.0	29
2053	3.0	92
2059	0.4	22
2059	5.9	-10
2062	0.05	90
2064	2.5	5
2077	5.8	32
2086	0.5	18
2088	5.0	90
2095	0.03	17
2099	1.8	47
2099	0.2	47

$\Delta a_0$  — сдвиг начальной (в 2006 году) большой полуоси от значения, соответствующего соударению в 2036 году.

# ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЯ: ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, 2040, $r_{min} = 2.8 \cdot 10^3$ км

Область начальных данных на момент JD = 2464448.5 (2035), ведущая к соударению в 2040 (3/4 резонанс), имеет максимальные размеры по координатам и скоростям:

км			мм/с		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$\Delta V_z$
0.42	0.26	0.63	0.042	0.132	0.308

Минимальные геоцентрические расстояния в 2036 году, соответствующие соударению в 2040 году, расположены между 101239.55 км и 101244.62 км (в области порядка 5.1 км).

# ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЯ: ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, 2041, $r_{min} = 5.5 \cdot 10^3$ км

Область начальных данных на момент JD = 2464448.5 (2035), ведущая к соударению в 2041 (6/5 резонанс), имеет максимальные размеры по координатам и скоростям:

км			мм/с		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$\Delta V_z$
0.033	0.019	0.049	0.0035	0.011	0.0028

Минимальные геоцентрические расстояния в 2036 году, соответствующие соударению в 2041 году, расположены между 30755.59 км и 30755.97 км (в области порядка 0.38 км).

# ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЯ: ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, 2042, $r_{min} = 2.9 \cdot 10^3$ км

Область начальных данных на момент JD = 2464448.5 (2035), ведущая к соударению в 2042, имеет максимальные размеры по координатам и скоростям:

км			мм/с		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$\Delta V_z$
5.5	3.2	8.4	0.54	1.8	4.1

Минимальные геоцентрические расстояния в 2036 году, соответствующие соударению в 2042 году, расположены между 500207.77 км и 500276.79 км (в области порядка 69 км).

# ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЯ: ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, 2044, $r_{min} = 6.2 \cdot 10^3$ км

Область начальных данных на момент JD = 2464448.5 (2035), ведущая к соударению в 2044, имеет максимальные размеры по координатам и скоростям:

км			мм/с		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$\Delta V_z$
3.1	1.8	4.8	0.31	1.0	2.3

Минимальные геоцентрические расстояния в 2036 году, соответствующие соударению в 2044 году, расположены между 771479.68 км и 771519.02 км (в области порядка 39 км).

# ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЯ: ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, 2047, $r_{min} = 3.0 \cdot 10^3$ км

Область начальных данных на момент JD = 2464448.5 (2035), ведущая к соударению в 2047, имеет максимальные размеры по координатам и скоростям:

км			мм/с		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$\Delta V_z$
0.024	0.013	0.035	0.0023	0.0072	0.0202

Минимальные геоцентрические расстояния в 2036 году, соответствующие соударению в 2047 году, расположены между 20921.50 км и 20921.78 км (в области порядка 0.28 км).

# ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЯ: ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, 2051, $r_{min} = 2.0 \cdot 10^3$ км

Область начальных данных на момент JD = 2464448.5 (2035), ведущая к соударению в 2051, имеет максимальные размеры по координатам и скоростям:

км			мм/с		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta V_x$	$\Delta V_y$	$\Delta V_z$
0.32	0.19	0.49	0.031	0.103	0.209

Минимальные геоцентрические расстояния в 2036 году, соответствующие соударению в 2051 году, расположены между 163670.14 км и 163674.08 км (в области порядка 3.9 км).

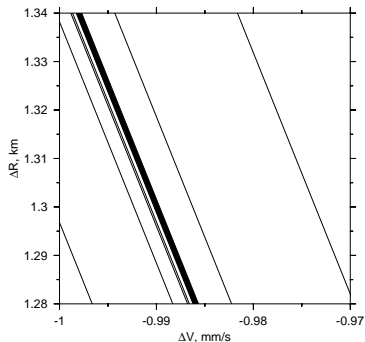
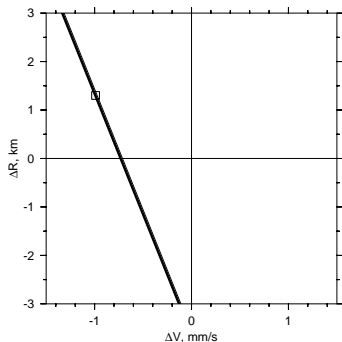


## ТРАЕКТОРИИ СОУДАРЕНИЯ: ОБЛАСТИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ, 2036, $r_{min} = 2.1 \cdot 10^3$ км

Область начальных данных, ведущая к соударению в 2036 году, имеет размеры в пространстве координат порядка:  
2006 — 3 м, 01.03.2029 — 500 м,  
01.05.2029 — 200 км, 2035 год — 1800 км.

Области начальных данных на момент 01.05.2029, ведущие к соударениям в 2040, 2041, 2042, 2044, 2047, 2051, имеют размеры примерно в 10 раз меньше, чем на JD = 2464448.5 (2035)

# НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ В 2006 ГОДУ, ВЕДУЩИЕ К СОУДАРЕНИЯМ



$\Delta R$ ,  $\Delta V$  — отклонения барицентрических расстояния и скорости.

Наклонные линии ( $a \approx const$ ) слева направо соответствуют соударениям в 2042, 2040, 2041, 2047, 2036 (темная полоса), 2051, 2044.

# Отчет-доклад НАСА

## **Deflecting a Hazardous Near-Earth Object**

### **1<sup>st</sup> IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids**

**27-30 April 2009**

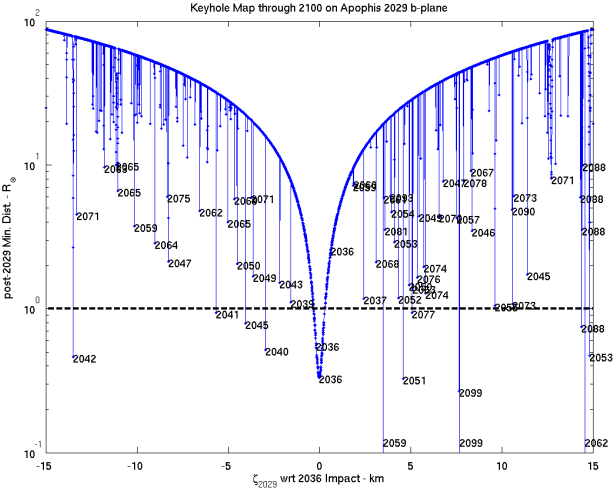
**Granada, Spain**

**D.K. Yeomans<sup>(1)</sup>, S. Bhaskaran<sup>(1)</sup>, S.B. Broschart<sup>(1)</sup>, S.R. Chesley<sup>(1)</sup>, P.W. Chodas<sup>(1)</sup>, T. H. Sweetser<sup>(1)</sup>,  
R. Schweickart<sup>(2)</sup>**

*<sup>(1)</sup>JPL/Caltech  
4800 Oak Grove Drive  
Pasadena, CA 91109, USA  
[Donald.k.yeomans@jpl.nasa.gov](mailto:Donald.k.yeomans@jpl.nasa.gov)*

*<sup>(2)</sup>B612 Foundation  
760 Fifth St. East  
Sonoma, CA 95476, USA  
[rs@well.com](mailto:rs@well.com)*

# Сближения и соударения (НАСА)



# ВЫВОДЫ

- Корректность полученных результатов.
- Устойчивость структуры возможных соударений Апофиса с Землей.
- Необходимость продолжения поисков возможных соударений.

# ЗАДАЧИ

- Повышение точности прогнозирования.
- Рассмотрение различных альтернатив, разработка сценариев и соответствующих действий в зависимости от результатов будущих наблюдений Апофиса.

Тревога не бывает ложной, тревога  
бывает учебной.

СПАСИБО