

Об орбитальной динамике астероида Апофис: предсказуемость движения и резонансы

Смирнов Е.А.
ГАО РАН

27 сентября 2010 г.

99942 Апофис

- 19 июня 2004 года в Kitt Peak Observatory (Аризона) был открыт астероид, получивший кодовое имя 2004 MN4.
- По начальным расчётам его орбита пересекала орбиту Земли, и существовала возможность столкновения в апреле 2029 года.
- После дополнительных наблюдений возможность соударения в 2029 году была исключена.
- 19 июля 2005 года после уточнения и определения орбиты астероиду было присвоено имя "Апофис".
- В 2004 году, когда орбита не была уточнена, "Апофису" был присвоен рекордный уровень опасности – 4. Впоследствии уровень был снижен до 1¹.

¹<http://neo.jpl.nasa.gov/news/news146.html>

99942 Апофис

- 19 июня 2004 года в Kitt Peak Observatory (Аризона) был открыт астероид, получивший кодовое имя 2004 MN4.
- По начальным расчётам его орбита пересекала орбиту Земли, и существовала возможность столкновения в апреле 2029 года.
- После дополнительных наблюдений возможность соударения в 2029 году была исключена.
- 19 июля 2005 года после уточнения и определения орбиты астероиду было присвоено имя “Апофис”.
- В 2004 году, когда орбита не была уточнена, “Апофису” был присвоен рекордный уровень опасности – 4. Впоследствии уровень был снижен до 1¹.

¹<http://neo.jpl.nasa.gov/news/news146.html>

99942 Апофис

- 19 июня 2004 года в Kitt Peak Observatory (Аризона) был открыт астероид, получивший кодовое имя 2004 MN4.
- По начальным расчётам его орбита пересекала орбиту Земли, и существовала возможность столкновения в апреле 2029 года.
- После дополнительных наблюдений возможность соударения в 2029 году была исключена.
- 19 июля 2005 года после уточнения и определения орбиты астероиду было присвоено имя “Апофис”.
- В 2004 году, когда орбита не была уточнена, “Апофису” был присвоен рекордный уровень опасности – 4. Впоследствии уровень был снижен до 1¹.

¹<http://neo.jpl.nasa.gov/news/news146.html>

99942 Апофис

- 19 июня 2004 года в Kitt Peak Observatory (Аризона) был открыт астероид, получивший кодовое имя 2004 MN4.
- По начальным расчётам его орбита пересекала орбиту Земли, и существовала возможность столкновения в апреле 2029 года.
- После дополнительных наблюдений возможность соударения в 2029 году была исключена.
- 19 июля 2005 года после уточнения и определения орбиты астероиду было присвоено имя “Апофис”.
- В 2004 году, когда орбита не была уточнена, “Апофису” был присвоен рекордный уровень опасности – 4. Впоследствии уровень был снижен до 1¹.

¹<http://neo.jpl.nasa.gov/news/news146.html>

99942 Апофис

- 19 июня 2004 года в Kitt Peak Observatory (Аризона) был открыт астероид, получивший кодовое имя 2004 MN4.
- По начальным расчётам его орбита пересекала орбиту Земли, и существовала возможность столкновения в апреле 2029 года.
- После дополнительных наблюдений возможность соударения в 2029 году была исключена.
- 19 июля 2005 года после уточнения и определения орбиты астероиду было присвоено имя “Апофис”.
- В 2004 году, когда орбита не была уточнена, “Апофису” был присвоен рекордный уровень опасности – 4. Впоследствии уровень был снижен до 1¹.

¹<http://neo.jpl.nasa.gov/news/news146.html>



Физические характеристики

- Радиус: 120 м
- Эксцентриситет: 0.19
- Наклонение: 3.33°
- Большая полуось: 0.922 а.е.
- Период: 0.886 лет
- Среднее движение: $1.113^\circ/\text{дн.}$

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} &= -k^2(1+m)\frac{x}{r^3} + \sum_i k^2 m_i \left(\frac{x_i - x}{\Delta_i^3} - \frac{x_i}{r_i^3} \right) \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -k^2(1+m)\frac{y}{r^3} + \sum_i k^2 m_i \left(\frac{y_i - y}{\Delta_i^3} - \frac{y_i}{r_i^3} \right) \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -k^2(1+m)\frac{z}{r^3} + \sum_i k^2 m_i \left(\frac{z_i - z}{\Delta_i^3} - \frac{z_i}{r_i^3} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь масса Солнца принята за единицу, m, x, y, z — масса и координаты возмущаемого тела, m_i, x_i, y_i, z_i — массы и координаты возмущаемых тел, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $\Delta_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2$, $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$, k — гауссова постоянная.

Чтобы оценить вычислительные ошибки, мы реализовали четыре метода:

- Метод Йошиды 8 порядка
- Предиктор–корректор 8 порядка
- Метод Эрмита 4 и 6 порядков
- Метод Эверхарта 15 порядка

Чтобы оценить вычислительные ошибки, мы реализовали четыре метода:

- Метод Йошиды 8 порядка
- Предиктор–корректор 8 порядка
- Метод Эрмита 4 и 6 порядков
- Метод Эверхарта 15 порядка

Чтобы оценить вычислительные ошибки, мы реализовали четыре метода:

- Метод Йошиды 8 порядка
- Предиктор–корректор 8 порядка
- Метод Эрмита 4 и 6 порядков
- Метод Эверхарта 15 порядка

Чтобы оценить вычислительные ошибки, мы реализовали четыре метода:

- Метод Йошиды 8 порядка
- Предиктор–корректор 8 порядка
- Метод Эрмита 4 и 6 порядков
- Метод Эверхарта 15 порядка

Численное интегрирование

Почему Ruby?

- динамическая типизация
- кросс-платформенность
- расширяемость за счёт библиотек
- понятность кода
- графический интерфейс²

²Например, `ruby-tk`, `ruby-gtk`, `ruby-cocoa`

Название	Значение
a	0.92233990112 а.е.
e	0.19111029766
i	$3^{\circ}.331735918309$
ϖ	$126^{\circ}.4186169939$
Ω	$204^{\circ}.4320062354$
M	$202^{\circ}.4952515361516$

Таблица: Начальные данные на $JD = 2455400.5$ (NASA, 2010)

Мы проводили интегрирование уравнений движения астероида Апофис, используя следующую модель:

- Гелиоцентрическая экваториальная прямоугольная система координат
- Эфемериды DE405
- Учитывались возмущения от всех планет и Плутона
- Учитывалась несферичность Земли до второго порядка
- Не учитывался эффект Ярковского, хотя его влияние не исключается

Мы проводили интегрирование уравнений движения астероида Апофис, используя следующую модель:

- Гелиоцентрическая экваториальная прямоугольная система координат
- Эфемериды DE405
- Учитывались возмущения от всех планет и Плутона
- Учитывалась несферичность Земли до второго порядка
- Не учитывался эффект Ярковского, хотя его влияние не исключается

Мы проводили интегрирование уравнений движения астероида Апофис, используя следующую модель:

- Гелиоцентрическая экваториальная прямоугольная система координат
- Эфемериды DE405
- Учитывались возмущения от всех планет и Плутона
- Учитывалась несферичность Земли до второго порядка
- Не учитывался эффект Ярковского, хотя его влияние не исключается

Мы проводили интегрирование уравнений движения астероида Апофис, используя следующую модель:

- Гелиоцентрическая экваториальная прямоугольная система координат
- Эфемериды DE405
- Учитывались возмущения от всех планет и Плутона
- Учитывалась несферичность Земли до второго порядка
- Не учитывался эффект Ярковского, хотя его влияние не исключается

Мы проводили интегрирование уравнений движения астероида Апофис, используя следующую модель:

- Гелиоцентрическая экваториальная прямоугольная система координат
- Эфемериды DE405
- Учитывались возмущения от всех планет и Плутона
- Учитывалась несферичность Земли до второго порядка
- Не учитывался эффект Ярковского, хотя его влияние не исключается

Для проверки результатов, полученных методами численного интегрирования, использовались следующие методы:

- Интегрирование вперёд-назад по времени
- Интегрирование модельных задач: задачи двух тел, ограниченной задачи трёх тел с известным теоретическим решением
- Интегрирование модельной задачи N-тел (Солнечная система)

Для проверки результатов, полученных методами численного интегрирования, использовались следующие методы:

- Интегрирование вперёд-назад по времени
- Интегрирование модельных задач: задачи двух тел, ограниченной задачи трёх тел с известным теоретическим решением
- Интегрирование модельной задачи N-тел (Солнечная система)

Для проверки результатов, полученных методами численного интегрирования, использовались следующие методы:

- Интегрирование вперёд-назад по времени
- Интегрирование модельных задач: задачи двух тел, ограниченной задачи трёх тел с известным теоретическим решением
- Интегрирование модельной задачи N-тел (Солнечная система)

Для задачи двух тел при шаге 0.01 для 1000 итераций разность значений полной энергии до и после интегрирования составила:

Метод	Разность
ПК-8	$5.61 \cdot 10^{-10}$
Йошиды	$9.77 \cdot 10^{-15}$
Паркера-Сочаки	$4.23 \cdot 10^{-13}$
Эрмита	$6.23 \cdot 10^{-6}$

Также нами рассматривалась задача трёх тел (плоское периодическое движение трёх тел по “восьмёрке”, $G = M = 1$).

$$x_1 = -0.97000436, y_1 = 0.24308753,$$

$$x_2 = -x_1, y_2 = -y_1,$$

$$x_3 = 0, y_3 = 0$$

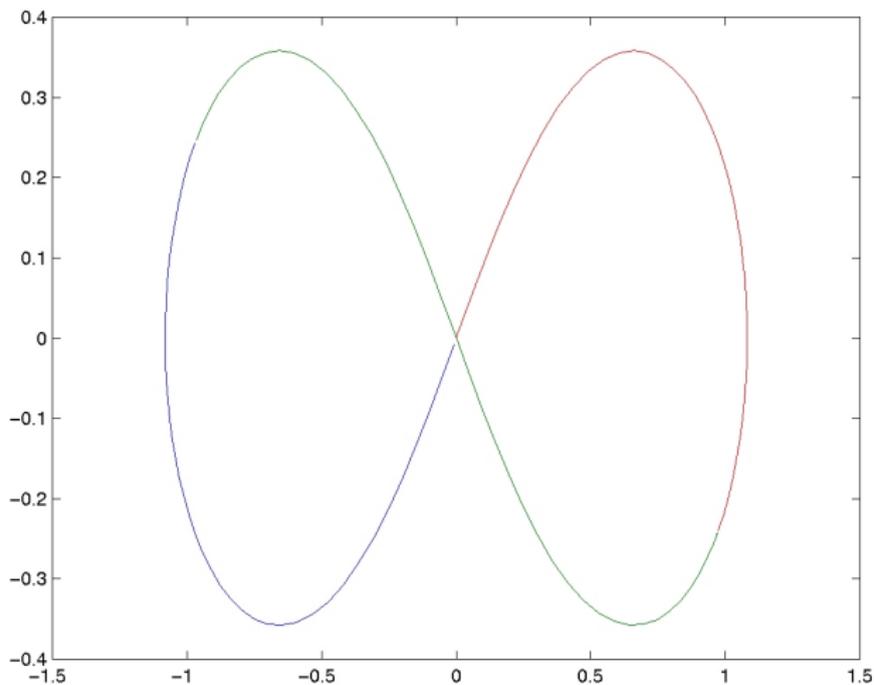
$$v_{x_1} = v_{x_2} = -v_{x_3}/2,$$

$$v_{y_1} = v_{y_2} = -v_{y_3}/2$$

$$v_{x_3} = 0.93240737, v_{y_3} = 0.86473146$$

Апофис

Модельная задача трёх тел



Интегратор	Порядок	Время (с)
Эрмита	4	1.10
Рунге–Кутты	4	0.94
Йошиды	8	5.02
ПК-8	8	3.70
Эверхарта	15	67.2
Эрмита*	4	10.44
Рунге–Кутты*	4	8.81

Таблица: Скорость работы интеграторов при одинаковом шаге интегрирования

Апофис

Расстояние между Землёй и Апофисом

Метод	Расстояние (а.е.)	Расстояние (км)
Эрмита 6	0.00025603283	38300 ± 1800
Йошиды 8	0.00025476945	38113 ± 1290
ПК-8	0.00025498335	38145 ± 1420
Эверхарта	0.00025555822	37650 ± 3490

Таблица: Минимальное расстояние между центром Земли и Апофисом 13 апреля 2029 года, с ошибкой 3σ , доверительная вероятность 95%

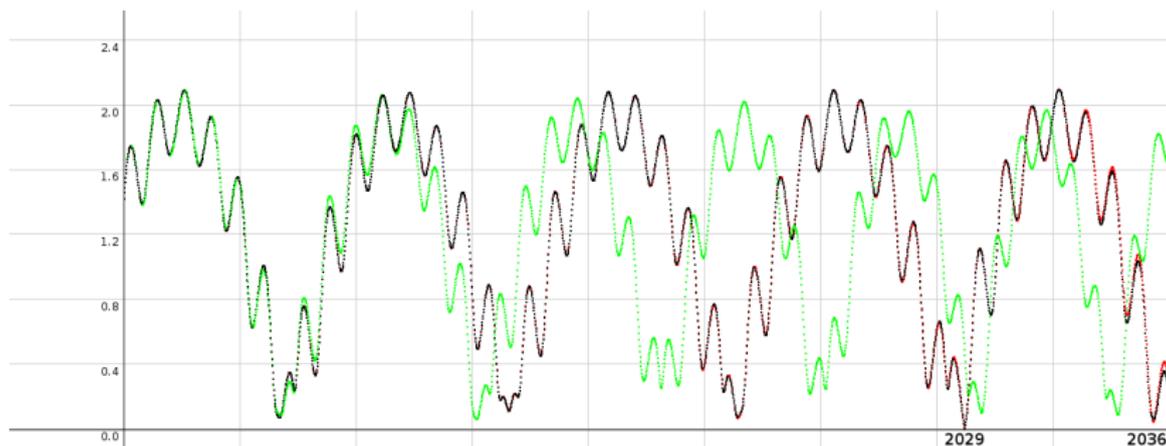
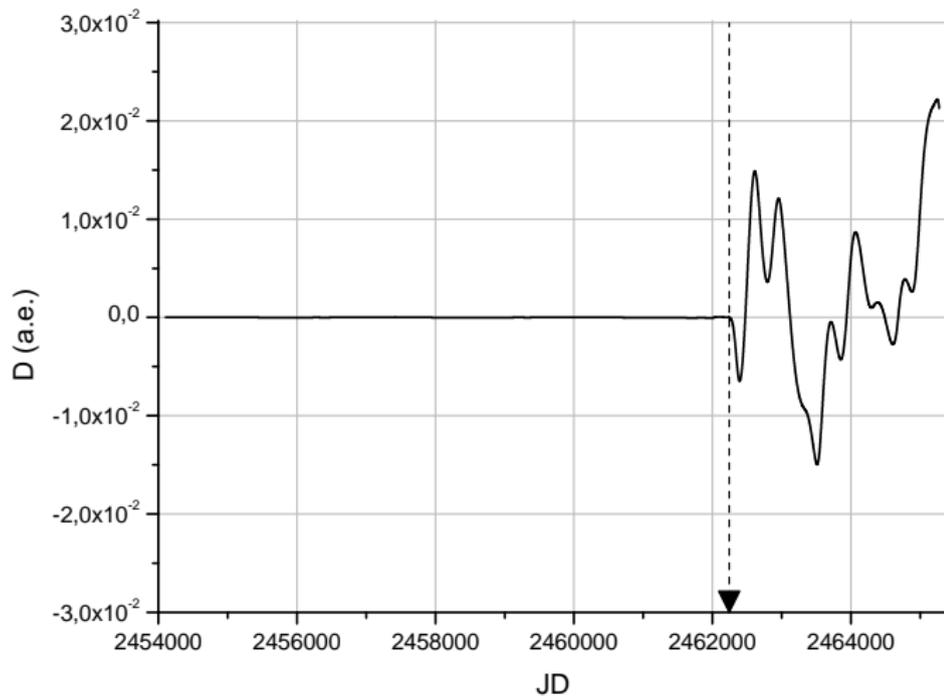
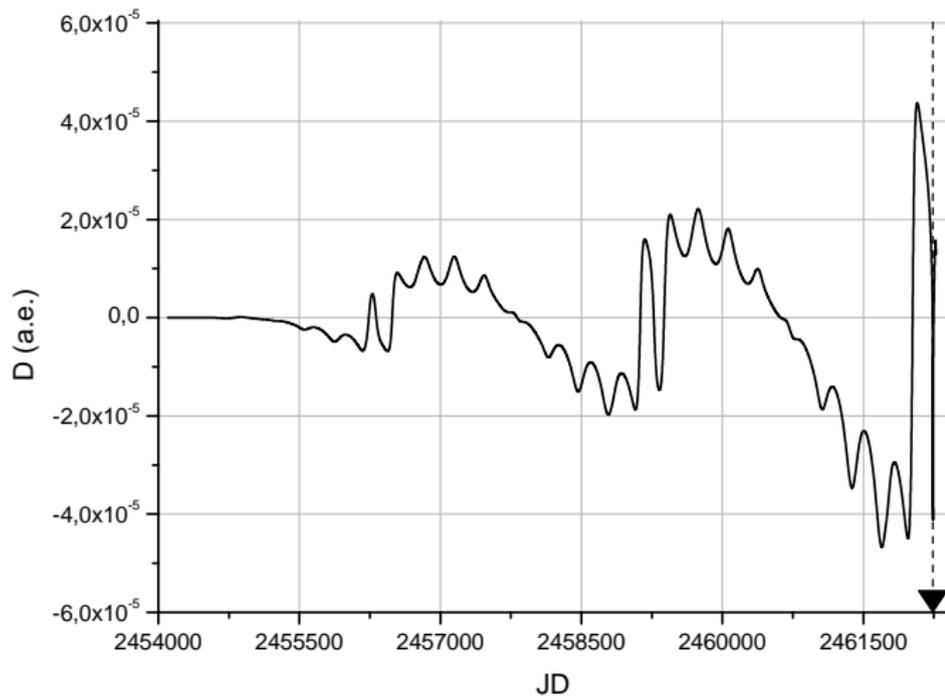


Рис.: Зелёная линия — метод Рунге–Кутты, чёрная — метод Йошиды, красная — ПК-8





Дата сближения	a (а.е.)	Расстояние (км)
2036.4.13.35881	0,9223398648	1360
2037.4.13.65132	0,9223400472	3402
2038.4.13.96329	0,9223402057	7990
2042.4.12.98387	0,9223406409	67937
2046.4.13.31502	0,9223401205	51
2049.4.13.20936	0,9223397906	21351
2051.4.14.11641	0,9223399286	8714
2056.4.14.04911	0,9223398232	172833

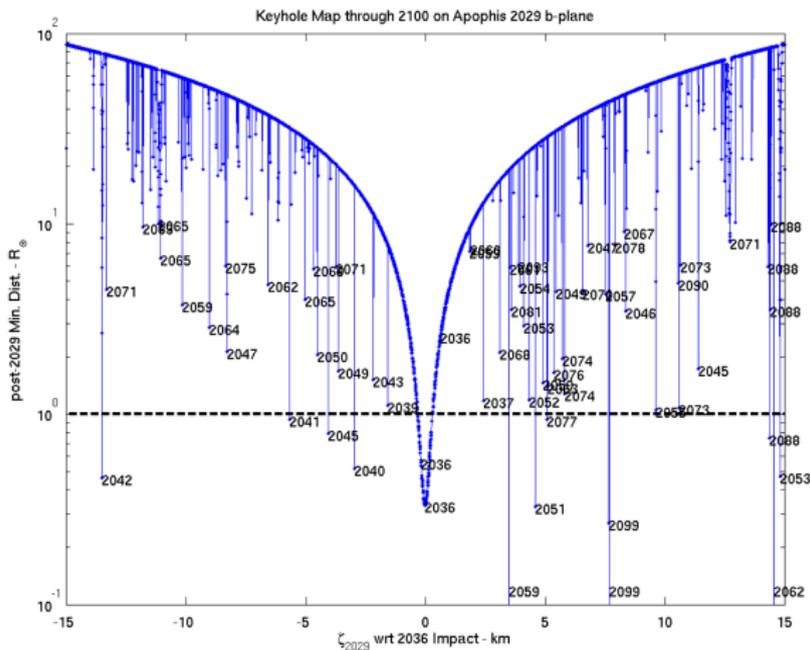


Рис.: Диаграмма “замочных скважин” для сближения 2036 года и последующих (D.K. Yeomans et al., 2009).

- 1 Различными методами вычислено минимальное расстояние между астероидом Апофис и Землёй 13 апреля 2029 года. Оно составило 38113 ± 1290 км, 38145 ± 1420 км, 38300 ± 1800 км и 37650 ± 3490 км для методов Йошиды, ПК-8, Эрмита и Эверхарта, соответственно.
- 2 Рассчитаны возможные сближения и соударения Апофиса с Землёй до 2056 года. Для каждого сближения определена область начальных данных, ведущая к сближению либо соударению.

- 1 Различными методами вычислено минимальное расстояние между астероидом Апофис и Землёй 13 апреля 2029 года. Оно составило 38113 ± 1290 км, 38145 ± 1420 км, 38300 ± 1800 км и 37650 ± 3490 км для методов Йошиды, ПК-8, Эрмита и Эверхарта, соответственно.
- 2 Рассчитаны возможные сближения и соударения Апофиса с Землёй до 2056 года. Для каждого сближения определена область начальных данных, ведущая к сближению либо соударению.

Автор приносит благодарность О.М. Кочетовой, Л.Л. Соколову, И.И. Шевченко и В.А. Шору за замечания и комментарии к работе.