

Об использовании эффекта гравитационного маневра для предотвращения соударений астероида с Землей

Соколов Леонид Леонидович

Санкт-Петербургский государственный университет

21 марта 2018 г.

2.06 опасных астероидах

На постоянно обновляемом сайте НАСА [cneos.jpl.nasa.gov /centry/](http://cneos.jpl.nasa.gov/centry/) регулярно появляются новые опасные астероиды размером 300-500 метров, с возможными соударениями через несколько лет, сейчас - в 2020-х годах. К счастью, они пока "летят мимо".

3. Об астероиде 2017 YZ1

Астероид 2017 YZ1 был открыт 20 декабря 2017 года. 6 января 2018 года он имел 1 по Туинской шкале (зеленый на сайте НАСА), -1.91 по Палермской шкале, размер 260 метров, основное соударение в 2047 году с вероятностью $2 \cdot 10^{-4}$. 13 января 2018 года он имел 0 по Туинской шкале, -3.3 по Палермской шкале, т.е. перестал быть особо опасным.

4. Об астероиде 2017 XO2

Астероид 2017 XO2 был открыт 10 декабря 2017 года. 21 января 2018 года он имел 1 по Туинской шкале (зеленый на сайте НАСА), -2.09 по Палермской шкале, размер 110 метров, основное соударение в 2057 году с вероятностью $3.3 \cdot 10^{-4}$. 29 января астероид перестал быть опасным после того как нашли его наблюдения в 2011 году и уточнили его орбиту.

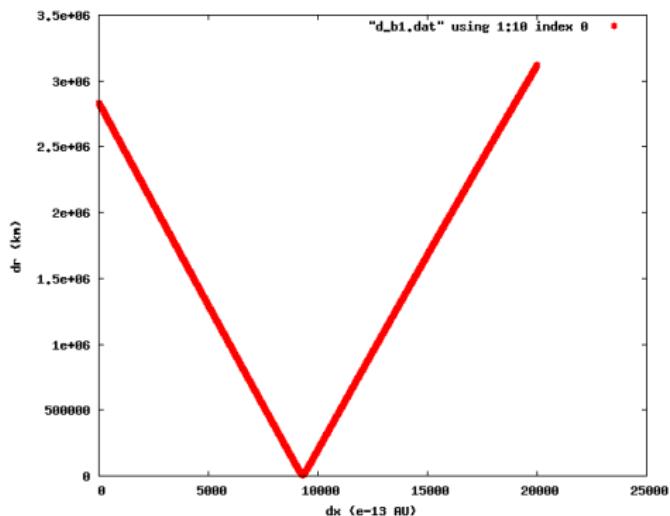
5. Необходимо знать возможные соударения с Землей опасных астероидов

Трудности поиска возможных соударений связаны с предыдущими сближениями и резонансными возвратами, ведущими к сближениям и соударениям с потерей точности прогнозирования.

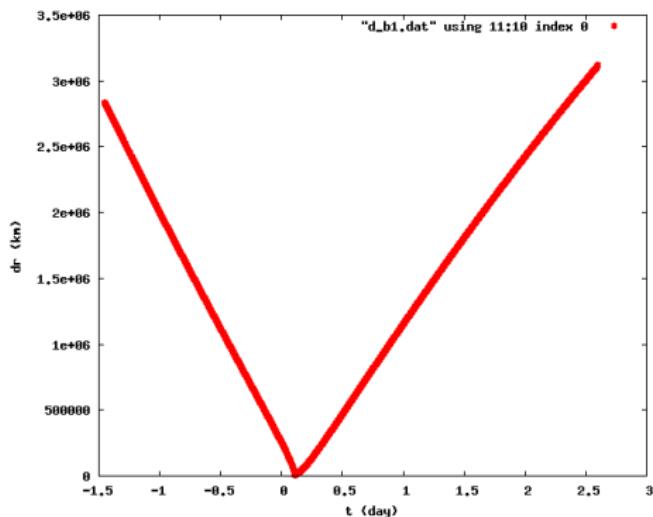
6. Наши методы поиска соударений

Интегратор Эверхарта, модели Солнечной системы DE405, DE430 (и другие). Основные характеристики траекторий соударений устойчивы относительно малых изменений модели движения. Варьируется одна координата. Ищутся минимумы геоцентрического расстояния $r(t, x)$. Первый этап - минимумы по t для каждого x_i . Второй этап - уточнение минимумов по x в окрестности минимумов, найденных на первом этапе. Третий этап - второй этап с "начальными данными" в позднюю эпоху для компенсации потери точности при тесных сближениях. При вычислениях использовался компьютерный кластер Санкт-Петербургского государственного университета.

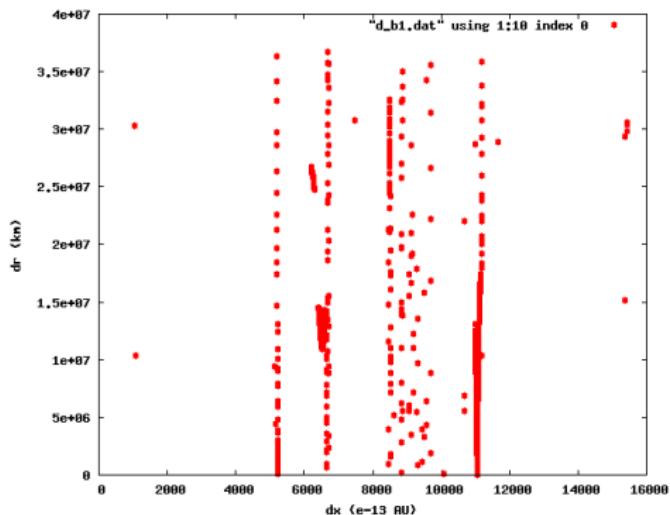
7. Цепочки, Апофис, координата, соударение в 2051 г.



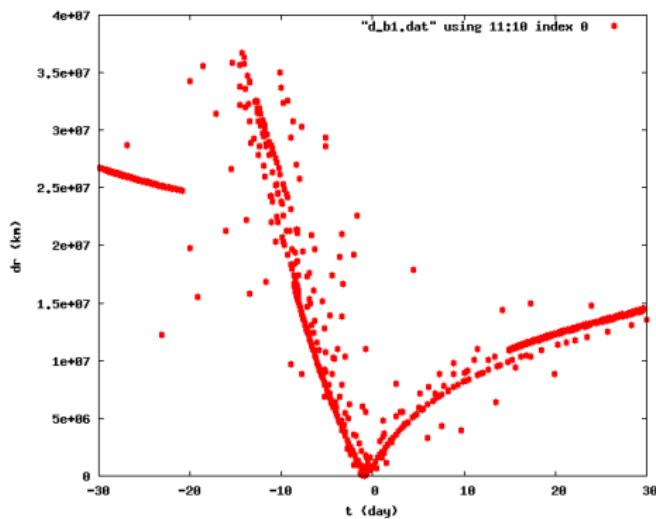
8. Цепочки, Апофис, время, соударение в 2051 г.



9. Цепочки, Апофис, координата, соударение в 2076 г.



10. Цепочки, Апофис, время, соударение в 2076 г.



11. Рассматривались возможные соударения с Землей астероидов Апофис, 2015 RN35, 2013 XK22, 2008 EX5

Для всех исследованных астероидов нами найдено существенно (на порядок) больше возможных соударений, чем приводится на сайте НАСА (или NEODyS). Основные соударения совпадают. Большое число соударений позволяет "увидеть" фрактальную структуру.

12. Опасный астероид Апофис

Открыт летом 2004 года в США. Диаметр около 300 метров. В конце 2004 года вероятность его соударения с Землей 13.04.2029 достигала 3 процентов. В настоящее время минимальное геоцентрическое расстояние оценивается в $38 \cdot 10^3$ км. Это тесное сближение вызывает многочисленные резонансные возвраты, включая возможные соударения. Самое опасное - в 2068 г., вероятность его оценивается в $6.7 \cdot 10^{-6}$. Важную роль играет также возможное сближение в 2051 г.

13. Опасный астероид 2008 EX5

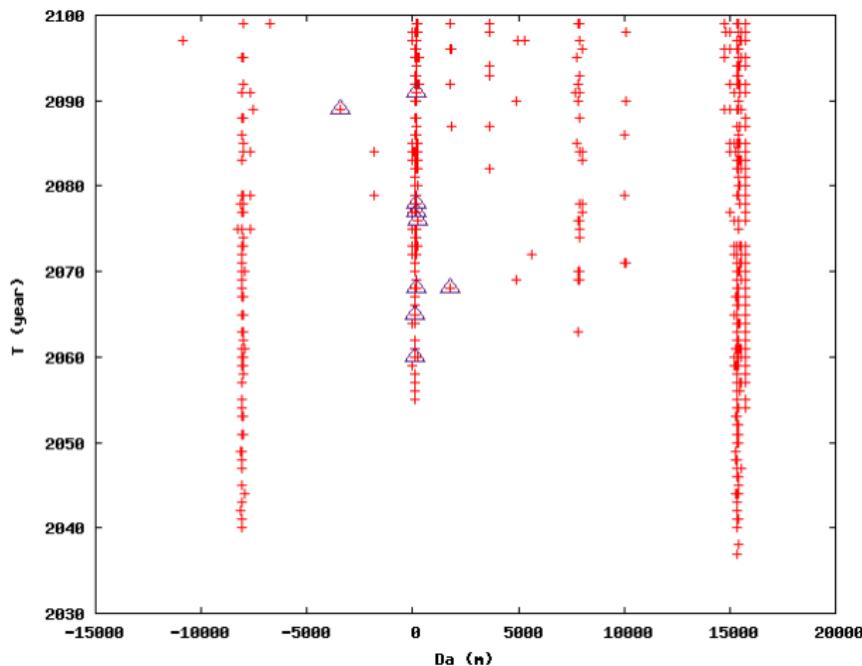
Открыт 4 марта 2008 года на расстоянии 0.1 а.е. от Земли, при сближении 1 ноября 2015 года на то же расстояние наблюдений не получено. Оценка диаметра 44-110 метров. Точность большой полуоси $2 \cdot 10^{-4}$ а.е. На сайте НАСА приведено 16 возможных соударений в 21 веке, основные - в 2072 и 2083 гг., их вероятности порядка $2 \cdot 10^{-5}$. Нами получено более 100 возможных соударений в текущем столетии, начиная с 2059 года, а также 12 возможных соударений с Луной.

14. Основные характеристики соударений

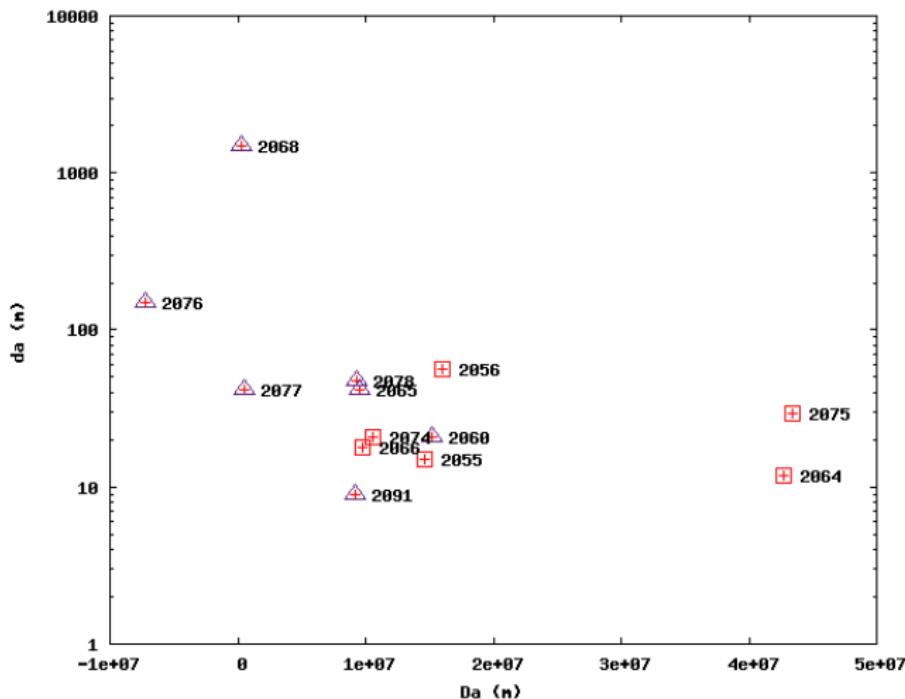
- Дата и момент соударения
- Положение ведущей к соударению щели
- Размер ведущей к соударению щели
- Минимальное геоцентрическое расстояние

Положение щели - относительное значение оскулирующей большой полуоси в некоторый момент.
Размер щели - диапазон ведущих к соударению значений большой полуоси в данный момент.

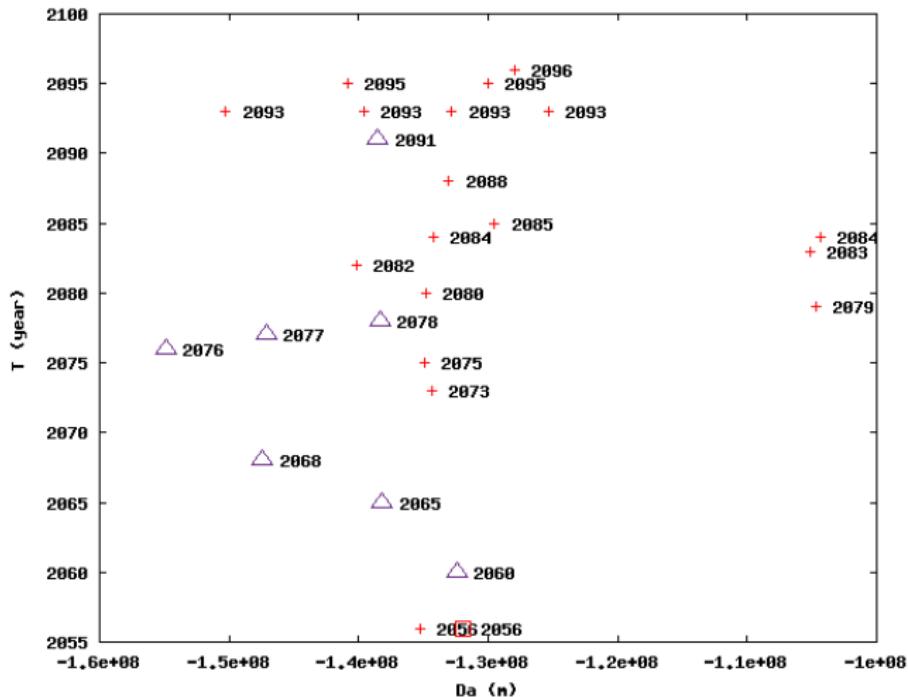
15. Соударения виртуального Апофиса (относительные положения щелей и даты)



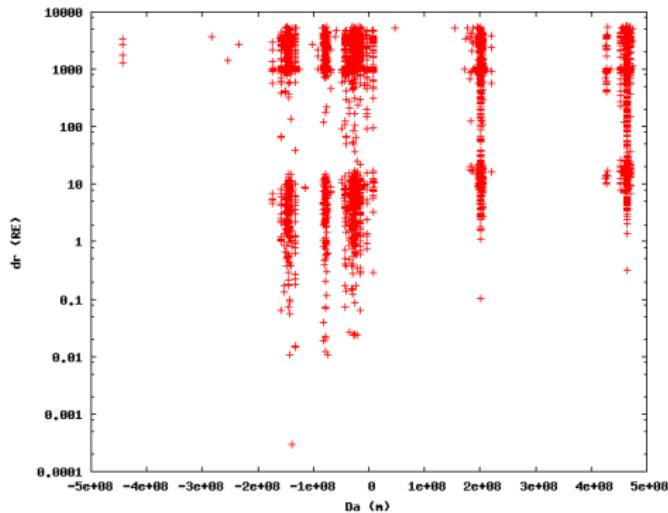
16. Соударения Апофиса вблизи номинальной орбиты



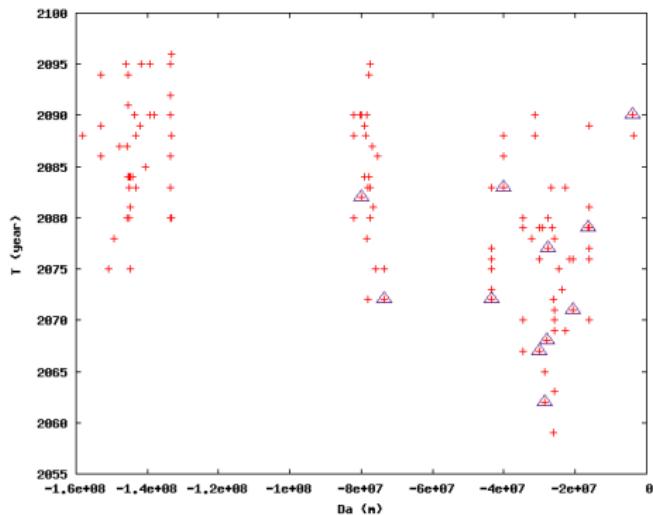
17. Соударения Апофиса с Луной



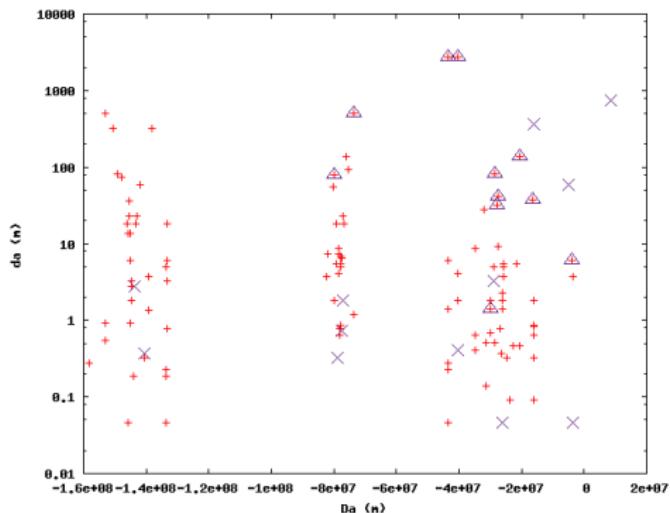
18. Сближения 2008 EX5 с Землей (положения и расстояния)



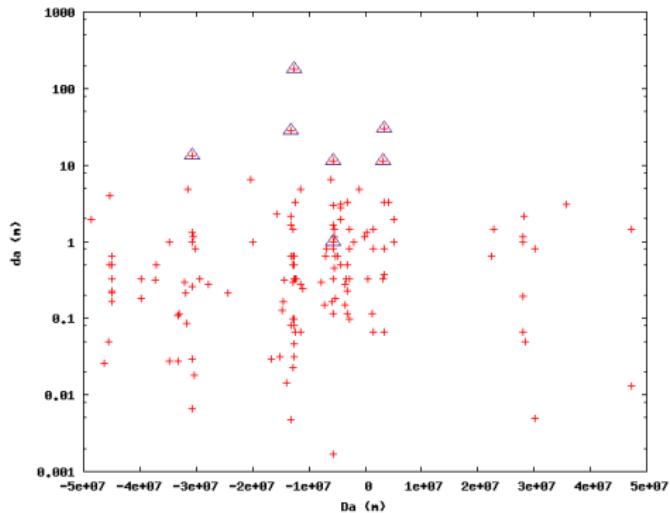
19. Соударения 2008 EX5 с Землей (положения и время)



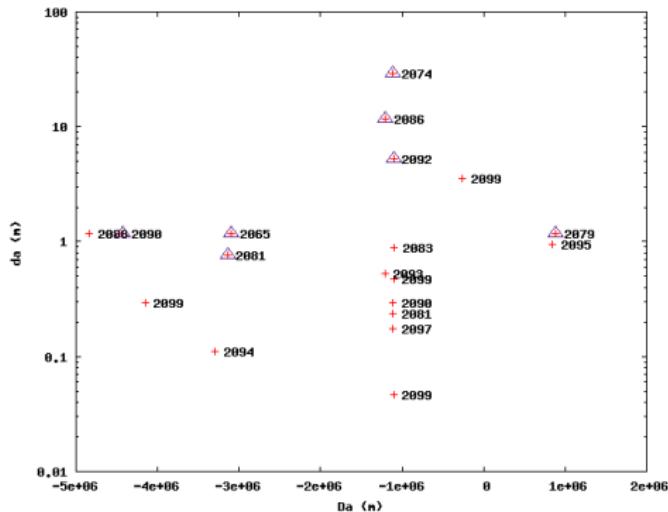
20. Соударения 2008 EX5 с Землей и Луной (положения и размеры щелей)



21. Соударения 2015 RN35 с Землей, положения и размеры щелей, 1-й этап наблюдений



22. Соударения 2015 RN35 с Землей, положения и размеры щелей, 2-й этап наблюдений



23. Рассеяния возможных траекторий астероидов

Рассеяния происходят при сближениях с планетами. Почему важно это исследовать?

- Соударение - частный случай сближения
- Сближение астероида с Землей предоставляет возможности для наблюдений
- Рассеяние траекторий связано с потерей точности прогнозирования
- Рассеяние ведет к резонансным возвратам и соударениям в будущем
- Эффект рассеяния – для увода от соударений

24. Методы предотвращения соударений

Отклонение. Разрушение

- Удар (кинетический метод)
- Взрыв (в т.ч. ядерный)
- Двигатель малой тяги
- "Гравитационный трактор"
- Солнечный парус
- Окраска

Два первых метода сейчас считаются более перспективными.

25. Энергетическая проблема. Эффект гравитационного маневра

Для небольших (менее 50 метров) астероидов предотвращение соударений не обяжательно. Для астероидов размером в несколько сотен метров отклонение кинетическим методом встречается с принципиальными трудностями энергетического характера. Элементарные оценки порядков величин показывают, что отклонение на радиус Земли с использованием ударника массой 1 тонна достигается для астероида размером в 50 метров за 5 лет, 100 метров - за 40 лет, 200 метров - за 300 лет, Апофиса - за 2 тысячи лет. Воздействие ядерным взрывом лишено энергетических трудностей, но есть другие очевидные серьезные проблемы. Очевидна идея использовать эффект гравитационного маневра в сочетании с кинетическим методом. Вопрос - есть ли "маневры"?

Asteroid Deflection Requirements as a Function of Warning Time
 M. E. Loucks¹, J. P. Carrico², E.T. Lu³ and Clark R. Chapman⁴

B612

Introduction: Understanding the “delta-v” (ΔV) requirements to deflect an asteroid on a collision course with Earth is critical to planetary defense. The required change in velocity (ΔV) depends on the time available from an Earth impact trajectory ($t = 3.56/2\pi$ m/s where t is the lead time in years [1]). The actual ΔV required will vary greatly from the mean, depending upon the presence of a preceding planetary close approach and on the nature of the impactor’s orbital elements. In this presentation we investigate the distributions of ΔV required to prevent asteroid impacts as a function of the time the impact is applied before impact. We have built a cloud-based simulation architecture to allow us to investigate problems such as this requiring large numbers of asteroid orbit propagations.

Description of Method: We start with the population of 20,000 virtual impactors defined by Chesley and Spahr [2]. These virtual impactors represent the Earth-impacting subset of a larger total virtual asteroid population. These data include the heliocentric orbital elements for the asteroids 30 days prior to their impact. The orbital elements are back propagated in time to create a set of virtual impactor orbits each with greater than 100 years until impact.

Solar System Modeling: The B612 Foundation, in cooperation with Analytical Graphics Inc. (AGI), is creating a cloud-based asteroid propagation capability based on AGI’s Systems Tool Kit (STK) and Google’s cloud-based computing architecture. This capability will be used to perform comparisons with the JPL Horizons propagator. This capability will make analysis of synthetic asteroid populations and potential impact much easier, and allow for the quick generation of these populations. Through a planned web-based API, the system can become ubiquitous as well as available to external analysis tools.

Using this toolset, we can create ΔV profiles for individual asteroids over time (see Figure 1). Each such “profile” shows the required ΔV to deflect an impacting asteroid from impact in a 10 Earth radius flyby.

This new capability allows us to easily investigate the deflection requirements characteristics of portions of a given population at all different warning times. Figure 2 shows a histogram of deflection ΔV 30 years before impact for a sample of 2000 synthetic asteroids.

References:

- [1] Grins, A., Wetherill, G. B., O’Bryan, D., and Bourke, A., Deflecting NEOs via Planetary Flybys, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 42, No. 1, 2005.
- [2] Chesley, S.R., and Spahr, T.M., Earth Impact Vectors: Orbital Deterministic and Warning Times, *Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids*, editors Bellot, N.U., et al., Cambridge University Press, 22-37 (2004).

Figure 1. Histogram of deflection ΔV required to create a 10 Earth radius flyby rather than an impact when deflection is applied 30 years prior to impact.

Figure 2. Histogram of deflection ΔV required to create a 10 Earth radius min distance rather than an impact when deflection is applied 30 years prior to impact.

Figure 3. Selection of cases with increasing close approaches. From the 20,000 simulated impactor cases, 510 had a planetary trajectory defined as close approach within a radius of 1.1 Earth radii to impact. It only includes the 200 cases with the most of the very low ΔV cases.

27. Неустойчивость движения Апофиса

Изменение начальных (в 2006 г.) координат на 10 см ведет к изменению минимального геоцентрического расстояния в 2029 г на 20 м, в 2051 г - на 2 тыс. км, в 2068 г. - на 0.3 млн км. Точность большой полуоси Апофиса - 80 м.

28. Апофис - траектории соударения в 2068 году и их изменения

$\Delta V(km/s)$, 2020	$1.7 \cdot 10^{-12}$	$1.7 \cdot 10^{-11}$	$1.7 \cdot 10^{-10}$
$\Delta r_{min}(km)$, 2051	$1.0 \cdot 10^2$	$0.9 \cdot 10^3$	$0.7 \cdot 10^4$
$\Delta r_{min}(km)$, 2068	$0.3 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^7$

$\Delta V(km/s)$, 2035	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$
$\Delta r_{min}(km)$, 2051	$0.2 \cdot 10^2$	$0.2 \cdot 10^3$	$0.2 \cdot 10^4$
$\Delta r_{min}(km)$, 2068	$0.8 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^4$	$0.2 \cdot 10^6$

$\Delta V(km/s)$, 2050	$1.7 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$
$\Delta r_{min}(km)$, 2051	$0.6 \cdot 10^2$	$0.6 \cdot 10^3$	$0.6 \cdot 10^4$
$\Delta r_{min}(km)$, 2068	$0.4 \cdot 10^4$	$0.6 \cdot 10^5$	$0.7 \cdot 10^6$

29. Сближения 2008 EX5 с Землей на номинальной траектории, минимальные расстояния R (10^6 km)

Номинал NASA

Date	2035	2042	2050	2062	2070	2077	2085	2097
R	19.3	3.3	34.5	12.1	20.5	21.6	4.9	26.2

Номинал NEODyS

Date	2035	2042	2062	2069	2077	2089	2096
R	18.0	5.6	10.1	21.3	22.3	9.6	24.3

30. Сближения 2008 EX5 с Землей на траектории соударения в 2072 г., минимальные расстояния R (10^6 km)

Номинал NASA

Date	2027	2035	2042	2053	2065	2072
R	35.8	21.6	2.3	24.5	11.0	0.004

Номинал NEODyS

Date	2027	2035	2042	2053	2065	2072
R	36.6	21.4	2.3	24.6	10.9	0.003

31. Сближения 2008 EX5 с Землей на траектории соударения в 2083 г., минимальные расстояния R (10^6 km)

Номинал NASA

Date	2027	2035	2042	2053	2065	2072	2076	2083
R	36.0	21.4	1.858	24.2	12.4	33.9	23.6	0.003

Номинал NEODyS

Date	2027	2035	2042	2053	2065	2072	2076	2083
R	36.8	21.3	1.876	24.2	12.4	33.9	23.5	0.003

32. Рассеяние траекторий 2008 EX5, ведущих к соударениям после 2042 г.

Date T	2083	2071	2062	2074
$R_{min}(2042), 10^6 \text{ km}$	1.86	0.690	0.355	0.188
$k = \Delta R_{min}(T) / \Delta R_{min}(2042)$	5	30	150	790

33. Эффект гравитационного маневра - предварительные результаты

Видно, что для отклонения от соударения с Землей астероида 2008 EX5 возможно использование эффекта гравитационного маневра при заблаговременном кинетическом воздействии на астероид. Для астероида 2015 RN35 сближение в 2022 году также позволяет получить эффект в 2 десятичных порядка. Очевидно возможно использование эффекта гравитационного маневра для астероида Апофис.

34. О возможности увода Апофиса

Эффективность использования рассеяния для увода Апофиса от конкретного соударения отмечалась во многих работах. Однако следует учитывать также потерю точности прогнозирования и большое число возможных соударений, связанных с резонансными возвратами при рассеянии. Проведенные нами исследования показывают, что в принципе возможен увод Апофиса от всех основных соударений в текущем столетии кинетическим методом, реализуемым с учетом имеющихся технических возможностей. Момент воздействия на астероид - до сближения в 2029 г., после 2022 г. - уточнения его орбиты при сближении с Землей.

35. Последние публикации

1. Петров Н.А., Васильев А.А., Кутеева Г.А., Соколов Л.Л. О траекториях соударения астероидов 2015 RN35 и Апофис с Землей. Астрон. вестн., 2018, N4.
2. Соколов Л.Л., Петров Н.А., Васильев А.А., Кутеева Г.А., Шмыров А.С., Эскин Б.Б. О возможности увода астероида от соударений с Землей с использованием кинетического метода. Астрон. вестн., 2018, N5.
3. Соколов Л.Л., Васильев А.А., Петров Н.А., Поль В.Г., Эскин Б.Б. О возможности предотвращения соударений с учетом резонансных возвратов астероидов. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017, N4.

36. Выводы

- Актуальная задача – разработка реализуемых сценариев предотвращения соударений.
- Для многих опасных астероидов можно использовать кинетический метод отклонения от соударений в сочетании с "гравитационным маневром" , причем отклонение в принципе реализуемо.
- Необходимо тщательное исследование возможных сближений и соударений астероидов с Землей.
- Воздействие на астероид с использованием эффекта гравитационного маневра должно происходить заблаговременно, откуда следует ряд новых задач.
- Необходимы наблюдения опасных астероидов и уточнение их орбит!

Спасибо!