

опубл. 27.01.07 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуал. собств., патентам и тов. знакам. – 2007. – № 3.

**8 Тормозная система железнодорожного транспортного средства:** пат. 2317902 Российской Федерации, МПК7 В 60Т 8/58, 13/36 ; / Э. И. Галай, П. К. Рудов; С. В. Рыбаков; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № 2006107952/11 ; заявл. 13.03.06 ; опубл. 27.02.08 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуал. собств., патентам и тов. знакам. – 2008. – № 6.

**9 Тормозная система железнодорожного транспортного средства:** пат. 2415037 Российской Федерации, МПК7 В 60Т 13/26, 15/18, В 61Н 13/20; / Э. И. Галай, П. К. Рудов; И. Л. Заенчковский; заявитель и патентообладатель УО «Белорус. гос. ун-т трансп.». – № 2009140285/11 ; заявл. 30.10.09 ; опубл. 27.03.11 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуал. собств., патентам и тов. знакам. – 2011. – № 9.

*P. K. RUDOV, I. YU. TARASEVICH, E. V. RUDOJ*

## **PNEUMATIC MECHANICAL SPEED REGULATOR FOR BRAKE PRESSING FORCE**

The analysis of known speed regulation devices for brake application shows the area of application and their drawbacks. The railway car braking system which allows to increase braking efficiency at the expense of applying the stepless brake application regulation with the speed device equipped with axial high-speed mechanical regulator has been worked out.

Получено 24.10.2011

---

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 6. Гомель, 2012**

---

УДК 521.1

*Л. Л. СОКОЛОВ, Г. А. КУТЕЕВА*

*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия*

## **О ТРАЕКТОРИЯХ ВОЗМОЖНЫХ СОУДАРЕНИЙ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ**

Приведены характеристики связанных с резонансными возвратами возможных соударений с Землей астероидов 2007 VK184, 2011 AG5. Рассмотрены возможные соударения с Землей астероида Апофис. Большая часть этих соударений рассчитана в Астрономическом институте им. В. В. Соболева СПбГУ, некоторые приведены в работах сотрудников НАСА. Результаты, полученные разными исследователями, хорошо согласуются.

Сегодня общепризнанна актуальность проблемы астероидно-кометной опасности (или безопасности). Обсуждение ее можно встретить не только в научных трудах, но и в средствах массовой информации. Известный «Тунгусский метеорит» упал в 1908 году, к счастью, в глухую тайгу, площадь

поражения 2 тыс. км<sup>2</sup>. Метеориты таких размеров (60 метров в диаметре) сталкиваются с Землей в среднем раз в несколько сот лет. Километровые астероиды, представляющие более серьезную опасность, сталкиваются с Землей примерно раз в миллион лет, десятикилометровые – раз в сто миллионов лет. Последнее ведет, вообще говоря, к глобальной катастрофе, полной перестройке биосферы Земли.

Актуальность проблемы астероидно-кометной безопасности связана, с одной стороны, с осознанием и лучшим пониманием проблемы, чему способствовало развитие техники астрономических наблюдений, с другой – с появляющимися возможностями противодействия угрозе, связанными с прогрессом космической техники.

Проблема астероидно-кометной безопасности комплексная, междисциплинарная. Она включает в себя, в частности, следующие астрономические составляющие: открытие новых потенциально опасных астероидов и наблюдение потенциально опасных астероидов, определение и уточнение их орбит по наблюдениям, прогнозирование траекторий, выделение траекторий возможных соударений и исследование их характеристик. В настоящей статье мы ограничиваемся последней задачей, относящейся к небесной механике. Общий обзор проблемы астероидно-кометной безопасности и ее современного состояния содержится, например, в монографии [5].

С учетом катастрофических последствий соударений с массивными астероидами задачу поиска возможных соударений нужно решать в полном объеме и заблаговременно для того, чтобы в случае необходимости можно было своевременно принять меры противодействия. Очевидно, что выделение опасных траекторий – первый необходимый этап работ по предотвращению последствий столкновений астероидов с Землей.

Орбиты опасных астероидов, получаемые по результатам наблюдений, а также характеристики возможных соударений с Землей приведены, в частности, на регулярно обновляемом сайте <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/> (ниже – сайт НАСА). Этот сайт регулярно пополняется вновь открытыми опасными объектами, их орбиты уточняются по мере поступления новых наблюдений. Однако на сайте НАСА приведены не все возможные соударения, а только некоторые из числа наиболее опасных.

В настоящей статье приведены полученные нами возможные соударения для наиболее опасных на сегодня астероидов (по Туринской шкале) 2007 VK184 и 2011 AG5. Обсуждаются возможные соударения для наиболее известного из опасных астероида Апофис.

**Выделение траекторий возможных соударений.** Прогнозирование движения небесных тел с известными начальными данными (или элементами орбиты), включая выделение соударений – стандартная задача небесной механики. Сегодня она обычно успешно решается различными методами численного интегрирования уравнений движения, см. например, [6].

Однако в небесной механике и в классической задаче  $N$  тел встречаются сложные случаи, когда прогнозирование такого рода затруднено или вообще невозможно, практически отсутствует детерминизм, а имеет место «детерминированный хаос». Большой вклад в исследование сложных движений классической задачи  $N$  тел внес в середине XX века московский математик Владимир Михайлович Алексеев [1]. Им была разработана концепция «квазислучайных движений».

Аналогичная трудность принципиального характера встречается при прогнозировании движения опасных астероидов. Она связана с потерей точности при тесных сближениях астероидов с Землей. Эта потеря может составлять 2–4 значащих цифры за одно сближение. В результате после двух сближений движение становится практически недетерминированным. Теоретически траектории – решения дифференциальных уравнений – полностью детерминированы, однако предполагается абсолютно точное знание начальных условий. Реально же известна трубка возможных траекторий, после сближения происходит рассеяние этих траекторий, расширение трубки возможных траекторий. Этот вопрос обсуждается, например, в работе [2]. В том же выпуске 6 журнала «Вестник СибГАУ» за 2011 г. содержатся другие работы по астероидно-кометной безопасности, озвученные на Международной научной конференции «Околоземная астронмия-2011».

Для любого возможного соударения астероида с Землей как правило возможны также их тесные сближения, в том числе с переходом на резонансные орбиты, с последующими сближениями (или резонансными возвратами) и соударениями. Причина в том, что трубка возможных траекторий существенно шире, чем размеры Земли (иначе о соударении было бы достоверно известно, произойдет ли оно). В результате множество интересующих нас возможных траекторий недетерминировано, оно может быть описано графом типа дерева, а для множества возможных соударений возникает структура фрактального типа. Последующие возможные соударения имеют существенно меньшую вероятность, чем предыдущие. Исчерпывающий список их на не малом интервале времени получить очень сложно.

Может быть полезна аппроксимация траекторий сближения методом точечных гравитационных сфер (ТГС), как для получения обозримой картины в целом, так и в качестве начального приближения. Приближение ТГС состоит в том, что взаимодействие астероида с планетой сводится к мгновенному повороту вектора планетоцентрической скорости «в момент соударения» на некоторый угол, модуль планетоцентрической скорости сохраняется. Тем самым сложная задача трех тел сводится к комбинации простых задач двух тел, подробнее см., например, [3].

Метод ТГС позволяет просто получить множество резонансных возвратов в первом приближении. Для того чтобы выяснить, на какое расстояние произойдет новое сближение и возможно ли соударение, нужно решать неупро-

ценную задачу, численно интегрировать уравнения движения. Для этого мы используем интегратор Эверхарта [8], стандартную модель движения планет DE405 (а также другие аналогичные модели для сравнения).

Поиск траекторий соударения фактически сводится к варьированию начальных данных в допустимой области. Важным обстоятельством, упрощающим поиск, является то, что достаточно варьировать на 1-мерном, а не на 6-мерном многообразии (среднее движение, большая полуось и т.п.), по крайней мере для рассматриваемых астероидов. Можно рассматривать это утверждение как результат численных экспериментов.

Для того чтобы преодолеть трудность, связанную с потерей точности, мы используем перенос области начальных данных вперед вдоль траекторий (за 2029 год для Апофиса). Подробнее методика поиска соударений описана в [3].

Каждое найденное семейство траекторий соударения характеризуется своими расположением и размерами. Расположение соударения задается сдвигом большой полуоси от значения, ведущего к «основному» соударению, в окрестности которого происходит рассеяние траекторий (для Апофиса это, как правило, соударение в 2036 году). Размеры семейства (трубки) траекторий можно задать диапазоном начальных (или промежуточных) больших полуосей в трубке, либо диапазоном минимальных расстояний в трубке при «основном» сближении. Оба способа задания размеров дают согласованные результаты, что косвенно свидетельствует об их правильности.

**Соударения астероида Апофис.** Апофис, хоть и не самый опасный на сегодня, но очень интересный АСЗ, из-за установленного сближения в 2029 г. и последующего рассеяния возможных траекторий со множеством опасных альтернатив.

Астероид Апофис был открыт летом 2004 года в обсерватории Китт Пик (США). Сразу обратила на себя внимание возможность соударения с Землей 13 апреля 2029 года. По мере уточнения орбиты вероятность этого соударения вначале возрастала, а затем стала резко убывать, как это обычно бывает у вновь открытых объектов. Максимальная вероятность в конце 2004 года составляла примерно три процента, что является своеобразным рекордом. Следует учесть, что тогда диаметр его оценивался числом около 400 метров (сейчас – 270 метров). После проведения радарных наблюдений в начале 2005 года стало ясно, что 13 апреля 2029 года будет иметь место не соударение, а сближение на расстояние 36–39 тысяч километров. Однако это сближение вызывает рассеяние возможных траекторий (расширение трубки траекторий, потерю точности прогнозирования). В частности, в результате «гравитационного маневра» в 2029 году возможен переход на различные резонансные орбиты с последующими тесными сближениями или соударениями с Землей (резонансными возвратами). По мере уточнения орбиты исходная трубка траекторий сужается и довольно быстро самым опасным стало возможное соударение Апофиса с Землей 13 апреля 2036 года. Если в 2036 году будет иметь место не

соударение, а сближение, после одного из резонансных возвратов возможны другие сближения или даже соударения [3].

В работе [4] приводятся характеристики траекторий 67 возможных соударений с Землей астероида Апофис в текущем столетии, связанных с «гравитационным маневром» в 2036 году: минимальное геоцентрическое расстояние при соударении, минимальное геоцентрическое расстояние в 2036 году, положение «щели» относительно «щели» 2036 года (сдвиг начальной полуоси).

Вблизи номинальной траектории Апофиса существует тесное сближение с Землей в 2051 году вместе с множеством резонансных возвратов, включая соударения [7]. Нам известно 24 таких соударения в текущем столетии вместе с их характеристиками. Всего их вблизи номинальной орбиты гораздо больше, порядка сотни согласно предварительным результатам, полученным в лаборатории небесной механики и звездной динамики СПбГУ.

В работах представителей НАСА [7], [9] представлена небольшая часть возможных соударений, включая самые опасные. Так, «вблизи номинала» после сближения в 2051 году указано 4 соударения [7], а после сближения в 2036 году – 12 соударений [9]. Интересно, что вероятности соударения в 2036 году и в 2068 году после сближения в 2051 году одного порядка  $10^{-6}$ . В первом случае – широкая «щель» вдали от номинальной орбиты, во втором – наоборот – узкая «щель» вблизи номинальной орбиты.

Укажем еще на огромное число тесных сближений, связанных с резонансными возвратами, отмечаемое как в работах коллег из НАСА, так и в [3], [4]. Сближений в несколько раз больше, чем соударений.

Траектории со сближениями очень неустойчивы; так, изменение минимального геоцентрического расстояния Апофиса в 2029 году на 1 км ведет к изменению минимального геоцентрического расстояния Апофиса в 2036 году на 30 тысяч км. Возникает поэтому вопрос о надежности характеристик найденных траекторий соударений.

В этом смысле исключительно важно совпадение характеристик соударений, найденных нами и приведенных в цитированных выше работах коллег из НАСА. Соударения и их характеристики получены независимо, с использованием различных моделей движения, интеграторов и программ.

Кроме того, было проведено исследование зависимости характеристик найденных соударений (минимальное геоцентрическое расстояние при соударении, относительное положение и размер «щели») от используемой модели движения [4]. Оказалось, что указанные характеристики соударений практически устойчивы. Это позволяет нам относиться с доверием к аналогичным результатам, получаемым для других опасных астероидов.

**Соударения астероидов 2007 VK184 и 2011 AG5.** Диаметры астероидов 130 и 140 м, скорости «на бесконечности» – 16 км/с и 10 км/с соответственно. Точности больших полуосей (1 сигма) – 1170 и 19350 км. Эти данные можно найти на сайте НАСА вместе с вероятностями указанных там воз-

возможных соударений. Так, для астероида 2007 VK184 вероятность соударения в 2048 г. оценивается числом  $5,5 \cdot 10^{-4}$ , в 2053 г. -  $1,4 \cdot 10^{-7}$ ; для астероида 2011 AG5 вероятность соударения в 2040 г., оценивается числом  $1,6 \cdot 10^{-3}$ , в 2042 г. -  $1,4 \cdot 10^{-7}$ .

В таблицах 1, 2 приводятся характеристики обнаруженных нами возможных соударений.

Таблица 1 – 2007 УК 184

№	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	3,5	73000	6400
2	2052	0,37	68	11	0,91	0,14
3*	2053	3,4	540	90	15	2,5
4*	2055	4,8	1800	310	100	17
5*	2057	4,8	6200	1100	880	160
6	2058	1,0	140	23	0,63	0,10
7	2061	1,4	390	64	3,7	0,63
8	2065	0,099	240	40	1,2	0,20
9	2071	0,44	230	37	0,91	0,25

$\Delta a$ , км – относительное положение «щели» (отклонение от значения большой полуоси, ведущего к соударению в 2048 г.);  $r_{48}, 10^3$  км – минимальное расстояние до Земли в 2048 г.,  $\delta a$ , м – диапазон начальных значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина «щели»);  $\delta r_{48}$ , км – диапазон минимальных геоцентрических расстояний в 2048 г. для траекторий соударения (ширина «щели»).

Звездочкой отмечены соударения, указанные на сайте НАСА.

Таблица 2 – 2011 AG5

№	Дата	$r, 10^3$ км	$\Delta a$ , км	$r_{40}, 10^3$ км	$\Delta a$ , м	$\delta r_{40}$ , км
1*	2040	0,97	0	0,97	4800	6400
2*	2042	5,9	-19	69	0,42	1,6
3*	2043	2,7	25	86	1,1	4,2
4	2044	3,8	12	41	0,19	0,75
5*	2045a	2,3	160	620	29	110
6	2045b	3,5	-8,3	28	0,070	0,28
7	2046	0,28	7,8	26	0,088	0,33
8*	2047a	2,8	-100	400	9,1	35
9	2047b	0,27	15	53	0,25	0,95
10	2053	6,0	10	36	0,026	0,10
11	2061	0,085	8,6	29	0,029	0,11

$\Delta a$ , км – относительное положение «щели» (отклонение от значения большой полуоси, ведущего к соударению в 2040 г.);  $r_{40}, 10^3$  км – минимальное расстояние до Земли в 2040 г.,  $\delta a$ , м – диапазон начальных значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина «щели»);  $\delta r_{40}$ , км – диапазон минимальных геоцентрических расстояний в 2040 г. для траекторий соударения (ширина «щели»).

Звездочкой отмечены соударения, указанные на сайте НАСА.

Вероятности соударений, указанные на сайте НАСА, оказываются приблизительно пропорциональными приводимой ниже в таблицах ширине «щелей». Эта ситуация принципиально отличается от случая Апофиса, описанного выше, с разными размерами щелей и одинаковой по порядку вероятностью за счет разных расстояний от номинальной орбиты. Другими словами, для 2007 VK184 и 2011 AG5 соударения расположены примерно на одном расстоянии от номинальной орбиты.

Каждое тесное сближение астероида с планетой порождает вторичные сближения (резонансные возвраты), включая соударения. Получается множество с очень сложной структурой фрактального типа, оно заслуживает более подробного исследования.

Возможные соударения сохраняются при "малых шевелениях" динамической системы (малых изменениях действующих сил, использовании других интеграторов и т.п.).

Актуальна задача исследования резонансных возвратов для других опасных АСЗ. При разработке методов предотвращения соударений астероидов с Землей следует учитывать сложную структуру множества возможных соударений, связанную с резонансными возвратами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 11-02-00232а Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (грант 6.37.110.2011).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Алексеев, В. М.** Лекции по небесной механике / В. М. Алексеев. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 1999. – 160 с.

2 **Галушина, Т. Ю.** О предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли / Т. Ю. Галушина, О. П. Раздымакина // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – Вып. 6 (39). – С. 9–14.

3 **Соколов, Л. Л.** Особенности движения астероида 99942 Apophis / Л. Л. Соколов, А. А. Башаков, Н. П. Питьев // Астрономический вестник. – 2008. – Т. 42, № 1. – С. 20–29.

4 **Траектории возможных соударений астероида Апофис** / Л. Л. Соколов [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – Вып. 6 (39). – С. 39–42.

5 **Шустов, Б. М.** Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра / Б. М. Шустов, Л. В. Рыглова. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.

6 **Щербаков, С. С.** Решение задачи  $N$  тел применительно к моделированию планетарной системы / С. С. Щербаков, Д. Г. Прибыток, Р. С. Жук // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: международ. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2011. – Вып. 5. – С. 259–265.

7 **Chesley, S. R.** Asteroid impact hazard assessment with Yarkovsky effect / S. R. Chesley // IAA Planetary Defense Conference, 9-12 May 2011, Bucharest, Romania.

8 **Everhart, E.** Implicit single-sequence methods for integrating orbits / E. Everhart // Celestial Mechanics. – 1974. – Vol. 10. – P. 35–55.

9 **Deflecting a Hazardous Near-Earth Object** / D. K. Yeomans [et al.] // 1 IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27–30 April 2009, Granada, Spain.

*L. L. SOKOLOV, G. K. KUTEEVA*

## **ON THE TRAJECTORIES OF POSSIBLE COLLISIONS OF ASTEROIDS WITH THE EARTH**

The characteristics of possible collisions of asteroids 2007 VK184, 2011 AG5 with the Earth due to resonant returns are presented. We discuss possible collisions of asteroid Apophis too. Main part of the collisions have been found in the Sobolev Astronomical Institute SPbSU, some of them have been presented in NASA papers. The results are in good agreement.

Получено 25.05.2012

---

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 6. Гомель, 2012**

---

УДК 620.178.3

*Л. А. СОСНОВСКИЙ, Е. С. ТАРАНОВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрено действие рабочей среды на усталостные свойства циклически деформируемого металла. Разработана схема основных механизмов обратного эффекта, связанных с адсорбционной усталостью. Выполнена систематизация исследований в области прямого и обратного эффекта при коррозионно-механической усталости.

Известно, что любая внешняя среда сложным образом взаимодействует с твёрдым телом [10]. Во многих случаях ее физико-химическое воздействие определяет долговечность и несущую способность материала деталей, вызывает обратимое или необратимое изменение его свойств.

Среды по степени влияния на механические свойства материалов подразделяются:

– на неактивные – спектрально чистые инертные газы, поверхностно-активные вещества (ПАВ), химически неактивные или слабо активные, оказывающие воздействие через адсорбцию;

– коррозионно-агрессивные (некоторые газы, вода, электролиты, расплавы солей и т. п.), вызывающие химическую или электрохимическую коррозию;

– абсорбирующие поверхностью материала (например, водород), растворяющие его и образующие с ним твердые растворы, которые могут привести к увеличению прочности и долговечности;