

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ АПОФИСА ЗА 100 ЛЕТ ПО ДВУМ ПРОГРАММАМ: GALACTICA И HORIZONS

И.И. Смульский, О.И. Кротов¹

НИУ Институт криосферы Земли СО РАН
625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86
а/я 1230 ИКЗ СО РАН

тел. (3452) 688714, E-mail: jmulsky@mail.ru, kolleg@ymail.com¹

Представляет интерес поведение Апофиса после сближения 13.04.2029 г. При исследовании вероятностей столкновения путём вариации параметров орбиты Апофиса в пределах трёх их неопределённостей σ [1] учитываются случаи, которые в действительности не будут происходить. Поэтому нами выполнены исследования [2] на 4-х последовательных уточнениях начальных условий (НУ). Они были получены из Базы малых планет тел [3] и системы HORIZONS [4] и основываются на двух уточнениях орбитальных элементов Апофиса: JPL sol. 140 от 04.04.2008 г. и JPL sol. 144 от 23.10.2009 г.

Результаты решения задачи о движении Апофиса программой Galactica представлены в табл. 1. При первом варианте НУ на 30.11.2008 г. даны момент времени и расстояние сближения Апофиса с Землей 13 апреля 2029 г.; расстояние прохождения R_H Апофиса у Земли 13 апреля 2036 г.; время T_F и расстояние R_F второго сближения. При втором варианте НУ от 04.01.2010 г. расстояние сближения уменьшилось на 1025 км в 2029 г., и изменились параметры сближений в другие эпохи.

Во втором варианте, по сравнению с первым вариантом, изменяются НУ как Апофиса, так и воздействующих тел: координаты и скорости воздействующих тел с 30.11.2008 г. по 04.01.2010 г. рассчитаны по DE406. Чтобы выявить влияние погрешностей НУ только Апофиса, третий вариант НУ задан (см. табл. 1), как и первый, на 30.11.2008 г., но НУ Апофиса вычислены в системе Horizons по решению JPL sol. 144. В этом случае отличия трех элементов орбиты Апофиса: i_e , Ω и ω_e от аналогичных элементов первого варианта НУ составляют 2,9, 1,6 и 1,5 соответствующих неопределен-

ностей σ . Отличие остальных элементов не превышает их неопределенностей. Как видно из табл. 1, результаты третьего варианта меньше отличаются от первого, чем результаты второго.

Четвертый вариант НУ отличается от третьего тем, что начальные координаты и скорости Апофиса решения sol. 144 определены по системе Horizons. В предыдущих вариантах элементы орбиты пересчитывались в координаты и скорости Апофиса на основании задачи двух тел [2]. Относительные отличия начальных координат и скоростей 4-ого варианта от 3-его изменяются от $-2.1 \cdot 10^{-9}$ до $5.1 \cdot 10^{-7}$ и не превышают неопределенностей σ элементов орбиты Апофиса. Тем не менее, как видно из таблицы 1, это небольшое отличие привело к увеличению времени сближения на 1 минуту в 2029 г. и к уменьшению расстояния сближения на 427 км. Такое влияние оказывает способ получения НУ для Апофиса. Отсюда также следует, что для уменьшения погрешности расчётов движения Апофиса после сближения необходимо определять его НУ с неопределенностью σ на 1÷2 порядка меньше, чем она имеется в настоящее время.

Такие же исследования по влиянию начальных условий нами проведены с системой Horizons агентства NASA [4]. Она позволяет вычислять движение астероида по той же стандартной динамической модели (SDM), по которой выполнены расчеты в работе [1]. Кроме рассмотренных трех НУ были использованы еще на дату 12 июля 2006 г.

Характеристики и основные результаты всех

Таблица 1. Влияние начальных условий на результаты интегрирования уравнений движения планет, Луны, Солнца и Апофиса программой Galactica и уравнений движения Апофиса системой Horizons: $Time_A$ – момент времени и расстояние сближения Апофиса с Землей 13 апреля 2029 г., соответственно; R_H – расстояние прохождения Апофиса вблизи Земли 13 апреля 2036 г.; T_F и R_F – время и расстояние второго сближения. Эл. sl. 144 – элементы орбиты Апофиса решения 144 JPL, по которым по задаче двух тел рассчитаны его координаты и скорости; крд. sl. 144 – координаты и скорости Апофиса по системе Horizons решения 144 JPL.

| Параметры | Решения при разных вариантах начальных условий | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Galactica | | | | Horizons | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | 30.11.2008 эл. sl.140 | 04.01.2010 эл. sl.144 | 30.11.2008 эл. sl.144 | 30.11.2008 крд. sl.144 | 18.07.2006 JPL sl.144 | 30.11.2008 JPL sl.140 | 04.01.2010 JPL sl.144 | 30.11.2008 JPL sl.144 |
| $Time_A$ | 21:44:45 | 21:44:53 | 21:44:45 | 21:45:48 | 21:46:47 | 21:45:47 | 21:45:47 | 21:45:47 |
| R_{minA} , км | 38905 | 37880 | 38813 | 38386 | 38068 | 38161 | 38068 | 38068 |
| R_H , млн. км | 86.0 | 43.8 | 81.9 | 64.7 | 51.9 | 55.9 | 51.8 | 51.7 |
| T_F , юл. ст. от 30.11.08 | 0.5837 | 0.7138 | 0.6537 | 0.5736 | 0.4237 | 0.9437 | 0.4238 | 0.4237 |
| R_F , тыс. км | 622 | 1663 | 585 | 2531 | 1511 | 684 | 1541 | 1511 |

решений представлены в табл. 1. Время сближения 13 апреля 2029 г. изменяется в пределах одной минуты, а расстояние находится вблизи 38000 км. Расстояние сближения 13 апреля 2036 г. колеблется от 52 до 56 млн. км. Характеристики второго за 100 лет сближения изменяются от 0.684 млн. км до 1.541 млн. км, т.е. примерно в тех же пределах, что и по программе Galactica.

В решениях с № 4 в табл. 1 по Galactica и Horizons одинаковые начальные условия как для воздействующих тел, так и для Апофиса. В этих решениях время сближения в 2029 г. совпало до секунды, а расстояния сближения отличаются на 316 км. Остальные параметры решения более близки друг к другу по сравнению с другими решениями. Отсюда следует, что отличия результатов программы Galactica от результатов Horizons в большей мере обусловлены начальными условиями Апофиса и воздействующих тел, чем алгоритмами этих программ.

Итак, расчеты по разным программам и при разных начальных условиях показали, что Апофис в 2029 г. сблизится с Землей на расстояние 38±39 тыс. км, и в ближайшие 100 лет он еще раз пройдет на расстоянии не ближе 600 тыс. км от Земли.

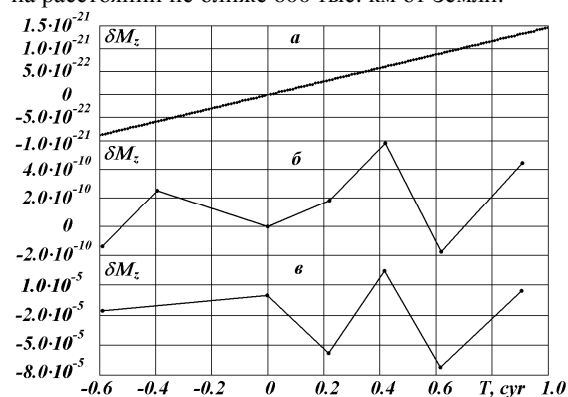


Рис. 1. Относительное изменение момента количества движения Солнечной системы за 160 лет: при интегрировании дифференциальных уравнений движения Солнца, планет, Луны и Апофиса программой Galactica (а); при расчетах движения планет, Солнца, Луны и астероидов: Церера, Паллада и Веста в системах DE406 (б) и Horizons (в).

Критерием точности интегрирования дифференциальных уравнений движения взаимодействующих тел является изменение момента количества движения всей Солнечной системы. Нами выполнены исследования по определению момента количества движения планет, Солнца и Луны относительно центра масс Солнечной системы по программам Galactica, DE406 и Horizons. В двух последних учитывались также астероиды: Церера, Паллада и Веста.

На рис. 1 показаны изменения относительной величины момента δM_z в направлении оси z за 160 лет. Величины δM_z рассчитаны по отношению к моменту M_z на 30.11.2008 г., величины которых в 10^{+43} кг·м²/сек по системам: Galactica, DE406 и Horizons равны: 2.884107327925816, 2.884103707836915, 2.884131506700124, соответст-

венно. Первая точка на графиках относится к дате 30.12.1949 г.

Изменение δM_z в решениях задачи о движении Апофиса по программе Galactica с шагом $dT = 10^{-5}$ года представлено на рис. 1а. Величина δM_z растет линейно со временем, и за 160 лет относительное изменение момента количества движения составляет $2.3 \cdot 10^{-21}$.

По эфемеридам DE406 (рис. 1б) величина δM_z изменяется немонотонно, и диапазон колебаний равен $8 \cdot 10^{-10}$, что на одиннадцать порядков превышает погрешности момента в программе Galactica. Погрешности момента количества движения в Horizons (рис. 1в) в $1.5 \cdot 10^5$ раз больше, чем в системе DE406.

С целью выяснения причин больших изменений момента количества движения в системах DE406 и Horizons были выполнены исследования его изменений по отдельным телам: планетам, Солнцу и Луне. В результате было установлено, что наибольшие относительные изменения момента количества движения наблюдаются для Солнца: момент изменяется в несколько раз. Для планет наибольшие изменения момента имеются у Меркурия – до 3 %.

Для программы Galactica изменения момента исследовались для первых четырех планет. Рассматривалось изменение момента в течение одного обращения тела вокруг Солнца. Кроме того, вычислялись средние за одно обращение моменты количества движения. Эти исследования проводились на протяжении 300 непрерывных обращений каждого тела. Диапазоны изменения момента количества движения отдельных тел в программе Galactica на несколько порядков меньше, нежели в эфемеридах DE406. По-видимому, большие изменения момента количества движения отдельных тел в DE406 приводят к большим колебаниям момента количества движения всей Солнечной системы. На наш взгляд, эти погрешности момента свидетельствуют о наличии аналогичных по величине погрешностей координат и скоростей в системе DE406 и Horizons.

Выводы

1. В течение 100 лет Апофис 13.04.2029 г. подходит к Земле на наименьшее расстояние.
2. Для увеличения определенности расчета движения астероидов после сближения с Землей неопределенность НУ и точность программ расчета необходимо улучшать на несколько порядков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Giorgini J.D., Benner L.A.M., Ostro S.I., Nolan H.C., Busch M.W. Predicting the Earth Encounters of (99942) Apophis // Icarus. 2008 v.193, pp. 1-19.
2. Смутьский И.И., Смутьский Я.И. Эволюция движения астероидов Апофис и 1950 DA за 1000 лет и возможное их использование / Институт криосферы Земли СО РАН. - Тюмень, 2011. - 36 с. - ил. : 10. Библиогр.: 27 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 25.01.11 г. № 21-B2011. <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/EvAp1950c.pdf>.
3. JPL Small-Body Database. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. 99942 Apophis (2004 MN4). <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=Apophis:orb=1>.
4. Система HORIZONS <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>.