

Небесная механика и астрономия

УДК 521.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ АСТЕРОИДА 2012 DA14

*А. Ф. Заусаев, С. С. Денисов, А. Е. Деревянка*Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mails: zausaev_af@mail.ru, denisovsergey777@rambler.ru, andr_derev@mail.ru

Проведено исследование эволюции орбиты астероида 2012 DA14 на интервале времени с 1800 по 2206, выявлены тесные сближения объекта с Землёй и Луной, вычислены вероятности столкновения с Землёй. Используемая математическая модель согласована с DE405, интегрирование проводилось при помощи модифицированного метода Эверхарта 27-го порядка, вероятность столкновения вычислена при помощи метода Монте–Карло.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод Эверхарта, астероиды, астероидная опасность, метод Монте–Карло.

Астероид 2012 DA14 был открыт в испанской обсерватории Ла-Сагра 23 февраля 2012 года. Позже наблюдения испанских астрономов были подтверждены французскими, итальянскими и американскими учёными. Астероид 2012 DA14 относится к группе Аполлона, имеет абсолютную звёздную величину $H = 24,41$. По текущим данным астероид имеет диаметр порядка 45–55 метров и массу около 120 000 тонн, т. е. не является потенциально опасным объектом.

Начальные данные, используемые авторами в расчётах, взяты из банка данных DASTCOM (Database of ASTeroids and COMets) американской Лаборатории реактивного движения (JPL) и приведены в табл. 1. Начальные элементы орбит вычислялись по 118 наблюдениям и использовались при интегрировании на интервале времени с 1800 по 2206 годы. Результаты вычислений приведены в табл. 2, 3 и на рисунке.

В качестве математической модели были использованы уравнения движения в барицентрической системе координат с учётом ньютоновских и шварцшильдовских членов, обусловленных взаимным влиянием Солнца и планет. Помимо этого учитывались влияние фигур Земли и Луны, воздействие земных приливов на геоцентрическое ускорение Луны и влияние пояса астероидов, смоделированного при помощи 50 частиц [1, 2]. Уравнения движения интегрировались при помощи метода Эверхарта 27-го порядка с переменным шагом интегрирования [3].

В табл. 3 представлены тесные сближения астероида с большими планетами Солнечной системы и Луной. Наиболее тесное сближение, согласно расчётам, произойдёт 15.02.2013 с Землёй, минимальное расчётное геоцентрическое расстояние составит около 43000 км в 19:26 UTC, что соответствует высоте геостационарной орбиты.

Как видно из табл. 2 и рисунка (а, б), в результате этого сближения астероид перейдёт из группы Аполлона в группу Атона. Также помимо большой полуоси скачкообразно изменятся наклонение, долгота восходящего узла и аргумент периге-

Анатолий Фёдорович Заусаев (д.ф.-м.н., проф.), профессор, каф. прикладной математики и информатики. *Сергей Сергеевич Денисов*, аспирант, каф. прикладной математики и информатики. *Андрей Евгеньевич Деревянка*, студент, каф. прикладной математики и информатики.

Таблица 1

Начальные данные

Epoch	M	α	e	ω	Ω	i
2012 03 14	103,3645	1,001712	0,108230	271,0762	147,2944	10,3388

Таблица 2

Элементы орбитальной эволюции

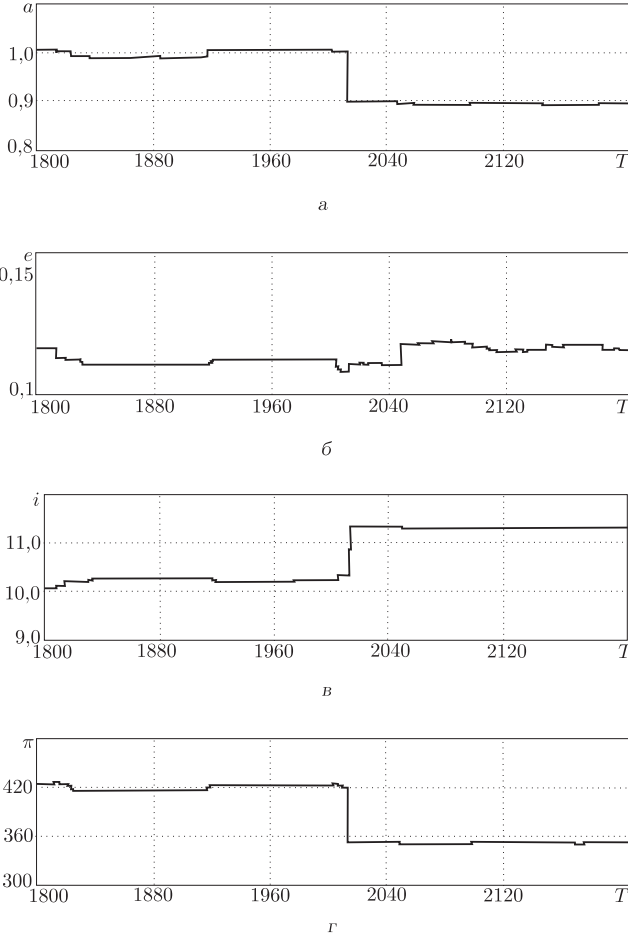
Epoch	M	α	q	e	P	ω	Ω	i
1800 01 05	112,7138	1,008459	0,891028	0,116445	1,01	273,9867	151,0374	10,0693
1813 12 23	37,9111	1,002505	0,888475	0,113745	1,00	276,4011	150,7734	10,1903
1827 12 10	26,2845	0,994688	0,882929	0,112356	0,99	266,9209	149,5788	10,1957
1841 11 26	61,7911	0,992492	0,882408	0,110917	0,99	266,9451	149,1065	10,2531
1855 11 13	105,3268	0,992641	0,882682	0,110774	0,99	267,0549	149,0608	10,2553
1869 10 30	146,6517	0,992965	0,882888	0,110857	0,99	267,1040	149,0125	10,2550
1883 10 17	186,9368	0,992857	0,882837	0,110811	0,99	267,2111	148,9548	10,2572
1897 10 03	229,0516	0,992527	0,882461	0,110895	0,99	267,2378	148,9141	10,2598
1911 09 21	272,7234	0,992728	0,882675	0,110860	0,99	267,4614	148,8554	10,2601
1925 09 07	244,9913	1,007562	0,894296	0,112416	1,01	273,7713	148,4355	10,1977
1939 08 25	174,6431	1,007502	0,894244	0,112415	1,01	273,8986	148,3916	10,1994
1953 08 11	106,4120	1,007149	0,893911	0,112435	1,01	273,9674	148,3409	10,2014
1967 07 29	39,6169	1,007146	0,893940	0,112403	1,01	274,0574	148,2889	10,2035
1981 07 15	331,6010	1,007466	0,894202	0,112425	1,01	274,1087	148,2428	10,2039
1995 07 02	261,2874	1,007566	0,894271	0,112444	1,01	274,2720	148,1923	10,2050
2009 06 18	202,6196	1,005600	0,896350	0,108642	1,01	273,5878	147,5472	10,3273
2023 06 05	171,0622	0,899768	0,799894	0,111000	0,85	205,1509	146,8860	11,3413
2037 05 22	301,2225	0,899699	0,799823	0,111010	0,85	205,1504	146,7909	11,3423
2051 05 09	84,1672	0,894049	0,789075	0,117413	0,85	203,5868	146,5397	11,3011
2065 04 25	272,6324	0,893479	0,787825	0,118251	0,84	203,4924	146,3934	11,2971
2079 04 12	102,5999	0,893883	0,787621	0,118876	0,85	203,8206	146,2617	11,3018
2093 03 29	291,0442	0,893548	0,787830	0,118312	0,84	204,1122	146,1360	11,3035
2107 03 17	113,3457	0,894433	0,790069	0,116681	0,85	204,6378	145,9788	11,3097
2121 03 03	285,5558	0,895822	0,792334	0,115523	0,85	205,3527	145,7911	11,3160
2135 02 18	94,0247	0,895921	0,792235	0,115732	0,85	205,3670	145,7117	11,3183
2149 02 04	268,6850	0,893850	0,788842	0,117478	0,84	205,0775	145,4840	11,3051
2163 01 22	99,8738	0,893277	0,788227	0,117601	0,84	205,1365	145,3651	11,3059
2177 01 08	292,7409	0,893718	0,788777	0,117421	0,84	205,2516	145,2551	11,3086
2190 12 26	112,8425	0,895821	0,791735	0,116190	0,85	205,9014	145,0796	11,3184
2204 12 13	280,4935	0,895883	0,791749	0,116236	0,85	205,9775	144,9788	11,3213

лия, как это показано на рисунке (в, г). Эксцентриситет же меняется незначительно на всём исследуемом интервале времени.

При оценке вероятности столкновения астероида 2012 DA14 с Землёй параметры орбиты считались независимыми нормально распределёнными случайными величинами. В качестве математического ожидания этих величин брались элементы орбит астероида, а величины допустимых отклонений элементов орбит — по данным JPL (см. табл. 4).

Суть метода Монте—Карло применительно к рассматриваемой задаче заключается в том, что начальные условия движения астероида (виртуальные астероиды) выбираются в пределах области возможных начальных значений орбитальных элементов. Далее движение виртуальных астероидов с заданной точностью численного интегрирования прослеживается на некотором промежутке времени до тех пор, пока они не столкнутся с планетой или не пролетят мимо. Формально считается, что столкновение с планетой происходит тогда, когда во время сближения расстояние между центром планеты и астероидом становится меньше радиуса планеты.

При большом числе испытаний отношение числа начальных условий, приводящих к столкновению, к общему числу испытаний может рассматриваться как статическая вероятность столкновения. Сходимость метода Монте—Карло является сходимостью по вероятности [4]. Метод Монте—Карло достаточно прост, но чрезвычайно трудоёмок. Чем менее вероятно событие, тем большее количество начальных условий движения необходимо для получения достоверной оценки вероятности.



Эволюция элементов орбит: а) большая полуось; б) эксцентриситет; в) наклонение; г) долгота перигелия

Таблица 3
Тесные сближения с Солнцем, большими планетами и Луной

Объект	Дата	Расстояние, а.е.
Земля	1813 08 20 09:35	0,008399
Луна	1813 08 20 19:11	0,007052
Луна	1822 02 16 08:24	0,009169
Земля	2004 08 19 12:00	0,008149
Луна	2004 08 19 13:11	0,006443
Земля	2013 02 15 19:26	0,000288
Луна	2013 02 16 00:37	0,002836
Луна	2048 02 16 13:11	0,008734
Земля	2048 02 16 16:48	0,006965

Величины допустимых отклонений элементов орбит

Элемент	a	e	i	Ω	ω	M
σ	$8,8412 \cdot 10^{-6}$	$2,115 \cdot 10^{-5}$	0,002216	0,0002284	0,0019926	0,0047132

На различные моменты оскуляции было произведено интегрирование уравнений движения 27824 виртуальных астероидов с начальными данными, являющимися независимыми нормально распределёнными случайными величинами. Соударение засчитывалось, если величина сближения была меньше радиуса Земли (6378 км).

В результате испытаний установлено, что существует вероятность столкновения астероида 2012 DA14 с Землёй 15.02.2033 года и 15.02.2045 года. Оценка вероятности столкновения в обоих случаях равна $3,59 \cdot 10^{-5}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зausaев А. Ф., Абрамов В. В., Денисов С. С.* Каталог орбитальной эволюции астероидов, сближающихся с Землёй с 1800 по 2204 гг. М.: Машиностроение-1, 2007. 608 с. [*Zausaev A. F., Abramov V. V., Denisov S. S.* Catalogue of orbital evolution of asteroids approaching to the Earth between 1800 and 2204. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. 608 pp.]
2. *Standish E. M.* JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405: Jet Prop Lab Technical Report. IOM 312. F-98-048, <http://iau-comm4.jpl.nasa.gov/de405iom/de405iom.pdf>.
3. *Денисов С. С.* Разработка программного обеспечения для автоматизации процесса создания банка данных эволюции орбит астероидов // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2011. № 4(25). С. 200–203. [*Denisov S. S.* Software development for automating the process of creation database of asteroids' orbital evolution // *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2011. no. 4(25). Pp. 200–203].
4. *Ермаков С. М.* Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Наука, 1975. 472 с. [*Ermakov S. M.* Monte Carlo methods and Related Questions. Moscow: Nauka, 1975. 472 pp.]

Поступила в редакцию 12/V/2012;
в окончательном варианте — 10/VI/2012.

MSC: 85–04

RESEARCH OF THE ORBITAL EVOLUTION OF ASTEROID 2012 DA14

A. F. Zausaev, S. S. Denisov, A. E. Derevyanka

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia.

E-mails: zausaev_af@mail.ru, denisovsergey777@rambler.ru, andr_derev@mail.ru

Research of the orbital evolution of asteroid 2012 DA14 on the time interval from 1800 to 2206 is made, an object close approaches with Earth and the Moon are detected, the probability of impact with Earth is calculated. The used mathematical model is consistent with the DE405, the integration was performed using a modified Everhart's method of 27th order, the probability of collision is calculated using the Monte Carlo method.

Key words: *mathematical modeling, Everhart's method, asteroids, asteroid's hazard, Monte Carlo method.*

Original article submitted 12/V/2012;
revision submitted 10/VI/2012.

Anatoliy F. Zausaev (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Professor, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science. *Sergey S. Denisov*, Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science. *Andrey E. Derevyanka*, Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.