

ВОЗМОЖНЫЕ СОУДАРЕНИЯ АСТЕРОИДА АПОФИС ПОСЛЕ УТОЧНЕНИЯ ЕГО ОРБИТЫ*

Л. Л. Соколов, Г. А. Кутеева

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

Рассматриваются возможные соударения с Землей астероида Апофис в XXI в., связанные с резонансными возвратами. Несмотря на существенное уточнение орбиты этого астероида из наблюдений в 2012–2013 гг., этих соударений много и Апофис остается опасным астероидом. Обычно после уточнения орбиты астероид исключается из списка опасных объектов, например астероиды 2011 AG5, 2007 VK184 и многие другие. Апофис является исключением из этого правила. Приведены данные для более 100 возможных соударений Апофиса с Землей, включая относительные положения и размеры областей начальных данных, ведущих к соударениям, или щелей. Обсуждается устойчивость этих характеристик при малых изменениях модели движения или начальных данных Апофиса. Также обсуждаются результаты исследования Апофиса, полученные в НАСА. Они находятся в хорошем согласии с нашими результатами. Однако НАСА приводит только 9 из числа основных соударений в XXI в., имеющие большие размеры щелей. Рассматривается сложная структура положений щелей, аналогичная фрактальной структуре. Причиной являются резонансные возвраты рассматриваемого астероида. Эту аналогичную фрактальную структуру необходимо иметь в виду при разработке мероприятий по предотвращению соударений. Особенности движения Апофиса, связанные с резонансными возвратами, имеют место и для других опасных астероидов. Изучение этих особенностей является важнейшей задачей. Библиогр. 21 назв. Табл. 3.

Ключевые слова: астероиды, соударения с Землей, траектории.

Введение. Астероидно-кометная опасность — одна из комплексных междисциплинарных проблем, актуальность которых сегодня общепризнана. После падения астероида под Челябинском в 2013 г. это стало еще более очевидным. Число публикаций на тему астероидно-кометной опасности огромно, они посвящены как общим вопросам [10, 12–14], так и специальным задачам, в частности небесномеханическим [1, 2, 9, 11].

Одна из частных, но важных задач, решение которых необходимо для обеспечения астероидно-кометной безопасности — заблаговременное выявление всех возможных соударений астероидов с Землей. Даже для астероидов с известными орбитами эта задача может быть трудной, несмотря на высокую точность знания орбит. Одна из причин — резонансные возвраты после сближений с Землей. При сближениях происходит рассеяние возможных траекторий, в частности возможны переходы на резонансные орбиты со сближениями или даже соударениями в ближайшем будущем. Из-за потери точности прогнозирования при сближениях такие движения практически недетерминированы, с чем связана трудность предсказания соударений.

В настоящей работе задача выявления возможных соударений рассматривается для знаменитого в кругу специалистов астероида Апофис. Возможные его соударения многократно изучались с момента открытия этого астероида в 2004 г., в том числе и в наших работах. Ниже мы анализируем последствия недавнего уточнения орбиты Апофиса из наблюдений вследствие угрозы, которую этот астероид представляет в настоящее время.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00804а, 15-02-4340) и СПбГУ (проект 6.37.341.2015).

Возможные соударения вблизи номинальной орбиты Апофиса. В настоящей работе мы анализируем множество траекторий с соударениями Апофиса с Землей, которые остаются возможными с учетом уточнения орбиты Апофиса в 2012–2013 гг., из числа обсуждавшихся в работе [7].

Технология нахождения возможных соударений, связанных с резонансными вратами, изложена в наших предыдущих работах [3–7]. Основные ее моменты: перебор начальных данных в допустимом множестве, численное интегрирование уравнений движения астероида (интегратор Эверхарта [17], модель Солнечной системы DE 405 [20]). Для преодоления трудностей, связанных с потерей точности при сближении, использовался перенос области начальных данных на более позднюю эпоху и варьирование начальных данных в эту эпоху. Мы использовали для этого юлианскую дату 2464448.5, или 1 мая 2035 года. Эксперименты показывают, что эту дату можно выбрать с большой степенью произвола. Важно лишь, чтобы она была после 13 апреля 2029 года — момента тесного сближения Апофиса с Землей. Кроме того, мы ограничивались перебором на одномерном многообразии, что существенно упрощает задачу. Наш опыт подтверждает, что в рассматриваемом случае Апофиса достаточно варьировать, например, среднее движение. В общем случае, возможно, это известное специалистам упрощение дает не все множество соударений, а только его значительную часть. Найдено очень много соударений в области возможных движений Апофиса, они требуют подробного исследования, и почти наверняка их список может быть продолжен даже с использованием обсуждаемого упрощения.

Остающиеся на сегодня возможными соударения из множества обсуждавшихся в работе [7] приведены в табл. 1. Кроме номера и даты соударения, указаны относительные положения соударения Δa (сдвиг начального значения большой полуоси в 2006 г.), минимальные геоцентрические расстояния во множествах траекторий соударения, а также размеры соответствующих соударениям областей больших полуосей δa в 2035 г. Существенно, что надежно определяются только относительные положения соударений, т. е. разности соответствующих больших полуосей. При малейшем изменении модели движения абсолютные значения ведущих к соударениям больших полуосей меняются очень сильно. Можно вести отсчет, например, от одного условно выбранного «основного» соударения. Мы отобрали из [7] те соударения, положения которых находятся в области указанных на сайте НАСА и имеющих значимые вероятности соударений (см. ниже), которые отмечены в таблице звездочкой.

Существенно, что указанные основные характеристики соударений устойчивы относительно модели движения, а также используемых начальных данных Апофиса. Например, вместо модели DE 405 можно использовать одну из последних моделей серии EPM, разработанных в ИПА РАН [19]. Подробнее это обсуждалось в работе [5]. Приведем еще в качестве маленькой иллюстрации сравнение характеристик соударений в 2068 и в 2056 гг., полученные по «старым» (2006 г.) и «новым» (2013 г., после уточнения орбиты) начальным данным Апофиса. Эти числа характеризуют реальную точность обсуждаемых характеристик.

Характеристики соударения в 2056 г.: разница минимальных геоцентрических расстояний — 24 км; разница ширин щели в 2035 г. — 0.4 м.

Характеристики «основного» соударения в 2068 г.: разница минимальных геоцентрических расстояний — 1.3 км.; разница ширин щели в 2035 г. — 10 м.

Положение щели 2068 г. относительно положения щели 2056 г. отличается менее чем на 0.1 м.

Бросаются в глаза фрактальные (кластерные) свойства положений соударений. Это естественно — каждое соударение характеризуется резонансными возвратами во множестве близких траекторий, следовательно — сближениями и соударениями в будущем. Особенно хорошо эти свойства видны на иллюстрациях, приведенных в [7].

Таблица 1. Возможные соударения астероида Апофис с Землей

N	Δa (м)	Дата	r_{\min} (км)	δa (м)
1	114.220	2055 4 13.8186	5921.09	0.121D+02
2	107.837	2056 4 13.0972	4204.05	0.798D+02
3	121.343	2058 4 13.5975	5517.28	0.429D+00
4	91.346	2058 4 13.3884	4425.72	0.124D+00
5	-13.457	2059 4 13.6741	3478.36	0.366D+01
6	214.778	2060 4 12.9937	4862.49	0.144D+01
7*	111.548	2060 4 13.0882	4404.01	0.205D+02
8	107.829	2060 4 12.8202	1414.28	0.995D-01
9	121.309	2061 4 13.3595	2599.14	0.736D+00
10	121.635	2062 4 13.5896	5263.99	0.248D+00
11	91.395	2062 4 13.4094	3033.00	0.674D+00
12	121.008	2062 4 13.6250	39.14	0.123D+01
13	91.257	2064 4 12.9994	5534.07	0.604D+00
14	-11.822	2064 4 13.0235	4575.66	0.129D+02
15*	137.346	2065 4 13.1313	2866.35	0.392D+02
16	121.041	2065 4 13.3622	5353.07	0.380D+00
17	107.837	2065 4 13.1981	5053.37	0.942D-01
18	136.193	2066 4 13.5824	5239.31	0.186D+02
19	121.911	2066 4 13.5893	3650.09	0.311D+00
20	121.935	2067 4 13.8445	2020.71	0.324D+00
21	121.624	2067 4 13.8467	1590.42	0.344D+00
22	121.254	2067 4 13.8508	5509.12	0.238D+00
23	102.229	2067 4 13.7233	5811.75	0.206D+00
24*	178.932	2068 4 12.6318	40.28	0.153D+04
25*	1789.523	2068 10 15.3232	2973.61	0.686D+02
26	120.421	2068 4 13.1972	34.34	0.817D+01
27	120.085	2068 4 13.2084	556.93	0.807D+01
28	122.362	2068 4 13.0709	1245.96	0.753D+00
29	178.869	2069 4 12.7248	3107.42	0.135D+01
30*	4876.497	2069 10 15.5930	374.42	0.267D+03
31	121.237	2070 4 13.6098	5590.58	0.167D+00
32	120.971	2070 4 13.6113	5315.45	0.379D+00
33	121.720	2071 4 13.8438	307.33	0.311D+00
34	178.940	2072 4 12.2427	2326.97	0.555D-01
35	121.613	2072 4 13.1252	2375.99	0.273D+00
36	-13.689	2072 4 12.8571	3800.03	0.915D+00
37	214.617	2073 4 13.0516	3480.03	0.700D+00
38	179.017	2073 4 20.6818	43.23	0.413D+00
39	121.232	2073 4 13.3901	1516.30	0.341D+00
40	120.526	2073 4 13.4308	284.43	0.296D+01
41	119.947	2073 4 13.4591	1399.42	0.414D+01
42	-13.674	2073 4 13.1118	1325.43	0.111D+01
43	-15.405	2073 4 13.1850	4772.19	0.130D+00
44	132.593	2074 4 13.3568	30.01	0.192D+02
45	179.066	2074 4 12.9464	1272.28	0.681D+00
46	119.446	2074 4 13.9537	2935.79	0.206D+01
47	91.294	2074 4 12.9038	38.47	0.708D+00
48	-14.781	2075 4 13.2101	49.24	0.282D+02
49	179.165	2075 4 13.1979	880.33	0.204D+01
50	139.167	2075 4 13.4812	735.39	0.751D+00
51	149.415	2075 4 13.7053	6084.62	0.918D-01
52	121.576	2075 4 13.8662	3130.60	0.250D+00

53*	212.750	2076 4 12.6966	702.03	0.150D+03
54*	177.666	2077 4 13.1125	2484.03	0.382D+02
55	121.107	2077 4 13.3748	1088.82	0.420D+00
56*	138.129	2078 4 13.3755	371.03	0.409D+02
57	178.431	2078 4 13.2656	5816.31	0.241D+01
58	122.137	2078 4 13.5138	46.09	0.339D+00
59	121.626	2078 4 13.6044	2033.31	0.235D+00
60	120.952	2078 4 13.6655	2060.35	0.540D+00
61	120.572	2078 4 13.6827	19.86	0.183D+02
62	119.887	2078 4 13.7278	1148.50	0.305D+01
63	138.135	2079 4 13.3975	29.71	0.121D+00
64	131.792	2079 10 16.8086	1214.97	0.586D+01
65	137.294	2080 4 12.7689	4931.10	0.165D+01
66	119.135	2080 4 13.4384	1565.63	0.294D+01
67	136.233	2080 4 12.7770	579.22	0.144D+01
68	120.082	2080 4 13.0950	1821.87	0.181D+00
69	137.322	2081 4 13.0546	16.65	0.712D+00
70	135.364	2081 4 12.9635	898.15	0.324D+00
71	178.768	2082 4 12.9246	531.68	0.829D+00
72	212.735	2082 4 13.0056	42.28	0.141D+00
73	137.333	2082 4 13.3903	2779.98	0.227D+00
74	121.433	2082 4 13.5806	5078.33	0.145D+00
75	3644.646	2082 4 4.7226	192.24	0.157D+01
76	212.729	2083 4 13.2189	1339.86	0.370D+00
77	120.581	2083 4 13.9059	31.89	0.180D+01
78	178.768	2083 4 13.1321	1299.23	0.713D+00
79	-15.375	2083 4 13.3130	1029.76	0.187D+01
80	212.657	2084 4 12.4547	873.08	0.202D+01
81	178.786	2084 4 12.4360	243.11	0.600D+00
82	119.503	2084 4 13.4086	1435.08	0.320D+01
83	118.803	2084 4 12.0410	814.89	0.103D+01
84	59.112	2084 4 11.9460	3354.50	0.113D+00
85	-14.758	2084 4 12.6336	211.76	0.896D+00
86	212.846	2085 4 13.1116	3431.90	0.272D+01
87	177.659	2085 4 13.0042	3504.85	0.261D+00
88	-14.780	2085 4 12.8557	6138.12	0.380D-01
89	162.373	2086 4 13.1801	5027.57	0.769D+00
90	178.219	2087 4 13.3967	407.74	0.822D+01
91	1865.042	2087 4 13.0017	1763.37	0.178D+01
92	3651.851	2087 4 9.1628	1058.61	0.468D+00
93	124.646	2088 4 12.7328	595.74	0.360D+01
94	167.210	2088 10 15.7617	29.48	0.788D+00
95	133.402	2090 10 16.5753	225.96	0.663D+01
96	179.205	2090 4 12.9052	5004.67	0.755D+00
97	120.074	2090 4 13.7400	2338.27	0.551D+00
98	4891.412	2090 10 15.6852	5710.46	0.169D+00
99*	138.929	2091 4 13.3708	5454.01	0.928D+01
100	303.541	2092 4 12.5181	4704.72	0.588D-01
101	178.816	2092 4 12.3518	21.32	0.198D+00
102	119.376	2092 4 13.3852	1546.21	0.102D+00
103	1792.942	2092 4 10.8109	2376.54	0.192D+01
104	179.426	2093 4 12.2460	282.57	0.663D+00
105	138.084	2093 4 13.0271	3851.17	0.696D+00
106	136.232	2093 4 12.9521	34.93	0.533D+00
107	3651.299	2093 4 17.6726	2679.21	0.800D+00
108	178.835	2093 10 16.0022	3146.41	0.292D+00
109	178.205	2094 4 12.9472	3899.60	0.208D-01
110	138.115	2094 4 13.3006	4060.79	0.200D+00
111	3651.292	2094 4 9.1062	2660.40	0.456D+00
112	3644.462	2094 4 6.1114	212.59	0.212D+00

113	212.805	2095 5 7.3834	57.56	0.755D+00
114	178.738	2095 4 13.0993	2048.82	0.773D+00
115	300.852	2095 4 13.3202	6056.35	0.597D-01
116	122.937	2095 4 13.1282	2149.08	0.607D+00
117	1786.572	2096 4 14.8829	24.81	0.127D+00
118	178.208	2096 4 12.5436	161.86	0.346D+00
119	177.721	2096 4 12.7238	2262.32	0.956D+00
120	137.294	2096 4 12.7097	1732.76	0.154D+00
121	1863.859	2096 4 12.1659	3125.46	0.292D-01
122	4956.336	2097 4 11.9934	1229.65	0.522D+01
123	-19.953	2097 4 12.6538	22.43	0.167D+01
124	178.416	2097 4 12.8211	3716.23	0.163D+00
125	132.824	2098 10 16.4792	1232.91	0.439D+02
126	123.102	2098 4 13.0267	5191.02	0.300D+01
127	212.707	2098 4 12.9696	2269.06	0.261D+00
128	142.759	2098 4 12.9238	2342.26	0.415D+00
129	-16.447	2098 4 13.0754	3954.37	0.563D+00
130	3644.641	2098 4 4.8156	35.19	0.140D+01
131	149.394	2099 4 13.1452	654.05	0.164D+01
132	217.302	2099 4 13.3483	6294.30	0.188D+00
133	142.750	2099 4 13.4016	2198.58	0.147D+00
134	1785.647	2099 4 14.5881	2154.24	0.298D+00
135	3644.643	2099 4 5.0600	661.94	0.892D+00

Результаты, полученные в НАСА. Исследование связанных с резонансными возвратами возможных соударений Апофиса с Землей было начато в НАСА практически сразу после открытия этого астероида [15]. Было найдено несколько траекторий резонансного возврата после сближения в 2029 г., включая соударение в 2036 г. По мере уточнения орбиты и уменьшения трубки возможных траекторий скоро осталось только соударение в 2036 г. Это соударение, а также близкие траектории, интенсивно исследовались в НАСА (а также в наших работах) в период с 2006 по 2011 г., когда не было наблюдений и орбита Апофиса практически не уточнялась. Важно подчеркнуть, что имело место практическое совпадение независимо полученных в НАСА и наших результатов в их общей области, что свидетельствует о надежности этих результатов и работоспособности применяемых методов. В 2011 г. на конференции в Бухаресте НАСА представило новые возможные соударения, связанные с резонансными возвратами после сближения в 2051 г. [16]. Эти траектории расположены существенно ближе к номинальной орбите, чем соударение 2036 г. В конце 2011 г. на сайте НАСА было указано 5 возможных соударений Апофиса: в 2036, 2056, 2068 (два соударения) и 2076 гг. Четыре последних связаны со сближением в 2051 г.

В 2012–2013 гг. имело место очередное сближение Апофиса с Землей. Была проведена интенсивная наблюдательная кампания, трубка возможных траекторий существенно сузилась после уточнения орбиты, номинальная орбита изменилась незначительно, как и ожидалось. В частности, соударение 2036 г. стало практически невероятным и было исключено из списка НАСА. После пересчета возможных соударений этот список содержит сегодня 12 соударений, из них 9 в текущем столетии. Подчеркнем нетривиальность ситуации: трубка возможных траекторий существенно сузилась, а число возможных соударений, наоборот, возросло. Как правило, после значимого уточнения орбиты астероида вообще исключаются из списка опасных. Примерами могут быть астероиды 2011 AG5, 2007 VK 184, не так давно бывшие в числе самых опасных, а также многие-многие другие. Причинами указанной нетривиальности является исключительная близость орбиты Апофиса ко многим орбитам соударения, а

также, возможно, повышенное внимание, обращенное в НАСА на Апофис. Во всяком случае Апофис остается опасным и после уточнения орбиты, только возможные соударения переносятся на более поздние сроки.

Когда 9 января 2013 года Апофис достиг минимального расстояния до Земли и соответствующие наблюдения были обработаны, появилась публикация [18], содержащая, в частности, новые возможные соударения и их вероятности. Эта публикация появилась в двух версиях: сначала v1, следом, довольно скоро, исправленная версия v2. Любопытно, что при исправлении существенно изменились вероятности соударений, в то время как положения и размеры соответствующих областей начальных данных остались практически неизменными. Это еще раз напоминает нам о неустойчивости такой важной характеристики, как вероятность соударения — обстоятельстве, хорошо известном специалистам. В настоящее время после обработки всех наблюдений 2012–2013 годов окончательные результаты содержат несколько меньше соударений, чем работа [18].

В табл. 2 выделены соударения, приведенные на сайте НАСА на момент представления статьи в редакцию (октябрь 2014), указаны как характеристики, полученные нами независимо, так и вероятности и положения соударений с этого сайта. Положения соударений определялись совсем по-разному, но видна хорошая корреляция. Видна также корреляция размеров областей, ведущих к соударениям (определенных нами), и вероятностей соударений с сайта НАСА. Символ «o» после 2068 и 2069 гг. в этой таблице означает, что соударения происходят не в апреле, а в октябре.

Таблица 2. Основные характеристики траекторий соударения с сайта НАСА

N	Дата	Δa (м)	δa (м)	Вероятность $\cdot 10^7$ (НАСА)	Положение (НАСА)
1*	2060	112.	21.	0.52	-0.723
2*	2065	137.	40.	1.4	-0.700
3*	2068	179.	1500.	39.	-0.663
4*	2068o	1790.	69.	1.5	+0.345
5*	2069o	4880.	270.	0.11	+3.495
6*	2076	213.	150.	3.3	-0.633
7*	2077	178.	38.	1.1	-0.664
8*	2078	138.	41.	1.2	-0.699
9*	2091	139.	9.3	1.2	-0.698

Δa (м) — относительное начальное положение большой полуоси щели; δa (м) — размер щели в 2035 г., или диапазон значений больших полуосей, ведущих к соударению (ширина щели).

Таким образом, на сайте НАСА указаны основные (по размерам областей и вероятностям) соударения, однако опущены соударения с вероятностями того же порядка, что и указанные. Опущено очень много «мелких» соударений. Их положения имеют «кластерно-фрактальную» структуру. Эту структуру необходимо учитывать при планировании, разработке и осуществлении мер противодействия соударениям, а значит, ее необходимо тщательно изучать*.

* В феврале 2015 г., когда журнал готовили «в печать», на сайте НАСА изменили характеристики траекторий соударения астероида Апофис. Положения соударений относительно номинальной орбиты, приведенные в табл. 2, сдвинулись на почти постоянную величину. Другими словами, изменилась номинальная орбита. Большинство вероятностей увеличилось примерно в два раза. Вероятность октябрьского соударения 2068 г. (№ 4), расположенного далеко от номинальной орбиты, напротив, уменьшилась до 10^{-12} , а октябрьское соударение 2069 г. (№ 5), расположенное еще дальше, совсем исчезло. Зато с другой стороны от номинальной орбиты появилось новое соударение в октябре 2089 г. с вероятностью 10^{-10} . Оно было ранее получено на кафедре небесной механики СПбГУ, хотя не было приведено в табл. 1 из-за малой вероятности.

О возможности изменения траекторий опасных соударений. Рассмотрим возможности увода Апофиса от «основного» соударения в 2068 г. с помощью ударного изменения его скорости. Изменение минимального геоцентрического расстояния в 2068 г. сильно зависит не только от величины приращения скорости, но и от момента удара. В табл. 3 приведены примеры оценок, полученных с использованием численного интегрирования уравнений движения. Удары разной силы производились в 2020, 2035, 2050 гг. Приведены изменения минимального геоцентрического расстояния в 2068 и 2051 гг. Аналогичные оценки проводились в работе [3] для соударения в 2036 г. Величина изменения скорости порядка 10^{-8} км/с может быть реализована при ударе Апофиса болванкой несколько сот килограммов с относительной скоростью несколько км/с. Это в принципе реализуемо современными средствами, однако удар должен быть произведен до 2035 г. Возникает вопрос о том, будет ли известна орбита Апофиса заблаговременно с достаточно высокой точностью, чтобы установить опасность соударения в 2068 г., а также многих других соударений вблизи его. Исследуя зависимость размеров областей, ведущих к соударениям, от времени, можно сформулировать соответствующие требования к точности орбиты в зависимости от времени ударного изменения орбиты. Естественно, результат также зависит от самой орбиты, расстояния ее до возможных соударений.

Таблица 3. Изменения минимального геоцентрического расстояния Апофиса в результате ударного изменения его скорости

ΔV (км/с), 2020	$1.7 \cdot 10^{-12}$	$1.7 \cdot 10^{-11}$	$1.7 \cdot 10^{-10}$
Δr_{\min} (км), 2051	$1.0 \cdot 10^2$	$0.9 \cdot 10^3$	$0.7 \cdot 10^4$
Δr_{\min} (км), 2068	$0.3 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^5$	$0.2 \cdot 10^7$
ΔV (км/с), 2035	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$
Δr_{\min} (км), 2051	$0.2 \cdot 10^2$	$0.2 \cdot 10^3$	$0.2 \cdot 10^4$
Δr_{\min} (км), 2068	$0.8 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^4$	$0.2 \cdot 10^6$
ΔV (км/с), 2050	$1.7 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$
Δr_{\min} (км), 2051	$0.6 \cdot 10^2$	$0.6 \cdot 10^3$	$0.6 \cdot 10^4$
Δr_{\min} (км), 2068	$0.4 \cdot 10^4$	$0.6 \cdot 10^5$	$0.7 \cdot 10^6$

Закключение. Несмотря на существенное уточнение орбиты Апофиса в 2012–2013 гг. из наблюдений, этот астероид остается опасным и по-прежнему имеется множество возможных соударений в текущем столетии, связанных с резонансными возвратами. Этим Апофис отличается от подавляющего большинства опасных астероидов. Видна фрактально-кластерная структура положений соударений. Ее необходимо исследовать и учитывать при разработке, планировании и осуществлении мероприятий по предотвращению соударений. Актуальной остается задача исследования множества возможных соударений, связанных с резонансными возвратами, для других опасных астероидов.

При проведении поисков возможных соударений использовался компьютерный кластер Ресурсного Центра Санкт-Петербургского государственного университета.

Авторы благодарны Никите Александровичу Петрову и Андрею Александровичу Васильеву за плодотворное сотрудничество.

Литература

1. Галушина Т. Ю., Раздывагина О. Н. О предсказуемости движения астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. 2011. Вып. 6(39). С. 9–14.
2. Ивашкин В. В., Стихно К. А. Гравитационная коррекция орбиты астероида Апофис // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. 2011. Вып. 6(39). С. 51–55.

3. Соколов Л. Л., Башаков А. А., Питъев Н. П. Особенности движения астероида 99942 Apophis // *Астрон. вестн.* 2008. Т. 42. № 1. С. 20–29.
4. Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Петров Н. А., Питъев Н. П., Шайдуллин В. Ш. Траектории возможных соударений астероида Апофис // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.* 2011. Вып. 6(39). С. 39–42.
5. Соколов Л. Л., Башаков А. А., Борисова Т. П., Петров Н. А., Питъев Н. П., Шайдуллин В. Ш. Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 4. С. 311–320.
6. Соколов Л. Л., Кутеева Г. А. О характеристиках возможных соударений астероидов с Землей // *Вестн. С.-Петерб. ун-та.* 2012. Сер. 1. Вып. 4. С. 133–138.
7. Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А. Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. № 5. С. 441–447.
8. Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А. Траектории соударения астероидов с Землей и резонансные возвраты // *Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества.* 2013. Т. 2. № 4. С. 148–153.
9. Стишно К. А. Метод поиска траекторий опасных небесных тел, приводящих к столкновению с Землей // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.* 2011. Вып. 6(39). С. 46–50.
10. Хьюбнер У. Ф. и др. Широкомасштабная программа защиты от потенциально опасных объектов // *Астрон. вестн.* 2009. Т. 43. № 4. С. 348–356.
11. Шор В. А., Чернетенко Ю. А., Кочетова О. М., Железнов Н. Б. О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 2. С. 131–142.
12. Шустов Б. М., Рыжлова Л. В. Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра. М., 2010.
13. Шустов Б. М., Рыжлова Л. В. О концепции комплексной программы «Создание российской системы противодействия космическим угрозам (2012–2020)» // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.* 2011. Вып. 6(39). С. 4–8.
14. Шустов Б. М., Рыжлова Л. В., Кулешов Ю. П., Дубов Ю. Н., Елкин К. С., Вениаминов С. С., Боровин Г. К., Молотов И. Е., Нароенков С. А., Барабанов С. И., Емельяненко В. В., Девяткин А. В., Медведев Ю. Д., Шор В. А., Холшевников К. В. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. № 4. С. 327–340.
15. Chesley Steven R. Potential impact detection of near-Earth asteroids: The Case of 99942 (2004 MN4) // *Asteroids, Comets, Meteors: Proc. IAU Symposium 229th, 2005.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. P. 215–228.
16. Chesley Steven R. Asteroid impact hazard assessment with Yarkovsky effect // *IAA Planetary Defense Conference, 9–12 May 2011, Bucharest, Romania.*
17. Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* 1974. Vol. 10. P. 35–55.
18. Farnocchia D. et al. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. arXiv:1301.1607v2 [astro-ph.EP] 19 Feb 2013.
19. Pitjeva E. V. EPM ephemerides and relativity. Relativity in fundamental astronomy // *Proc. IAU Symp. N 261.* Cambridge Univ. Press, 2010. P. 170–178.
20. Standish E. M. JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405. Interoffice Memorandum, 1998. 312.F-98-048.
21. Yeomans D. K. et al. Deflecting a hazardous near-Earth object // *IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27–30 April 2009, Granada, Spain.*

Статья поступила в редакцию 23 октября 2014 г.

Сведения об авторах

Соколов Леонид Леонидович — доктор физико-математических наук, профессор; lsok@astro.spbu.ru
 Кутеева Галина Анатольевна — кандидат физико-математических наук, доцент; gkut@rambler.ru

PREDICTION OF POSSIBLE COLLISIONS OF ASTEROID APOPHIS AFTER REFINEMENT OF ITS ORBIT

Leonid L. Sokolov, Galina A. Kuteeva

St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7-9, St.Petersburg, 199034,
 Russian Federation; lsok@astro.spbu.ru, gkut@rambler.ru

Possible collisions of asteroid Apophis with the Earth in the 21st century are considered. In spite of the refinement of its orbit in 2012–2013, a number of collisions are still possible, so that Apophis should continue to be considered as a hazardous asteroid. Usually after the refinement of an asteroid's orbit, the object can be removed from the list of hazardous objects; examples are asteroids 2011 AG5, 2007 VK184

and many others. Apophis is an exception to this trend. A list of more than 100 possible collisions of asteroid Apophis with the Earth is presented, including relative positions and ranges of initial conditions that lead to collisions or to gaps between the asteroid's orbit and the Earth. The stability of these characteristics under small changes in the motion model and in Apophis' initial conditions is discussed. The results concerning asteroid Apophis derived by NASA are considered as well; these are in good general agreement with our results. However, NASA presents only 9 probable collisions in the 21st century, with large gaps. Complicated structure of the gaps, similar to a fractal structure, is discussed. The cause of this is the resonant returns of the asteroid under discussion. This similarity to fractal structure must be taken into account when considering the elimination of possible collisions. Peculiarities of the motion of Apophis, connected with resonant returns, are similar as for other hazardous objects. Investigation of these peculiarities is a very important problem. Refs 21. Tables 3.

Keywords: Asteroids, collisions with the Earth, trajectories.

References

- Galushina T. Yu., Razdimamahina O. N., "On the predictability of motion of asteroids passing through the Earth gravitation sphere", *Vestn. Sib. Gos. Aerokosmich. Univ.* 6(39), 9–14 (2011).
- Ivashkin V. V., Stikhno C. A., "Gravitational correction of asteroid's Apophis orbit", *Vestn. Sib. Gos. Aerokosmich. Univ.* 6(39), 51–55 (2011).
- Sokolov L. L., Bashakov A. A., Pitjev N. P., "Peculiarities of the motion of asteroid 99942 Apophis", *Solar System Research* **42**, Issue 1, 18–27.
- Sokolov L. L., Borisova T. P., Petrov N. A., et al., "Trajectories of possible collisions of asteroid Apophis", *Vestn. Sib. Gos. Aerokosmich. Univ.* 6(39), 39–42 (2011).
- Sokolov L. L., Bashakov A. A., Borisova T. P., et al., "Impact trajectories of the asteroid Apophis in the 21st century", *Solar System Research* **46**, Issue 4, 291–300.
- Sokolov L. L., Kuteeva G. A., "Characteristics of possible collisions of asteroids with the Earth", *Vestn. St. Petersburg Univ. Ser. 1* Issue 4, 133–138 (2012).
- Sokolov L. L., Borisova T. P., Vasil'ev A. A., et al., "Properties of collision trajectories of asteroids with the Earth", *Solar System Research* **47**, Issue 5, 408–413.
- Sokolov L. L., Borisova T. P., Vasil'ev A. A., et al., "Trajectories of collisions of asteroids with the Earth and resonant returns", *Ecological bulletin of research centers of the black sea economic cooperation* **2**(4), 148–153 (2013).
- Stikhno C. A., "Method of determination of trajectories of pernicious stellar bodies leading to collisions", *Vestn. Sib. Gos. Aerokosmich. Univ.* 6(39), 46–50 (2011).
- Huebner W. F., Johnson L. N., Boice D. C., et al., "A comprehensive program for countermeasures against potentially hazardous objects (PHOs)", *Solar System Research* **43**, Issue 4, 334–342.
- Shor V. A., Chernetenko Yu. A., Kochetova O. M., et al., "On the impact of the Yarkovsky effect on Apophis' orbit", *Solar System Research* **46**, Issue 2, 119–129.
- Shustov B. M., Rykhlova L. V., "Asteroid hazard: yesterday, today, tomorrow" (Moscow, 2010).
- Shustov B. M., Rykhlova L. V., "On the concept of an integrated program "Creating the Russian system to counteract the space threats (2012–2020)""", *Vestn. Sib. Gos. Aerokosmich. Univ.* 6(39), 4–8 (2011).
- Shustov B. M., Rykhlova L. V., Kuleshov Yu. P., et al., "A concept of a space hazard counteraction system: Astronomical aspects", *Solar System Research* **47**, Issue 4, 302–314.
- Chesley Steven R., "Potential Impact Detection of Near-Earth Asteroids: The Case of 99942 (2004 MN4)", *Asteroids, Comets, Meteors: Proceedings IAU Symposium 229th, 2005* 215–228 (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2006).
- Chesley Steven R., "Asteroid impact hazard assessment with Yarkovsky effect", *IAA Planetary Defense Conference, 9-12 May 2011* (Bucharest, Romania).
- Everhart E., "Implicit single-sequence methods for integrating orbits", *Celest. Mech.* **10**, 35–55 (1974).
- Farnocchia D., et al., "Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis", arXiv:1301.1607v2 [astro-ph.EP] 19 Feb 2013.
- Pitjeva E. V., "EPM ephemerides and relativity", *Relativity in fundamental astronomy: Proc. IAU Symp.* N 261, 170–178 (S. Klioner, P. K. Seidelmann, M. Soffel (eds.); Cambridge University Press, 2010).
- Standish E. M., "JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405", *Interoffice Memorandum* 312. F-98-048 (1998).
- Yeomans D. K., et al., "Deflecting a hazardous near-Earth object", *IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27-30 April 2009* (Granada, Spain).