

УДК 521.1

ВОЗМОЖНЫЕ СОУДАРЕНИЯ И СБЛИЖЕНИЯ С ЗЕМЛЕЙ НЕКОТОРЫХ ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ

© 2021 г. Л. Л. Соколов^{а,*}, И. А. Баляев^а, Г. А. Кутеева^а, Н. А. Петров^а, Б. Б. Эскин^а

^аС.-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: lsok@astro.spbu.ru

Поступила в редакцию 16.07.2019 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 13.07.2020 г.

В настоящей работе получены характеристики возможных соударений с Землей ряда опасных астероидов: 443104 (2013 ХК22), 2015 RN35, 2008 ЕХ5. Большинство этих соударений было ранее неизвестно. Обсуждаются также возможные сближения астероидов с Землей, и полученные ранее возможные соударения с Землей астероида Апофис. Полученные результаты свидетельствуют, что число возможных соударений с Землей опасных астероидов существенно больше, чем было известно ранее. Тщательное исследование этих соударений, а также предшествующих им сближений с Землей является актуальной задачей.

Ключевые слова: астероиды, соударения, Земля

DOI: 10.31857/S0320930X21010084

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы обеспечения астероидно-кометной безопасности не вызывает сегодня сомнений. Одной из важнейших задач является заблаговременное обнаружение опасных астероидов, определение и уточнение их орбит, предсказание возможных сближений и соударений их с Землей. Результаты этой работы представлены, например, на регулярно обновляемом сайте НАСА: speos.jpl.nasa.gov/sentry/ и сайте NEODyS Пизанской обсерватории в Италии: newton.spacedys.com/neodyS/. В настоящее время известно более 20 тыс. “астероидов, сближающихся с Землей”, или АСЗ. Они характеризуются перигелийным расстоянием менее 1.3 а. е. Из них порядка тысячи астероидов имеют отличную от нуля (более 10^{-10}) вероятность столкновения с Землей в ближайшие сто лет.

Один из самых известных опасных астероидов, которому посвящено огромное число работ – Апофис – был открыт в 2004 г. Сегодня достоверно установлено, что 13 апреля 2029 г. Апофис сближается с Землей на расстояние 38 тыс. км. Рассеяние его возможных траекторий после этого сближения ведет, в том числе, к последующим возможным сближениям и соударениям с Землей (“резонансные возвраты”), которые в настоящее время подробно исследованы. В работе (Chesley, 2006) был приведен список возможных соударений Апофиса с Землей, соответствующий точности орбиты астероида того времени. Довольно

скоро из этого списка осталось только соударение в 2036 г. Оно, а также резонансные возвраты после соответствующего возможного сближения стало предметом многочисленных исследований в 2008–2012 гг. (Артемяева и др., 2013; Ивашкин, Стихно, 2008; 2009; Соколов и др., 2008; 2012; Binzel и др., 2009; Giorgini и др., 2008; Yeomans и др., 2009). В работе (Chesley, 2011) было показано, что наряду с резонансными возвратами после сближения в 2036 г. опасные сценарии возникнут после сближения Апофиса с Землей в 2051 г., включая основное возможное на сегодня соударение Апофиса с Землей в 2068 г. В 2012–2013 гг. орбита этого астероида была уточнена из наблюдений, возможное соударение с Землей в 2036 г. стало невозможным вместе с большим числом соударений, связанных с резонансными возвратами после сближения в 2036 г. Несмотря на высокую точность орбиты Апофиса, осталось много ведущих к соударениям возможностей, которые исследовались в работах (Соколов, Кутеева, 2015; Соколов и др., 2018; Vancelin и др., 2012; Петров и др., 2018; Farnocchia и др., 2013; Petrov и др., 2018; Sokolov и др., 2018; 2019). Высокая точность орбиты астероида и необходимость высокоточного прогнозирования его движения привлекли внимание к сложным негравитационным эффектам, таким как эффект Ярковского (Chesley, 2011; Шор и др., 2012; Farnocchia и др., 2013). На примере Апофиса неоднократно рассматривались возможности ухода астероида от соударений с Землей (Ивашкин, Стих-

но, 2008; 2009; Соколов и др., 2018). Астероид Апофис служит хорошим примером, иллюстрирующим большое число связанных с резонансными возвратами возможных соударений и сближений астероида с Землей. Для реального астероида, конечно, на самом деле в итоге возможно только одно соударение с Землей из множества опасных альтернатив, которое мы называем множеством возможных соударений. Наличие этого множества является следствием ограниченной точности известной нам орбиты, а также практически недетерминированного движения астероида в случае резонансных возвратов.

Выделение траекторий возможных соударений численными методами является непростой задачей. Однако некоторые результаты могут быть получены сравнительно просто, если использовать приближенный “метод точечных гравитационных сфер” (ТГС). Иногда используется термин “точечные сферы действия”. Как известно, есть еще “сферы влияния”, “сферы тяготения”, “сферы Хилла”. Размеры всех этих “сфер” малы вместе с отношением массы планеты к массе Солнца. В пределах все “сферы” сжимаются в точку. ТГС — аппроксимация предполагает описание траектории астероида со сближениями с Землей в виде последовательности кеплеровых эллиптических гелиоцентрических орбит соударения. При каждом “соударении” происходит мгновенное преобразование орбиты, сводящееся к переходу с одной асимптоты планетоцентрической гиперболы на другую. Подробнее метод ТГС применительно к астероиду Апофис описан, например, в (Соколов и др., 2008). Аппроксимация ТГС — недетерминированная, мы “не видим”, что происходит в точке “соударения”. Она позволяет свести сложную задачу трех тел к последовательности простых задач двух тел с понятными условиями “сшивки”. Особенно эффективно использование ТГС-аппроксимации в качестве первого приближения при проектировании траекторий космического аппарата со многими гравитационными маневрами. Можно применить это приближение и при поиске траекторий астероидов с резонансными возвратами, что продемонстрировано в работе (Соколов и др., 2008). Точность ТГС-аппроксимации исследована не в полной мере; на практике траектории, найденные с ее помощью, целесообразно воспроизвести с использованием численного интегрирования неупрощенных уравнений движения, как это сделано, например, в той же работе (Соколов и др., 2008). Ниже мы опробуем метод ТГС на примере астероида 2013 ХК22, найдя резонансные возвраты после сближений с Землей в 2101 г. Метод тот же, что в работе (Соколов и др., 2008).

Метод, который мы используем для нахождения возможных соударений и сближений астероидов с Землей (а также Луной и другими планета-

ми) описан в наших работах (Соколов и др., 2012; Petrov и др., 2018). В основе — численное интегрирование уравнений движения астероида и перебор начальных данных на одномерном многообразии. Используются интегратор Эверхарта (Everhart, 1974) и различные модели Солнечной системы: DE405 (Standish, 1998), DE430 (Folkner и др., 2014) и другие (Соколов и др., 2012). В работе (Petrov и др., 2018) описан алгоритм, по которому работает программный комплекс v19, созданный на кафедре небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета, используемый для поиска соударений и сближений астероидов с Землей. В основе — перебор на одномерном многообразии начальных данных, который показал свою эффективность для астероида Апофис. Одномерное многообразие — одна из декартовых координат (обычно называемая x) или одна из компонент скорости в барицентрической экваториальной системе координат, в которой производится численное интегрирование. На первом этапе вычисляется ряд траекторий и для каждой находятся минимумы геоцентрического расстояния по времени (сближения). Затем в окрестностях найденных значений времени, дающих минимумы, используя вычисленные траектории, производится минимизация по координате. На втором этапе производится уточнение найденных минимумов перебором по координате с существенно меньшим шагом. Если астероид имеет очень тесное сближение с Землей (как Апофис в 2029 г.), для того чтобы компенсировать потерю точности имеет смысл перенести начальные данные вдоль траекторий вперед по времени за тесное сближение (Соколов и др., 2008). Это третий этап поиска соударений, без него большинство щелей Апофиса “не разглядеть” из настоящего времени. Мы активно используем компьютерный кластер университетского Вычислительного центра, поскольку алгоритм программного комплекса v19 легко допускает распараллеливание. В среднем для поиска одного возможного соударения приходится затратить несколько часов вычислений на современном персональном компьютере.

Программный комплекс v19 позволяет эффективно находить возможные соударения астероидов с Землей. Основные соударения, приведенные на сайте НАСА, как правило, совпадают с найденными нами. Для астероида Апофис мы варьировали различные координаты или компоненты скорости, при этом расположение найденных щелей по большей части сохраняется независимо от направления варьирования. Мы используем этот искусственный прием, поскольку он демонстрирует эффективность по крайней мере во многих случаях.

Каждое возможное соударение характеризуется его датой и моментом, а также положением и размерами области, ведущей к соударению. По-

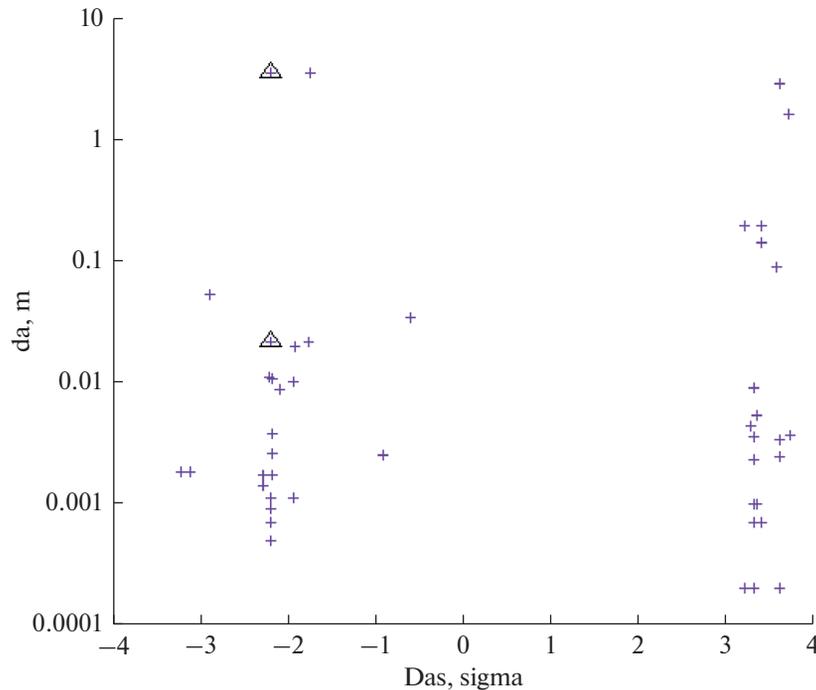


Рис. 1. Возможные соударения с Землей астероида 443104 (2013 ХК22). Положения и размеры ведущих к соударениям щелей.

ложение мы характеризуем обычно отклонением большой полуоси данного соударения от ее номинального (или другого фиксированного) значения в некоторый (обычно начальный) момент, размеры щели – диапазоном значений большой полуоси в некоторый момент, ведущих к данному соударению. Альтернатива, которую удобно использовать, если имеется тесное сближение с Землей перед множеством возможных соударений: положение щели характеризуется минимальным геоцентрическим расстоянием в момент сближения, а ее размеры – диапазоном минимальных геоцентрических расстояний траекторий в тот же момент, ведущих к данному соударению.

АСТЕРОИД 443104 (2013 ХК22)

Астероид 443104 был открыт в конце 2013 г. обзором Catalina, получив временное обозначение 2013 ХК22. Абсолютная звездная величина составляет 24.3, период обращения близок к периоду обращения Земли, что позволило наблюдать его до середины 2016 г. Всего получено 99 наблюдений на дуге в 959 дней. Точность орбиты сравнительно высока. Ошибка большой полуоси (σ) на сайте NASA 5.8125×10^{-8} а. е., NEODYS дает 7.435×10^{-8} а. е. Мы использовали значение с сайта NASA. Оба этих сайта дают возможное соударение с Землей в 2101 г. с вероятностями 1.4×10^{-6} и 2.24×10^{-5} соответственно. Следующая серия сближений с Землей состоится в 2028–2032 гг.

Диаметр астероида оценивается в 50 м, энергия потенциального столкновения оценивается в 3.4 мегатонны.

Особенностью астероида оказалось наличие двух точек пересечения орбит: в окрестности 20 июня и 20 декабря. Всего нами найдено 80 возможных соударений в 2101–2154 гг. и 51 тесное сближение с минимальным расстоянием от одного до двух радиусов Земли. Примечательны два возможных соударения в 2144 и одно в 2130: размер области начальных данных (диапазон больших полуосей), ведущих к этим соударениям, близок к размеру области начальных данных, ведущих к соударению 2101 г., причем одно из соударений 2144 г. заметно ближе к номиналу. Из 80 найденных соударений 6 приходятся на окрестность 20 декабря.

На рис. 1, 2 приведены найденные нами положения и размеры щелей, ведущих к возможным соударениям с Землей астероида 2013 ХК22, и годы соударений. Треугольниками отмечены соударения 2101 и 2102 гг., присутствовавшие на сайте NASA.

Основные найденные нами соударения приведены в табл. 1. Положения щелей, ведущих к соударениям, характеризуются отклонениями Да большой полуоси от номинального значения, измеряемого в величинах (σ) большой полуоси. Они же приведены на осях абсцисс на рис. 1, 2 (Das). Ширина щелей в табл. 1 характеризуется

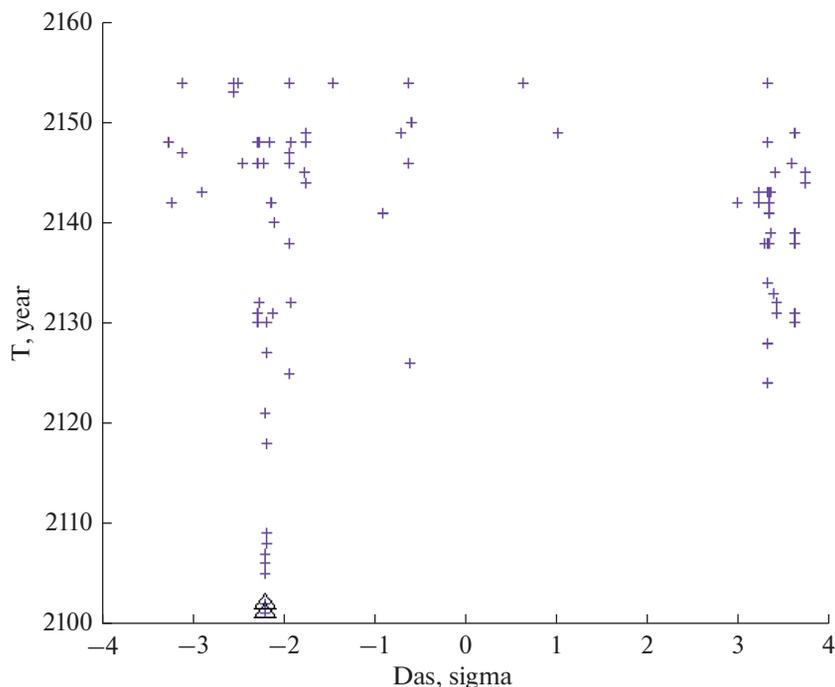


Рис. 2. Возможные соударения с Землей астероида 443104 (2013 ХК22). Положения ведущих к соударениям щелей и даты соударений.

диапазоном dx варьируемого параметра x (первой декартовой координаты), соответствующим данному соударению. На рис. 1, 2 размеры щелей da (отложены по оси ординат) определяются по диапазонам оскулирующих больших полуосей в начальный момент, ведущих к данному соударению. Они пропорциональны диапазонам варьируемого параметра dx в табл. 1. Было вычислено 50000 траекторий с начальными данными, равномерно распределенными на интервале $[-4 (\text{sigma}), +4 (\text{sigma})]$. Имеется в виду (sigma) большой полуоси.

Соударение 2101 г. соответствует единственному приведенному на сайте NASA. Оно (также единственное) присутствует и на сайте NEODyS.

Отметим, что найденное нами соударение 2102 г. с маленькой шириной щели присутствовало на сайте NASA до 2017 г., потом исчезло.

С использованием метода ТГС вычислены возможные резонансные возвраты после 2101 г. и произведено сравнение с результатом работы нашего программного комплекса v19. Для простоты будем считать орбиту Земли круговой. В табл. 2 приведены резонансные возвраты вблизи соударения 2101 г., Dx — относительное значение варьируемого параметра x , которое ведет к данному соударению. Величина R_{\min} показывает минимальное расстояние в соответствующем году. Если R_{\min} меньше радиуса Земли, то это — соударение; в противном случае — тесное сближение. Величи-

Таблица 1. Основные соударения астероида 2013 ХК22 с Землей

Дата	Положение Da , sigma	Ширина dx , м
20.06.2101	-2.193807	3.6
20.06.2102	-2.201904	0.021
20.06.2130	3.614532	2.8
20.06.2131	3.417835	0.20
20.06.2142	3.222149	0.20
19.06.2144	-1.751546	3.6
19.06.2144	3.730861	1.6
20.12.2145	3.404795	0.14
20.06.2146	3.582860	0.089

Таблица 2. Резонансные возвраты 2013 ХК22

N	Dx, м	Год	Период, г	Rmin, тыс. км	R2101(v19), тыс. км	R2101(ТГС)
1	-149.8	2102	1/1	0.5	152.7	156.1
2	-51.1	2109	8/9	39.3	49.7	51.2
3	-45.1	2108	7/8	10.9	44.7	46.2
4	-24.1	2108	7/9	17.3	22.7	24.2
5	-21.1	2104	3/4	23.8	18.6	20.2
6	-15.2	2106	5/7	8.6	13.9	15.9
7	0	2101	1.075	2.2		
8	56.6	2105	4/3	5.8	50.9	52.0
9	74.6	2106	5/4	1.9	75.1	76.4
10	101.5	2107	6/5	5.1	104.9	106.6
11	137.4	2108	7/6	5.1	142.6	144.9
12	182.3	2109	8/7	0.9	191.9	195.2
13	245.1	2110	9/8	10.3	259.2	264.3

на R2101 обозначает минимальное расстояние до центра Земли в 2101 г. Первое значение найдено программным комплексом v19, второе значение оценено методом ТГС, используя начальное значение периода астероида 1.075 г.

Можно видеть, что приближение ТГС дает сравнительно хороший результат, хотя и с небольшой систематической ошибкой. Разница может быть связана, например, с эллиптичностью орбиты Земли: эффект гравитационного маневра в разных точках орбиты будет немного отличаться.

Таким образом, простая модель (точечные гравитационные сферы, круговая орбита Земли) позволяет без численного интегрирования получить некоторые результаты о резонансных возвратах и траекториях возможных соударений астероидов с Землей, соответствующие точной модели движения. Этот факт свидетельствует об устойчивости структуры множества возможных соударений относительно малых изменений модели движения. В частности, это свидетельствует и о надежности получаемых нами результатов.

АСТЕРОИД 2015 RN35

Астероид 2015 RN35 был открыт 09.09.2015. Его диаметр 85 м, геоцентрическая скорость “на бесконечности” – 5.72 км/с. Первый этап его наблюдений продолжался до 03.11.2015, второй – от 19.01.2016 до 07.03.2016. На втором этапе точность большой полуоси возросла примерно в 8 раз по сравнению с первым этапом. Результаты исследования возможных соударений и сближений 2015 RN35 с Землей по данным первого и второго этапов наблюдений приведены в (Петров и др., 2018); они сравниваются с результатами, приво-

димыми на сайте NASA. После первого этапа наблюдений мы нашли по номинальной орбите NASA 154 возможных соударения в текущем столетии, после второго этапа – 21.

16–17 марта 2018 г. на обсерватории Серго Раданал были получены новые наблюдения астероида 2015 RN35, после чего общий интервал наблюдений составил 2.5 г. Точность большой полуоси увеличилась примерно в 60 раз по сравнению с полученной после второго этапа наблюдений; ее ошибка составила 7×10^{-8} а. е. Все найденные возможные соударения с Землей стали невозможными. Резко уменьшилось также и число возможных сближений с Землей (ближе 0.25 а. е.), в текущем столетии их осталось всего 5, включая сближение 15 декабря 2022 г. на расстоянии 0.0046 а. е.

Мы предприняли поиски возможных сближений и соударений с Землей астероида 2015 RN35 в XXII веке с учетом его новой точной орбиты. Число возможных сближений резко возросло. Удалось обнаружить 11 возможных соударений. Они показаны на рис. 3, 4 (положения и размеры ведущих к соударениям щелей; положения щелей и даты соударений). На первом рисунке видны только 6 соударений, остальные 5 имеют слишком малые размеры щелей. Положения и размеры щелей определяются так же, как на рис. 1, 2 для астероида 443104 (2013 ХК22).

АСТЕРОИД 2008 EX5

Астероид 2008 EX5 был открыт 4 марта 2008 г. на расстоянии 0.11 а. е. от Земли. Минимальное геоцентрическое расстояние 0.06 а. е. было достигнуто 13 февраля 2008 г. Диаметр астероида на сайте NASA оценивается в 59 м. Следующее сбли-

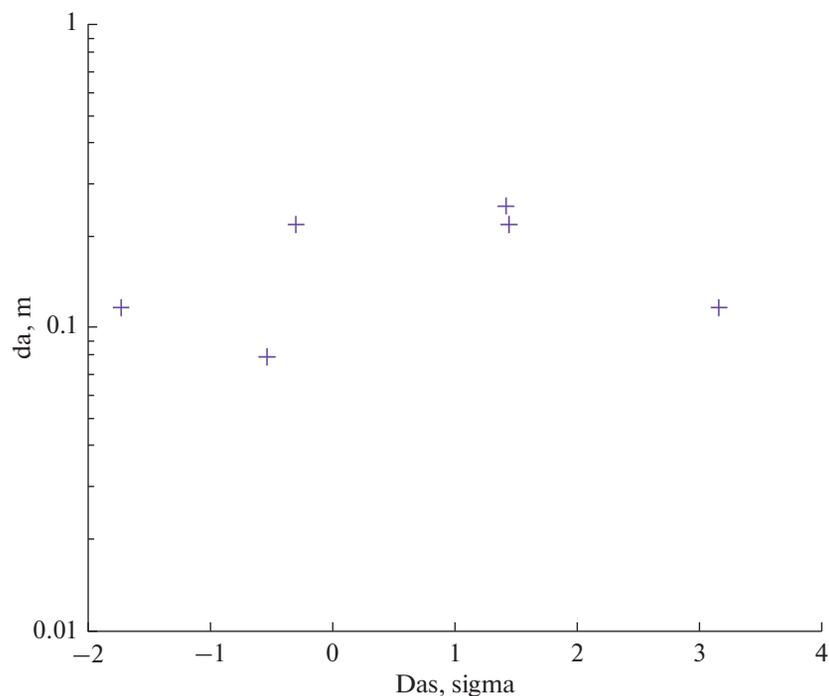


Рис. 3. Возможные соударения с Землей астероида 2015 RN35. Положения и размеры ведущих к соударениям щелей.

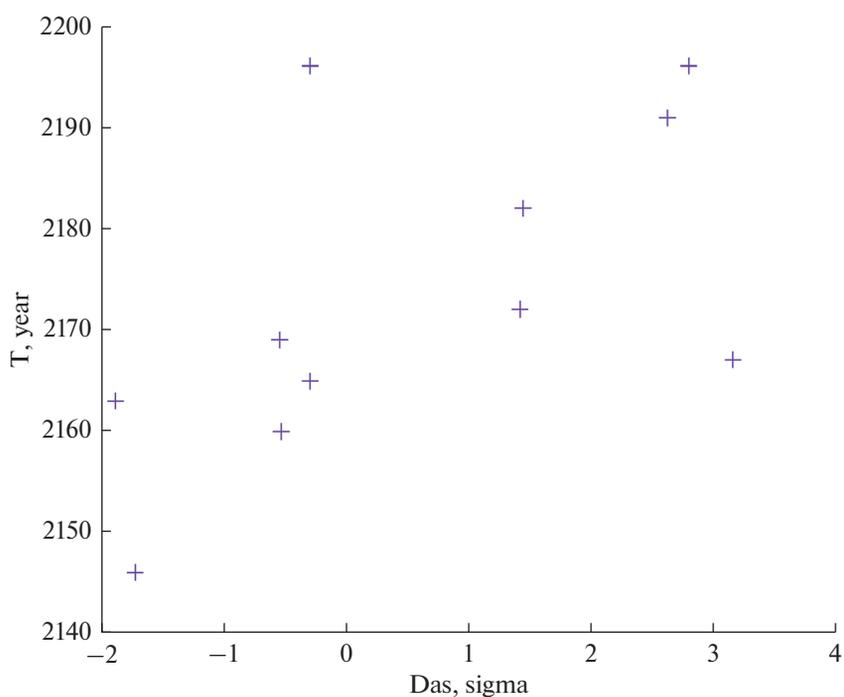


Рис. 4. Возможные соударения с Землей астероида 2015 RN35. Положения ведущих к соударениям щелей и даты соударений.

жение с Землей должно было произойти 1 ноября 2015 г. на расстоянии 0.1 а. е., однако астероид наблюдать не удалось. Точность большой полуоси 2008 EX5 сайте NASA составляет 0.23957×10^{-3} а. е. На сайте NASA приведено 11 возможных соударений этого астероида с Землей в текущем столетии.

Нами найдено более ста возможных соударений с Землей и 12 соударений с Луной астероида 2008 EX5 в XXI веке. Положения и размеры соответствующих щелей показаны на рис. 5, положения щелей и годы соударений — на рис. 6. Положения и размеры щелей определяются так же, как на

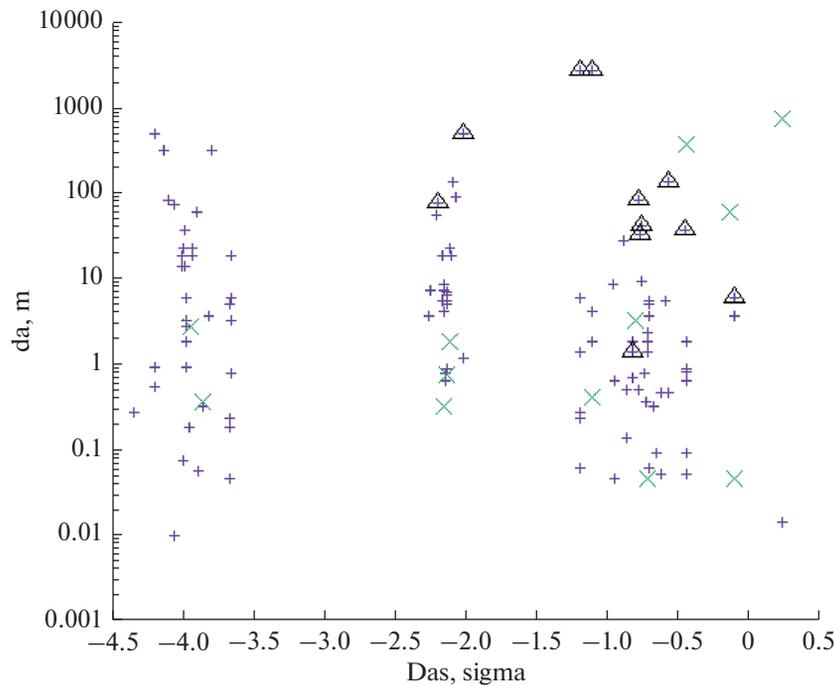


Рис. 5. Возможные соударения с Землей и Луной астероида 2008 EX5. Положения и размеры ведущих к соударениям щелей.

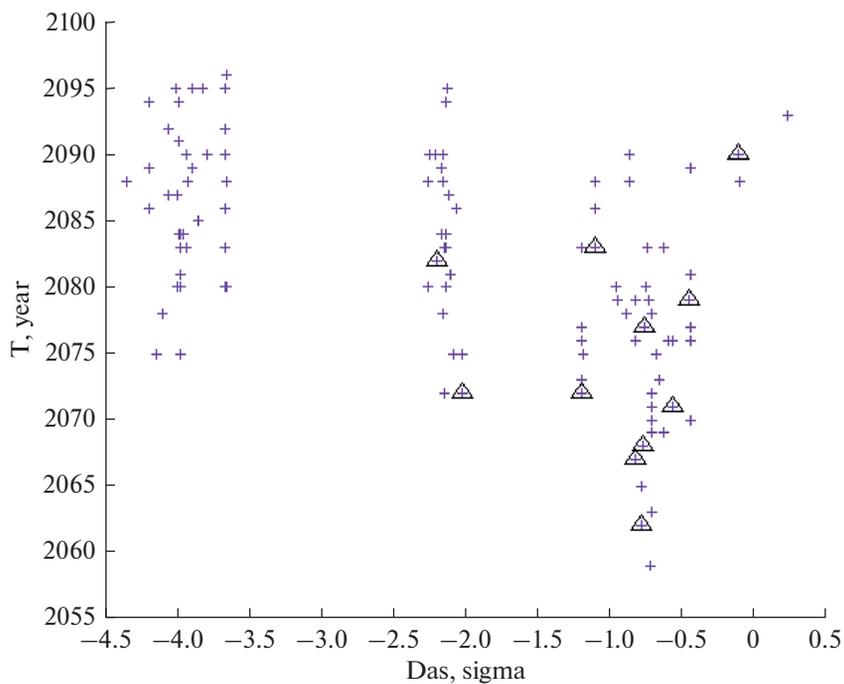


Рис. 6. Возможные соударения с Землей астероида 2008 EX5. Положения ведущих к соударениям щелей и даты соударений.

рис. 1, 2 для астероида 443104 (2013 XK22) и на рис. 3, 4 для 2015 RN35. Треугольниками обозначены соударения, приведенные на сайте NASA, крестами — найденные нами 12 возможных соударений астероида с Луной. На рис. 7 приведены положения (D_{as} по оси абсцисс) и минимальные

геоцентрические расстояния в радиусах Земли для найденных сближений и соударений с Землей астероида 2008 EX5.

Для астероида 2008 EX5 были найдены сближения с Землей на траекториях, ведущих к соуда-

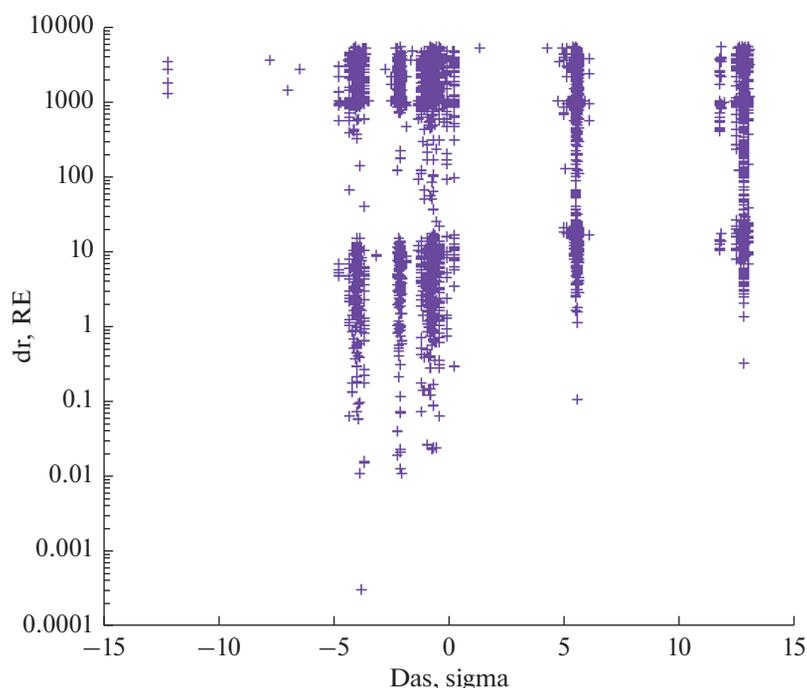


Рис. 7. Возможные соударения и сближения с Землей астероида 2008 EX5. Положения щелей и минимальные геоцентрические расстояния.

рению с ней (Sokolov и др., 2018). Оказалось, что на траекториях соударения сближения обычно существенно более тесные, чем, скажем, на номинальных траекториях. Эту тенденцию можно увидеть и на рис. 7. Это обстоятельство естественно учитывать при уводе астероида от соударений, используя эффект гравитационного маневра при сближениях. Кроме того, последовательность сближений на траектории соударения может служить “маркером” этого соударения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют, что число возможных соударений опасных астероидов с Землей существенно больше, чем было известно ранее, и это касается не только хорошо исследованного астероида Апофис, но и других объектов.

Для астероида 2013 XK22 было найдено 78 ранее неизвестных возможных соударений с Землей в следующем столетии, а также 51 тесное сближение с ней на расстоянии менее двух радиусов Земли. Шесть возможных соударений происходят 20 декабря, остальные — 20 июня. Продемонстрирована возможность использования метода точечных гравитационных сфер для нахождения резонансных возвратов этого астероида, используя минимум вычислений.

Для астероида 2008 RN35 после проведенного NASA уточнения его орбиты нами было найдено

11 возможных соударений с Землей в следующем столетии и много сближений с ней. Очередное сближение, которое ожидается 15 декабря 2022 г., должно позволить еще уточнить орбиту этого астероида.

Для астероида 2008 EX5 было найдено более сотни возможных соударений с Землей, а также 12 возможных соударений с Луной в текущем столетии. Найдено также много сближений с Землей. Интересно, что сближения на траекториях, ведущих к соударениям, для этого астероида оказываются заметно более тесными. Тщательное исследование возможных соударений, а также предшествующих им сближений с Землей опасных астероидов является актуальной задачей. В частности, сближения в принципе позволяют использовать эффект гравитационного маневра для увода астероида от соударения с Землей, делая увод практически реализуемым. Кроме того, сближения позволяют обнаруживать новые и потерянные опасные объекты и уточнять их орбиты из наблюдений.

При выполнении настоящей работы использовался компьютерный кластер Вычислительного центра Ресурсного центра научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Авторы благодарны Е.А. Гильдебрант за помощь в проведении вычислений.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 18-12-00050).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артёмьева Н.А., Баканас Е.С., Барабанов С.И., Витязев А.В., Волков В.А., Глазачев В.О., Дегтярь В.Г., Емельяненко В.В., Иванов Б.А., Кочетова О.М., Куликова Н.В., Медведев Ю.Д., Нароенков С.А., Немчинов И.В., Печерникова Г.В., Польш В.Г., Попова О.П., Рыхлова Л.В., Светцов В.В., Симонов А.В., Соколов Л.Л., Тиммербаев Р.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А., Шувалов В.В., Шустов Б.М.* Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра. М.: Физматлит, 2013. 384 с.
- Ивашкин В.В., Стихно К.А.* О проблеме коррекции орбиты сближающегося с Землей астероида (99942) Арофис // Докл. АН. Механика. 2008. Т. 419. № 5. С. 624–647.
- Ивашкин В.В., Стихно К.А.* О предотвращении возможного столкновения астероида Арофис с Землей // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 6. С. 502–516 (Sol. Syst. Res. 2009. V. 43. № 6. P. 483–496).
- Петров Н.А., Васильев А.А., Кутеева Г.А., Соколов Л.Л.* О траекториях соударения астероидов 2015 RN35 и Арофис с Землей // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 4. С. 330–342 (Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 4. P. 326–337).
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питъев Н.П.* Особенности движения астероида 99942 Арофис // Астрон. вестн. 2008. Т. 42. № 1. С. 20–29 (Sol. Syst. Res. 2008. V. 42. № 1. P. 18–27).
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Борисова Т.П., Петров Н.А., Питъев Н.П., Шайдулин В.Ш.* Траектории соударения астероида Арофис с Землей в XXI веке // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 4. С. 311–320 (Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 4. P. 291–300).
- Соколов Л.Л., Кутеева Г.А.* Возможные соударения астероида Арофис после уточнения его орбиты // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. 2015. Сер. 1. Т. 2(60). Вып. 1. С. 148–156.
- 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. Т. 52. № 4. С. 343–350 (Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 4. P. 338–346).
- Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., Железнов Н.Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Арофиса // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 131–142 (Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 119–129).
- Bancelin D., Colas F., Thuilot W., Hestroffer D., Assafin M.* Asteroid (99942) Apophis: new predictions of Earth encounters for this potentially hazardous asteroid // Astron. and Astrophys. 2012. V. 554. P. A15.
- Binzel R.P., Rivkin A.S., Thomas C.A., Vernazza P., Burbine T.H., DeMeo F.E., Bus S.J., Tokunaga A.T., Birlan M.* Spectral properties and composition of potentially hazardous asteroid (99942) Apophis // Icarus. 2009. P. 481–485.
- Chesley S.R.* Potential Impact Detection of Near-Earth Asteroids: The Case of 99942 (2004 MN4). // Eds. Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernandes J.A. Asteroids, Comets, Meteors: Proceedings IAU Symposium 229th, 2005. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. P. 215–228.
- Chesley S.R.* Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect // IAA Planetary Defense Conf. 9–12 May 2011, Bucharest, Romania.
- Everhart E.* // Celestial Mechanics. 1974. V. 10. P. 35–55.
- Farnocchia D., Chesley S.R., Chodas P.W., Micheli M., Tholen D.J., Milani A., Elliott G.T., Bernardi F.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // Icarus. 2013. V. 224. № 1. P. 192–200.
- Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P.* The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431, JPL Interplanet. Network Progress Report. 2014. V. 42–196. P. 1–81.
- Giorgini J.D., Benner L.A.M., Ostro S.J., Nolan M.C., Busch M.W.* Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis // Icarus. 2008. V. 193. P. 1–19.
- Petrov N., Sokolov L., Polyakhova E., Oskina K.* // AIP Conf. Proc. 1959. 040012 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5034615>
- Sokolov L., Petrov N., Kuteeva G., Vasilyev A.* // AIP Conf. Proc. 2018. V. 1959. 040019. <https://doi.org/10.1063/1.5034622>
- Sokolov L., Kuteeva G., Petrov N., Eskin B.* Hazardous near-Earth asteroids approach // AIP Conference Proceedings 1271, 130019 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5133286>. Published online: 15 November 2019.
- Standish E.M.* JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405 // Interoffice Memorandum. 1998. 312. F-98-048. 18 p.
- Yeomans D.K., Bhaskaran S., Broschart S.B., Chesley S.R., Chodas P.W., Sweetser T.H., Schweickart R.* Deflecting a Hazardous Near-Earth Object. 1 IAA Planet. Defense Conf.: Protecting Earth from Asteroids, 27–30 April 2009, Granada, Spain.