

Соколов Л.Л. и Кутеева Г.А. О возможных соударениях астероидов с Землей

Введение

Сегодня общепризнана актуальность проблемы астероидно-кометной опасности (или безопасности). Обсуждение ее ведется не только в научных трудах, но и в правительствах ведущих стран, ООН, а также в средствах массовой информации.

Известный «Тунгусский метеорит» упал в 1908 году, к счастью, в глухую тайгу, площадь поражения 2 тыс кв. км. 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. Психологически нелегко адекватно оценить степень угрозы крайне маловероятного события с такими сокрушительными последствиями. Это без преувеличения конец света, и у нас есть возможность его предотвратить. Можно ли сказать, что финансовая цена вопроса неадекватно высока, и экономить на этом деньги? К тому же, история прошедшего века свидетельствует, что государства не жалели средств на орудия массового уничтожения, но научные исследования, проводимые на эти средства, приводили к прогрессу человечества, а не к его уничтожению.

Актуальность проблемы астероидно-кометной безопасности в настоящее время 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 наблюдения потенциально опасных астероидов, определение и уточнение их орбит по наблюдениям, прогнозирование траекторий, выделение траекторий возможных соударений и исследование их характеристик. Ниже мы обсудим подробнее последнюю задачу, относящуюся к небесной механике.

Общий обзор проблемы астероидно-кометной безопасности и ее современного состояния содержится, например, в монографии [3]³⁴. Необходимы, в частности, дальнейшие исследования возможных последствий соударений; разработка космических средств предотвращения соударений и соответствующих проектов. Для астероидов размером с Тунгусский метеорит и менее, видимо, достаточно мероприятий по линии МЧС (эвакуация населения и т.п.), планы таких мероприятий должны быть разработаны.

Исследования по проблеме астероидно-кометной безопасности ведутся учеными во всем мире, однако лидерами сейчас являются исследователи США, где эти работы лучше всего финансируются – на государственном уровне. Основные работы проводятся под эгидой НАСА по поручению Конгресса США.

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 (и сравнительно дешевый) 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 откры-

³⁴ Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. *Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра*. М.: Физматлит, 2010.

тыми 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.

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.

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. 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.

Для любого возможного соударения астероида с Землей, как правило, возможны также их тесные сближения, в том числе с переходом на резонансные орбиты под действием притяжения Земли, 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 обобщаемой 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, [1]³⁵.

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 неупрощенную задачу, численно интегрировать уравнения движения. Для этого мы используем интегратор Эверхарта, 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 нами 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 астероида Апофис). Подробнее методика поиска соударений описана в [1].

Каждое найденное семейство траекторий соударения характеризуется своими расположением и размерами. Расположение соударения задается сдвигом большой полуоси от значения,

³⁵ Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питьев Н.П. *Особенности движения астероида 99942 Apophis*. Астрон. вестн. 2008. Т. 42. № 1. С. 20–29.

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 астероидов Апофис, 2007 VK184, 2011 AG5

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 [1].

Необходимо подчеркнуть, что трудность прогнозирования движения Апофиса связана также с невозможностью наблюдать его с поверхности Земли в настоящее время и уточнять орбиту. Однако очень скоро, видимо, уже в этом году, наблюдения позволят практически полностью исключить возможность множества из обсуждаемых нами соударений.

В работе [2]³⁶ 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 после этого сближения, включая соударения после 2051 года [4]³⁷. Нам известно сегодня 24 таких соударения в текущем столетии вместе с их характеристиками. Всего их, конечно, гораздо больше, как вблизи номинальной орбиты (рассеяние возможных траекторий в 2051 году), так и после рассеяния в 2036 году. Согласно предварительным результатам, полученным в лаборатории небесной механики и звездной динамики СПбГУ, их значительно больше сотни.

В работах представителей НАСА [4], [5]³⁸ представлена небольшая часть возможных соударений, включая самые опасные. Так, «вблизи номинала» после сближения в 2051 году указано 4 соударения [4], а после сближения в 2036 году – 12 соударений [5]. 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 [1], [2]. Сближений в несколько раз больше, чем соударений.

³⁶ Соколов Л.Л., Башаков А.А., Борисова Т.П., Петров Н.А., Питьев Н.П., Шайдулин В.Ш. *Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке*. Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 4. С. 311–320.

³⁷ Chesley Steven R. *Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect*. IAA Planetary Defense Conference, 9–12 May 2011, Bucharest, Romania.

³⁸ Yeomans D.K. et al. *Deflecting a Hazardous Near-Earth Object 1* IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27–30 April 2009, Granada, Spain.

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 [2]. Оказалось, что указанные характеристики соударений практически устойчивы. Это позволяет нам относиться с доверием к аналогичным результатам, получаемым для других опасных астероидов.

На сегодня по формальным показателям (по шкале Палермо) самыми опасными являются астероиды 2007 VK184 и 2011 AG5. Их размеры примерно вдвое меньше, чем Апофиса, однако вероятность соударения примерно на два десятичных порядка выше – в 2048 году и в 2040 году соответственно. На сайте НАСА указаны еще по три возможных соударения для этих астероидов после рассеяния в 2048 и 2040 годах, наиболее вероятные. На самом деле, как и в случае Апофиса, возможных соударений гораздо больше. Мы пока исследовали 9 соударений для 2007 VK184 и 11 соударений для 2011 AG5.

Заключение

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. Иначе, изменяя траекторию астероида и избегая одного соударения, мы можем попасть на другое соударение, очень близко расположенное.

Очень скоро начнутся астрономические наблюдения астероида Апофис, которые позволят уточнить его орбиту и, скорее всего, закрыть вопрос о реальной возможности соударения с Землей в обозримой перспективе. Однако те, кто регулярно заходит на сайт НАСА, видят, что регулярно происходит открытие новых потенциально опасных астероидов размером более полукилометра, для которых возможно столкновение с Землей, последствия которого трудно себе представить. Однако довольно быстро уточнение орбиты по наблюдениям позволяет практически исключить возможность столкновения, – в очередной раз астероид пролетит мимо, к счастью для нас.

Список литературы

1. Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питьев Н.П. *Особенности движения астероида 99942 Apophis*. Астрон. вестн. 2008. Т. 42. № 1. С. 20–29.
2. Соколов Л.Л., Башаков А.А., Борисова Т.П., Петров Н.А., Питьев Н.П., Шайдулин В.Ш. *Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке*. Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 4. С. 311–320.
3. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. *Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра*. М.: Физматлит, 2010.
4. Chesley Steven R. *Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect*. IAA Planetary Defense Conference, 9–12 May 2011, Bucharest, Romania.
5. Yeomans D.K. et al. *Deflecting a Hazardous Near-Earth Object 1* IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27–30 April 2009, Granada, Spain.