

Опасные астероиды и изучение их орбит

Петров Никита Александрович

Санкт-Петербургский государственный университет

19 августа 2024 г.

2. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня известно порядка 10^6 астероидов.

Считается, что угрозу Земле могут представлять "околоземные астероиды" с перигелийным расстоянием $q < 1.3$ а.е. Таких известно порядка $3 \cdot 10^4$.

Из околоземных астероидов выделяют "потенциально опасные астероиды". Их MOID (наименьшее расстояние между орбитой астероида и орбитой Земли) меньше 0.05 а.е., абсолютная величина (связанная с размером) $H < 22$. Таких известно порядка 2 тысяч. Для примерно тысячи астероидов найдены возможные соударения с Землей.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ясно, что взаимодействие с планетами в принципе может приблизить астероид к Земле, сделать его околоземным и потенциально опасным. Основная задача настоящего сообщения - оценка этого эффекта, выяснение возможностей сближения и соударения с Землей астероидов, для которых $q > 1.3$ а.е.

4. МЕТОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Приводятся оценки возможных изменений орбит астероидов при сближениях с Юпитером, полученные простым приближенным хорошо известным методом точечных гравитационных сфер. Показана возможность последующего сближения с Землей астероидов, вначале не являющихся околоземными.
2. С использованием метода Монте-Карло и быстродействующей программы численного интегрирования выделено множество астероидов, угрожающих Земле, Луне и планетам, в том числе астероидов с $q > 1.3$ а.е. угрожающих Земле.
3. Получены оценки вероятностей сближений и соударений астероидов с планетами и Луной, анализируется их точность.

5. МЕТОД ТОЧЕЧНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ СФЕР

Приближенное описание влияния Юпитера на орбиту астероида предполагает рассмотрение в рамках плоской круговой ограниченной задачи трех тел. При этом взаимодействие сводится к мгновенному повороту вектора планетоцентрической скорости в момент сближения, модуль этой скорости сохраняется. Соответствующий вектор новой гелиоцентрической скорости позволяет с использованием интегралов энергии и площадей получить новые большую полуось и эксцентриситет орбиты астероида.

6. ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТ АСТЕРОИДОВ МЕТОДОМ ТГС

Рассмотрим астероид с перигелийным расстоянием $q > 1.3$ а.е., с афелийным расстоянием $Q > 5.2$ а.е. Используя интегралы энергии и площадей, получим векторы гелиоцентрической и планетоцентрической скорости при взаимодействии астероида с Юпитером. Если новый вектор планетоцентрической скорости направлен точно против скорости Юпитера, новое перигелийное расстояние будет меньше, чем старое. Например, для астероида 2019 УН3 ($q = 1.436$ а.е., $Q = 5.534$ а.е.) новое перигелийное расстояние может достигать $q = 1.015$ а.е.

7. Методы, используемые нами для нахождения соударений и сближений

В настоящее время используется два различных метода.

1. В основе первого (которым мы пользуемся давно, программа v19) - минимизация геоцентрического расстояния при переборе на одномерном многообразии, например, одной из начальных координат. Описание опубликовано например в AIP Conference Proceedings 1959, 040012 (2018); doi: 10.1063/1.5034615.

2. Кроме того, создана быстродействующая программа для нахождения сближений и соударений астероидов с планетами и Луной (Balyaev I.A. Solar System Research, 2020, Vol. 54, No 6, pp. 557-566). Она позволяет запускать очень много виртуальных астероидов и фиксировать попадание части из них в планету или ее заданную окрестность.

8. Программа, используемая для оценки вероятности соударений и сближений астероидов с планетами и Луной

В основе быстродействующей программы - метод Эверхарта, модель движения планет DE 430. Основная идея оптимизации - параллельное интегрирование большого числа близких виртуальных астероидов можно осуществлять экономно, используя один и тот же шаг, одни и те же положения планет, узловые значения времени и т.п. Осуществляется группировка виртуальных астероидов по величине шага интегрирования в зависимости от сближений с планетами, и т.д. В результате быстродействие увеличилось более чем на порядок.

9. Нахождение возможных сближений и соударений астероидов с планетами. Метод Монте-Карло

Начальные данные для большого числа N виртуальных астероидов, описывающих возможные траектории исследуемого астероида, выбираются в соответствии с многомерным нормальным распределением, заданным математическим ожиданием и матрицей ковариаций элементов орбиты, взятыми с сайта НАСА. Для генерации случайных чисел используется вихрь Мерсенна. Интегрирование осуществляется до 2132 года (JD=2500000), (если нет соударений).

10. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОУДАРЕНИЙ С ЗЕМЛЕЙ И ЛУНОЙ АСТЕРОИДА 2021 QM1

N	С Землей	С Луной
10^4	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$
10^5	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$6.0 \cdot 10^{-5}$
10^6	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$
10^7	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$

11. ВЫДЕЛЕНИЕ АСТЕРОИДОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ ПРЕДСТАВЛЯТЬ УГРОЗУ. 1.

Из множества известных астероидов исключаются имеющие $q > 1.8$ а.е. и одновременно $Q < 4.0$ а.е., исключаются также малые астероиды с $H > 26$. Остается 127 тысяч астероидов.

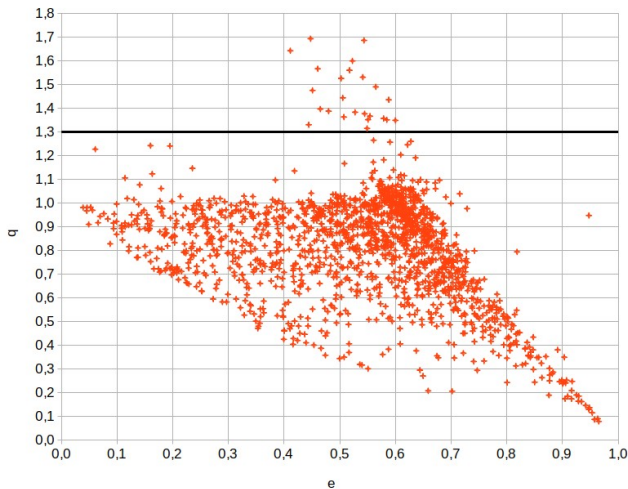
1 этап. Для каждого из оставшихся объектов при $N = 2 \cdot 10^3$ виртуальных астероидов ищутся возможные сближения на расстояние менее 10^3 радиусов одной из планет или Луны. Если таких нет, астероид исключается. Остается $1.1 \cdot 10^4$ астероидов, которые берутся в следующий этап.

2 этап. Для каждого из оставшихся объектов при $N = 2 \cdot 10^4$ виртуальных астероидов ищутся возможные сближения на расстояние менее 10^2 радиусов одной из планет или Луны. Если таких нет, астероид исключается. Остается $3 \cdot 10^3$ астероидов, которые берутся в следующий этап.

12. ВЫДЕЛЕНИЕ АСТЕРОИДОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ ПРЕДСТАВЛЯТЬ УГРОЗУ. 2.

3 этап. Для каждого из оставшихся объектов при $N = 2 \cdot 10^5$ виртуальных астероидов ищутся возможные сближения на расстояние менее 10^2 , 10^1 , 10^0 радиусов одной из планет или Луны. В результате получаем кумулятивные вероятности сближений на 100, 10 радиусов планет, а также соударений для примерно 3 тысяч астероидов. В частности, найдено 20 астероидов, имеющих $q > 1.3$ а.е. и сближающихся с Землей на расстояние меньше 100 ее радиусов. Результаты 3 этапа приведены в http://www.astro.spbu.ru/sites/default/files/stats_200000.xls

13. Астероиды после 3-го этапа эксперимента (e, q)



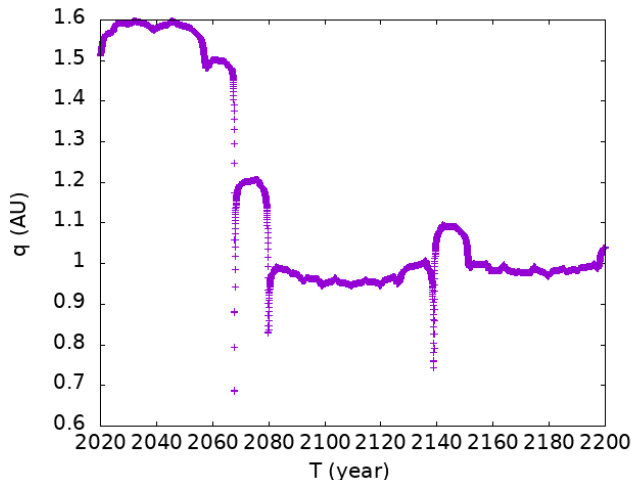
14. ДАЛЕКИЕ АСТЕРОИДЫ, СБЛИЖАЮЩИЕСЯ С ЗЕМЛЕЙ.

Астероид	q_{nom} (а.е.)	q (а.е.)	$R_{min}(R_{Earth})$	T_{appr}
2020 KH	1.643	1.696	24	19-06-2090
2012 SO23	1.608	1.652	414	16-03-2131
2010 UC8	1.364	1.430	51	06-12-2083
2019 WY6	1.367	1.459	86	21-01-2133
2011 XD3	1.531	1.611	31	10-01-2178
2006 CQ	1.527	1.571	0.14	14-01-2169
2020 RJ8	1.490	1.490	11	19-09-2088
2019 UQ10	1.352	1.477	3.2	07-02-2092
2017 VN14	1.351	1.398	100	21-07-2174
2019 YH3	1.436	1.423	48	31-01-2142
2009 LB	1.315	1.313	4.4	29-05-2194

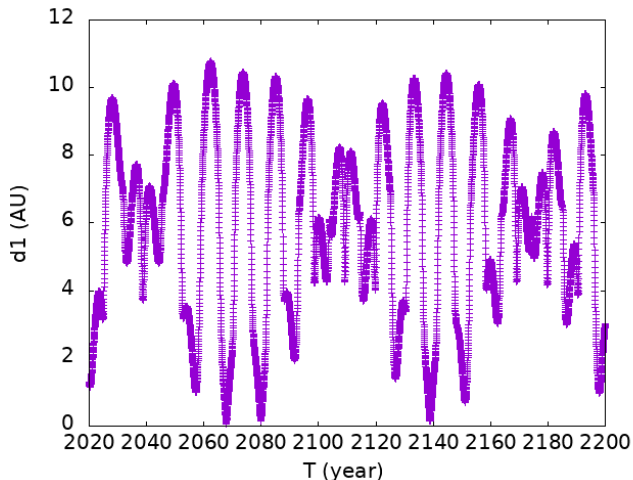
15. О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ДАЛЕКИХ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Несомненно, полученные результаты вычислений требуют внимательного изучения. Отметим лишь, что вышеприведенный астероид 2012 SO₂₃ имеет абсолютную величину H , равную 15.4. Другими словами, его размеры порядка километра. Для астероида 2006 CQ нами найдено возможное соударение с Землей в 2169 году. Оно получается как по модели DE430, так и по модели DE405.

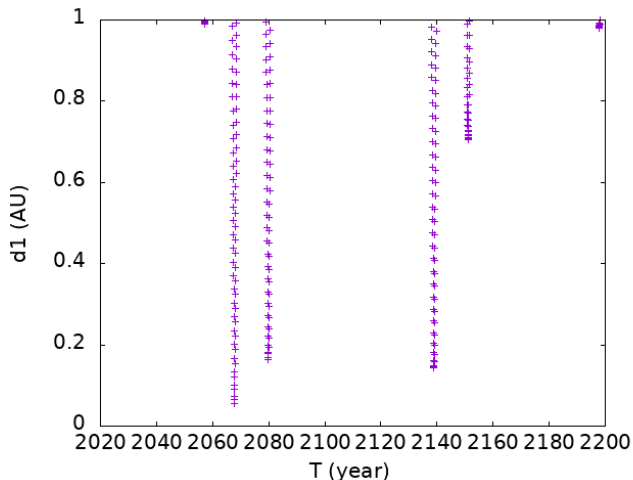
16. Астероид 2006 CQ. Эволюция перигелийного расстояния q



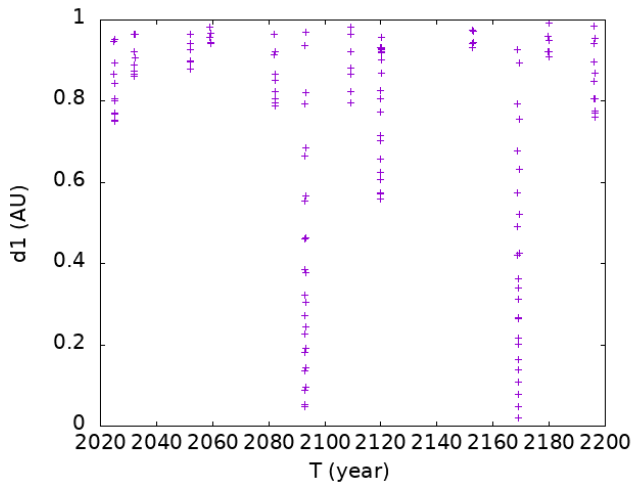
17. Астероид 2006 CQ. Эволюция расстояния до Юпитера



18. Астероид 2006 CQ. Эволюция расстояния до Юпитера



19. Астероид 2006 CQ. Эволюция расстояния до Земли



20. ВЫВОДЫ

1. Продемонстрирована возможность исследования возможных соударений и сближений большого числа астероидов.
2. Показано, что угрожать Земле могут не только "околоземные астероиды". Установлены возможные соударения и тесные сближения с Землей ряда астероидов с известными орбитами, которые ранее опасными не считались.
3. Методом Монте-Карло получены оценки вероятностей соударений и сближений с Землей, Луной и планетами для большого числа астероидов.

Спасибо!