

О динамической шкале населения астероидов, сближающихся с Землей

Золотарёв Р.В.¹, Шустов Б.М.², Корчагин В.И.¹

¹*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

²*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

С помощью численной модели эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) показано, что характерное время пополнения (истощения) текущего населения АСЗ составляет ~ 5 млн лет. Это время согласуется с результатами других авторов.

On the dynamic scale of the population of near-Earth asteroids

Zolotarev R.¹, Shustov B.², Korchagin V.¹

¹*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

²*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

Using a numerical model of the evolution of the population of near-Earth asteroids (NEA), we demonstrated that the characteristic time of replenishment (depletion) of the current NEA population is ~ 5 million years. This time is in order of magnitude consistent with the results of other authors.

1. Введение

Среди малых тел Солнечной системы выделяют большой класс объектов, сближающихся с Землей. Согласно общепринятому определению под объектами, сближающимися с Землей (ОСЗ, в англоязычной литературе NEOs – Near Earth Objects), понимают астероиды (астероиды, сближающиеся с Землей АСЗ, в англоязычной литературе NEA) и кометы (NEC), с орбитами, для которых перигелийное расстояние $q < 1.3$ а.е. Из их числа выделяют потенциально опасные объекты (ПОО, в англоязычной литературе PHO – potentially hazardous objects, в том числе РНА - potentially hazardous asteroids), под которыми понимают тела, чьи орбиты сближаются с орбитой Земли до минимального расстояния (МОИД), не превышающего 0.05 а.е., т.е. 7.5 млн. км. Основанием для того, чтобы считать такие тела опасными, является то обстоятельство, что в таких пределах можно ожидать изменения расстояний между орбитами малого тела и Земли в обозримом будущем (100 – 200 лет) под влиянием планетных возмущений, а также то, что 0.05 а.е. – характерный масштаб области неопределённости орбиты малого тела небольшой массы (при прогнозировании примерно на сто лет вперед) вследствие неточного знания параметров движения тела в настоящую эпоху. К этому (динамическому) определению ПОО в мировой литературе добавляют требование, чтобы абсолютная астероидная звездная величина H тела не превосходила 22.0 (см. например, <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>). Для некоторой средней для астероидов величины альбедо 0.15 размер сферического тела, имеющего $H = 22$, оценивается примерно в 140 м. Но в последние годы, особенно под влиянием эффектного явления – падения в районе Челябинска 17-метрового метеороида 15 февраля 2013 г., эти размеры существенно понижены вплоть до дециметровых размеров [1]. Среди ОСЗ подавляющее большинство составляют именно АСЗ. По данным международного Центра малых планет (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>) на 1 августа 2020 г число обнаруженных ОСЗ составило 23309, среди них астероидов – 23199 и комет – 110. Для полноты изложения укажем также количество потенциально опасных астероидов – 2103. Конечно, это лишь малая доля АСЗ, существующих в данный момент в Солнечной системе.

Интерес к объектам данного типа возрастает с каждым годом. Это происходит не только потому, что характеристики населения АСЗ – важный штрих в научной картине состояния и эволюции Солнечной системы, но и по двум причинам практического плана: 1. Достаточно массивные АСЗ, (особенно потенциально опасные астероиды) представляют собой определенную опасность для человечества, и 2. АСЗ сейчас рассматривается как один из источников ценных космических ресурсов (чаще всего – источников ценного сырья).

По современным представлениям главный источник АСЗ – это Главный пояс астероидов (ГПА), поставляющий до 94% АСЗ, а источником остальных АСЗ является пояс Койпера [2].

Согласно установившейся (в целом) картине эволюции Солнечной системы (см., например, [3, 4]), бомбардировка Земли астероидами – не эпизодическое явление. Земля существует более 4.5 млрд. лет. Она сформировалась довольно быстро (за примерно 100 млн. лет) и с самого начала испытывала постоянные столкновения с телами меньшего размера (планетезималиями). Эти столкновения привели к росту массы про-

топланет - сгустков вещества в протосолнечной системе и появлению в результате роста одного из сгустков нашей планеты. Бомбардировка продолжается до сих пор, но её темп меняется со временем.

Интенсивность столкновений в более близкие эпохи существенно понизилась, но все-таки не стала пренебрежимо малой. Эти изменения можно проследить, анализируя изменение со временем темпа ударного кратерообразования на Луне, поверхность которой служит естественным “журналом” с записями столкновений за большой интервал времени (миллиарды лет). Отсутствие атмосферы, воды, тектонической активности способствует сохранности записей в этом “журнале”. Для Луны согласно работе [5] история бомбардировки описывается формулой

$$\phi(> 1km) = 3.77 \cdot 10^{-13} \times \exp(6.93t) + 8.38 \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

где ϕ - число кратеров размером более 1 км, образовавшихся на поверхности Луны за 1 год. Время t задается в миллиардах лет от нашей эпохи в прошлое. Важный вывод – последние 2 млрд. лет темп бомбардировки Луны, а значит и Земли, телами, представляющими опасность (за образование ударных кратеров размером более 1 км, ответственны тела размером более 50 м) менялся мало. Для Земли темп нужно умножить на фактор 13.3, т.е. на отношение площадей максимальных сечений Земли и Луны. Второй вывод – тела размером 50 м сталкиваются с Землёй в среднем один раз в несколько сотен лет.

Период постоянного темпа потери астероидов из ГПА может быть даже больше 2 млрд лет. В [6] приводятся аргументы в пользу того, что почти постоянный и не пренебрежимо малый поток астероидов, покидал ГПА в течение последних 3.7 – 3.8 млрд лет.

Важной динамической характеристикой АСЗ является шкала существования текущего населения АСЗ. Уже первые оценки [7, 8] показали, что эта шкала относительно короткая и составляет несколько миллионов лет. Вытянутые орбиты АСЗ подвержены сильным возмущениям от планет и на этой шкале времени они либо выбрасываются из Солнечной системы, либо падают на Солнце и планеты.

Из того факта, что время жизни текущего населения АСЗ на три порядка величины короче продолжительности периода бомбардировки с примерно постоянным темпом, следует простой вывод – население АСЗ постоянно (и довольно равномерно во времени) пополняется, причем интенсивности истощения текущего населения АСЗ и его пополнения находятся в динамическом равновесии, характеризуемым общим количеством АСЗ и некоторой временной шкалой пополнения (истощения) t_{NEA} . Для определенности под t_{NEA} мы будем понимать время, за которое текущее население АСЗ уменьшается в 2 раза (здесь пополнение не учитывается).

Точное определение этой шкалы важно и для оценки темпа бомбардировки и для выбора модели пополнения. Если общее число в текущем населении АСЗ – задача наблюдательная, то точное определение значения – задача моделирования. В предыдущих работах [7, 8] модельные оценки t_{NEA} довольно расплывчаты (указывается, что это время составляет несколько миллионов лет). И даже в более поздней, но уже классической, работе [9] оценки столь же неконкретны (указано, что t_{NEA} составляет менее 10 миллионов лет). Поскольку в последующем мы планируем рассмотреть источники АСЗ, то значение t_{NEA} необходимо знать точнее.

В данной работе с помощью численной модели эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей, мы уточнили значение t_{NEA} . В разделе 2 описан метод моделирования и начальные условия. В разделе 3 представлены результаты. В разделе 4 собраны основные выводы.

2. Начальные данные и метод расчета

Основная идея расчетов проста – нужно задать начальное распределение АСЗ, “выключить” источники АСЗ и проследить дальнейшую динамическую эволюцию этого населения малых тел Солнечной системы.

Итак, нужно задать начальные распределения элементов орбит АСЗ, прежде всего, больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит. Все эти характеристики наиболее важны для рассмотрения динамической эволюции ансамбля АСЗ. Массы АСЗ в динамической модели можно не учитывать, поскольку массы АСЗ намного меньше масс основных гравитирующих центров в Солнечной системе, включая массивные астероиды ГПА.

Конечно, было бы идеальным иметь полные исходные данные из наблюдений. К сожалению, полнота данных об астероидах, сближающихся с Землёй, может считаться удовлетворительной только для астероидов размером более 1 км. Для астероидов меньших размеров неполнота быстро увеличивается с уменьшением массы. Так по данным США (см., например, документ “NATIONAL NEAR-EARTH OBJECT PREPAREDNESS STRATEGY AND ACTION PLAN” 2018, доступный по адресу <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/06/National-Near-Earth-Object-Preparedness-Strategy-and-Action-Plan-23-pages-1MB.pdf>) для астероидов размером 300 м неполнота составляет примерно 85%, для астероидов размером 50 м (Тунгусское тело) неполнота составляет уже примерно 99%, а для астероидов декаметрового размера (например, таких как Челябинское тело) неполнота весьма близка к 100%. Таких декаметровых АСЗ может существовать порядка 10 млн. Понятно, что такой огромный объем данных (имейся он у исследователей) все равно

было бы невозможно включить в динамический код. Поэтому на практике для моделирования динамической эволюции ансамбля АСЗ обычно задают некоторое достаточно представительное количество АСЗ (включая как известные, так и клонированные объекты), распределения элементов орбит которых максимально близки к наблюдаемым. Для использования в модели мы взяли указанные распределения АСЗ в том виде, как они приведены в программном комплексе NEOPOP Европейского космического агентства (ЕКА) [<http://neo.ssa.esa.int/neo-population>]. В ходе мероприятий, связанных с программой ЕКА по космической ситуационной осведомленности (SSA), возникла необходимость в программном средстве моделирования систем наблюдения и была разработана находящаяся в открытом доступе Программа Наблюдения Населения Околосемных Объектов (Near-Earth Object Population Observation Program, NEOPOP), позволяющая пользователям выполнять:

- генерацию популяций ОСЗ на основе недавно разработанной модели Granvik et al. [10];
- имитацию наблюдений популяций ОСЗ с использованием недавно разработанной модели производительности оптического датчика фирмы Gelhaus;
- анализ популяций ОСЗ.

NEOPOP реализован в виде консольной программы и может удобно управляться с помощью графического пользовательского интерфейса (GUI), который поставляется вместе с инструментом.

С помощью данной программы была сгенерирована синтетическая популяция АСЗ, основанная на модели Granvik et al. (2018) [10] с числом частиц в начальный момент $N_0 = 1674$. Количество объектов определялось с одной стороны необходимостью достаточно представительной выборки, а с другой техническими (вычислительными) ограничениями. На рис. 1 и рис. 2 (слева) представлены параметры данной популяции.

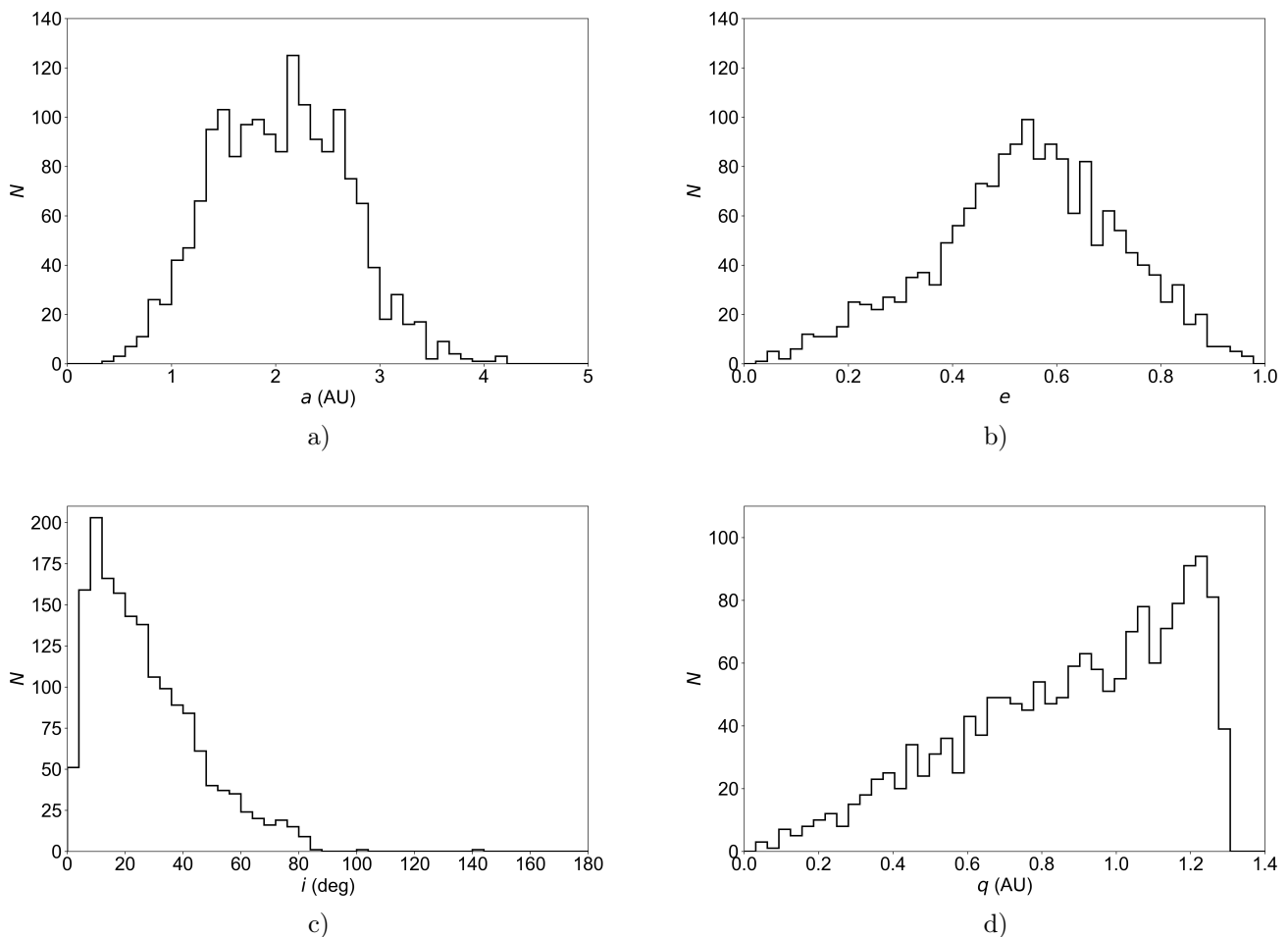


Рис. 1. Начальные условия для модели: распределение АСЗ а) по большим полуосям, б) по эксцентриситетам, в) по наклонениям, д) по перигелийному расстоянию

Главные затраты в подобных численных моделях уходят на адекватное вычисление гравитационного поля, меняющегося с изменением положения гравитирующих тел. Для того чтобы избежать нерациональных затрат вычислительного времени, мы ограничились набором из 10 гравитирующих тел, включающих Солнце, Землю, Луну и другие планеты Солнечной системы. Как уже отмечалось выше, хотя среди астероидов встречаются достаточно крупные тела, ни один из АСЗ не является достаточно крупным, чтобы

вносить сколь-нибудь заметный (в рамках данной задачи) вклад в структуру гравитационного потенциала Солнечной системы. Исходя из этого население АСЗ моделировалось малыми телами, гравитацией которых можно пренебречь. Начальные условия для гравитирующих тел в модели были взяты из базы данных NASA JPL HORIZONS (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>).

Для моделирования динамической эволюции ансамбля АСЗ был использован программный комплекс REBOUND [11]. REBOUND - это универсальный N-body код, который находится в свободном доступе под лицензией с открытым исходным кодом. Разработанный для столкновительной динамики, код имеет высокую модульность и может быть легко настроен для работы над широким спектром различных проблем в астрономии и в других областях. По сообщению разработчиков, код может эффективно работать как на настольных компьютерах, так и на больших вычислительных кластерах. Мы подтверждаем это заключение, основываясь на нашей практике расчетов с REBOUND.

Для интегрирования использовалась гибридная схема MERCURIUS [12], входящая в стандартную библиотеку REBOUND. В данной схеме основной расчёт идёт при помощи симплектической схемы WHFast [13] с постоянным шагом по времени, но при возникновении ситуации сближений частиц, для сближающихся частиц интегрирование автоматически переключается на схему IAS15 [14] с переменным шагом по времени. Такой подход позволяет точно обрабатывать сближения и столкновения частиц, сохранив при этом преимущества симплектической схемы при интегрировании на больших временах. Для WHFast был задан шаг интегрирования по времени соответствующий 36 часам, в схеме IAS15 шаг по времени выбирается автоматически для каждого шага [14].

Во время обработки сближений частиц также учитывалась возможность столкновения АСЗ с крупными телами, участвующими в моделировании. В качестве сечения столкновения использовались геометрические размеры объектов, а размерами астероидов при этом пренебрегалось. Частицы-астероиды, испытавшие столкновение, исключались из дальнейших вычислений. Отметим, что большая часть сближений не приводила к столкновениям и такие частицы продолжали участвовать в моделировании.

3. Результаты

На рис. 2 представлен график зависимости доли АСЗ от их первоначального количества. Доля здесь означает отношение количества АСЗ в данный момент времени $N(t)$ к изначальному количеству N_0 . При подсчете $N(t)$ – количества АСЗ в текущий момент времени – учитывалось условие $q < 1.3$ а.е. (из определения АСЗ). Расчеты проводились до момента времени, когда количество АСЗ в расчётной популяции уменьшилось до $N_0/2$. В нашей модели это время составило ~ 5 млн лет, что и даёт оценку для t_{NEA} . При этом из первоначального числа 1674 малых тел 208 (12%) вышли на гиперболические орбиты и покинули Солнечную систему, 482 (29%) испытали столкновения, среди них которых 457 пришлись на столкновения с Солнцем (около 95% столкновений) и 25 (около 5%) на столкновения с крупными телами (планетами).

Резкое изменение (уменьшение) доли АСЗ в начале эволюции модельного населения АСЗ связано с тем, что эффективность динамического взаимодействия АСЗ астероидов с планетами сильно зависит от начального положения АСЗ на диаграмме $a - e$ (результаты исследования этой зависимости будут представлены в готовящейся публикации).

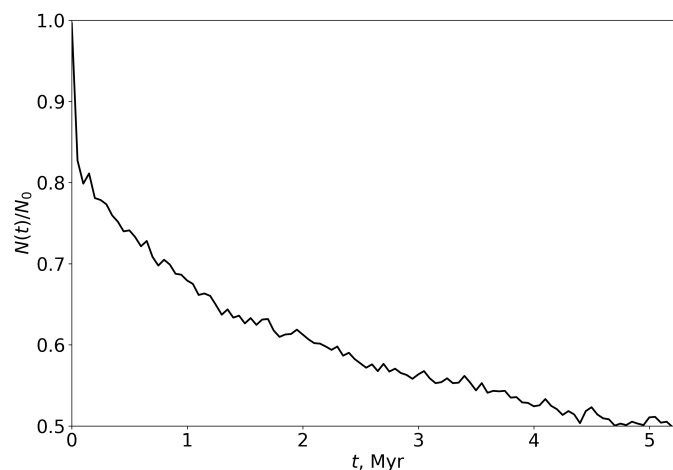


Рис. 2. Доля оставшихся АСЗ в модели в зависимости от времени

Начальные условия были выбраны так, что в вся популяция частиц-астероидов удовлетворяла определению АСЗ, однако в процессе динамической эволюции параметры орбит для некоторых частиц претерпели значительные изменения и они перестали удовлетворять определению АСЗ. Это видно из рис. 3, который показывает распределение частиц в пространстве большая полуось-эксцентриситет для начального момента

времени и в конце моделирования. В процессе динамической эволюции часть частиц возвращалась в область $q < 1.3$, на время увеличивая долю оставшихся АСЗ.

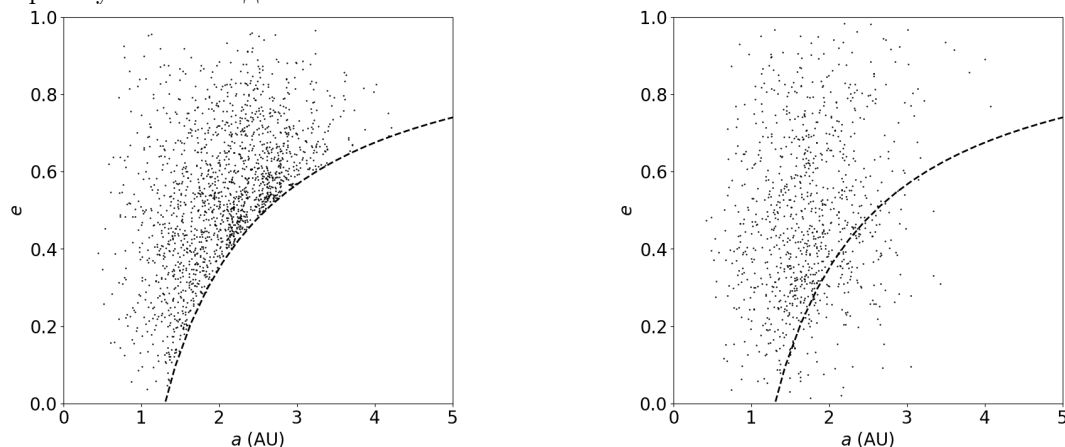


Рис. 3. Распределение астероидов в пространстве большая полуось - эксцентриситет: слева – для начального момента времени; справа – для момента времени 5 млн лет. Пунктирная линия отмечает границу $q = 1.3$

4. Заключение

Мы показали с помощью динамической модели эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей, что характерное время пополнения (истощения) текущего населения АСЗ составляет $t_{NEA} \sim 5$ млн лет. Наша оценка согласуется с результатами других авторов (например, [7, 8, 9]), которые, однако, дают гораздо более приблизительную приближенную оценку t_{NEA} . Полученная нами величина времени истощения АСЗ важна при рассмотрении механизмов пополнения АСЗ, а также для количественной оценки адекватности различных механизмов пополнения населения АСЗ.

Благодарность

РЗ и ВК выражают благодарность Южному федеральному университету за финансовую поддержку (грант 2020, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

Список литературы

1. B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, V. V. Emel'yanenko, and A. S. Shugarov, *Solar System Research*, **47**, 288, 2013.
2. A. Morbidelli, J. Bottke, W. F., C. Froeschlé, and P. Michel, *Origin and Evolution of Near-Earth Objects*, 409–422 (2002).
3. A. N. Youdin and S. J. Kenyon, *From Disks to Planets*, 1 (2013).
4. W. F. Bottke and M. D. Norman, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **45**, 619, 2017.
5. G. Neukum and B. Ivanov, in *Lunar and Planetary Science Conference*, 991, Lunar and Planetary Science Conference (1994).
6. R. G. Strom, M. Renu, Z.-Y. Xiao, T. Ito, F. Yoshida, and L. R. Ostrach, *Research in Astronomy and Astrophysics*, **15**, 407, 2015.
7. P. Farinella, C. Froeschlé, C. Froeschlé, R. Gonczi, G. Hahn, A. Morbidelli, and G. B. Valsecchi, *Nature*, **371**, 314, 1994.
8. D. P. O'Brien and R. Greenberg, in S. Mackwell and E. Stansbery, eds., *Lunar and Planetary Science Conference*, 2018, Lunar and Planetary Science Conference (2003).
9. M. Granvik, A. Morbidelli, D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, D. Nesvorný, and R. Jedicke, *A&A*, **598**, A52, 2017.
10. M. Granvik, A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, et al., *Icarus*, **312**, 181, 2018.
11. H. Rein and S. F. Liu, *A&A*, **537**, A128, 2012.
12. H. Rein, D. M. Hernandez, D. Tamayo, G. Brown, et al., *MNRAS*, **485**, 5490, 2019.
13. H. Rein and D. Tamayo, *MNRAS*, **452**, 376, 2015.
14. H. Rein and D. S. Spiegel, *MNRAS*, **446**, 1424, 2015.