

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПА УБЫЛИ НАСЕЛЕНИЯ АСЗ ОТ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Р. В. Золотарёв, Б. М. Шустов
Институт астрономии РАН

В работе проводится численное моделирование динамической эволюции населения АСЗ на время 20 млн лет. В результате получено характерное время убыли населения АСЗ для различных областей пространства орбит, а также рассмотрены различные каналы убыли АСЗ.

DEPENDENCE ON ORBITAL PARAMETERS FOR NEA DEPLETION RATE

R. V. Zolotarev, B. M. Shustov
Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

A numerical simulation of the dynamical evolution of the NEA population is made. Dependence of NEA depletion rate on orbit parameters is obtained. Different channels of the NEA depletion are considered.

Введение

Изучение объектов, сближающихся с Землей является важной задачей в контексте вопросов астероидно-кометной опасности, а также изучения Солнечной системы. Согласно определению, астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), — это астероиды с перигелийным расстоянием $q < 1.3$ а. е. АСЗ являются подклассом более общего класса объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ), куда, помимо астероидов, входят еще и кометы с перигелийным расстоянием $q < 1.3$ а. е., однако комет существенно меньше, чем астероидов.

Одной из особенностей динамической истории текущего населения АСЗ является тот факт, что численность населения АСЗ на протяжении последних 2–3 млрд лет оставалась неизменной. Об этом свидетельствуют исследования процесса ударного кратерообразования на Луне [1]. С другой стороны, оценки динамической шкалы существования населения АСЗ дают существенно меньшее время, до нескольких десятков млн лет (см., например, обзор в [2]). Для характеристики динамической шкалы можно использовать время, за которое текущее число астероидов значительно уменьшится. В нашей работе мы используем медианное время t_{NEA} , т. е. время, за которое число астероидов уменьшается вдвое. В работе [2] было показано, что для населения АСЗ t_{NEA} составляет порядка 3 млн лет, а также было замечено на качественном уровне, что эта величина сильно зависит от значений большой полуоси и эксцентриситета орбит астероидов. В данной работе этот вопрос исследуется детально на количественном уровне.

Методика

Для оценки времени жизни АСЗ рассматривается динамическая эволюция фиксированного населения АСЗ с «выключенными» источниками пополнения и вычисляется t_{NEA} в различных регионах пространства орбит $a - e - i$. Технически это реализуется следующим образом. Из каталога Центра малых планет [3] были выбраны АСЗ с абсолютной

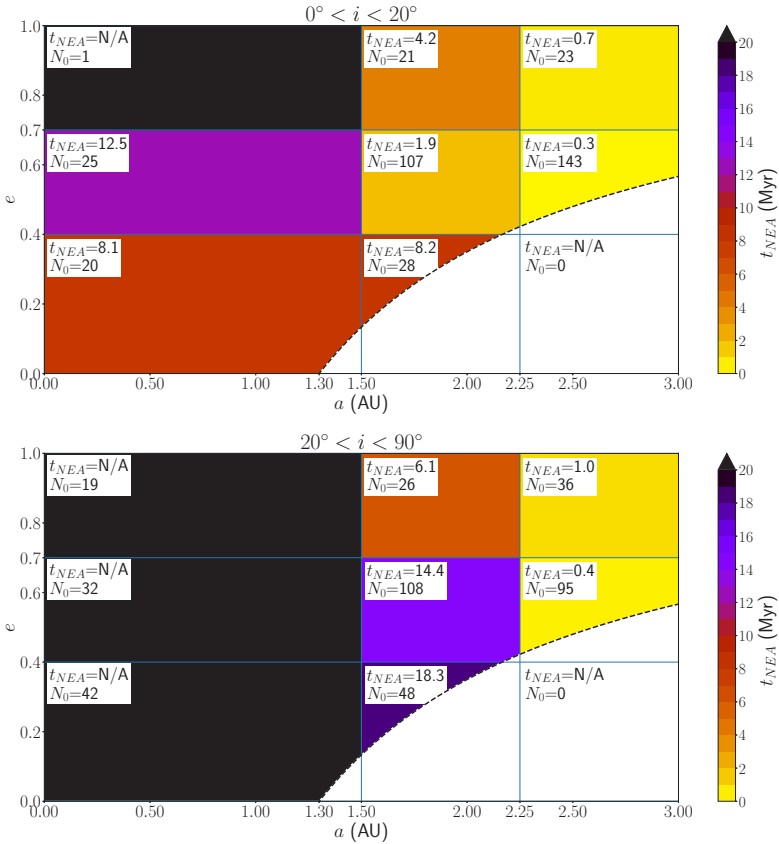


Рис. 1. Зависимость $t_{NEA}(a, e, i)$ в выделенных ячейках области орбитальных параметров населения АСЗ. Цветом и текстом указано время t_{NEA} (в млн лет) и количество астероидов в начальный момент времени N_0 . В зонах, окрашенных черным цветом, $t_{NEA} > 20$ млн лет. Пунктирная линия обозначает границу АСЗ $q = 1.3$ а. е.

астероидной звездной величиной $H < 17.7$, такое значение H соответствует размеру более примерно 1 км. Таких астероидов нашлось 825. Выборка из АСЗ размером более 1 км может считаться достаточно полной (см. обзор в [2]). Далее производилось интегрирование движения выбранных астероидов на 20 млн лет при помощи программного комплекса REBOUND с использованием гибридной схемы MERCURIUS [4]. В модели учитывалось гравитационное поле Солнца и планет, в то время как астероиды считались как безмассовые частицы, такое допущение вполне уместно, учитывая соотношение масс астероидов и планет. Также в модели учитывалась возможность столкновения астероидов с Солнцем и планетами, при этом в качестве сечения брались геометрические размеры объектов, но астероиды считались точками. Для астероида, испытавшего столкновение, интегрирование прекращалось.

Для изучения зависимости t_{NEA} от времени вся область орбитальных параметров $a - e - i$ была разбита на ячейки, границами для которых были значения $a = (0.0, 1.5, 2.25, 3.0)$ а. е., $e = (0.0, 0.4, 0.7, 1.0)$ и $i = (0, 20, 90^\circ)$. Граничные значения выбирались так, чтобы в каждую ячейку попало достаточное количество астероидов в начальный момент времени. Для каждой из ячеек прослеживалась эволюция отношения $N(t)/N_0$, где N_0 — число астероидов в ячейке в начальный момент времени, $N(t)$ — число астероидов в ячейке в момент времени t . Время, когда отношение становится равным 0.5, соответствует t_{NEA} .

Для того чтобы лучше изучить роль сближений с планетами в ходе эволюции, в модели отслеживались количество сближений астероидов для различных в разных областях пространства орбит $a - e$. Под сближением здесь понимается сближение астероида с какой-либо из планет на расстояние, соответствующее трем радиусам сферы Хилла $r_H = a_P \sqrt[3]{m_P / (m_P + M_\odot)}$ для данной планеты P . Также в модели отслеживалась статистика ухода АСЗ по различным каналам (выход из области определения АСЗ, столкновения, выброс из Солнечной системы).

Результаты

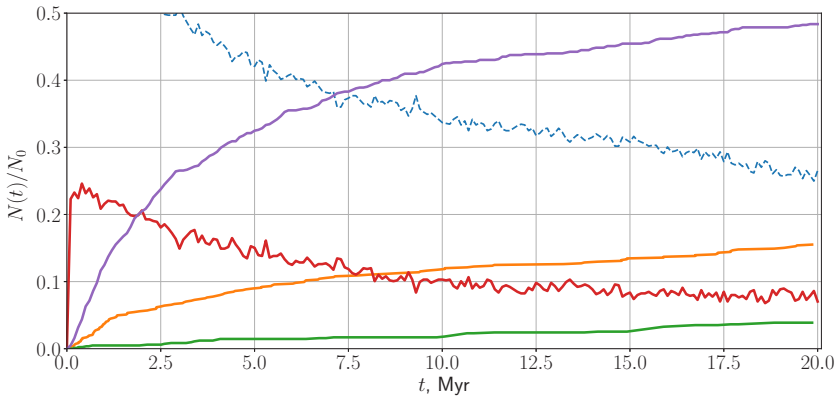


Рис. 2. Зависимость от времени количества АСЗ $N(t)$ относительно начального количества N_0 , покидающих население АСЗ. Фиолетовая линия — доля АСЗ, выброшенных из Солнечной системы на момент времени t ; зеленая линия — доля АСЗ, испытавших столкновения с планетами; оранжевая — доля АСЗ, столкнувшихся с Солнцем; красная — доля АСЗ, оставшихся в Солнечной системе, но вышедших из области определения АСЗ. Штриховая линия — доля оставшихся АСЗ в модели

На рис. 1 представлена зависимость характерного времени убыли t_{NEA} для различных областей пространства орбитальных параметров $a - e - i$. На рисунке видно, что значения t_{NEA} заметно выше для АСЗ, орбиты которых изначально имели большие значения наклона. Качественно это можно объяснить тем, что астероиды на этих орбитах (при прочих равных параметрах) имеют меньше тесных сближений с планетами. Также заметно, что при больших значениях a и e значения t_{NEA} заметно уменьшаются. Учет информации о

сближениях говорит о том, что сближений в этих областях существенно больше (см. подробнее [5]). Это как раз обусловлено тем, что на таких орбитах происходит больше сближений с самым мощным возмущающим телом — Юпитером.

На основе результатов численного расчета также была изучена зависимость темпа ухода АСЗ от времени для различных каналов ухода. На рис. 2 показана зависимость от времени количества АСЗ $N(t)$ относительно начального N_0 , покидающих население АСЗ различными способами. Со временем относительное распределение по каналам убыли меняется, но количество безвозвратно ушедших астероидов (испытавших столкновение или выброшенных из Солнечной системы) монотонно растет. Значительная доля столкновений приходится на столкновения с Солнцем, что отмечалось также в работе [6].

Заключение

В работе количественно исследована зависимость темпа убыли АСЗ от положения астероидов в пространстве элементов орбит, получены оценки для характерного времени убыли. Рассмотрены основные каналы убыли АСЗ. Полученные результаты могут быть полезны в дальнейшем при исследовании механизмов пополнения населения АСЗ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00115

Библиографические ссылки

- [1] *Neukum G., Ivanov B. A., Hartmann W. K.* Cratering Records in the Inner Solar System in Relation to the Lunar Reference System // Chronology and Evolution of Mars. Series: Space Sciences Series of ISSI / ed. by Reinald Kallenbach, Johannes Geiss, William K. Hartmann. — 2001. — Vol. 12. — P. 55–86.
- [2] *Zolotarev R. V., Shustov B. M.* On the Dynamic Evolution of the Population of Near-Earth Asteroids // Astronomy Reports. — 2021. — Vol. 65, № 6. — P. 518–527.
- [3] IAU Minor Planet Center. URL: <https://www.minorplanetcenter.net/data>.
- [4] *Rein Hanno, Hernandez David M., Tamayo Daniel et al.* Hybrid symplectic integrators for planetary dynamics // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Vol. 485, № 4. — P. 5490–5497. 1903.04972.
- [5] *Zolotarev R. V., Shustov B. M.* Dynamic scale of NEAs: dependence on orbital parameters // INASAN Science Reports. — 2022. — Vol. 7. — P. 23–29.
- [6] *Farinella Paolo, Froeschlé Christiane, Froeschlé Claude et al.* Asteroids falling into the Sun // Nature. — 1994. — Vol. 371, № 6495. — P. 314–317.