

Динамическая шкала АСЗ: зависимость от орбитальных параметров

Золотарёв Р.В., Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В нашей предыдущей работе (Золотарёв, Шустов 2021) были рассмотрены аспекты динамической эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ): изменение со временем темпа убыли АСЗ и итоговая эффективность различных каналов убыли АСЗ. Было показано, что численность населения АСЗ убывает с медианным временем ~ 3 млн. лет, что уточняет оценки других авторов. На качественном уровне была также показана зависимость медианного времени от начальных значений параметров орбиты: большой полуоси и эксцентриситета. В данной работе эта зависимость от начального набора параметров орбит астероидов впервые исследована количественно. Как и в предыдущей работе интегрирование движения астероидов проводилось при помощи программного комплекса REBOUND. Интервал интегрирования 20 млн. лет. Также изучена зависимость темпа ухода АСЗ от времени для различных каналов ухода.

Поступила в редакцию 09.05.2022 г. Принята в печать 30.05.2022 г.

Ключевые слова: астероиды сближающиеся с Землей, динамическая эволюция астероидов

Dynamic scale of NEAs: dependence on orbital parameters

Zolotarev R.V., Shustov B.M.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In our previous paper (Zolotarev, Shustov 2021), aspects of the dynamic evolution of the population of near-Earth asteroids (NEAs) were considered. Those were the NEA depletion rate and the final efficiency of various channels of NEA escape. It was shown that the given population of the NEA decreases with a median time $t_{\text{NEA}} \sim 3$ million years, which refines the estimates of other authors. At the qualitative level, the dependence of t_{NEA} on the initial values of the orbit parameters: the semi-major axis and eccentricity was also shown. In this paper, this dependence on the initial parameters of asteroid orbits for the first time is studied quantitatively. As in the previous work, the integration of asteroid motion was carried out using the REBOUND software package. The integration interval is 20 million years. The change of the NEO escape routes in time for various channels of escape has also been studied.

Received 09.05.2022. Accepted 30.05.2022.

Keywords: Near-Earth asteroids, dynamic evolution of asteroids

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.004

1. Введение

Изучение населения АСЗ, т.е. астероидов, у которых перигелийное расстояние q удовлетворяет условию $q < 1.3$ а.е., является важным в связи с вопросами астероидно-кометной опасности, вопросами происхождения Солнечной системы, а также перспективами добычи астероидных ресурсов. Одной из особенностей

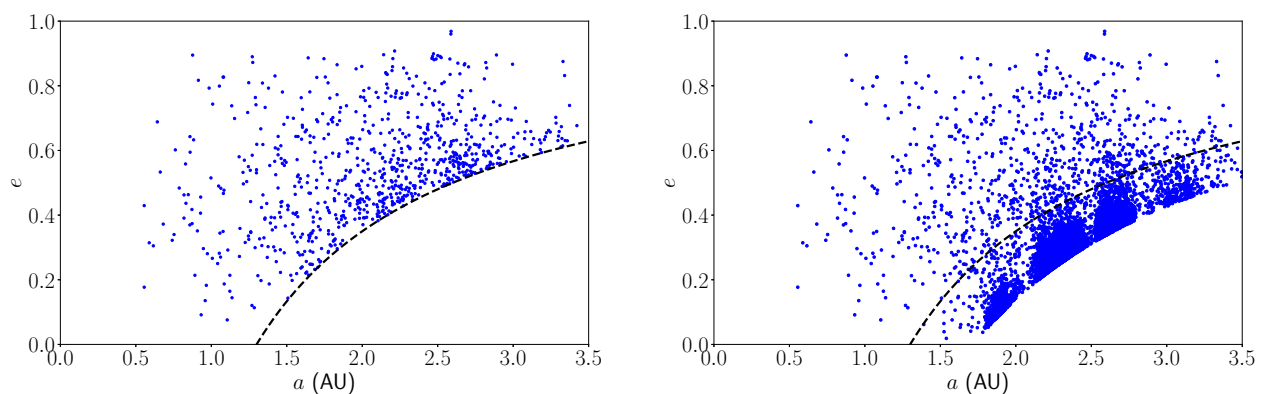


Рис. 1: Начальное распределение исследуемых астероидов размером более 1 км в плоскости элементов орбит $a - e$. Слева: модель 1, в которой рассматриваются только АСЗ ($q < 1.3$ а.е.); справа: модель 2, в которой рассматриваются все астероиды с $q < 1.72$ а.е.

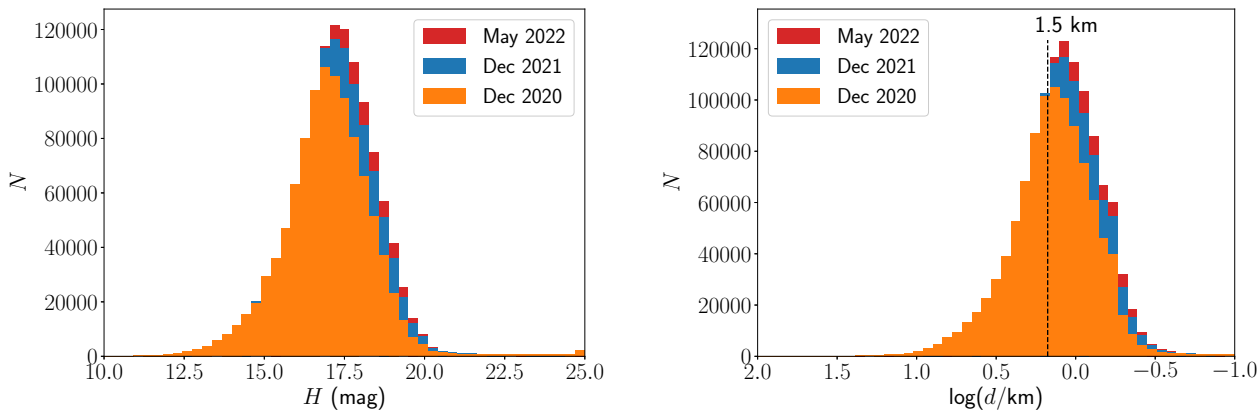


Рис. 2: Динамика изменения распределения астероидов ГПА по абсолютной астероидной звездной величине H (слева) и по размерам d (справа), включенных в базу Центра малых планет [3].

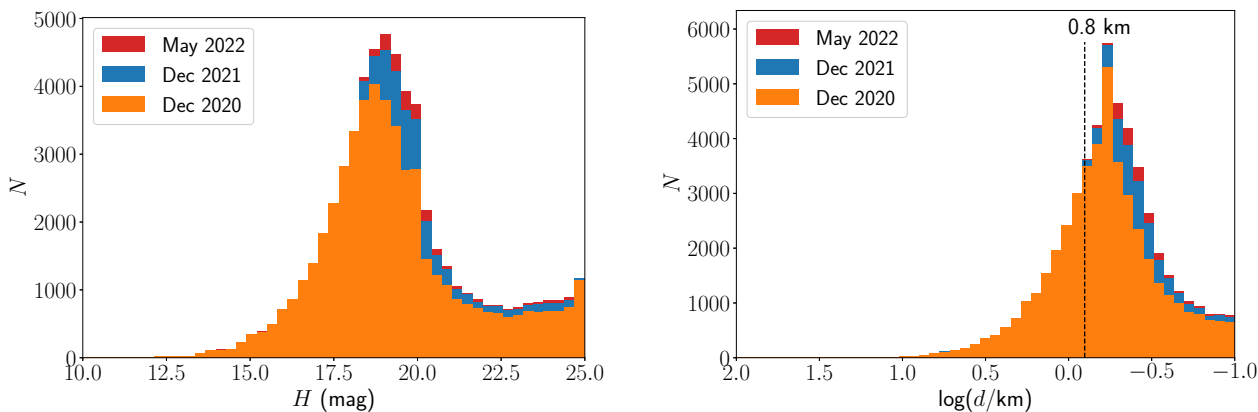


Рис. 3: Динамика изменения распределения астероидов ГПА с перигелийными расстояниями $q < 1.72$ а.е. по размерам (см. для сравнения рис. 2, нижнюю панель).

эволюции населения АСЗ является тот факт, что численность АСЗ на протяжении приблизительно 2–3 последних миллиардов лет оставалась неизменной, о чем свидетельствуют исследования истории кратерообразования на Луне [1], с другой стороны, динамическая шкала текущего населения АСЗ существенно короче этого времени. Под динамической шкалой здесь понимается характерное время, за которое численность текущего населения заметно уменьшается. Как правило, для оценки шкалы берут т.н. медианное время t_{NEA} , т.е. интервал времени, за которое численность N популяции АСЗ уменьшается вдвое по отношению к начальному значению N_0 . По результатам других авторов в оценках t_{NEA} есть существенный разброс (см., например, обзор в [2]). В то же время, важно знать это значение поточнее, так как это знание накладывает ограничения на механизмы пополнения АСЗ, на оценки численности АСЗ, на оценки времени жизни Главного пояса астероидов и т.д.

В работе [2] нами было показано, что время жизни текущего населения АСЗ составляет около 3 млн. лет. Мы также заметили на качественном уровне, что значение t_{NEA} сильно зависит от значений большой полуоси a и эксцентриситета e АСЗ. В данной работе эта зависимость от начального набора параметров орбит астероидов исследована количественно. Такое исследование проводится впервые.

2. Постановка задачи и методика расчета

Основная идея расчетов состоит в том, чтобы проследить динамическую эволюцию фиксированной на данный момент популяции АСЗ с «выключенными» источниками пополнения АСЗ. Для этого при помощи выборки АСЗ из базы данных Центра малых планет [3] задается начальное распределение параметров орбит АСЗ. Для выборки были взяты АСЗ с абсолютной звездной астероидной величиной $H < 17.7^m$, т.е.

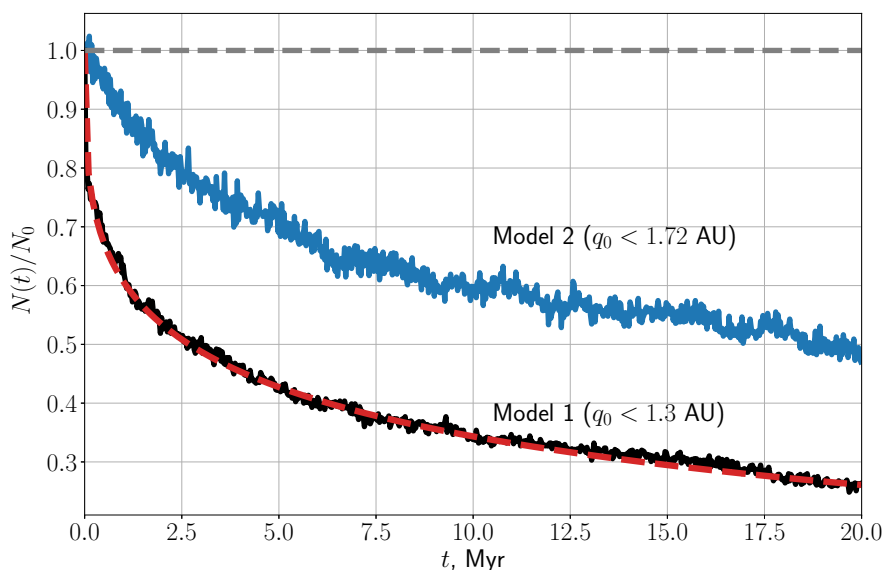


Рис. 4: Изменение отношения $N(t)/N_0$ для ансамбля АСЗ (модель 1) и для расширенного набора астероидов (модель 2). Красной штриховой линией показана аппроксимационная зависимость (2) для модели 1.

диаметром $d > 1$ км, поскольку она может считаться достаточно полной. Количество АСЗ в начальный момент времени $N_0 = N(t=0) = 825$. Эта выборка представлена на рис. 1 (слева) в плоскости элементов орбит $a - e$. В дальнейшем мы рассматриваем эволюционное изменение этого распределения (Модель 1). Напомним, что по определению к АСЗ относятся астероиды с $q < 1.3$ а.е. На этом же рисунке показано начальное распределение на такой же диаграмме всех астероидов размером более 1 км, но с перигелийными расстояниями $q < 1.72$ а.е. Число таких астероидов согласно [3] составляет около 10 тыс. Эволюционное изменение этого распределения далее обозначено как Модель 2.

Мы полагаем, что расширение списка рассматриваемых астероидов позволяет понять динамику изменения населения АСЗ с учетом прихода астероидов в зону АСЗ из не-АСЗ зоны пространства элементов орбит ($a - e$). В работе [2] мы назвали это диффузией орбит.

Основной источник АСЗ — это астероиды Главного пояса (ГПА) (см., например, [4, 5]). Понятно, что, как это следует из сведений, приведенных во Введении, если включить в рассмотрение весь этот ансамбль астероидов, то население АСЗ будут постоянно пополняться из огромного резервуара ГПА и количество АСЗ в каждый данный момент времени будет примерно одинаковым. К сожалению, включить в рассмотрение все астероиды ГПА размером более 1 км затруднительно не только из-за их большого числа, но и потому что выборка таких астероидов не будет достаточно полной. На рис. 2 показано распределение астероидов ГПА по абсолютной астероидной звездной величине H и по размерам в соответствии с результатами, опубликованными на сайте Центра малых планет [3] в последние годы. Размеры определялись по формуле [6]:

$$d(\text{km}) = 10^{3.1236 - 0.5 \log_{10}(A) - 0.2H} \quad (1)$$

при значении альбедо, принятом $A = 0.15$.

Очевидно, что заметное из рис. 2 быстрое нарастание количества открытых астероидов происходит в основном за счет астероидов меньших размеров. Практически все более крупные астероиды уже открыты. Граница «полноты обнаружения», согласно рис. 2, соответствует примерно $d = 1.5$ км. Из общих соображений можно представить, что положение границы полноты зависит от условий обнаружения, и астероиды на более вытянутых орбитах обнаруживаются легче, поскольку они могут сближаться с Землей на более короткие расстояния, чем астероиды ГПА, находящиеся на почти круговых орбитах. На рис. 3 показано распределение астероидов по размерам для выборки астероидов с перигелийными расстояниями $q < 1.72$ а.е. Как видно из рис. 3, граница полноты обнаружения для таких астероидов находится примерно на $d = 800$ м.

Интегрирование движения астероидов в моделях 1 и 2 проводилось на 20 млн. лет при помощи программного комплекса REBOUND с использованием гибридной схемы MERCURIUS [7]. В модели учитывалось гравитационное поле планет и Солнца, в то время как астероиды считались как безмассовые частицы. В численной модели учитывалась возможность столкновения астероидов с Солнцем и планетами, при этом в качестве сечения брались геометрические размеры объектов, а размерами астероидов при этом пренебрегалось.

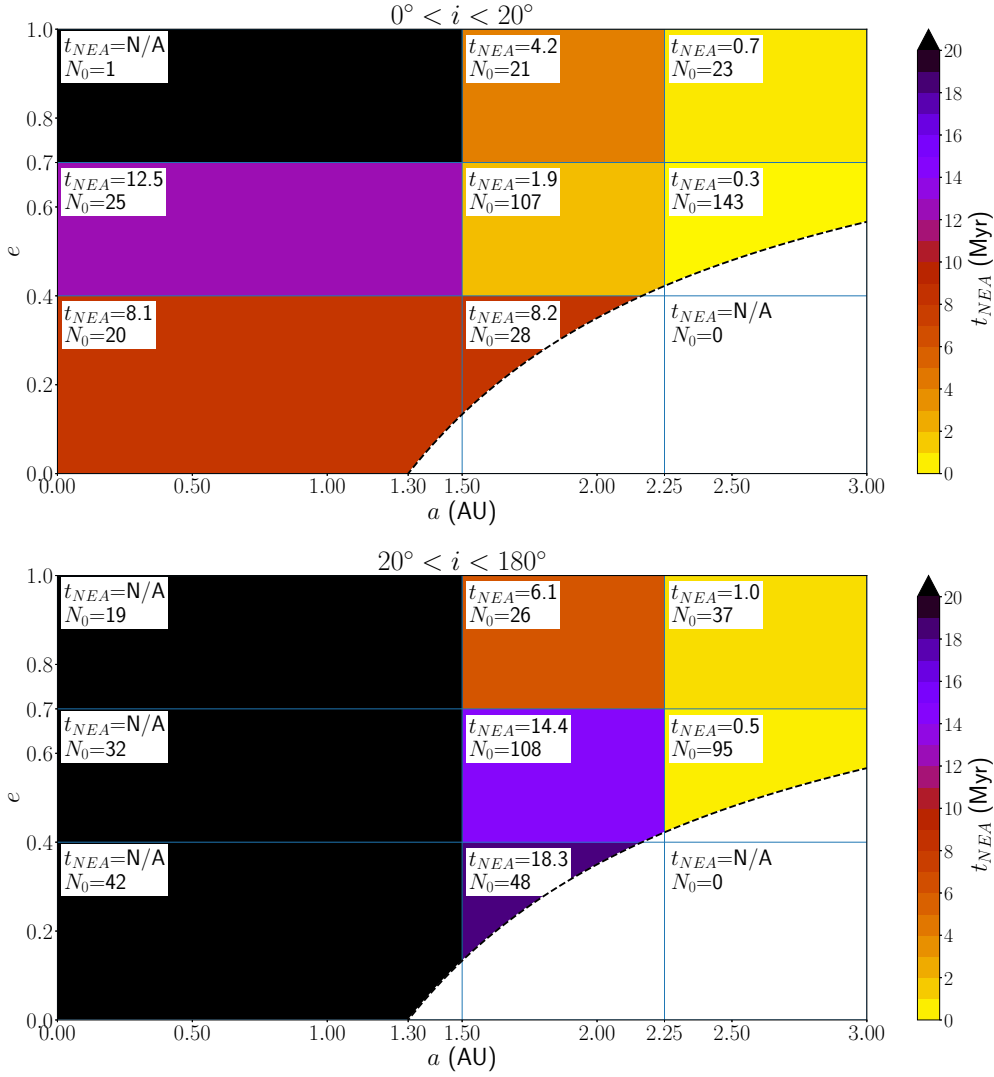


Рис. 5: Зависимости $t_{NEA}(a, e, i)$ в выделенных ячейках области орбитальных параметров населения АСЗ. В каждой ячейке цветом и текстом указано время t_{NEA} (в млн. лет) и количество астероидов N_0 в момент времени $t_0 = 0$. В зонах, окрашенных черным, t_{NEA} превышает 20 млн. лет.

Для выяснения характера зависимости $t_{NEA}(a, e, i)$ вся область орбитальных параметров населения АСЗ была разбита на ячейки, граничными значениями для которых были:

$$a = 0.0, 1.50, 2.25, 3.0 \text{ а.е.},$$

$$e = 0.0, 0.2, 0.7, 1.0,$$

$$i = 0, 20, 180^\circ.$$

Количество таких ячеек — 18, это довольно грубая сетка, но из-за относительно небольшого общего числа рассматриваемых астероидов, число ячеек увеличить не представляется разумным, т.к. и без того малое число АСЗ в ячейке при этом стало бы слишком малым для проведения статистических оценок. Эволюция отношения N/N_0 , т.е. отношение текущего числа АСЗ к начальному числу АСЗ в данной ячейке, прослеживалась для каждой такой ячейки, и, соответственно, для каждой ячейки определялось значение t_{NEA} .

Для лучшего понимания роли сближений астероидов с планетами, для всех астероидов подсчитывалось число сближений каждого астероида с планетами. Сближением считается вход астероида в зону, радиусом в три радиуса сферы Хилла $r_H \simeq a_P \sqrt{\frac{m_P}{m_P + M_\odot}}$ для данной планеты. Также в модели 1 непрерывно отслеживалась статистика ухода АСЗ по различным каналам (столкновения с Солнцем, столкновения с планетами, уход астероидов из Солнечной системы, выход астероидов из области определения АСЗ).

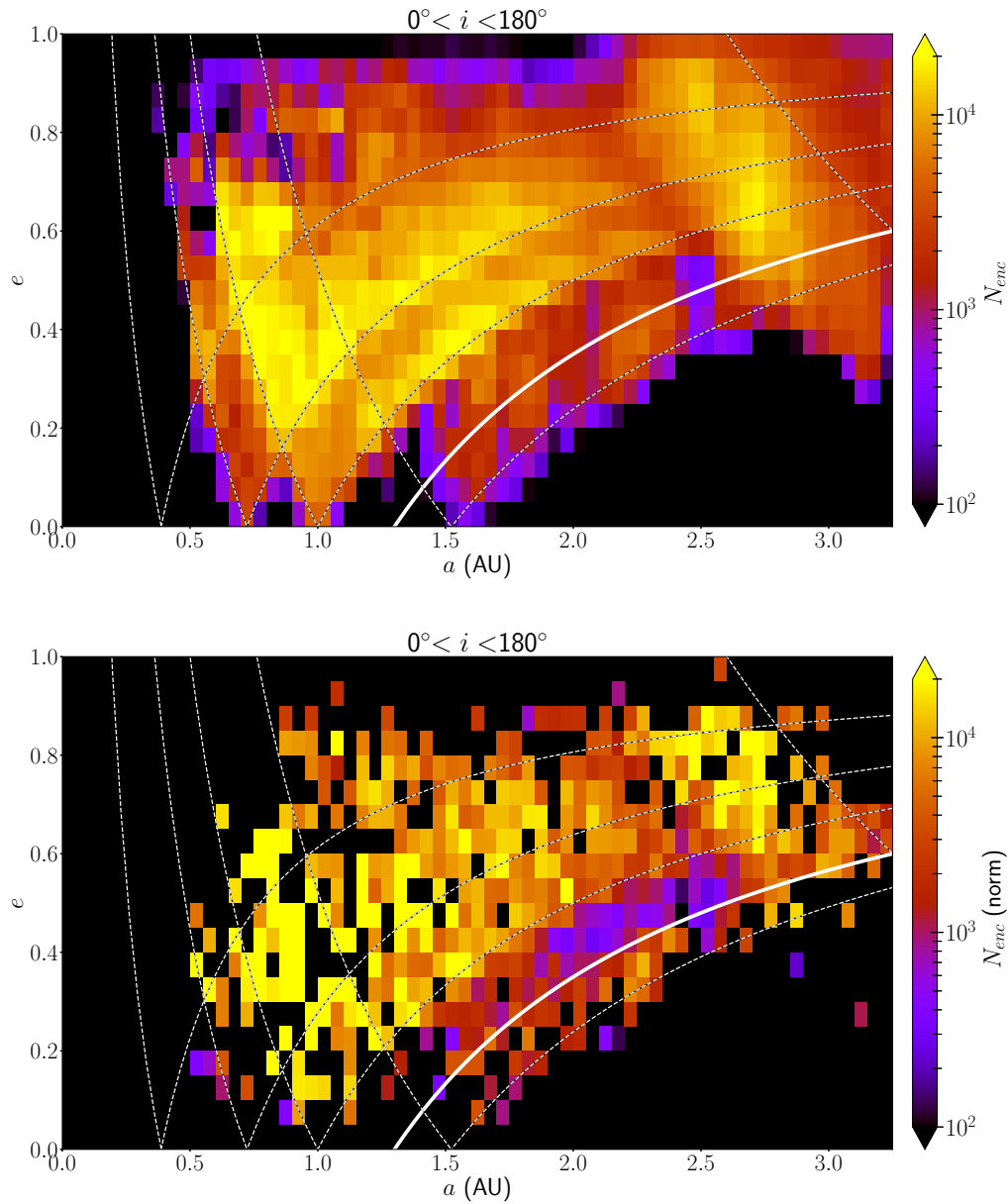


Рис. 6: Числа сближений с планетами для астероидов из разных ячеек на плоскости орбитальных параметров $a - e$, достигнутое на момент времени $t = 12$ млн. лет. На верхней панели показано общее число сближений астероидов с планетами в данной ячейке. На нижней панели — нормированное число сближений, в пересчете на астероид. Пунктирные линии соответствуют перигелийному расстоянию $q = 0.387, 0.723, 1.0, 1.523$ а.е., а также афелийному расстоянию $Q = 0.387, 0.723, 1.0, 1.523, 5.203$ а.е. Жирная белая линия показывает границу АСЗ $q = 1.3$ а.е.

3. Результаты

На рис. 4 проиллюстрированы результаты расчетов зависимости от времени отношения числа АСЗ в момент времени t к начальному числу АСЗ $N(t)/N_0$ для выборки АСЗ (модель 1) и для расширенного набора астероидов (модель 2). Хорошо видно, что в модели 1 значение t_{NEA} составляет примерно 3.0 млн. лет. Зависимость N/N_0 хорошо аппроксимируется выражением

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-0.5t^{0.33}}, \quad (2)$$

где время t задано в млн. лет. На рис. 4 также показана зависимость $N(t)/N_0$ в модели 2. Эта кривая спадает со временем гораздо медленнее, что естественно объясняется тем, что есть значительный резервуар астероидов в зоне $q < 1.72$ а.е., из которого астероиды могут «диффундировать» в зону АСЗ. Если рассматривать

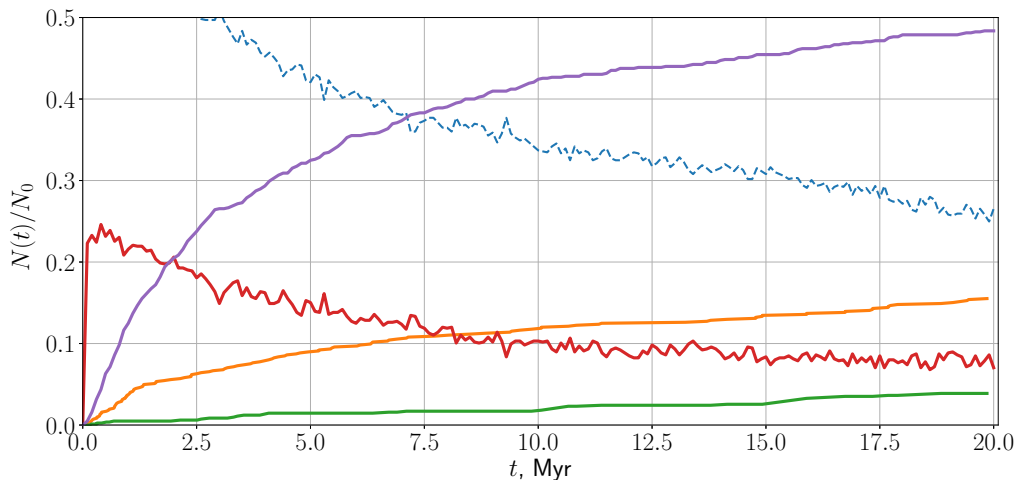


Рис. 7: Зависимость от времени количества $N(t)$ АСЗ относительно начального количества N_0 , уходящих из области определения АСЗ по различным каналам. Фиолетовая линия — доля АСЗ, выброшенных на момент времени t из Солнечной системы, зеленая — доля АСЗ, столкнувшихся с планетами, оранжевая — доля АСЗ, столкнувшихся с Солнцем, красная — доля АСЗ, оставшихся в Солнечной системе, но вышедших из области определения АСЗ. Штриховая линия — та же зависимость, что показана на рис. 4 (модель 1).

весь возможный резервуар астероидов ГПА, то кривая будет плоской на уровне значений $\simeq 1$ (на рис. 4 условно показана серой штриховой кривой).

Зависимость $t_{NEA}(a, e, i)$ в области орбитальных параметров населения АСЗ проиллюстрированы на рис. 5. Из рис. 5 хорошо виден основной характер зависимости t_{NEA} от орбитальных параметров. Мы полагаем, что он прежде всего объясняется количеством сближений данного астероида с крупными возмущающими орбиту астероида телами (планетами) за время интегрирования: чем больше сближений, тем более вероятен уход астероида из области АСЗ. Поэтому представляется логичным рассматривать $t_{NEA}(a, e, i)$ и информацию о частоте сближений совместно.

На рис. 6 показано количество сближений для астероидов из разных ячеек на плоскости орбитальных параметров $a - e$, достигнутое на момент времени $t = 12$ млн. лет. Картина, естественно, качественно не меняется и при интегрировании на больший интервал времени. Поскольку число сближений может быть довольно большим, оказалось возможным разбить плоскость $a - e$ на большее количество ячеек по сравнению с рис. 5. Это делает картину более детальной. На верхней панели рис. 6 показано общее число сближений с планетами астероидов находяющихся в данной ячейке. На нижней панели это число нормировано на некоторое среднее число астероидов в данной ячейке, т.е. на этой панели показано как бы некоторое среднее число сближений для каждого астероида из данной ячейки. Весьма характерной деталью на рис. 6 является повышенное число сближений (как общее так и относительное) для астероидов, для которых перигелийное расстояние $q = 0.72$ а.е. и $q = 1.0$ а.е., а также афелийное расстояние $Q = 1.0$, а.е. Это объясняется тем, что такие астероиды относительно чаще сближаются с Венерой и Землей соответственно. Повышенная частота сближений в правом верхнем углу диаграмм на рис. 6 объясняется тем, что астероиды на таких вытянутых орбитах с большими a относительно часто сближаются с Юпитером в афелийной области их орбит.

Рис. 5 иллюстрирует основной характер зависимости t_{NEA} от орбитальных параметров. Учет информации из рис. 6 позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Значения t_{NEA} существенно выше для АСЗ, орбиты которых изначально имели большие значения i . Качественно это можно объяснить тем, что астероиды на этих орбитах (при прочих одинаковых параметрах) имеют меньше тесных сближений с планетами.
- 2) При больших значениях a и e значения t_{NEA} существенно уменьшаются. Это как раз обусловлено тем, что на таких орбитах происходит больше сближений с самым мощным возмущающим телом — Юпитером.

Конечно, было бы неплохо получить более подробную карту $t_{NEA}(a, e, i)$, но для ее получения с достаточной степенью приближения необходимо рассчитать эволюцию гораздо большего количества частиц на гораздо более подробной сетке ячеек. Мы планируем выполнить эту работу. При этом ожидается, что сравнение с картой частоты сближений позволит провести более детальный анализ.

На основе полученных результатов расчетов мы также изучили зависимость темпа ухода АСЗ от времени для различных каналов ухода. На рис. 7 показана зависимость от времени количества $N(t)$ АСЗ

(относительно начального количества N_0), уходящих из области определения АСЗ по различным каналам. Со временем относительное распределение по различным каналам меняется, но количество безвозвратно ушедших астероидов (вследствие выброса из Солнечной системы, столкновения с планетами или Солнцем) монотонно растет. На момент $t = 20$ млн. лет доля не-АСЗ из Солнечной системы составляет 7%, столкнувшихся с планетами — 4%, столкнувшихся с Солнцем — 15%, выброшенных из Солнечной системы — 48%. Значительная доля столкновений приходится на столкновения с Солнцем, что отмечалось также в работе [8]. С течением времени доля оставшихся АСЗ будет уменьшаться и установятся окончательные соотношения. По предварительным оценкам приведенные выше доли увеличатся пропорционально, примерно в 1.2 раза.

4. Выводы

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

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

Список литературы

1. G. Neukum and B. A. Ivanov, in *Lunar and Planetary Science Conference*, 1263, Lunar and Planetary Science Conference (2002).
2. R. V. Zolotarev and B. M. Shustov, *Astronomy Reports*, **65**, 518, 2021.
3. IAU minor planet center, URL <https://www.minorplanetcenter.net/data>.
4. A. Morbidelli, J. Bottke, W. F., C. Froeschlé, and P. Michel, in *Asteroids III*, 409–422 (2002).
5. M. Granvik, A. Morbidelli, D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, D. Nesvorný, and R. Jedicke, *Astron. and Astrophys.*, **598**, A52, 2017.
6. A. W. Harris and A. W. Harris, *Icarus*, **126**, 450, 1997.
7. H. Rein, D. M. Hernandez, D. Tamayo, G. Brown, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **485**, 5490, 2019.
8. P. Farinella, C. Froeschlé, C. Froeschlé, R. Gonczi, G. Hahn, A. Morbidelli, and G. B. Valsecchi, *Nature*, **371**, 314, 1994.