АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2021, том 98, № 6, с. 518–527

УДК 523.6

О ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ НАСЕЛЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

© 2021 г. Р. В. Золотарев[1,*], Б. М. Шустов[2,**]

[1] Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Россия

[2] Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: rv_zolotarev@mail.ru

**E-mail: bshustov@inasan.ru

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.
После доработки 28.02.2021 г.
Принята к публикации 28.02.2021 г.

Рассмотрены аспекты динамической эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ): изменение со временем темпа убыли АСЗ, включая зависимость темпа от начальных параметров орбиты АСЗ, эффективность различных каналов убыли АСЗ и диффузия орбит АСЗ. Исследование проводилось как для реальных астероидов, так и для искусственно сгенерированного населения. Для исследования отобраны 3024 реальных астероида размером более 1 км с перигелийным расстоянием $q < 1.6$ а.е., из них 833 АСЗ ($q < 1.3$ а.е.), т.е. практически все крупные АСЗ. Для отдельных задач население АСЗ также моделировалось с помощью программы NEOPOP (ESA). Орбиты интегрировались на 10 млн. лет с помощью численного комплекса REBOUND. Учтено гравитационное поле Солнца и планет, а также возможность столкновений. Показано, что общая численность населения АСЗ убывает с медианным временем $t_{NEA} \simeq 5.5$ млн. лет, что уточняет оценки других авторов. Главной особенностью данной работы является то, что в ней впервые исследована зависимость t_{NEA} от начальных значений параметров орбиты: большой полуоси a и эксцентриситета e. Показано, что эта зависимость весьма сильная: t_{NEA} для подмножества астероидов с большими a и e в десятки раз меньше, чем у подмножества с малыми a и e. Полученные качественные оценки зависимости $t_{NEA}(a, e)$ важны для количественного анализа адекватности различных моделей механизмов пополнения населения АСЗ. Изучены детали диффузии (перемешивания параметров) орбит астероидов в плоскости "$a - e$" в процессе эволюции. 10% АСЗ за время интегрирования было выброшено из Солнечной системы, 1.5% выпало на планеты (в том числе на Землю 0.2%) и на Солнце (17%), 12.5% вышло из зоны АСЗ.

Ключевые слова: астероиды, АСЗ, диффузия орбит

DOI: 10.31857/S0004629921070070

1. ВВЕДЕНИЕ

Астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), т.е. астероиды с орбитами, для которых перигелийное расстояние $q < 1.3$ а.е., привлекают большое внимание исследователей как одно из важных и динамично меняющихся населений малых тел Солнечной системы. Особое значение изучение АСЗ представляет в контексте ставших весьма актуальными для человечества проблем астероидно-кометной опасности и астероидных ресурсов (см., напр., [1]). Одна из важных особенностей динамической эволюции населения АСЗ состоит в том, что численность населения АСЗ на протяжении последних 2–3 млрд. лет оставалась почти неизменной, хотя динамическая шкала существования текущего населения АСЗ относительно коротка. Конечно, о численности АСЗ в предыдущие эпохи можно судить, лишь анализируя изменение со временем темпа ударного кратерообразования на безатмосферных телах Солнечной системы. Наиболее удобный для изучения естественный "журнал" с записями столкновений за большой интервал времени (миллиарды лет) – это поверхность Луны. Отсутствие атмосферы, воды, тектонической активности способствует сохранности этого журнала. Для Луны согласно работе [2] история бомбардировки описывается формулой

$$N(1) = 5.44\times10^{-14}(\exp(6.93T) - 1) + 8.38\times10^{-4}T, \quad (1)$$

где $N(1)$ – число кратеров размером более 1 км, образовавшихся на поверхности Луны в пересчете на площадь 1 км^2 за время T, которое задается в миллиардах лет от нашей эпохи в прошлое.

Производная по времени от соотношения (1) дает оценку темпа бомбардировки. Важный вывод: последние ~3 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, хотя ~4 млрд. лет назад темп бомбардировки был на несколько порядков выше.

Второй вывод: тела размером ~50 м сталкиваются с Землей в среднем один раз в несколько сотен лет. Конечно, полученные выше оценки показывают изменения некоторого усредненного темпа бомбардировки. В течение миллиардов лет различные события могли вызывать (временные) изменения этого темпа. Например, оценки изменения численности околоземных объектов на основе анализа возрастов лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет привели авторов работ [3, 4] к выводу, что число столкновений за единицу времени увеличилось в 2.6 раза 290 млн. лет назад. Возможная причина таких колебаний – разрушительные столкновения крупных тел. Так, согласно [5] катастрофическое разрушение большого астероида главного пояса 160 млн. лет назад могло почти вдвое увеличить современное число АСЗ диаметром $d > 1$ км по сравнению со средним числом, полученным для интервала в 1 млрд. лет. Еще одна причина – динамические возмущения в населении малых тел, вызванные сближениями Солнечной системы со звездами. Так, в [6] показано, что сближения Солнечной системы со звездами (на расстояние $\sim 10^5$ а.е.) происходят несколько раз (в среднем 4) в течение миллиона лет. Более близкие прохождения звезд на расстоянии $\sim 10^3$ а.е., вызывающие сильные динамические возмущения в ансамбле малых тел Солнечной системы, происходят примерно раз в 1–2 млрд. лет.

По современным представлениям главный источник АСЗ (95%) – это Главный пояс астероидов (ГПА), источником остальных АСЗ является пояс Койпера [7]. Поскольку за образование ударных кратеров на Луне и планетах ответственны в основном астероиды (точнее АСЗ), логично сравнивать статистику лунных (планетных) данных с астрономическими данными о распределении АСЗ по размерам. Как отмечено в [8], в целом лунные данные о статистике (размеров) ударников и астрономические данные о распределении размеров АСЗ хорошо согласуются, но существенно отличаются от статистики размеров астероидов Главного пояса. Что касается динамической шкалы населения АСЗ, то уже первые оценки [9–11] показали, что эта шкала относительно короткая и составляет несколько миллионов лет. Здесь под динамической шкалой мы понимаем характерное время, за которое численность фиксированной на данный момент времени популяция АСЗ заметно уменьшается. Как правило, для оценки шкалы берут так называемое медианное время, т.е. интервал времени, за которое численность популяции АСЗ уменьшается вдвое. 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. В [10] была изучена динамика выборки из 117 АСЗ на интервале времени 60 млн. лет. Показано, что 10–20% АСЗ из выборки за это время заканчивают свою жизнь, сталкиваясь с Венерой или Землей, более половины заканчивают свою жизнь, выпав на Солнце, и около 15% выбрасываются из Солнечной системы. Медианное время жизни этой выборки составляет около 10 млн. лет.

В нашей предыдущей работе [12] мы провели аналогичное исследование эволюции населения АСЗ, взяв модельную выборку объектов, построенную с помощью комплекса NEOPOP Европейского космического агентства (см. в разделе 2). При изучении статистики каналов ухода АСЗ мы получили, что за примерно 5 млн. лет население АСЗ уменьшилось примерно вдвое. Распределение по каналам ухода получилось примерно такое же, как и в [10].

Параметры орбит менее массивных тел Солнечной системы (астероидов и метеороидов) могут существенно меняться под гравитационным воздействием более массивных тел. Эти изменения приводят к тому, что часть АСЗ просто уходит из области определения АСЗ, и наоборот, некоторые астероиды из не-АСЗ области становятся АСЗ. Мы называем такое явление для простоты и по аналогии с одноименным физическим процессом диффузией в пространстве параметров орбит астероидов, или просто диффузией орбит.

Отметим, что во всех предыдущих работах, включая [12], рассматривалась эволюция (убывание числа АСЗ) для выборки в целом, хотя и предполагалось, что темп убывания числа АСЗ может зависеть от начального набора параметров орбит АСЗ, однако эти предположения не были исследованы. В этой работе в разделе 2 мы более подробно, чем в [12], описываем общую постановку и метод расчета; в разделе 3 рассматриваем более детально процесс убывания населения АСЗ, обращая внимание на зависимость скорости этого процесса от начального набора параметров орбиты АСЗ (прежде всего, большой полуоси a и эксцентриситета e). Раздел 4 посвящен результатам изучения процесса диффузии орбит АСЗ. Выводы даны в разделе 5.

2. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА И МЕТОД РАСЧЕТА

Основная идея расчетов динамической эволюции АСЗ проста: нужно задать начальное распределение, т.е. задать начальные распределения элементов орбит АСЗ (прежде всего, больших полуосей a, эксцентриситетов e и наклонений орбит i, поскольку именно они описывают энергетические характеристики орбиты), "выключить" источники АСЗ и проследить дальнейшую динамическую эволюцию этого населения малых тел Солнечной системы. Массы АСЗ в динамической модели можно не учитывать, поскольку массы АСЗ намного меньше масс основных гравитирующих центров в Солнечной системе.

Конечно, было бы идеальным брать исходные данные об АСЗ только из наблюдений. Как уже упоминалось, по этому пути пошли авторы работы [10]. Они взяли 117 реальных астероидов (АСЗ). Но это все-таки не слишком представительная выборка. В идеале набор рассматриваемых астероидов должен быть полным. К сожалению, полнота списка АСЗ может считаться удовлетворительной (>90%) только для астероидов размером более 1 км. Для астероидов меньших размеров неполнота быстро увеличивается с уменьшением массы. Так, по данным из документа "National Near-Earth Objects Preparedness Strategy and Action Plan" (опубликован в 2018 г. Национальным советом по науке и технике, США) для астероидов размером 300 м (таких как астероид Апофис) 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., а ведь именно астероиды размером менее 100 м представляют наибольшую угрозу (из-за гораздо большей частоты потенциальных столкновений по сравнению с более крупными телами). 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 либо делают выборку из реальных АСЗ, выполняя обрезание по критерию полноты списка, либо используют население из модельных объектов, распределения элементов орбит которых задаются в соответствии с распределениями, полученными по наблюдаемым данным. Исследование динамики модельных АСЗ позволяет обеспечить большую гибкость в исследовании динамический эволюции астероидов различных размеров (массы), поскольку можно "дополнять" население АСЗ в тех интервалах значений массы, в которых неполнота наблюдательных данных существенна. Этот подход использован в нашей работе [12], где мы взяли популяцию АСЗ в том виде, как она генерируется в программном комплексе NEOPOP Европейского космического агентства[1]. Была сгенерирована популяция АСЗ 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.

В данной работе для удобства сравнения с работой [10] мы решили включить в рассмотрение реальные объекты – АСЗ размером более 1 км, а также не-АСЗ астероиды крупнее 1 км, но находящиеся на диаграмме "большая полуось–эксцентриситет" ("a–e") близ области АСЗ. Еще раз подчеркнем: мы считаем, что выборка этих довольно крупных объектов считается практически полной. Из базы данных Центра малых планет[2] на момент 01 января 2021 г. были выбраны все астероиды с абсолютной астероидной звездной величиной H ниже 17.7^m. Это при некотором среднем альбедо 0.14 дает оценку размера (диаметра астероида) $d \geq 1$ км, причем выполнялось требование: перигелийное расстояние $q < 1.6$ а.е. Таких астероидов оказалось 3024. Все АСЗ размером более 1 км естественно попадают в эту выборку. Таких АСЗ насчитывается 833. В дальнейшем мы рассматриваем два варианта динамической эволюционной модели: (1) динамическую эволюцию населения только АСЗ и (2) всего ансамбля отобранных астероидов. Это делается для того, чтобы изучить особенности диффузии орбит (см. раздел 4).

Распределение астероидов по элементам орбиты a, e, i и q показано на рис. 1. На рис. 2 показано положение всех рассматриваемых астероидов на диаграмме "a–e". Поскольку одна из целей работы – исследование зависимости динамической эволюции ансамбля астероидов от начальных значений a и e, мы выделили цветом и формой значков пять групп астероидов. Штриховая жирная линия отмечает границу $q = 1.3$ а.е., т.е. разделяет области АСЗ (слева и выше границы) и не-АСЗ (справа от границы). Пунктирные линии соответствуют значениям q от 0.1 а.е. до 1.9 а.е. с шагом 0.2 а.е. В табл. 1 перечислены признаки выделенных групп.

Конечно, для изучения эволюции ансамбля астероидов нужно применять методы численного интегрирования. Главные затраты в подобных численных моделях уходят на адекватное вычисление гравитационного поля, меняющегося с изменением положения гравитирующих тел. Чтобы

[1] http://neo.ssa.esa.int/neo-population
[2] https://www.minorplanetcenter.net/data

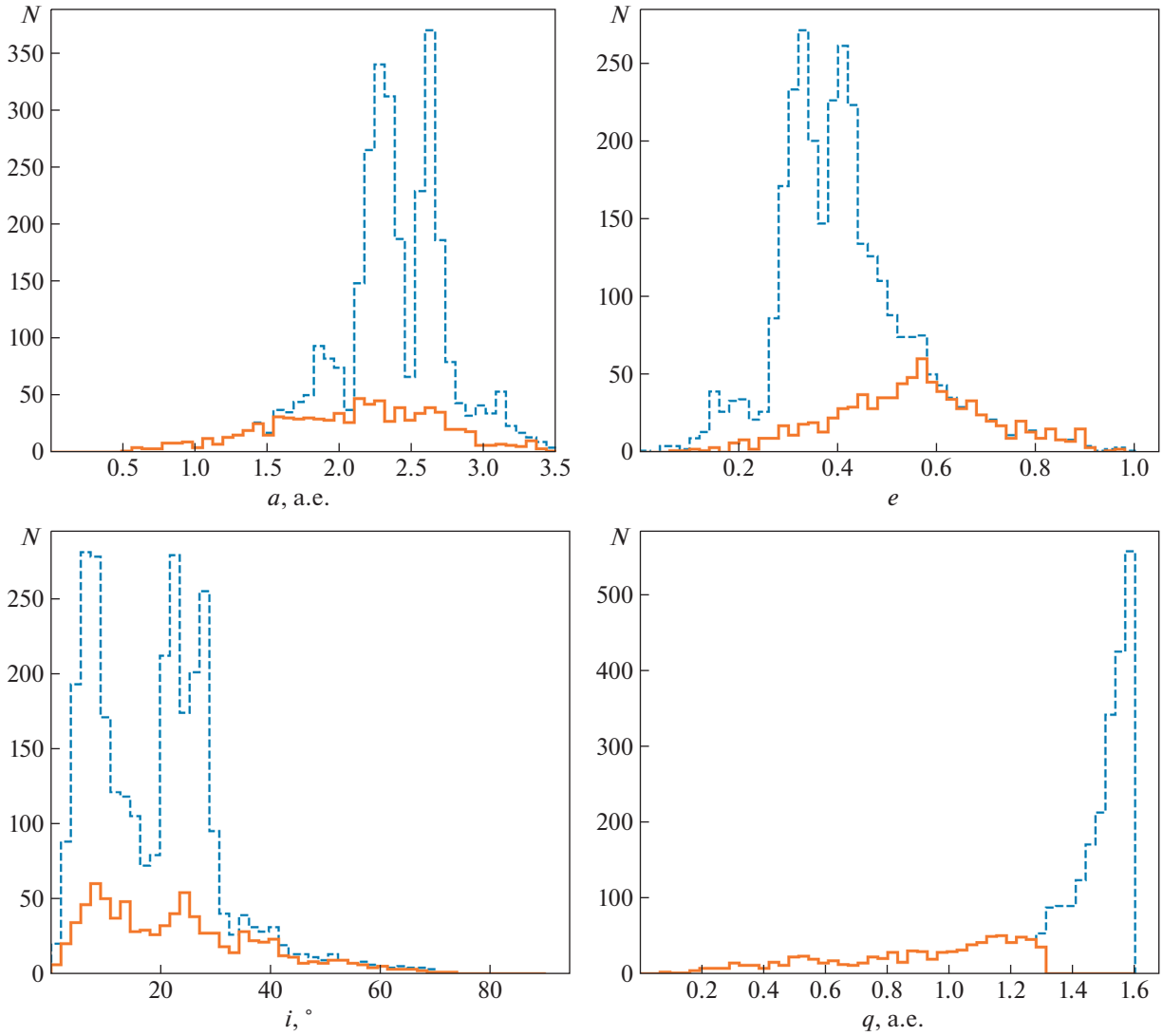

Рис. 1. Распределение астероидов по a, e, i и q в начальный момент времени. Штриховая линия показывает распределение для всей выборки, сплошная – распределение среди населения АСЗ, попавшего в выборку.

избежать нерациональных затрат вычислительного времени, мы ограничились набором из девяти гравитирующих тел, включающих Солнце и планеты Солнечной системы. Даже этот набор основных гравитирующих тел задает весьма сложную эволюцию гравитационного поля в Солнечной системе. К счастью, хотя среди астероидов встречаются достаточно крупные тела, ни один астероид из рассматриваемой выборки не является достаточно крупным, чтобы вносить

Таблица 1. Группы астероидов на начальной диаграмме “a–e”

Группа	Цвет	Значок	Диапазон изменений a, а.е.	Диапазон изменений e
1	зеленый	квадрат	0.0–1.0	0.5–1.0
2	красный	звездочка	1.0–3.5	0.5–1.0
3	синий	треугольник	0.0–1.0	0.0–0.5
4	оранжевый	косой крестик	1.0–3.5	0.0–0.5
5	фиолетовый	прямой крестик	не-АСЗ	не-АСЗ

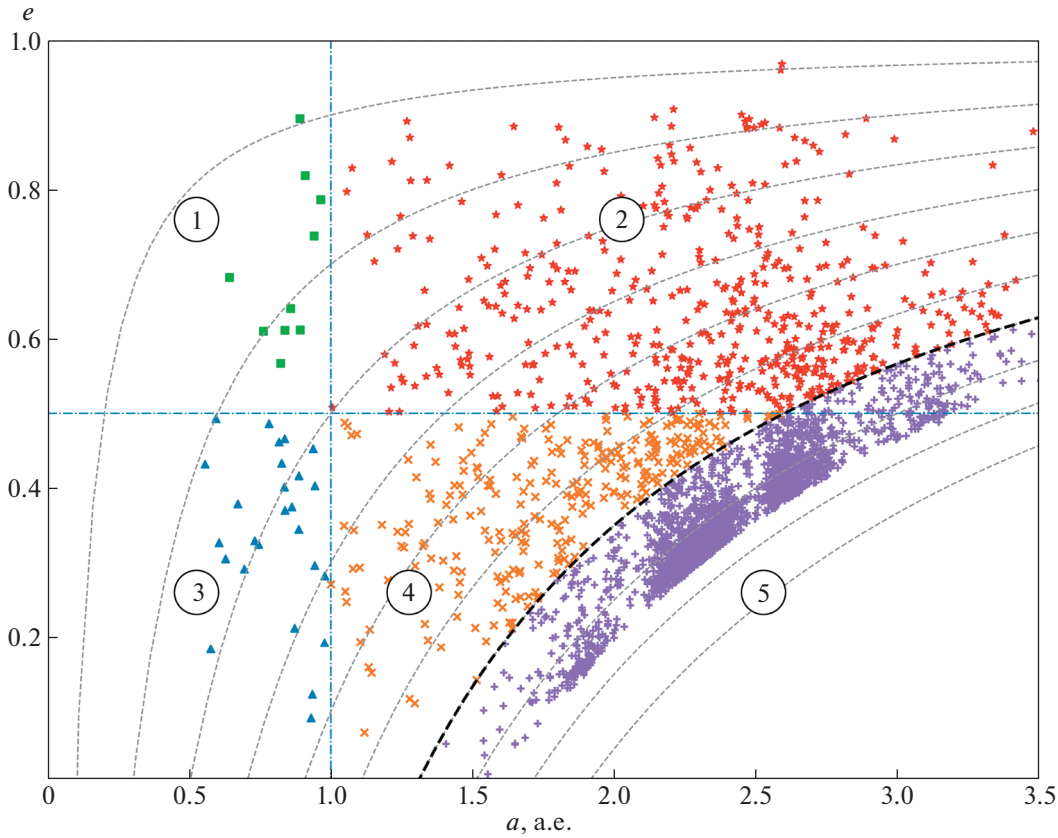

Рис. 2. Распределение ансамбля астероидов на диаграмме "a–e" на начальный момент времени. Штриховая жирная линия отмечает границу $q = 1.3$, т.е. разделяет области АСЗ и не-АСЗ. Пунктирные линии соответствуют значениям q от 0.1 а.е. до 1.9 а.е. с шагом 0.2 а.е.. Выделены группы астероидов 1–5.

сколько-нибудь заметный (в рамках данной задачи) вклад в структуру гравитационного потенциала Солнечной системы. Именно поэтому астероиды можно считать пассивными частицами, гравитацией которых можно пренебречь. Солнце и планеты рассматривались как гравитирующие (активные) частицы.

Начальные условия для гравитирующих тел в модели были взяты из базы данных NASA JPL HORIZONS4. Для моделирования динамической эволюции ансамбля АСЗ был использован программный комплекс REBOUND [17] – универсальный N-body код, который находится в свободном доступе под лицензией с открытым исходным кодом.

Для интегрирования использовалась гибридная схема MERCURIUS [14], входящая в стандартную библиотеку REBOUND. В данной схеме основной расчет идет при помощи симплектической схемы WHFast [15] с постоянным шагом по времени, но при возникновении ситуации сближений частиц для них (сближающихся частиц) интегрирование автоматически переключается на схему IAS15 [16] 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 3 суткам, в схеме IAS15 шаг по времени выбирается автоматически для каждого шага [16]. Критерием сближения было выбрано приближение астероида к планете на расстояние, соответствующее 3 радиусам сферы Хилла планеты, такой же критерий является основным в схеме MERCURIUS (подробнее см. [14]). Во время обработки сближений частиц также учитывалась возможность столкновения АСЗ с крупными телами (активными частицами), 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.

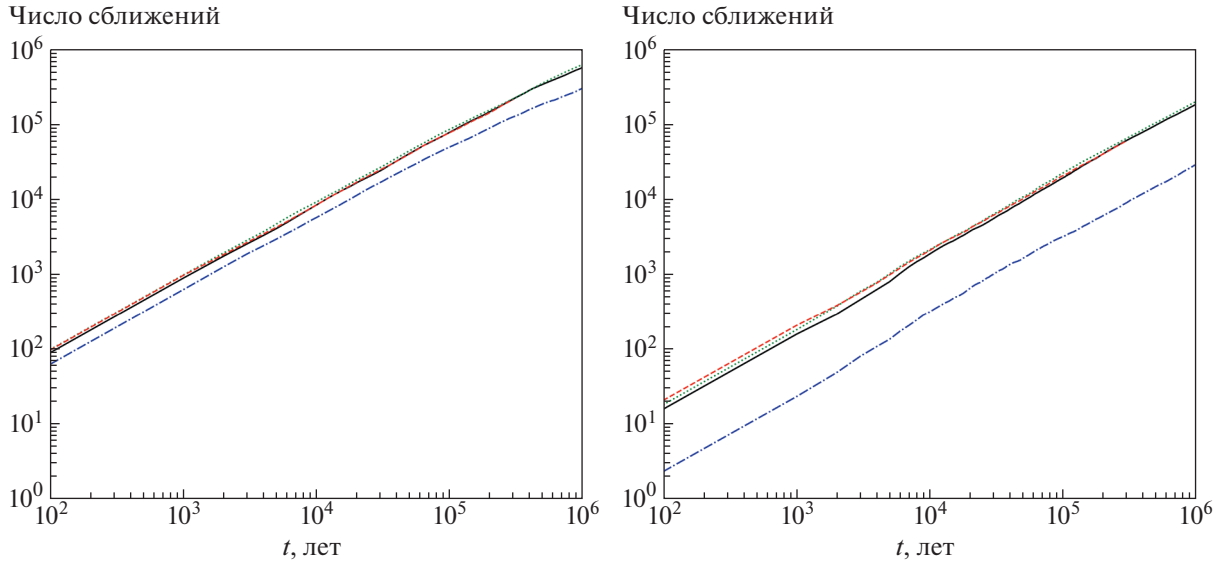

Рис. 3. Зависимость общего количества сближений модельных астероидов со всеми планетами (слева) и отдельно с Землей (справа) от времени. Для интегрирования при помощи схемы MERCURIUS: штрихпунктирная синяя линия соответствует интегрированию с шагом по времени 30 дней, сплошная черная линия – с шагом 3 дня, пунктирная зеленая линия – с шагом 0.3 дня. Штриховая красная линия соответствует интегрированию при помощи схемы IAS15.

Мы ограничились рассмотрением эволюции ансамбля астероидов в течение 10 млн. лет, поскольку предполагали, что такой интервал времени достаточен для того, чтобы выявить основные эволюционные характеристики, рассмотрению которых посвящена данная работа.

Основные изменения параметров орбит астероидов происходят во время сближений с планетами. Для *ансамбля* астероидов картину эволюции будет определять общее число сближений всех участников ансамбля с центрами тяготения. Поэтому число сближений нужно считать точно. Исходя из этого критерия, подбирался шаг по времени для основной схемы расчета. Для исследования того, какой шаг по времени необходим для точного подсчета количества сближений, с помощью пакета NEOPOP, кратко описанного в разделе 2, была сгенерирована синтетическая популяция из 500 АСЗ и ее эволюция проинтегрирована при помощи схемы MERCURIUS [14] с различным шагом по времени на интервале 1 млн. лет. Были выбраны шаги по времени, равные 0.3 дня, 3 дня и 30 дней. Также для контроля было выполнено интегрирование при помощи схемы IAS15 [16] с переменным шагом по времени. На рис. 3 представлена зависимость от времени количества сближений астероидов из этой модельной популяции с планетами. Во всех этих расчетах, так же как и в основном, учитывалась гравитация Солнца и планет Солнечной системы, а также возможность столкновений. Поскольку различия между результатами интегрирования с шагом 0.3 дня и 3 дня несущественны, из соображений экономии вычислительного времени мы выбрали для основных расчетов шаг 3 дня.

3. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПА ИСТОЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ АСЗ ОТ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ: БОЛЬШОЙ ПОЛУОСИ И ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА

Вначале рассмотрим эволюцию в модели, содержащей только АСЗ. Мы проинтегрировали движение астероидов групп 1–4 (см. табл. 1) и сравнили темп изменения численности астероидов по группам. На рис. 4 показаны относительные темпы изменения числа астероидов N/N_0, где N – текущее число, а N_0 – начальное число астероидов в каждой из групп. Также показано изменение числа N/N_0 для ансамбля АСЗ в целом.

Интуитивно представляется, что орбиты астероидов групп 1 и 3 должны быть наименее изменчивы, так как относительно малое значение большой полуоси означает относительно более редкие сближения с планетами. По аналогичным соображениям орбиты АСЗ группы 2 наименее устойчивы. Эти интуитивные представления очень хорошо подтверждаются ходом кривых на рис. 4. Видно, что чем больше значения a и e, тем быстрее АСЗ уходят из этой области. Характерное (медианное) время t_{NEA} отличается для “крайних” групп 3 и 2 во много раз! Это имеет большое значение для изучения механизмов пополнения АСЗ. Такие механизмы должны обеспечивать по-

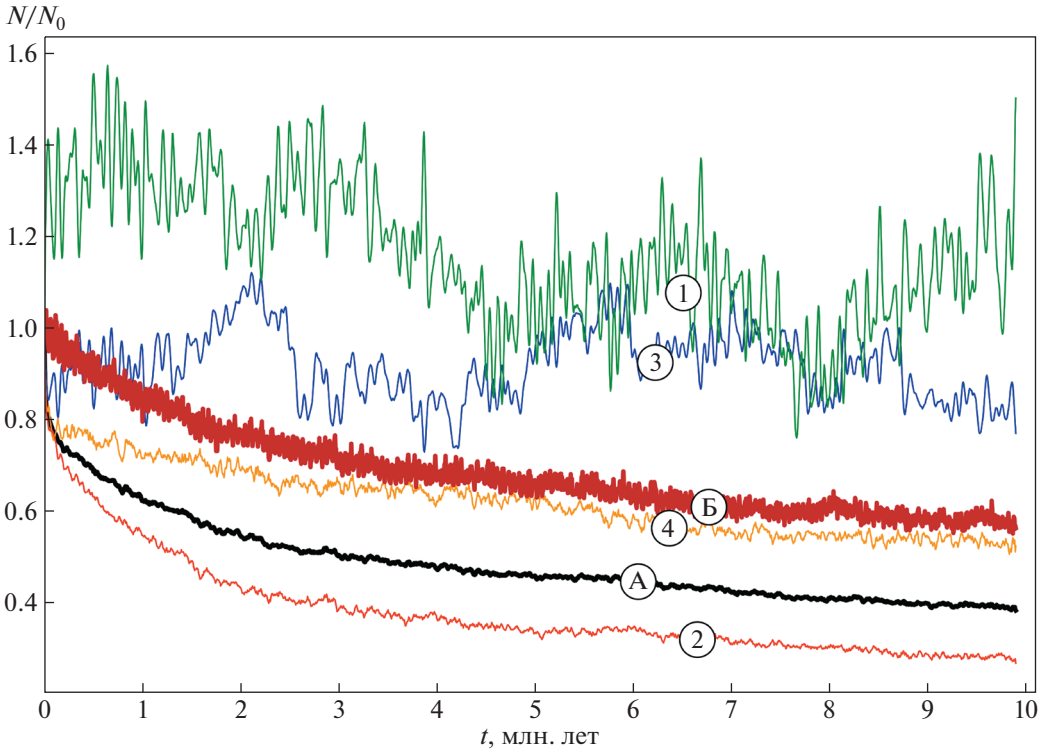

Рис. 4. Изменение относительного числа АСЗ в процессе эволюции. Цвета линий и обозначения соответствуют обозначениям в табл. 1. Линия “А” показывает изменение относительного числа астероидов в модели, содержащей только АСЗ, линия “Б” – в модели, содержащей всю изначальную выборку.

полнение не только общего числа АСЗ, но и по отдельным группам. Очевидно, что исходя из квазистационарности числа АСЗ, механизм (механизмы) пополнения должны, например, “поставлять” АСЗ группы 2 гораздо более интенсивно, чем АСЗ других групп.

Рассмотрение хода черной сплошной линии на рис. 4, представляющей средний темп убыли АСЗ в модели, содержащей только АСЗ, дает оценку величины t_{NEA} для всего ансамбля АСЗ примерно 5.5 млн. лет.

Естественно задать вопрос: а насколько устойчив полученный результат для среднего темпа убыли АСЗ, поскольку составляющие (т.е. зависимости для групп) различаются так сильно? Здесь полезен метод моделирования населения АСЗ, поскольку позволяет легко реализовать и проанализировать различные вариации. Для построения модельных наборов АСЗ мы снова применили пакет NEOPOP, кратко описанный в разделе 2. На рис. 5 показана зависимость N/N_0 от времени для ансамбля, изначально состоящего из 500 АСЗ для 10 интегрирований на 10 млн. лет с различными начальными условиями. Отличия в кривых обусловлены только статистикой неизбежного разброса начальных значений элементов орбит астероидов в наборах АСЗ, выдаваемых программой NEOPOP. Для проверки этого предположения мы провели аналогичные расчеты для ансамбля из 1000 частиц и получили похожий набор кривых, но разброс по ординате (для каждого момента времени) оказался примерно в два раза меньше, что полностью подтверждает наше предположение. Средняя статистическая оценка по этим модельным расчетам снова дает t_{NEA} = 5.5 млн. лет.

4. ДИФФУЗИЯ ОРБИТ

Как видно из рис. 3, население астероидов (напомним, что рассматривались 500 модельных астероидов) уже на шкале времени в тысячу лет испытывает большое количество сближений с планетами – около тысячи сближений за 10 тыс. лет. Понятно, что при этих сближениях орбиты малых тел испытывают существенные изменения и их положение в пространстве элементов орбит существенно меняется. При сравнении рис. 6, построенного для всего ансамбля рассматриваемых астероидов на момент времени $t = 3000$, и рис. 2 ($t = 0$ лет) видно, что уже через 3000 лет имеет место заметное взаимопроникновение астероидов из различных групп (хотя слово “уже” может быть не вполне уместным, ведь за это время астероиды совершили в среднем по тысяче оборотов вокруг

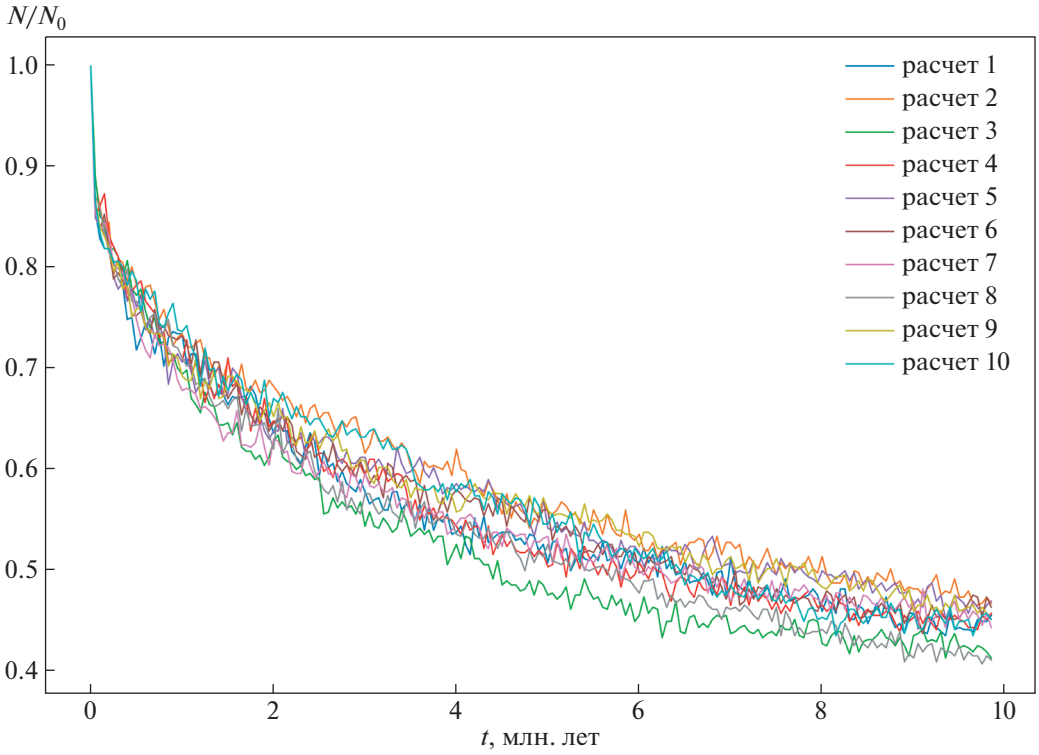

Рис. 5. Изменение относительного числа модельных АСЗ в процессе эволюции для 10 прогонов интегрирования. Начальное число АСЗ – 500. Номера на легенде соответствуют номеру прогона.

Солнца). Изменения наиболее заметны для астероидов с наибольшими a и e. Общее число частиц в зоне АСЗ практически не изменилось, но в правой части рис. 6 видно, что часть частиц из зоны АСЗ (на момент $t = 0$) переместилась в зону не-АСЗ и, наоборот, некоторые изначально не-АСЗ частицы пересекли границу АСЗ и стали (на данный момент) астероидами, сближающимися с Землей. Этот процесс мы и назвали диффузией орбит.

Таким образом, диффузия орбит протекает в обоих направлениях. На нижней границе области расположения не-АСЗ астероидов (четкой по определению на момент $t = 0$ и заданной условием $q = 1.6$ а.е.) на рис. 6 видно существенное расплывание частиц за пределы этой границы. Если бы мы могли включить в расчеты все астероиды размером более 1 км, т.е. не проводили бы обрезание по q, то правый нижний угол был покрыт миллионами точек – астероидами Главного пояса, а отток точек через нижнюю границу ансамбля компенсировался бы притоком в обратном направлении.

Диффузия, в конечном итоге, приводит к установлению некоторого (динамического) равновесия. Темп диффузии можно оценить из проведенного численного эксперимента. По результатам расчетов в модели, содержащей только АСЗ, мы получили картину убывания населения АСЗ в первые тысячи лет эволюции. На рис. 7 показано изменение N/N_0 для АСЗ в первые 10 тыс. лет эволюции. Видно, что сначала уход АСЗ из области определения происходит относительно быстро с темпом

$$\frac{d(N/N_0)}{dt} \simeq 6\times10^{-5}\ \text{год}^{-1}. \qquad (2)$$

После быстрого первичного снижения величина N/N_0 через 3–4 тыс. лет выходит на примерно постоянное значение, близкое к 0.85. Выход на такой квазистационар обусловлен тем, что некоторые ранее диффундировавшие в область не-АСЗ частицы начинают возвращаться в АСЗ-область. “Квази” потому, что на этом относительно коротком интервале вековую эволюцию (уменьшение N/N_0 на масштабах миллионы лет, показанную на рис. 4) заметить трудно.

На этом же рис. 7 показана зависимость N/N_0 от времени, полученная по всему ансамблю отобранных астероидов. Видно, что есть некий шум, но значение N/N_0 близко к 1 и практически не уменьшается за 20 тыс. лет. Это результат того, что обратный поток из области не-АСЗ компенсирует потерю АСЗ из-за диффузии. Конечно,

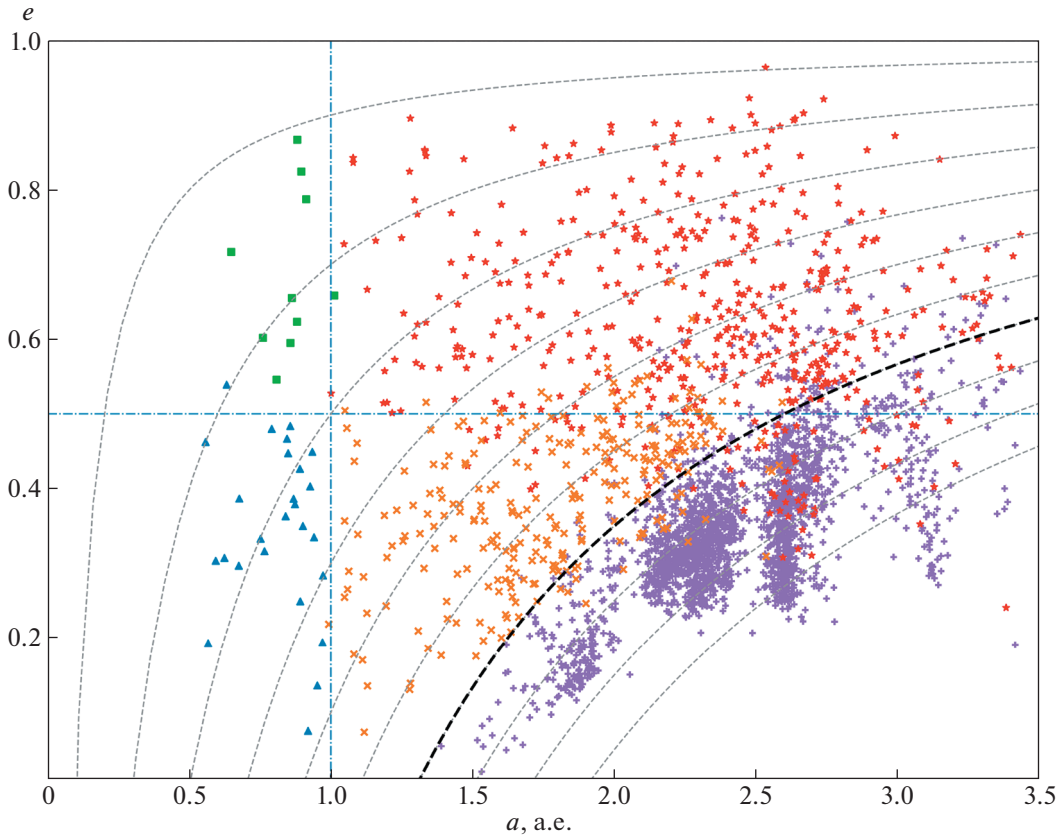

Рис. 6. Распределение ансамбля астероидов в модели 2 на диаграмме “a–e” на момент времени 3000 лет. Обозначения точек соответствуют обозначениям на рис. 2.

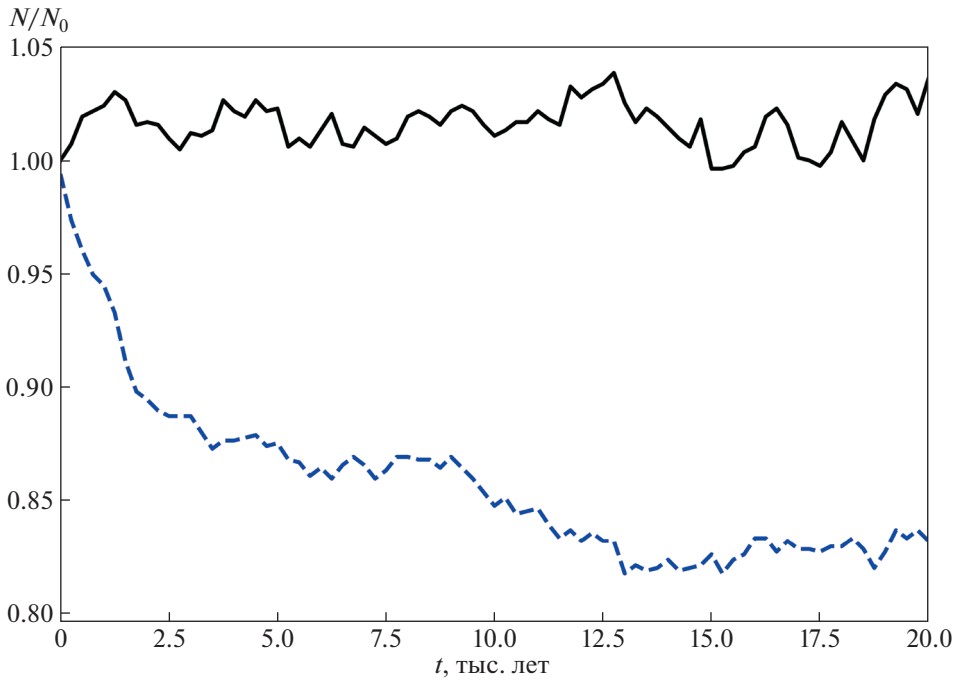

Рис. 7. Относительное изменение числа АСЗ в первые 20 тыс. лет. Штриховая синяя линия соответствует модели, в которой изначально были только АСЗ, черная сплошная линия – модели, включавшей всю выборку.

темп диффузии различен в разных областях диаграммы a–e пространства орбит.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом численного моделирования рассмотрены аспекты динамической эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ): изменение со временем темпа убыли АСЗ и диффузия орбит АСЗ. Показано, что общая численность населения АСЗ убывает с медианным временем $t_{NEA} = 5.5$ млн. лет, что подтверждает оценки других авторов. Однако t_{NEA} сильно отличается для различных областей в пространстве "a–e". К сожалению, в рамках данного исследования нет возможности построить аппроксимационную формулу для функции $N/N_0 = f(t, a, e)$. Недостаточные вычислительные ресурсы не позволили провести разбиение ансамбля не на 4 группы, а по крайней мере, на 100 или лучше на 1000 групп. Понятно также, что для этого нужно строить модельное распределение АСЗ вплоть до размера ~ 40 м (общее количество до 50000–500000).

Для понимания эволюции ансамбля малых тел Солнечной системы полезно знать, что по результатам данной работы 10% всех АСЗ за время интегрирования было выброшено из Солнечной системы, 1.5% выпало на планеты (в том числе на Землю 0.2%) и 17% выпало на Солнце, при этом 12.5% остались в системе, но вышли из области определения АСЗ ($q < 1.3$). Полученные оценки величины (медианного) времени истощения АСЗ и характер ее зависимости от a и e весьма важны для количественной оценки адекватности различных механизмов пополнения населения АСЗ. Такую оценку мы планируем провести в будущем. Также будет более подробно изучен процесс диффузии. По нашим представлениям диффузия может быть эффективна в переводе кометных тел на орбиты с малым эксцентриситетом, например, как источник астероидов с кометной активностью в ГПА.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.И. Корчагину за ценные советы и обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *B. M. Shustov*, Herald of the Russian Academy of Sciences **89**, 311 (2019).
2. *G. Neukum, B. A. Ivanov, and W. K. Hartmann*, in *EGS General Assembly Conference Abstracts* (2002), p. 4075.
3. *S. Mazrouei, R. R. Ghent, W. F. Bottke, A. H. Parker, and T. M. Gernon*, Science **363**, 253 (2019).
4. *S. I. Ipatov, E. A. Feoktistova, and V. V. Svettsov*, Solar System Res. **54**(5), 384 (2020), arXiv:2011.00361 [astro-ph.EP].
5. *W. F. Bottke, D. Vokrouhlický, and D. Nesvorný*, Nature **449**(7158), 48 (2007).
6. *B. M. Shustov, S. V. Vereshchagin, and M. D. Sizova*, INASAN Science Rep. **5**, 89 (2020).
7. *A. Morbidelli, W. F. Bottke Jr., C. Froeschlé, and P. Michel*, *Origin and Evolution of Near-Earth Objects*, edited by *W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel* (Tucson: University of Arizona Press, 2002), p. 409.
8. *R. G. Strom, M. Renu, Z.-Y. Xiao, T. Ito, F. Yoshida, and L. R. Ostrach*, Res. Astron. and Astrophys. **15**(3), id. 407 (2015), arXiv:1407.4521 [astro-ph.EP].
9. *P. Farinella, C. Froeschlé, R. Gonczi, G. Hahn, A. Morbidelli, and G. B. Valsecchi*, Nature **371**, 314 (1994).
10. *B. Gladman, P. Michel, and C. Froeschlé*, Icarus **146**, 176 (2000).
11. *D. P. O'Brien and R. Greenberg*, in *34th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 17–21, 2003, League City, Texas*, edited by S. Mackwell and E. Stansbery (2003), abstract № 2018.
12. *R. V. Zolotarev, B. M. Shustov, and V. I. Korchagin*, INASAN Science Rep. **5**, 225 (2020).
13. *H. Rein and S. F. Liu*, Astron. and Astrophys. **537**, id. 128 (2012), arXiv:1110.4876 [astro-ph.EP].
14. *H. Rein, D. M. Hernandez, D. Tamayo, G. Brown, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **485**(4), 5490 (2019), arXiv:1903.04972 [astro-ph.EP].
15. *H. Rein and D. Tamayo*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **452**(1), 376 (2015), arXiv:1506.01084 [astro-ph.EP].
16. *H. Rein and D. S. Spiegel*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **446**(2), 1424 (2015), arXiv:1409.4779 [astro-ph.EP].