

На правах рукописи

Золотарёв Роман Викторович

**Некоторые особенности динамики ансамблей
малых тел, сближающихся с Землёй**

Специальность 1.3.1.
Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель: д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, проф.
Шустов Борис Михайлович

Официальные оппоненты: **Медведев Юрий Дмитриевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБУН Институт прикладной астрономии
РАН,
заведующий лабораторией малых тел Солнечной системы

Нефедьев Юрий Анатольевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
профессор

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится 27 сентября 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при ФГБУН Институте астрономии РАН по адресу: г. Москва, ул. Пятницкая 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке библиотеке Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>.

Автореферат разослан 15 августа 2024 года.
Телефон для справок: +7 (495) 951-54-61.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.032.01,
кандидат физ.-мат. наук

Чупина Наталия Викторовна

Общая характеристика работы

В данной работе рассматривается решение нескольких задач, связанных с изучением динамики ансамблей малых тел Солнечной системы. Малые тела Солнечной системы (или малые небесные тела – МНТ) – термин, введенный в резолюции 5 Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза в 2006 году [1] для обозначения объектов Солнечной системы, которые не являются ни планетами, ни карликовыми планетами, ни их спутниками. Это астероиды, кометы, метеороиды и пылинки. До последних лет ситуация с классификацией МНТ была довольно неопределённой. Только сравнительно недавно объекты, составляющие понятие МНТ, получили классификацию по размеру, рекомендованную для общего использования. По современной классификации (согласно решению комиссии F1 МАС 2017 г. [2].):

- астероиды и ядра комет – твёрдые межпланетные объекты размером более 1 м;
- метеороиды – твёрдые объекты размером от 30 мкм до 1 м, движущиеся в межпланетном пространстве;
- межпланетная пыль – твёрдые межпланетные объекты размером до 30 мкм.

Исследования динамической эволюции ансамблей МНТ дают важнейшую фундаментальную информацию о происхождении и эволюции Солнечной системы. В последнее время проявились очень серьёзные практические аспекты таких исследований. Эти практические важные аспекты связаны с проблемой астероидно-кометной опасности, безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве, а также с проблемой космических ресурсов. В данной диссертации такие важные практические аспекты отмечены.

В диссертации рассмотрены некоторые заинтересовавшие автора задачи, касающиеся динамической эволюции различных классов МНТ. Рассмотрены:

- шкала динамической эволюции астероидов, сближающихся с Землей;
- столкновения как механизм активации сублимационно-пылевой активности астероидов;
- формирование и эволюция спектра масс метеороидных потоков;
- распределение малых тел в околоземном космическом пространстве.

Эти разные вопросы в диссертации объединены общим подходом к исследованию. Подход заключается в применении метода численного расчета динамической эволюции ансамблей малых тел и статистического анализа полученных результатов.

Шкала динамической эволюции астероидов, сближающихся с Землёй

Астероиды и кометы, у которых перигелийные расстояния $q < 1.3$ а.е., называют объектами, сближающимися с Землёй (ОСЗ), сюда относят астероиды, сближающиеся с Землёй (АСЗ) и кометы, сближающиеся с Землёй (КСЗ).

Важная характеристика любого ансамбля МНТ – количество МНТ в ансамбле. Она характеризуется определённой степенью полноты, которая зависит от размеров МНТ. Рассмотрим степень полноты данных о распределении размеров астероидов в ГПА и АСЗ. Эти два населения генетически тесно связаны. По современным представлениям основной источник АСЗ – это Главный пояс астероидов (ГПА), поставляющий до 94% АСЗ, а источником остальных АСЗ является пояс Койпера [3].

Если проанализировать динамику наполнения каталога Центра малых планет МАС [4], то можно заметить, что в последние несколько лет практически не обнаруживаются новые АСЗ размером более 1 км и астероиды ГПА размером более 1.5 км. В то же время общий объём каталога растёт. Это может свидетельствовать о достижении полноты обнаружения для объектов размером более указанного.

Ещё раз необходимо подчеркнуть, что приведённые выше распределения относятся только к выборке наблюдаемых объектов. Для объектов малых размеров степень неполноты очень высока. На 2023 год, согласно данным из [5], выборка АСЗ диаметром более 1 км могла считаться достаточно полной (известно более 95% популяции). Для астероидов меньших размеров неполнота быстро увеличивается с уменьшением размера. Вопрос полноты важен, т.к. при использовании статистического подхода, необходимо опираться на достаточно полные выборки. Тогда можно рассчитывать, что свойства ансамбля МНТ (различные распределения), полученные по полной выборке, применимы и к более широкому ансамблю.

Интерес к изучению населения АСЗ возрастает с каждым годом. Это происходит не только потому, что изучение свойств населения АСЗ добавляет важные штрихи к научной картине состояния и эволюции Солнечной системы, но и по двум указанным выше причинам практического плана.

Согласно установившейся (в целом) картине эволюции Солнечной системы (см., например, [6; 7]), бомбардировка Земли астероидами – не эпизодическое явление. Земля существует более 4.5 млрд лет. Она сформировалась довольно быстро и с самого начала испытывала постоянные столкновения с телами меньшего размера (планетезималиями). Интенсивность столкновений в более поздние эпохи существенно понизилась, но всё-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». Согласно [8], последние 2–3 млрд лет темп бомбардировки Луны, а значит и Земли, телами, по размерам превышающим размер Тунгусского тела, менялся мало. Конечно, этот вывод относится к изменению усреднённого темпа бомбардировки. В течение миллиардов лет различные события могли вызывать (временные) изменения этого темпа.

Население АСЗ не является неизменным на протяжении последних миллиардов лет. Текущее население АСЗ уменьшается вследствие столкновений с планетами, Солнцем, выброса из Солнечной системы. Постоянство темпа бомбардировки Земли означает, что есть некоторое динамическое равновесие между интенсивностью пополнения АСЗ и темпом ухода.

Таким образом, важной динамической характеристикой АСЗ является шкала существования текущего населения АСЗ. Оценки, выполненные разными авторами [9–12], показали, что эта шкала относительно короткая и составляет несколько миллионов лет (примерно от 1 до 10 млн лет). В диссертации под динамической шкалой, обозначаемой t_{NEA} , понимается характерное время, за которое численность фиксированной на данный момент времени популяции АСЗ заметно уменьшается. Как и в работах других авторов, для оценки шкалы берётся медианное время, т.е. интервал времени, за которое численность популяции АСЗ уменьшается вдвое. Разброс оценок шкалы убыли АСЗ в работах других авторов стимулировала более детальное рассмотрение этого вопроса в данной диссертации.

В главе 1 вопрос о шкале динамической эволюции АСЗ рассмотрен подробно. Уточнено среднее по ансамблю значение t_{NEA} и впервые детально изучены вариации этой шкалы для различных групп АСЗ (зависимость от начальных орбитальных характеристик АСЗ), а также уточнены темпы ухода АСЗ по различным каналам.

Столкновения как механизм активации сублимационно-пылевой активности астероидов

В течение последней пары десятилетий среди астероидов Главного пояса был выделен новый класс объектов – так называемые «активные астероиды», или «кометы Главного пояса» (КП) (см. исторический обзор в [13]). Это тела (их пока известно несколько десятков), у которых были зарегистрированы хотя бы один раз выраженные признаки кометной активности (образование комы или хвоста). Такая хорошо детектируемая активность может возникать, как правило, при столкновениях астероидов, ведущих к (частичной) дезинтеграции этих тел, или при интенсивной сублимации льдов, содержащихся в теле астероида и извлечённых на поверхность астероида вследствие удара. Обсуждаются и другие механизмы (см., [13]), в числе которых: потеря частиц при раскрутке астероида

вследствие YORP-эффекта до скорости выше критической, разрушение вследствие термического растрескивания при тесных сближениях некоторых астероидов с Солнцем, радиативное давление на мелкую пыль, образующуюся при бомбардировке микрометеоритами (частицы реголита), и др. Согласно [14] эти механизмы не являются доминирующими.

Как показано в [15–17], распространённой (хотя и относительно более слабой и не проявляющейся так явно, как у КГП) формой активности может быть сублимационно-пылевая активность (СПА) астероидов примитивных типов, ведущая к образованию у них временной, достаточно разреженной (оптическая толщина $\tau_V \leq 0.5$) пылевой экзосферы, которая может быть обнаружена спектральным методом. Наблюдения активности астероидов проводились, главным образом, в области перигелия. В цитируемых работах сделано предположение, что наблюдавшееся формирование пылевой экзосферы у этих астероидов может быть обусловлено временной сублимацией H_2O льда, содержащегося в этих астероидах, который, по видимому, выносится на поверхность вследствие столкновений с мелкими телами. В дальнейшем такой механизм активации будем называть столкновительно-сублимационным. Сублимация может происходить как в силу приближения астероида к Солнцу на перигелийном участке орбиты, так и вследствие солнечных вспышечных событий [18].

Как отмечалось выше, выброс пыли из активных астероидов (в том числе и АСЗ) может быть обусловлен двумя основными механизмами: выбросом пыли при ударе (столкновительным механизмом) и описанным столкновительно-сублимационным механизмом, когда льдосодержащие слои тела астероида вскрываются при столкновениях астероидов. Первый механизм более универсален, он не требует наличия льдов.

Чтобы выяснить относительный вклад этих механизмов в сублимационно-пылевую активность астероидов, эти механизмы нужно сравнивать на количественном уровне.

Для решения этой задачи нужно получить количественные ответы на следующие вопросы:

1. Частота столкновений астероидов.
2. Параметры выбросов, образующихся при столкновениях.
3. Частота столкновений с энергией, превышающей критическое значение, т.е. значение энергии, необходимой для активации СПА.
4. Согласие полученных теоретических оценок частоты событий с наблюдениями конкретных астероидов с сублимационно-пылевой активностью.

В диссертации в **Главе 2** представлены ответы на эти вопросы и показано, что эффективность чисто столкновительного механизма для активации астероидов, проявляющих сублимационно-пылевую активность, сравнима с эффективностью столкновительно-сублимационного механизма.

Избранные вопросы формирования и эволюции метеороидных потоков

АСЗ сталкиваются с нашей планетой нечасто. А вот потоки МНТ малых размеров (метеороидов и пыли) постоянно протекают через околоземное космическое пространство (ОКП) и относительно часто сталкиваются с Землёй. Эти тела наблюдаются, как правило, только при входе в земную атмосферу (метеорные явления) или с помощью датчиков соударений на космических аппаратах (КА). Постоянное присутствие метеорных тел в ОКП является определённым фактором риска для космической деятельности в ОКП.

Помимо этого практического интереса изучение метеорных явлений и метеорного вещества (в частности метеоритов) – важнейший канал получения знаний о строении, физических и химических свойствах вещества, динамике и эволюции тел Солнечной системы. Конечно, это огромная область науки о Солнечной системе. В данной работе рассматривается лишь один частный вопрос о спектре масс метеороидов и, особенно, о проявляющихся в наблюдениях эволюционных изменениях этой характеристики в метеороидных потоках.

Определяемое из наблюдений распределение метеороидов по массе обычно описывают степенным законом $dn = C_1 m^{-s} dm$ где dn – число частиц, значения массы которых лежит в интервале $[m, m + dm]$, s – дифференциальный индекс массы метеороидов, а C_1 – нормирующий коэффициент.

Индекс массы метеороидов – весьма важная характеристика, т.к. она позволяет понять свойства распределения. Значения $s < 2$ в формуле, приведённой выше, указывают, что в более крупных (массивных) частицах содержится большая часть массы населения метеороидов, а значения $s > 2$ указывают, что большая часть массы сосредоточена в мелких частицах. При решении одной из главных задач метеорной астрономии – оценке притока массы метеороидов на Землю, необходимо знать спектр масс, т.е. значение индекса массы s . Есть и очевидный прикладной аспект – необходимо знать спектр масс метеороидов для оценки рисков (последствий) столкновений метеороидов с космическими аппаратами. Эта оценка сильно зависит от того, какого размера (т.е. какой массы) объекты преобладают в потоке твердых частиц в околоземном пространстве.

Согласно результатам длительных серий наблюдений, выполненных многими исследователями, можно сделать важный вывод: индексы массы метеорных тел отличаются для спорадических метеоров и метеорных потоков. В [19] по результатам радарных наблюдений получено среднее значение и оценены вариации индекса: $s = 2.17 \pm 0.07$. Аналогичные результаты $s = 2.0$ получены в [20]. Оптические наблюдения дают для спорадических метеоров сходные значения s [21; 22]. В [23] приводятся

значения s для спорадических метеороидов по радарным наблюдениям в диапазоне масс $10^{-5} \text{ г} < m < 10^{-3} \text{ г}$: $s = 2.10 \pm 0.08$, и по оптическим наблюдениям в диапазоне масс $10^{-3} \text{ г} < m < 10^{-1} \text{ г}$: $s = 2.08 \pm 0.08$.

В работе [24] по наблюдениям сети Международной метеорной организации, проведённым в 2011-2017 гг., для спорадических метеоров получено среднее значение $s = 1.98$. Там же приведены данные для метеорных потоков η -Лириды и η -Аквариды, для которых $s = 1.79$ и 1.74 соответственно. В [25] по наблюдениям потоков Квадрантиды и Геминиды с радаром CMOR (Canadian Meteor Orbit Radar) значения индекса массы были оценены как 1.55 и 1.65 соответственно. Последняя оценка хорошо согласуется с полученной гораздо раньше в работе [26] средней оценкой $s = 1.67$ для Геминид.

Суммируя эти данные, можно утверждать, что характерное распределение масс метеорных тел, вызывающих спорадические метеоры, неплохо описывается законом $dn \propto m^{-2} dm$, тогда как распределение масс метеорных тел в потоках имеет более пологий вид ($s < 2$).

Для ответа на вопрос почему спектр масс, характерный для метеорных потоков более пологий, чем в случае спорадических метеоров, необходимо рассмотреть задачи формирования и эволюции метеороидных потоков. Результатом решения первой задачи является построение поля скоростей частиц различной массы, выброшенных из ядра кометы в данном месте орбиты ядра или образовавшихся при столкновении астероидов. Это дает необходимое начальное условие для решения второй задачи – описания эволюции метеороидного потока.

Согласно сложившимся представлениям, большинство метеороидных потоков образуется в результате постепенного или катастрофического распада комет (см., например, детальное обсуждение этого вопроса в [27; 28]). Происхождение некоторой (меньшей) части метеороидных потоков объясняется столкновениями астероидов. Обсуждение возможных физических и динамических процессов формирования метеорных потоков при столкновениях астероидов можно найти, например, в [28; 29].

Рассмотрению процесса выброса частиц из ядра кометы посвящено немало работ. Наиболее полный обзор дан в работе [30]. Главный вывод, который можно сделать по этому обзору и по другим работам, сформулирован в работе [31]: «Ни одна модель скорости выброса не может быть рекомендована, главным образом, из-за отсутствия сильных ограничений и обобщений на все кометы. Физические характеристики комет и их активность существенно различны, и вполне возможно, что каждая комета нуждается в своей собственной модели. Мы можем только сказать, что пределом скорости выброса метеороидов является скорость газа».

Помимо образования метеороидных потоков вследствие распада комет обсуждается и другой источник таких потоков – распад или столкновения астероидов (см., например, обзоры в работах [31–35]). Большинство

разовых выбросов при столкновениях происходит незаметно для наблюдателей, поскольку прогнозировать и, соответственно, подготовиться к наблюдениям таких событий невозможно, но последствия выбросов – образование пылевой экзосферы, хвоста – иногда обнаруживаются. Речь идёт об активных астероидах, обсуждавшихся выше. В то время как многие кометы тщательно наблюдаются при их приближении к перигелию и регистрируется интенсивность потоков газа и твёрдых частиц из ядра, т.е. отслеживается процесс образования (очередной порции частиц) метеороидного потока, зафиксировать свежее столкновение астероидов – это элемент случайной наблюдательной удачи. Пример такой удачи – объект P/2010 A2 [36].

Согласно [37] статистика метеорных потоков в Центре метеорных данных МАС [38] на конец 2020 г. включала 835 потоков, 112 из которых получили названия, официально признанные МАС. Около 700 потоков включены в т.н. Рабочий список. Исследователи, наблюдающие метеоры с помощью различных технологий, составляют свои списки метеорных потоков, и эти списки очень сильно различаются по числу потоков (от 45 до 815!). Сложная картина и со списками родительских тел. Уверенно ассоциированных с родительскими телами немного (лишь несколько десятков). В базе данных Центра метеорных данных МАС [38] ассоциируются с кометами как родительскими телами 21 поток, с астероидами – 5 потоков.

Такая статистика объясняет, почему обычно полагают, что практически все метеорные потоки – результат входа в атмосферу Земли метеороидных потоков, образовавшихся при распаде комет вследствие их сближений с Солнцем (см., например, [35; 39–41]). И всё же происхождение некоторой части метеорных потоков объясняется распадом или столкновениями астероидов. Пожалуй, самый сильный общий аргумент в пользу существования метеороидных потоков астероидного происхождения состоит в том, что многие метеориты имеют явно астероидное происхождение (например железокремнистые, железно-никелевые, ахондриты и т.д.), т.е. они образовались в результате разрушения именно астероидов.

Понятно, что в качестве метеорных потоков проявляются лишь те метеороидные потоки, которые пересекают орбиту Земли, и родителями таких потоков могут быть лишь ОСЗ. Среди ОСЗ комет относительно мало (не более 0.3%). Почему же большая часть интенсивных потоков, ассоциируемых с родительскими телами, ассоциируются именно с кометами? Это, по-видимому, обусловлено не столько количеством потенциальных родительских тел, сколько с механизмами образования и эволюции метеороидных потоков. Представляется, что для метеороидных потоков астероидного происхождения такие механизмы недостаточно изучены.

Динамическая судьба метеороидного потока астероидного происхождения определяются несколькими факторами: параметрами орбиты

родительского астероида, его положением на орбите в момент столкновения, энергией столкновения, спектром масс (размеров) и скоростей выброшенных фрагментов, а также геометрией выброса. Параметров много и пока что достаточно полной теоретической картины образования астероидных метеороидных потоков не существует.

Представленный выше краткий обзор можно рассматривать как обоснование выбора задач, решение которых представлено в **главе 3**. В числе этих задач:

- уточнение описания процесса образования метеороидного роя в результате распада кометы или столкновения астероидов;
- расчёт эволюции метеороидного роя, состоящего из частиц различных размеров, включая расчёт изменения спектра масс частиц со временем;
- сравнение интенсивности кометного и астероидного механизмов пополнения населения метеороидов и пыли.

Распределение малых тел в околоземном космическом пространстве

Уже отмечалось выше, что как крупные МНТ (АСЗ, КСЗ), так и более мелкие тела (метеороиды и даже крупная межпланетная пыль) представляют определённую опасность. При этом современное понимание потенциально опасного тела (ПОО) в контексте вопроса астероидно-кометной опасности включает в себя не только обычно подразумеваемые крупные объекты размером более 140 м, но и объекты небольшого размера, вплоть до 10 м. Хотя такие тела и не могут привести к глобальной катастрофе, но тем не менее могут нести существенную опасность. Примером может служить падение Челябинского метеорита 2013 г. Это событие также ещё раз показало особую опасность тел, приходящих со стороны дневного неба, так как такие объекты невозможно своевременно обнаружить с помощью наземных средств и даже средств, размещённых в ближнем космосе.

Основным источником информации об обнаруживаемых ПОО в настоящее время являются наземные наблюдения в оптическом диапазоне. К сожалению, такие наблюдения невозможны для условий дневного неба. Это ограничение не принципиально для крупных объектов, обнаруживаемых задолго (\sim год и более) до возможного сближения с Землёй. Однако тела декаметрового размера обнаруживаются только в непосредственной близости от Земли с характерным временем упреждения порядка суток. Важно, что, как свидетельствуют наблюдения, потоки метровых и декаметровых тел в ОКП с ночного и дневного неба сравнимы по интенсивности.

Для решения задачи обнаружения астероидов, приходящих со стороны дневного неба, наиболее перспективными на сегодняшний день

представляются наблюдения при помощи космических телескопов, расположенных так, чтобы иметь возможность наблюдать в недоступных с Земли участках неба. В настоящее время в мире разрабатывается несколько таких проектов, один из них – проект СОДА [42; 43].

Для разработки программы наблюдений объектов, приходящих как со стороны ночного, так и со стороны дневного неба, необходимо иметь оценку потока таких тел со всех направлений, желательно в зависимости от (класса) размеров этих тел. Этому вопросу посвящена **Глава 4**.

Цели работы:

- уточнение динамики изменения численности населения АСЗ – темпа убыли, каналов убыли;
- изучение столкновительного механизма активации астероидов с сублимационно-пылевой активностью;
- количественное объяснение особенностей изменения индекса масс в метеорных потоках;
- исследование эволюционных особенностей метеороидных потоков столкновительного происхождения;
- исследование распределения АСЗ в ОКП.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

- исследование динамической эволюции населения АСЗ методом численного моделирования;
- оценка частоты и последствий столкновений астероидов в ГПА;
- исследование образования и динамики метеороидных потоков методом численного моделирования;
- оценка распределений астероидов, входящих в ОКП, по частоте, направлениям прихода, скоростям и размерам.

Научная новизна.

- уточнена оценка важной динамической характеристики населения АСЗ – характерного времени убыли (пополнения) и впервые получена оценка этого времени для АСЗ в разных областях пространства элементов орбит (a, e, i) ;
- проведено сравнение столкновительного и столкновительно-сублимационного механизмов активации астероидов с сублимационно-пылевой активностью и показано, что столкновительный механизм может приводить к появлению наблюдаемых признаков сублимационно-пылевой активности, а также получена теоретическая оценка частоты проявления сублимационно-пылевой активности, качественно согласующаяся с статистикой наблюдений;

- впервые на количественном уровне показано, что наблюдаемые изменения индекса масс в метеорных потоках формируются в результате динамической эволюции частиц различных размеров в соответствующих метеороидных потоках;
- показано, что темп производства метеороидного вещества при столкновениях АСЗ сравним с темпом производства метеороидного вещества при распаде кометных ядер;
- уточнена оценка темпа входа астероидов в околоземное космическое пространство и получены детальные распределения по направлениям и скорости входа; исследованы причины асимметрии в распределении входов по направлениям.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученная оценка динамической шкалы убыли (пополнения) АСЗ важна для дальнейших исследований механизмов притока астероидов в область АСЗ и позволяет наложить ограничение на темп притока. Построенные модели формирования и эволюции метеороидных потоков могут быть полезны для оценки распределений твёрдого вещества в околоземном космическом пространстве по массе и составу, что важно для вопросов безопасности космической деятельности. Распределения астероидов, входящих в околоземное пространство, по направлениям и скорости могут быть полезны в дальнейшем для совершенствования программ обнаружения потенциально опасных астероидов, в частности, при проектировании системы обнаружения дневных астероидов (СОДА).

Методика исследования.

Решение описанных задач выполнялось по следующей методике:

1. Моделирование ансамблей МНТ.
2. Моделирование динамической эволюции ансамблей МНТ.
3. Статистический анализ результатов моделирования.
4. Сравнение с доступными наблюдениями.

Положения, выносимые на защиту:

1. Уточнена оценка для характерного времени убыли населения АСЗ $t_{NEA} \simeq 3.5$ млн лет и впервые показано, что это время существенно различается для разных областей пространства элементов орбит.
2. Впервые показано, что столкновительный механизм инициирования сублимационно-пылевой активности астероидов сравним по эффективности с столкновительно-сублимационным механизмом. Показано, что в каждый момент времени несколько астероидов диаметром более 100 км могут находиться в активном состоянии – проявлять признаки сублимационно-пылевой активности.

3. Впервые на количественном уровне показано, что наблюдаемые изменения индекса масс в метеорных потоках являются следствием динамической эволюции частиц различной массы в соответствующих метеороидных потоках.
4. Получена оценка темпа производства метеороидного вещества при столкновениях АСЗ $\sim 10^{10}$ кг/год и показано, что этот темп сравним с темпом производства метеороидного вещества в ходе распада кометных ядер.
5. Получена оценка для частоты входа астероидов размером более 10 м в околоземное космическое пространство ~ 1 тыс. в год. Получено детальное распределение по направлениям и скоростям входа.

Апробация работы.

Результаты докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. On the dynamical evolution of the NEO population. R.V. Zolotarev, B.M. Shustov. 7th IAA Planetary Defense Conference. Онлайн-участие. 26-30 апреля 2021.
2. On the evolution of meteoroid streams. R.V. Zolotarev, B.M. Shustov. IAU Symposium 362, «The predictive power of computational astrophysics as a discovery tool». Онлайн-участие. 8-12 ноября 2021.
3. О распределении метеорных частиц по массе. Р.В. Золотарёв, Б.М. Шустов. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых «Астрономия и исследование космического пространства». Онлайн-участие. 31 января - 4 февраля 2022.
4. О динамической шкале эволюции населения астероидов, сближающихся с землёй. Р.В. Золотарёв, Б.М. Шустов. Научно-практическая конференция с международным участием «Околоземная астрономия-2022». Москва, Россия, 18-21 апреля 2022.
5. Об индексе масс метеорных тел. Р.В. Золотарёв. «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». Томск, Россия. 13-17 апреля 2022.
6. On the mass indices of meteor bodies. R.V. Zolotarev, B.M. Shustov. IAU General Assembly Symposium 374, «Astronomical Hazards for Life on Earth». Онлайн-участие, Пусан, Южная Корея. 9-11 августа 2022.
7. On the mass indices of meteor bodies. R.V. Zolotarev, B.M. Shustov. The Thirteenth Moscow Solar System Symposium. Москва, Россия. 10-14 октября 2022.
8. Зависимость темпа убыли населения АСЗ от орбитальных параметров. Р.В. Золотарёв, Б.М. Шустов. 50-я Всероссийская с

- международным участием студенческая научная конференция «Физика Космоса». Коуровская астрономическая обсерватория, с. Слобода, Свердловская обл., Россия. 30 января – 3 февраля 2023.
9. О роли столкновительных событий в формировании сублимационно-пылевой активности астероидов. Р.В. Золотарёв, Б.М. Шустов. XIII Всероссийская молодежная научная конференция «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Екатеринбург, Россия. 29 мая – 2 июня 2023.
 10. Динамика метеороидных потоков, возникающих при столкновениях АСЗ. Р.В. Золотарёв, Б.М. Шустов. Научно-практическая конференция с международным участием «VIII Бредихинские чтения». Заволжск, Россия. 4-8 сентября 2023.
 11. К динамике метеороидных потоков, образующихся при столкновениях АСЗ. Р.В. Золотарёв, Б.М. Шустов. 51-я Всероссийская с международным участием студенческая научная конференция «Физика Космоса». Коуровская астрономическая обсерватория, с. Слобода, Свердловская обл., Россия. 29 января – 2 февраля 2024

Личный вклад.

Автор самостоятельно получил основные результаты, представленные в данной работе, активно участвовал в постановке задачи, анализе и обсуждении результатов, самостоятельно выполнил расчёты и их обработку. Автор принимал прямое непосредственное участие в написании всех статей, указанных в рамках данного диссертационного исследования.

Публикации.

Основное содержание диссертации изложено в 8 статьях, 5 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, и заключения. Полный объем диссертации **145** страниц текста с **58** рисунками и **5** таблицами. Список литературы содержит **202** наименования.

Содержание работы

Во **введении** приводятся основные определения, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме и обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, приводится методология исследований, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** исследуется вопрос о динамической шкале жизни населения АСЗ. Рассмотрены изменение со временем темпа убыли АСЗ

t_{NEA} , включая зависимость этого темпа от начальных параметров орбиты АСЗ (большой полуоси a , эксцентриситета e , наклонения i) и эффективность различных каналов убыли 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.), такую выборку можно считать достаточно полной. Искусственные популяции моделировались при помощи программ NEOMOD [44] и НЕОРОП [45]. Движение астероидов интегрировалось на 20 млн лет с помощью численного комплекса REBOUND [46]. В модели учитывалось гравитационное поле Солнца и планет, а также возможность столкновений.

Показано, что общая численность населения АСЗ убывает с медианным временем $t_{NEA} \simeq 3.5$ млн лет, что уточняет оценки других авторов. Главной особенностью данной работы является то, что в ней впервые количественно исследована зависимость t_{NEA} от начальных значений параметров орбиты: большой полуоси a , эксцентриситета e и наклонения i . 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 , что связано с количеством сближений астероидов с планетами. Полученные оценки зависимости $t_{NEA}(a, e, i)$ важны для количественного анализа адекватности различных моделей механизмов пополнения населения АСЗ.

Во второй главе исследуется эффективность столкновительного и сублимационно-столкновительного механизмов иницирования сублимационно-пылевой активности (СПА) астероидов Главного пояса.

На основе выборки из базы данных Центра малых планет МАС [4] и доступных литературных данных [47; 48] построены распределения по размерам и скорости сближения астероидов ГПА и получена оценка для частоты столкновений астероидов различных размеров.

Рассмотрены параметры выбросов, образующихся в результате ударов [49] и получены оценки для количества выбрасываемого вещества, а также вскрываемой столкновением площади поверхности астероида. На примере астероида 145 Адеона получены оценки для критической энергии столкновений $E_{p,crit}$, необходимых для инициации СПА на крупных (диаметром ~ 100 км) астероидах ГПА, как при помощи столкновительного механизма ($E_{p,crit} \sim 10^{10}$ Дж), так и при помощи столкновительно-сублимационного ($E_{p,crit} \sim 10^{13}$ Дж). Соответствующие оценки частоты столкновений, обеспечивающих проявления активности в ансамбле крупных астероидов составили ~ 1 в год для чисто столкновительного механизма и $\sim 10^{-2}$ в год для столкновительно-сублимационного механизма.

При характерном времени проявления пылевой активности до 0.01 года в случае столкновительного механизма из примерно 300 крупных астероидов ГПА диаметром более 100 км в любой момент времени несколько астероидов может находиться в активном состоянии. Для обеспечения эффективности столкновительно-сублимационного механизма столкновения должны быть мощнее, чтобы вскрывать льдосодержащие слои на достаточно большой площади (до 0.1 кв. км). Хотя частота таких столкновений существенно ниже, но длительность проявления кометоподобной активности существенно дольше (годы). Всплески солнечной активности и нагрев при прохождении астероида по перигелийному участку орбиты могут обеспечить наблюдаемую частоту проявлений сублимационной активности крупных астероидов ГПА примитивных типов (их насчитывается около 200). Согласно построенной модели, вследствие действия столкновительно-сублимационного механизма в каждый момент времени несколько крупных астероидов могут проявлять признаки СПА. Таким образом, для объяснения проявлений СПА применимы как столкновительный, так и столкновительно-сублимационный механизмы, однако нужны подтверждения в дальнейших наблюдениях.

В **третьей главе** рассматриваются задачи о формировании и эволюции метеороидных потоков, о вариациях в индексе масс метеороидных потоков и сравнивается вклад различных источников в производство метеороидного вещества, существующего в околоземном пространстве.

Для решения данных задач построены модели формирования и эволюции метеороидных потоков. Формирование потоков кометного происхождения исследовалось на основе модифицированной модели Уиппла [50], получены скорости выбрасываемых частиц различного размера (массы) в зависимости от физических параметров ядра родительского тела кометы. Модель применена к ядрам комет 96P/Machholz и 2P/Encke. Полученные распределения частиц по скорости использовались на втором этапе, где моделировалась динамическая эволюция соответствующих метеороидных потоков с учётом воздействия возмущений планет и сил радиационного характера (эффекта Пойтинга-Робертсона и давления излучения). Интегрирование движения производилось при помощи кода REBOUND [46] с использованием гибридной схемы MERCURIUS [51]. На этапе обработки результатов численного расчёта учитывался состав частиц вблизи Земли и вычислялся индекс массы.

В результате показано, что в метеороидном потоке формируется распределение спектров масс: в центре потока значения индекса масс $s < 2$, на краю потока s может превышать 2. Причины таких изменений в структуре метеороидного потока две: 1) начальная скорость выброса частиц из кометного ядра сильно зависит от размера частиц и мелкие частицы быстрее удаляются от ядра, и 2) мелкие частицы сильнее подвержены действию радиационных сил и поэтому рассеиваются в пространстве быстрее, чем

крупные, и значение индекса масс в центре потока уменьшается. Эти результаты согласуются с результатами, полученными другими авторами по наблюдениям метеорных потоков, в частности, потока Ариетид. Также отмечено, что эволюция метеороидного потока слабо зависит от геометрии выброса, если не принимать крайние предположения (очень узкий и притом единственный конус выброса), а вот зависимость от скорости выброса намного существеннее. Результаты расчётов подтверждают, что структура модельного потока одного и того же возраста заметно зависит от начального момента, когда началось истечение (выброс метеороидов) из ядра кометы, но общий характер поведения индекса масс в потоке тот же.

Также в главе представлены результаты моделирования формирования и эволюции метеороидных потоков, порождаемых столкновением тел. Такой механизм более универсален, так как работает и для астероидов, и для комет (в основном для астероидов, так как их число гораздо больше). Рассмотрены столкновения АСЗ с астероидами Главного пояса как причина формирования метеороидных потоков астероидного происхождения.

На основе анализа теоретических и лабораторных исследований построена общая картина выброса при столкновении. Получена оценка массы выбрасываемого вещества в зависимости от параметров удара, распределение выбрасываемых частиц по массам и скорости, а также распределение по направлениям. Полученные оценки хорошо согласуются с экспериментом DART [52].

На примере модельного астероида исследована динамическая эволюция метеороидного потока, образующегося при столкновении. Так же, как и в случае потоков кометного происхождения, после отделения от родительского тела ансамбль частиц «растягивается» по орбите, постепенно формируя квазиколеобразную структуру. Выброс вещества при столкновении происходит один раз в отличие от кометного механизма, где поток постоянно «подпитывается» в ходе кометной активности. Вследствие этого астероидный поток, порождённый столкновением, быстрее рассеивается в пространстве. Однако количество образующихся метеороидных потоков астероидного происхождения может быть существенно больше, чем количество потоков кометного происхождения. Так же, как и в случае потоков кометного происхождения, сближения с планетами оказывают влияние на формирование сгустков и разрежений в потоке, однако для астероидных потоков это более выражено, так как поток не пополняется новыми выбросами, которые могли бы компенсировать убыль плотности частиц в потоке. Такие вариации плотности для конкретного потока сложно прогнозировать, поскольку время и место соударения точно неизвестны.

Со временем как кометные, так и астероидные потоки постепенно рассеиваются в пространстве, поддерживая приток пылевого и метеороидного вещества в диффузный диск Солнечной системы. Столкновения с крупными ударниками гораздо менее вероятны, однако в ходе таких столкновений

производится гораздо больше пыли и обломков. Получена интегральная оценка притока массы твёрдого вещества в результате столкновений АСЗ $\sim 10^9$ кг/год, что по порядку величины совпадает с темпом «производства» твёрдого вещества кометами.

В **четвёртой главе** представлены результаты статистического моделирования входа астероидов, сближающихся с Землёй (АСЗ) в околоземное космическое пространство (ОКП) – сферу радиусом 0.01 а.е. вокруг Земли. Рассмотрены особенности распределения АСЗ при их вхождении в ОКП. При помощи пакета программ NEOMOD [44] построена модель населения АСЗ с размерами от 10 м, затем при помощи комплекса REBOUND [46] было произведено численное интегрирование с фиксацией сближений астероидов с Землёй.

В результате вычислений получена оценка частоты входов астероидов декаметрового класса в ОКП, она составляет примерно 10^3 входов в год. При этом в ОКП в каждый момент времени находится в среднем около четырёх таких АСЗ. Распределение астероидов по направлениям входа в ОКП неравномерное и имеют повышенную концентрацию вблизи направлений, близких к направлению на Солнце и противоположных. При этом уменьшенная концентрация наблюдается вблизи направления вектора скорости (апекса) Земли, что объясняется распределением АСЗ по элементам орбит.

Скорости сближения АСЗ с Землей на расстоянии 0.01 а.е. в подавляющем большинстве сближений не превышают 30 км/с. Распределение имеет максимум вблизи 7.5 км/с. При этом величина скорости сближения меньше в направлениях апекса и антиапекса Земли, что соответствует движению Земли по орбите вблизи плоскости эклиптики.

В связи с вопросами астероидно-кометной опасности важным представляется тот факт, что до половины астероидов входят в ОКП со стороны дневной полусферы и не могут быть обнаружены наземными и околоземными оптическими средствами.

Рассчитано распределение по угловой скорости входящих астероидов для наблюдателя, находящегося в точке Лагранжа L_1 системы Солнце-Земля, характерные угловые скорости не превышают нескольких десятых долей угловой секунды в секунду (относительно направления на Землю). В дальнейшем, это может быть полезно при проектировании системы обнаружения дневных астероидов (СОДА) [43].

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе численного моделирования динамической эволюции населения АСЗ получена уточнённая оценка для характерного времени убыли (пополнения) населения АСЗ t_{NEA} . Важным результатом является сильная зависимость от начальных элементов орбит АСЗ (a, e, i) . Это важно для дальнейшего исследования

механизмов притока астероидов в область АСЗ и накладывает ограничения на эффективность этих механизмов.

2. С использованием модели столкновительных процессов населения астероидов Главного пояса проведено сравнение эффективности столкновительного и столкновительно-сублимационного механизмов, ответственных за инициализацию сублимационно-пылевой активности астероидов. Полученные оценки частоты столкновений качественно (по порядку величины) согласуются с наблюдаемой статистикой проявления активности, однако для уточнения требуется проведение дополнительных наблюдений.
3. Построены численные модели формирования и динамической эволюции метеороидных потоков, которые позволили на количественном уровне воспроизвести наблюдаемое изменение во времени индекса масс в метеорных потоках. Построенные модели могут быть полезны для оценки распределения метеороидного вещества в ОКП, а также создания динамической модели распределения твёрдого вещества в ОКП.
4. Полученная оценка для темпов производства пыли и метеороидного вещества в результате столкновений АСЗ оказалась сравнима с соответствующей оценкой темпа производства в результате процессов распада кометных ядер. Данный результат может быть полезен для прогнозирования распределения метеороидного вещества в ОКП по составу.
5. На основе численного моделирования динамики населения АСЗ получена оценка частоты входов астероидов размером более 10 м в околоземное космическое пространство. Получены детальные распределения по направлениям и скорости входа, которые могут быть полезны в дальнейшем при планировании программ поиска потенциально опасных объектов, в частности при проектировании системы обнаружения дневных астероидов (СОДА).

Дальнейшее развитие видится и в получении новых данных наблюдений, и в развитии методов исследования. Представляется перспективной разработка программ численного интегрирования движения ансамблей малых тел Солнечной системы, учитывающих особенностей их динамики, с использованием потенциала параллельных вычислений, предоставляемого современной аппаратурой, в том числе с использованием графических ускорителей.

В заключение автор выражает особую благодарность и большую признательность научному руководителю Б.М. Шустову за поддержку, помощь, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор хотел бы поблагодарить коллектив Института астрономии РАН, в стенах которого выполнялась работа, за поддержку, обсуждение результатов и помощь в различных вопросах. Автор благодарит своих родителей за всестороннюю

поддержку. Автор также благодарит всех, кто сделал настоящую работу возможной.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Золотарёв, Р. В.* О динамической эволюции населения астероидов, сближающихся с Землёй [Текст] / Р. В. Золотарёв, Б. М. Шустов // *Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 98, № 6. — С. 518—527.
- A2. *Шустов, Б. М.* Об индексах массы метеорных тел. I. Модель образования метеороидных потоков [Текст] / Б. М. Шустов, Р. В. Золотарёв // *Астрономический журнал*. — 2022. — Т. 99, № 2. — С. 165—176.
- A3. *Золотарёв, Р. В.* Об индексах массы метеорных тел. II. Эволюция метеороидных потоков [Текст] / Р. В. Золотарёв, Б. М. Шустов // *Астрономический журнал*. — 2022. — Т. 99, № 3. — С. 250—264.
- A4. Ударные события как возможный механизм активации сублимационно-пылевой активности астероидов главного пояса [Текст] / Б. М. Шустов [и др.] // *Астрономический журнал*. — 2022. — Т. 99, № 11. — С. 1058—1071.
- A5. *Золотарёв, Р. В.* Эволюция метеороидных потоков, образующихся при столкновениях с АСЗ [Текст] / Р. В. Золотарёв, Б. М. Шустов // *Астрономический журнал*. — 2023. — Т. 100, № 10. — С. 1—19.
- A6. *Золотарёв, Р. В.* О динамической шкале населения астероидов, сближающихся с землей [Текст] / Р. В. Золотарёв, Б. М. Шустов, В. И. Корчагин // *Научные труды Института Астрономии РАН*. — 2020. — Т. 5, № 5. — С. 225—229.
- A7. *Золотарёв, Р. В.* Динамическая шкала АСЗ: зависимость от орбитальных параметров [Текст] / Р. В. Золотарёв, Б. М. Шустов // *Научные труды Института Астрономии РАН*. — 2022. — Т. 7, № 1. — С. 23—29.
- A8. *Золотарёв, Р. В.* Некоторые особенности распределения астероидов в околоземном космическом пространстве [Текст] / Р. В. Золотарёв // *Научные труды Института Астрономии РАН*. — 2023. — Т. 8, № 1. — С. 1—5.

Список литературы

1. Resolutions adopted at the General Assemblies. Resolutions 5 and 6: «Definition of a Planet in the Solar System» and «Pluto» [Электронный ресурс]. — 2006. — URL: https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf (visited on 05/05/2024).

2. IAU Definitions of terms in meteor astronomy [Электронный ресурс]. — 2017. — URL: https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf (visited on 09/01/2023).
3. Origin and Evolution of Near-Earth Objects [Текст] / A. Morbidelli [и др.] // Asteroids III. — 2002. — С. 409–422.
4. IAU Minor Planet Center [Электронный ресурс]. — 2023. — URL: <https://minorplanetcenter.net/> (visited on 05/01/2023).
5. NASA NSTC NATIONAL PREPAREDNESS STRATEGY FOR NEAR-EARTH OBJECT HAZARDS AND PLANETARY DEFENSE [Электронный ресурс]. — 2023. — URL: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/04/2023-NSTC-National-Preparedness-Strategy-and-Action-Plan-for-Near-Earth-Object-Hazards-and-Planetary-Defense.pdf> (visited on 01/10/2024).
6. *Youdin, A. N.* From Disks to Planets [Текст] / A. N. Youdin, S. J. Kenyon // Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 3: Solar and Stellar Planetary Systems / под ред. T. D. Oswalt, L. M. French, P. Kalas. — 2013. — С. 1.
7. *Bottke, W. F.* The Late Heavy Bombardment [Текст] / W. F. Bottke, M. D. Norman // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 2017. — Август. — Т. 45, № 1. — С. 619–647.
8. *Neukum, G.* Cratering Records in the Inner Solar System in Relation to the Lunar Reference System [Текст] / G. Neukum, B. A. Ivanov, W. K. Hartmann // Space Science Reviews. — 2001. — Апрель. — Т. 96. — С. 55–86.
9. Asteroids falling into the Sun [Текст] / P. Farinella [и др.] // Nature. — 1994. — Сентябрь. — Т. 371, № 6495. — С. 314–317.
10. *Gladman, B.* The Near-Earth Object Population [Текст] / B. Gladman, P. Michel, C. Froeschlé // Icarus. — 2000. — Июль. — Т. 146, № 1. — С. 176–189.
11. *O'Brien, D. P.* The Main Belt and NEA Size Distributions: Linked Collisional and Dynamical Evolution [Текст] / D. P. O'Brien, R. Greenberg // Lunar and Planetary Science Conference / под ред. S. Mackwell, E. Stansbery. — 03.2003. — С. 2018. — (Lunar and Planetary Science Conference).
12. Escape of asteroids from the main belt [Текст] / M. Granvik [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2017. — Февр. — Т. 598. — A52.
13. *Jewitt, D.* The Asteroid-Comet Continuum [Текст] / D. Jewitt, H. H. Hsieh // arXiv e-prints. — 2022. — Март. — arXiv:2203.01397. — arXiv: 2203.01397 [astro-ph.EP].

14. *Jewitt, D.* The Active Asteroids [Текст] / D. Jewitt, H. Hsieh, J. Agarwal // Asteroids IV. — 2015. — С. 221–241.
15. *Busarev, V. V.* Material composition assessment and discovering sublimation activity on asteroids 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, and 1474 Beira [Текст] / V. V. Busarev, S. I. Barabanov, V. B. Puzin // Solar System Research. — 2016. — Июль. — Т. 50, № 4. — С. 281–293.
16. *Busarev, V. V.* Possible sublimation and dust activity on primitive NEAs: Example of (162173) Ryugu [Текст] / V. V. Busarev, F. Vilas, A. B. Makalkin // arXiv e-prints. — 2017. — Июнь. — arXiv:1706.04073. — arXiv: [1706.04073](https://arxiv.org/abs/1706.04073) [astro-ph.EP].
17. Confirmation of the Sublimation Activity of the Primitive Main-Belt Asteroids 779 Nina, 704 Interamnia, and 145 Adeona, as well as its Probable Spectral Signs on 51 Nemausa and 65 Cybele [Текст] / V. V. Busarev [и др.] // Solar System Research. — 2019. — Июль. — Т. 53, № 4. — С. 261–277.
18. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact [Текст] / V. V. Busarev [и др.] // Icarus. — 2021. — Ноябрь. — Т. 369. — С. 114634.
19. *Blaauw, R. C.* Mass distribution indices of sporadic meteors using radar data [Текст] / R. C. Blaauw, M. D. Campbell-Brown, R. J. Weryk // Monthly Notices of the RAS. — 2011. — Апр. — Т. 412, № 3. — С. 2033–2039.
20. *Janches, D.* A Decade of Sporadic Meteoroid Mass Distribution Indices in the Southern Hemisphere Derived from SAAMER’s Meteor Observations [Текст] / D. Janches, C. Brunini, J. L. Hormaechea // The Astronomical Journal. — 2019. — Июнь. — Т. 157, № 6. — С. 240.
21. *Babadzhanov, P. B.* Density of Meteoroids and their Mass Influx on the Earth [Текст] / P. B. Babadzhanov // Asteroids, Comets, Meteors 1993. Т. 160 / под ред. А. Milani, М. di Martino, А. Cellino. — 01.1994. — С. 45–54.
22. *Rendtel, J.* The population index of sporadic meteors [Текст] / J. Rendtel // Proceedings of the International Meteor Conference, 22nd IMC, Bollmannsruh, Germany, 2003 / под ред. М. Triglav-Čekada, С. Trayner. — 01.2004. — С. 114–122.
23. *Pokorný, P.* A reproducible method to determine the meteoroid mass index [Текст] / P. Pokorný, P. G. Brown // Astronomy and Astrophysics. — 2016. — Авг. — Т. 592. — A150. — arXiv: [1605.04437](https://arxiv.org/abs/1605.04437) [astro-ph.EP].

24. Results of the IMO Video Meteor Network - May 2017, and flux density calculation [Текст] / S. Molau [и др.] // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 2017. — Дек. — Т. 45, № 6. — С. 144–148.
25. *Blaauw, R. C.* A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar - III. Mass distribution indices of six major meteor showers [Текст] / R. C. Blaauw, M. D. Campbell-Brown, R. J. Weryk // Monthly Notices of the RAS. — 2011. — Июль. — Т. 414, № 4. — С. 3322–3329.
26. *Babadzhanov, P. B.* Some Structural Characteristics of the Geminid Meteor Shower [Текст] / P. B. Babadzhanov, S. O. Isamutdinov, R. P. Chebotarev // Solar System Research. — 1992. — Янв. — Т. 26, № 1. — С. 70.
27. Meteor Phenomena and Bodies [Текст] / Z. Ceplecha [и др.] // Space Science Reviews. — 1998. — Сент. — Т. 84. — С. 327–471.
28. *Jenniskens, P.* Meteor Showers and their Parent Comets [Текст] / P. Jenniskens. — 2008.
29. *Borovička, J.* Small Near-Earth Asteroids as a Source of Meteorites [Текст] / J. Borovička, P. Spurný, P. Brown // Asteroids IV. — 2015. — С. 257–280.
30. *Ryabova, G. O.* Modeling of meteoroid streams: The velocity of ejection of meteoroids from comets (a review) [Текст] / G. O. Ryabova // Solar System Research. — 2013. — Май. — Т. 47, № 3. — С. 219–238.
31. From Parent Body to Meteor Shower: The Dynamics of Meteoroid Streams [Текст] / J. Vaubaillon [и др.] // Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond / под ред. G. O. Ryabova, D. J. Asher, M. J. Campbell-Brown. — 2019. — С. 161.
32. Physical and Chemical Properties of Meteoroids [Текст] / J. Borovička [и др.] // Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond / под ред. G. O. Ryabova, D. J. Asher, M. J. Campbell-Brown. — 2019. — С. 37.
33. *Kostolansky, E.* On asteroidal meteoroid streams detection [Текст] / E. Kostolansky // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 1998. — Апр. — Т. 28, № 1. — С. 22–30.
34. *Garcia-Martinez, J. J.* Meteoroid Streams of Asteroidal Origin as Evidence of Recent Impacts on NEAs [Текст] / J. J. Garcia-Martinez, F. Ortega-Gutierrez // Meteoritics and Planetary Science Supplement. — 2007. — Авг. — Т. 42. — С. 5327.
35. Genetic analysis of parameters of near earth asteroids for determining parent bodies of meteoroid streams [Текст] / M. Sokolova [и др.] // Advances in Space Research. — 2018. — Окт. — Т. 62, № 8. — С. 2355–2363.

36. Newly Disrupted Main Belt Asteroid P/2010 A2 [Текст] / D. Jewitt [и др.] // arXiv e-prints. — 2010. — Окт. — arXiv:1010.2575. — arXiv: [1010.2575](https://arxiv.org/abs/1010.2575) [astro-ph.EP].
37. IAU Meteor Data Center: the shower database [Текст] / Т. J. Jopek [и др.] // Izvestiya Natsional'noy Akademii Nauk Tadzhikistana. Otdeleniye Fiziko-Matematicheskikh Khimicheskikh. — 2021. — Февр. — Т. 2. — С. 51–65.
38. IAU Meteor Data Center [Электронный ресурс]. — 2023. — URL: <https://www.astro.sk/IAUC22DB/MDC2022/> (visited on 05/01/2023).
39. *Babadzhanov, P. B.* On the cometary nature of near-Earth asteroid 2003 EH1 [Текст] / P. B. Babadzhanov, G. I. Kokhirova, Y. V. Obrubov // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2016. — Сент. — Т. 32, № 5. — С. 250–254.
40. *Kokhirova, G.* Inactive comets within meteoroid streams [Текст] / G. Kokhirova, P. Babadzhanov, Y. Obrubov // IAU General Assembly. Т. 29. — 08.2015. — С. 2256176.
41. Asteroids Associated with the Librid-Lupid Meteoroid Stream [Текст] / G. I. Kokhirova [и др.] // Izvestiia Akademiia Nauk TadzhSSR. — 2020. — Июль. — Т. 4. — С. 41–48.
42. Astronomical aspects of cosmic threats: new problems and approaches to asteroid–comet hazard following the chelyabinsk event of February 15, 2013 [Текст] / В. М. Shustov [и др.] // Astronomy Reports. — 2015. — Окт. — Т. 59, № 10. — С. 983–996.
43. *Shugarov, A. S.* System of Observation of Day-time Asteroids (SODA) [Текст] / A. S. Shugarov, В. М. Shustov // INASAN Science Reports. — 2022. — Июль. — Т. 7. — С. 85–92.
44. NEOMOD: A New Orbital Distribution Model for Near-Earth Objects [Текст] / D. Nesvorný [и др.] // The Astronomical Journal. — 2023. — Авг. — Т. 166, № 2. — С. 55. — arXiv: [2306.09521](https://arxiv.org/abs/2306.09521) [astro-ph.EP].
45. Modeling the NEO Population. [Текст] / G. Hahn [и др.] // Technical Note, ESA/ESTEC Contract No: 4000106274. — 2014. — Дек.
46. *Rein, H.* REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics [Текст] / H. Rein, S. .-. Liu // Astronomy and Astrophysics. — 2012. — Янв. — Т. 537. — A128. — arXiv: [1110.4876](https://arxiv.org/abs/1110.4876) [astro-ph.EP].
47. Collisional Evolution of Small-Body Populations [Текст] / D. R. Davis [и др.] // Asteroids III. — 2002. — С. 545–558.
48. *Cibulkova, H.* A six-part collisional model of the main asteroid belt [Текст] / H. Cibulkova, M. Broz, P. G. Benavidez // Icarus. — 2014. — Окт. — Т. 241. — С. 358–372. — arXiv: [1407.6143](https://arxiv.org/abs/1407.6143) [astro-ph.EP].

49. *Holsapple, K. A.* The Scaling of Impact Processes in Planetary Sciences [Текст] / К. А. Holsapple // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 1993. — Янв. — Т. 21. — С. 333–373.
50. *Whipple, F. L.* A comet model. I. The acceleration of Comet Encke [Текст] / F. L. Whipple // The Astrophysical Journal. — 1950. — Март. — Т. 111. — С. 375–394.
51. Hybrid symplectic integrators for planetary dynamics [Текст] / Н. Rein [и др.] // Monthly Notices of the RAS. — 2019. — Июнь. — Т. 485, № 4. — С. 5490–5497. — arXiv: [1903.04972](https://arxiv.org/abs/1903.04972) [[astro-ph.EP](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
52. Ejecta from the DART-produced active asteroid Dimorphos [Текст] / J.-Y. Li [и др.] // Nature. — 2023. — Апр. — Т. 616, № 7957. — С. 452–456. — arXiv: [2303.01700](https://arxiv.org/abs/2303.01700) [[astro-ph.EP](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].

Золотарёв Роман Викторович

Некоторые особенности динамики ансамблей
малых тел, сближающихся с Землёй

Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____