

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»



А.В. Германенко

« 04 » 2024 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на диссертационную работу Золотарёва Романа Викторовича «Некоторые особенности динамики ансамблей малых тел, сближающихся с Землёй», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Диссертационная работа Золотарёва Романа Викторовича посвящена актуальной проблеме исследования динамики ансамблей малых тел Солнечной системы. В диссертации рассмотрены следующие задачи: 1) оценка параметров шкалы динамической эволюции астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ); 2) обоснование механизма активации сублимационно-пылевой активности астероидов вследствие столкновений; 3) выявление общих закономерностей формирования и эволюции спектра масс метеороидных потоков; 4) исследование распределения малых тел в околоземном космическом пространстве.

Полученные в диссертационной работе результаты, несомненно, обладают высокой научной ценностью и новизной. Автор диссертации уточнил оценку характерного времени убыли населения АСЗ — около 3.5 млн лет и впервые показал, что это время существенно различается для

разных областей пространства элементов орбит. В диссертации впервые показано, что столкновительный механизм инициирования сублимационно-пылевой активности астероидов сравним по эффективности со столкновительно-сублимационным. Сделан вывод, что в каждый момент времени несколько астероидов диаметром более 100 км могут находиться в активном состоянии, то есть проявлять признаки сублимационно-пылевой активности. В диссертации впервые на количественном уровне показано, что наблюдаемые изменения индекса масс в метеорных потоках являются следствием динамической эволюции частиц различной массы в соответствующих метеороидных потоках. Автором диссертации получена оценка темпа производства метеороидного вещества при столкновениях АСЗ — порядка  $10^{10}$  кг/год и показано, что этот темп сравним с темпом производства метеороидного вещества в ходе распада кометных ядер. В диссертации оценена частота входа астероидов размером более 10 м в околоземное космическое пространство — порядка 1 тыс. в год, а также построено детальное распределение по направлениям и скоростям входа.

### Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 145 страницах, содержит 58 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 202 наименования и изложен на 20 страницах.

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

В **первой главе** исследуется вопрос о динамической шкале жизни населения АСЗ. Рассмотрены изменение со временем темпа убыли АСЗ, включая зависимость этого темпа от начальных значений позиционных

элементов орбиты АСЗ и эффективность различных каналов убыли АСЗ. Показано, что общая численность населения АСЗ убывает с медианным временем порядка 3.5 млн лет, что уточняет оценки других авторов. Отметим, что в диссертации впервые количественно исследована зависимость медианного времени убыли АСЗ от начальных значений позиционных элементов орбиты. Показано, что эта зависимость весьма сильная. Так для объектов с большими значениями больших полуосей и эксцентриситетов орбит медианное время в десятки раз меньше, чем у подмножества с малыми значениями больших полуосей и эксцентриситетов, что связано с изменением количества сближений астероидов с планетами.

Во **второй главе** выполнен сравнительный анализ столкновительного и сублимационно-столкновительного механизмов инициирования сублимационно-пылевой активности (СПА) астероидов Главного пояса. На примере астероида (145) Адеона получены оценки критической энергии столкновений, необходимых для инициации СПА на крупных (диаметром порядка 100 км) астероидах ГПА, как при помощи столкновительного механизма, так и при помощи столкновительно-сублимационного. Соответствующие оценки частоты столкновений, обеспечивающих проявления активности в ансамбле крупных астероидов, составили порядка одного в год для чисто столкновительного механизма и порядка 0.01 в год для столкновительно-сублимационного механизма. Показано, что в случае столкновительного механизма из примерно 300 крупных астероидов ГПА диаметром более 100 км в любой момент времени несколько астероидов могут находиться в активном состоянии, а вследствие действия столкновительно-сублимационного механизма в каждый момент времени несколько крупных астероидов могут проявлять признаки СПА.

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

метеороидном потоке формируется распределение спектров масс: в центре потока значения индекса масс меньше 2, а на краю потока индекс масс может превышать 2. Выделены две причины таких изменений в структуре метеороидного потока: 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. Сделан вывод, 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 этой главе представлены результаты моделирования формирования и эволюции метеороидных потоков, порождаемых столкновением тел. Данный механизм универсален, так как работает и для астероидов, и для комет, но для астероидов он более эффективен ввиду их большого количества. Полученная интегральная оценка притока массы твердого вещества в результате столкновений АСЗ с астероидами Главного пояса — порядка  $10^{10}$  кг/год, сопоставима с темпом генерации твердого вещества кометами.

В **четвертой главе** представлены результаты статистического моделирования входа АСЗ в околоземное космическое пространство — сферу радиусом 0.01 а.е. вокруг Земли. Рассмотрены особенности распределения АСЗ при их вхождении в околоземное космическое пространство. Получена оценка частоты входов астероидов декаметрового класса в околоземное космическое пространство — примерно  $10^3$  входов в год. При этом в околоземном космическом пространстве в каждый момент времени находится в среднем около четырех таких АСЗ. Отмечается, что скорости сближения АСЗ с Землей на расстоянии 0.01 а.е. в подавляющем большинстве случаев не превышают 30 км/с с максимумом распределения вблизи 7.5 км/с. Для проблемы астероидно-кометной опасности представляет интерес факт, что до половины астероидов входят в околоземное

космическое пространство со стороны дневной полусферы и не могут быть обнаружены наземными и околоземными оптическими средствами.

**В Заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы, а также направления дальнейшего развития темы диссертации.

**Научная новизна** заключается в том, что уточнена оценка важной динамической характеристики населения АСЗ — характерного времени убыли (пополнения) и впервые получена оценка этого времени для АСЗ в разных областях пространства позиционных элементов орбит; 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 со 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.

**Научная и практическая значимость** подтверждается тем, что 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).

### **Достоверность результатов, публикации и апробация работы**

Достоверность полученных результатов, положений и выводов обоснована применением современного программного комплекса REBOUND при исследовании динамической эволюции ансамблей малых небесных тел, использованием методов статистического анализа при обработке результатов численного моделирования, сравнением получаемых результатов с наблюдениями и работами других авторов. Также достоверность подтверждается опубликованием полученных результатов в 5 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и еще в 3 публикациях по теме исследования. Результаты проведенных исследований были представлены на 11-ти всероссийских и международных конференциях.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором в ходе совместных исследований и опубликованы с соавторами в научных статьях. Автор принимал прямое непосредственное участие в написании всех статей. Р.В. Золотарёв самостоятельно получил основные результаты, представленные в диссертации, активно участвовал в постановке задачи, анализе и обсуждении результатов, самостоятельно выполнил расчёты и их обработку.

### **Замечания по диссертационной работе**

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, она логично построена и хорошо структурирована. Тем не менее есть ряд замечаний по содержанию проведенного исследования.

1. На странице 32 обсуждается время Ляпунова для близких орбит в Солнечной системе и приводится значение 200 тыс. лет. Для объектов, сближающихся с Землей, оценки времени Ляпунова составляют от

нескольких десятков до нескольких сотен лет (см. например, Whipple A.L. Lyapunov times of the inner asteroids // Icarus. 1995. V. 115. P. 347–353).

2. В комментарии к рисунку 19 желательно пояснить, чем вызван резкий скачок относительного количества АСЗ, оставшихся в Солнечной системе, но вышедших из области определения АСЗ, наблюдаемый в начале интервала.

Имеются замечания по представлению результатов работы.

1. В тексте нет ссылки на рисунок 3.
2. Используются разные системы обозначений астероидов: с использованием круглых скобок для выделения номера и без скобок.
3. Страница 32: «... наиболее оптимальным представляется использовать ...» — дополнение «наиболее» излишне, так как оптимальный — это лучший в своем классе.
4. На рисунке 25 подписи осей даны на английском языке, а поясняющие надписи у графиков — на русском.
5. На странице 106 не указаны единицы измерения для скоростей  $v_{\min}$  и  $v_{\max}$ . Отметим, что на странице 105 сказано, что используется система СИ, однако для остальных величин единицы изменения указаны явно.

В работе имеется ряд опечаток. Приведены некоторые из них.

1. Страница 6: «... непрерывно пополняется На рис. 1 ...» — пропущена точка.
2. Страница 6: «... это лишь малая объектов, существующих ...» — пропущено слово.
3. Страницы 7 и 8: в подписях к рисункам 1 и 2 говорится о положении частей рисунков справа и слева, в то время как они расположены вертикально.
4. В названии раздела «1.1 Постановка задачи метод расчёта» требуется согласование или знак препинания.
5. Страница 74: «... где концентрация потенциальных ударников и на порядки выше ...» — лишний союз «и».

Указанные выше замечания являются важными, но не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Золотарёва Романа Викторовича «Некоторые особенности динамики ансамблей малых тел, сближающихся с Землёй» является законченной работой и полностью удовлетворяет требованиям ВАК. Результаты, полученные в диссертационной работе, вносят заметный вклад в исследование динамики ансамблей малых тел, сближающихся с Землей. Автореферат диссертации в полном объеме отражает основные результаты, полученные в работе. Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертационной работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Заведующий кафедрой астрономии, геодезии,  
экологии и мониторинга окружающей среды  
Института естественных наук и математики УрФУ,  
доктор физико-математических наук  
тел. +7 (343) 389 95 89  
e-mail: [eduard.kuznetsov@urfu.ru](mailto:eduard.kuznetsov@urfu.ru)

 Э.Д. Кузнецов

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Тел. +7 (343) 375 44 44, e-mail: [contact@urfu.ru](mailto:contact@urfu.ru)