

Отзыв научного консультанта на диссертационную работу
Галушиной Татьяны Юрьевны
«Исследование орбитальной динамики избранных групп астероидов,
сближающихся с Землей»
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.3.1. «Физика космоса,
астрономия»

Актуальность темы исследования

Астероиды представляют собой наиболее обширный класс объектов Солнечной системы. По данным каталога Э. Боуэлла на конец 2023 года число наблюдаемых астероидов превосходило 1300000 объектов, в том числе астероидов, сближающихся с Землей, (АСЗ) было более 32000.

Исследование орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы несет в себе фундаментальные знания о динамической эволюции Солнечной системы в целом. С практической точки зрения знание особенностей динамики астероидов, сближающихся с Землей, необходимо для прогнозирования и предотвращения столкновения этих объектов с Землей

Кроме того, актуальность исследованиям динамики астероидов придают космические миссии, направленные на изучение природы наиболее интересных объектов семейства АСЗ. Например, планируемая миссия к астероиду (3200) Phaethon.

В изучении динамики АСЗ, а также в создании методов защиты Земли от потенциально опасных астероидов (ПОА) большую роль играет численное моделирование движения. Аналитические методы и подходы здесь не применимы, поскольку значительная часть АСЗ движется по орбитам с большими эксцентриситетами и имеет многочисленные сближения с планетами.

Прогноз реального движения астероида основан на наблюдениях, которые всегда отягощены случайными ошибками, что создает неопределенность

в вычислении параметров движения, которая должна учитываться при исследовании орбитальной эволюции объектов

Особенности динамики астероидов способны приводить к проявлению хаотичности в их движении. Поэтому численные модели движения астероидов должны иметь в своей структуре алгоритмы выявления хаотичности.

При исследовании ПОА большое значение имеет возможность быстро оценить вероятность столкновения с Землей и в случае необходимости предотвратить его.

Все указанные выше аспекты проблемы исследования динамики астероидов рассмотрены диссертантом на примере анализа динамики избранных групп астероидов, сближающихся с Землей. Поэтому актуальность представленных исследований сомнений не вызывает.

Цели и задачи

Целью работы Галушиной Т.Ю. является выявление и изучение особенностей орбитальной динамики избранных групп АСЗ, а именно астероидов с малыми перигелийными расстояниями и потенциально опасных для Земли астероидов (ПОА). Причем динамика ПОА изучается на предмет оперативного определения вероятности столкновения объекта с Землей и возможности превентивного воздействия на астероид с целью предотвращения столкновения.

Для достижения поставленной цели автором диссертации были решены следующие задачи:

- разработана и протестирована на реальных наблюдениях (в том числе полученных автором лично) методика построения обзорных эфемерид;
- создано программно-алгоритмическое обеспечение, которое дает возможность проводить исследование динамики астероидов, сближающихся с Землей, в том числе позволяет оценивать влияние возмущающих факторов, выявлять сближения и возможные столкновения с большими планетами, оценивать вероятность столкновения, обнаруживать вековые и орбитальные резонансы, определять время предсказуемости движения;

- построена методика исследования структуры возмущений в движении астероидов и исследовано влияние различных слабых возмущающих факторов на вероятностную динамику астероидов с малыми перигелийными расстояниями;

- получены значения параметра эффекта Ярковского для астероидов с малыми перигелийными расстояниями и оценки точности определения параметра на основе реальных и модельных наблюдений;

- выявлены все орбитальные резонансы низких порядков в движении астероидов с малыми перигелийными расстояниями, оценено влияние эффекта Ярковского и светового давления на резонансные соотношения и критические аргументы;

- исследована вероятностная орбитальная эволюция ряда астероидов с малыми перигелийными расстояниями, оценено влияние на моделирование их динамики способа построения начального облака неопределенности и эффекта Ярковского;

- реализован и протестирован метод численного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой;

- обоснована принципиальная реализуемость метода предотвращения столкновения астероида с Землей, основанного на превентивном разрушении опасного объекта.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана оригинальная методика изучения структуры возмущений, которая показала, что при изучении движения астероидов с малыми перигелийными расстояниями необходимо учитывать влияния планет, Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца, а для объектов с хорошо определенной орбитой и эффекта Ярковского;

- получены оценки параметра эффекта Ярковского для всей совокупности известных астероидов с малыми перигелийными расстояниями, продемонстрировано, что для повышения точности определения параметра

необходимо не только увеличение мерного интервала, но и повышение точности наблюдений;

– впервые показано, что среди 60 исследованных астероидов с малыми перигелийными расстояниями 33 движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно; всего было выявлено 50 соизмеримостей, 16 из которых являются устойчивыми; показано также, что эффект Ярковского оказывает заметное влияние на неустойчивые резонансные соотношения;

– исследована вероятностная орбитальная эволюция 14 астероидов с малыми перигелийными расстояниями; показано, что эффект Ярковского оказывает заметное влияние на большую полуось орбиты астероида, что приводит к изменениям числа и величин расстояний сближения данных объектов с большими планетами; кроме того, учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению неопределенности в положении астероидов;

– численным моделированием показано, что новый метод предотвращения столкновения, основанный на превентивном разрушении астероида, обеспечивает защиту от падения самого объекта и его осколков.

Научная значимость работы состоит в следующем:

– предложена вероятностная методика исследования структуры возмущений, которая дает возможность проводить детальный анализ влияния различных возмущающих факторов на движение объекта;

– разработан и исследован эффективный метод оценивания вероятности столкновения астероида с Землей;

– изучена динамика группы из 60-ти астероидов с малыми перигелийными расстояниями, выявлены резонансные структуры в орбитальном движении этих объектов, исследована вероятностная орбитальная эволюция 14-ти из них.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

– показана практическая возможность наблюдения на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования Института астрономии РАН (ИНАСАН)

астероидов до 22^m , получены наблюдения объектов с малыми перигелийными расстояниями, которые уменьшили неопределенность в векторе положения рассмотренных объектов;

– разработана численная модель движения астероидов с учетом действующих на них сил и реализована в виде программно-алгоритмического комплекса «ИДА» (Исследование Динамики Астероидов) Комплекс «ИДА» позволяет прогнозировать положение астероида на заданный момент времени, строить вероятностную орбитальную эволюцию, проводить OMEGNO–анализ динамики астероида, исследовать некоторые особенности его движения, такие как тесные сближения, орбитальные и вековые резонансы с планетами, Плутоном и Луной;

– представленные в работе алгоритмы, а также построенное на их основе программное обеспечение могут быть использованы для исследования динамической эволюции широкого класса астероидов;

– приведенные в диссертации результаты численного моделирования показывают применимость и надежность предложенного метода оценивания вероятности столкновения астероида с Землей.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников (244 наименования) и одного приложения, содержит 89 рисунков и 61 таблицу. Общий объем работы составляет 326 страниц.

Во введении дано обоснование актуальности проблемы, сформулированы цель и практическая значимость исследований, приведены положения, выносимые на защиту, список публикаций и данные об апробации работы, описана структура диссертации.

Первая глава является обзорной, в ней описана популяция астероидов, сближающихся с Землей, представлены основные методы исследования их динамики, освещена проблема астероидной опасности.

Вторая глава посвящена методам исследования динамики астероидов, используемых в данной работе. В ней дается описание численной модели

движения малых тел Солнечной системы, рассматриваются уравнения движения и математическая модель возмущающих сил, включающая влияние всех больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты; сжатия Земли, Солнца и Юпитера; релятивистских эффектов от Солнца, планет, Плутона и Луны; эффекта Ярковского и светового давления, описываются возмущающие силы, приведены алгоритмы вычисления их влияния. В главе также излагаются вопросы, связанные с определением оценок начальных параметров орбит, приводится краткий обзор методов построения начального облака неопределенности параметров орбит астероидов. Представлена численно-аналитическая методика выявления орбитальных и вековых резонансов, выписаны 20 апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков, описан метод оценки времени предсказуемости движения с помощью параметра OMEGNO и способ выявления тесных сближений. Отдельное внимание уделено методике исследования структуры возмущений и методу быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с планетами.

В третьей главе представлен программный комплекс ИДА, разработанный автором для изучения движения астероидов. С помощью этого комплекса выполнено большинство исследований в настоящей работе. Программный комплекс состоит из ряда подсистем, которые позволяют решать практически все перечисленные выше задачи динамики астероидов.

Четвертая глава посвящена описанию методов и результатов наблюдений, выполненных на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» ИНАСАН. В течение шести сеансов с 2020 года по 2023 год были проведены наблюдения десяти астероидов с малыми перигелийными расстояниями и девяти астероидов с плохо определёнными орбитами. Кроме того, в первом тестовом сеансе наблюдался астероид (3753) Cruithne, и особое внимание было уделено объектам 2023 BU во время тесного сближения с Землей в январе 2023 года и (65803) Didymos после столкновения космического аппарата DART с его спутником. В процессе наблюдений тестировалось две методики: наблюдения слабых астероидов с движением

телескопа со скоростью движения астероида и поиск объекта на небесной сфере с использованием обзорных эфемерид.

В пятой главе приводятся результаты исследования динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями, в частности описывается структура возмущений, даются оценки нелинейности задачи оценивания начальных параметров. Особое внимание уделяется эффекту Ярковского, который оценивается для всех исследуемых объектов на основе реальных и модельных наблюдений, делается вывод о требуемой точности наблюдений. В данной главе также рассматриваются результаты вероятностной орбитальной эволюции ряда объектов с малыми перигелийными расстояниями, приводится информация о выявленных орбитальных резонансах и оценки влияния светового давления и эффекта Ярковского на резонансные соотношения и аргументы.

В шестой главе описываются результаты тестирования методов быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с Землей, а также представлен метод предотвращения столкновения, основанного на превентивном разрушении астероида, и результаты его тестирования. Метод оценивания вероятности столкновения основан на линейных отображениях облака неопределенности в окрестности целевой орбиты, первым приближением для которой является номинальная орбита, полученная в результате улучшения. Тестирование метода на примере нескольких потенциально опасных астероидов показало, что он дает те же результаты, что и метод Монте-Карло, но за существенно меньшее время. Метод предотвращения столкновения основан на разрушении объекта во время предшествующего тесного сближения. Рассматриваются различные варианты взрыва для выбора оптимального.

В заключении перечислены основные результаты, представленные в диссертационной работе и сделаны соответствующие выводы.

По результатам исследования опубликована 30 статей, из них 17 – в журналах, включенных в международные базы данных научного цитирования

Scopus/Web of Science, кроме того, 32 работы опубликованы в материалах международных конференций

Аннотация правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация Галушиной Т.Ю. «**Исследование орбитальной динамики избранных групп астероидов, сближающихся с Землей**» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, и может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (физико-математические науки).

Научный консультант

д.ф.-м.н., профессор,

Томского

государственного

университета

Бордов

Бордовицына Т.В.

31.05.2024



ДЛЯ УДОСТОВЕРЕНИЯ
ВЕДУЩИЙ ДОКУМЕНТОВЕД
АНДРИЕНКО И.В.

И.В. Андриенко