

На правах рукописи



Галушина Татьяна Юрьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ИЗБРАННЫХ
ГРУПП АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия
(физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ФГАОУ ВО НИ ТГУ).

Научный консультант

БОРДОВИЦЫНА Татьяна Валентиновна

доктор физико-математических наук, профессор, Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ФГАОУ ВО НИ ТГУ), профессор.

Официальные оппоненты:

ДЕВЯТКИН Александр Вячеславович,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ФГБУН ГАО РАН), главный научный сотрудник, и.о. зав. лаборатории.

КУЗНЕЦОВ Эдуард Дмитриевич,

доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАО ВО УрФУ), заведующий кафедрой.

ЧЕРНЕТЕНКО Юлия Андреевна,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ФГБУН ИПА РАН), ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ).

Защита состоится 22 ноября 2024 г. в 12 час. 45 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.021.01 на базе Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГАО РАН (https://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2024/07/Dissertatsia_Galushina.pdf).

Автореферат разослан 21 октября 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.021.01

кандидат физико-математических наук



Осипова А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Астероиды представляют собой наиболее обширный класс объектов Солнечной системы. По данным каталога Э. Боуэлла (Bowell et al., 1994) на 7 сентября 2023 года известно 1303580 астероидов, в том числе 32587 сближающихся с Землей. Орбитальное движение рассматриваемых объектов отличается большой сложностью и разнообразием, что создает определенные трудности в построении алгоритмов численного моделирования их динамики. Кроме того, астероиды могут представлять угрозу деятельности человека на Земле и в космосе.

Усиливающийся в последнее время интерес к исследованию движения малых тел Солнечной системы объясняется рядом причин. Основной из них является осознание того, что представления о динамической эволюции этих объектов необходимы для понимания эволюции Солнечной системы в целом. Такое пристальное внимание специалистов к исследованию эволюции орбит астероидов также обусловлено недавними яркими событиями, например, разрушением прародителя Челябинского метеорита в результате торможения в атмосфере, произошедшего 15 февраля 2013 года (Petrova et al., 2013). В контексте астероидной опасности нельзя не упомянуть астероид (99942) Apophis, тесное сближение с которым ожидается в 2029 году (Виноградова и др., 2008; Кочетова и др., 2009; Шор и др., 2012; Ивашкин и др., 2020; Соколов и др., 2021; Chesley, 2006; Delbo et al., 2007; Giorgini et al., 2008; Thuillot et al., 2015; Farnocchia et al., 2013; Wlodarczyk, 2017; Brozovic et al., 2018; Perez-Hernandez, Benet, 2022).

Особую актуальность исследованиям динамики астероида (3200) Phaethon придает недавнее сближение с Землей в декабре 2017 года (Ye, 2017; Jewitt, 2017), которое поспособствовало уточнению орбиты и физических параметров объекта (Hanuš et al., 2016). На 2024 год запланирована миссия DESTINY+, в рамках которой космический аппарат должен пролететь над данным объектом (Krüger et al., 2019; Masiero et al., 2019).

Моделирование движения играет особую роль в изучении динамических свойств объектов Солнечной системы, а также в защите Земли от потенциально опасных астероидов (ПОА). В частности, необходимо выбрать оптимальную модель возмущающих факторов, влияющих на движение астероида, для исследования эволюции орбиты, прогнозирования тесных сближений и столкновений.

Прогноз реального положения астероида в пространстве всегда основывается на наблюдениях, более того – точность прогнозирования в существенной степени определяется точностью начальных данных, которая зависит от числа имеющихся измерений. По этой причине представляется очень важным регулярный мониторинг малых небесных тел, особенно ПОА.

Исследование эволюции орбит астероидов на большом интервале времени имеет ряд особенностей. Использование аналитических методов проблематично при исследовании движения таких объектов из-за тесных сближений с большими

планетами. Поэтому, как правило, для изучения долговременной орбитальной эволюции малых тел применяются численные методы интегрирования дифференциальных уравнений движения. Многократные сближения с большими планетами, орбитальные и вековые резонансные взаимодействия значительно влияют на динамику исследуемых объектов и способны приводить к проявлению хаотичности в их движении. В этой связи создаваемые численные модели движения астероидов должны иметь в своей структуре алгоритмы выявления хаотичности.

При исследовании ПОА также большое значение имеет возможность быстро оценить вероятность столкновения с Землей и при необходимости предотвратить его. Научные результаты исследования орбитальной эволюции некоторых астероидов с различными особенностями движения могут быть использованы для решения актуальных задач астероидной опасности, а также интересны для различных групп исследователей, открывая новые пути для пилотируемых миссий к астероидам.

В данной работе рассматриваются астероиды, которые вызывают всеобщий интерес мирового научного сообщества, и знание динамики которых позволяет пролить свет на понимание орбитальной эволюции объектов самой обширной фракции малых тел Солнечной системы. Большое внимание уделено астероидам с малыми перигелийными расстояниями ($q \leq 0.15$ а.е.) Особенностью орбит рассматриваемых небесных тел являются большие эксцентриситеты и наклоны, а прохождение рядом с Солнцем накладывает особые требования на модель сил и затрудняет получение новых наблюдений.

Перечисленные факторы позволяют сделать вывод об актуальности задач, результаты исследования которых представлены в настоящей диссертации.

Цели и задачи

Целью работы является выявление и изучение особенностей орбитальной динамики избранных групп астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). В данной работе рассматриваются особенности динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями, а также изучается динамика ПОА на предмет оперативного определения вероятности столкновения и превентивного воздействия на астероид с целью предотвращения столкновения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана и протестирована на реальных наблюдениях 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 орбитальную 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 аргументы;

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

- 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

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 эффект 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 улучшение 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; эффект Ярковского оказывает заметное влияние на неустойчивые резонансные соотношения;

- исследована вероятностная орбитальная эволюция 14 астероидов с малыми перигелийными расстояниями; показано, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на большую полуось орбит астероидов, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений; кроме того, учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению неопределенности положения астероидов;

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

Научная и практическая значимость работы

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 необходимых действующих на них сил и реализована в виде программно-алгоритмического комплекса «ИДА» (Исследование Динамики Астероидов) (Galushina et al., 2019). Комплекс «ИДА» позволяет прогнозировать движение астероида на заданный момент времени, строить вероятностную орбитальную эволюцию, проводить OMEGNO-анализ (Orthogonal Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbit) (Шефер, Коксин, 2013) 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 надежную применимость методов оценивания вероятности столкновения астероида с Землей и его предотвращения.

Методология и методы исследования

Методология исследования динамики астероидов основана на законах небесной механики и решении соответствующих дифференциальных уравнений движения. При исследовании орбитальной эволюции АСЗ численное интегрирование уравнений движения небесных объектов осуществляется эффективными методами Гаусса-Эверхарта (Авдюшев, 2010) и Lobbie (Авдюшев, 2022). Выбор сил, которые необходимо учитывать при численном моделировании, выполняется с помощью методики, предложенной в (Galushina et al., 2015), которая основана на оценке начальной неопределенности и эволюции номинальной орбиты. Определение начальных параметров орбиты (в том числе параметра эффекта Ярковского) производится в рамках метода наименьших квадратов (МНК), для обращения матриц используется метод сингулярного разложения SVD (Singular Value Decomposition). При построении

начального облака неопределенностей для получения коэффициентов нелинейности применяется метод, предложенный Черницовым А.М. (Черницов и др., 2006). В случае сильной и средней нелинейности используется метод возмущенных наблюдений (Авдюшев, 2009), а при слабой нелинейности облако неопределенности представляется в виде эллипсоида в шестимерном пространстве координат и компонент скорости.

Выявление и исследование орбитальных резонансов в движении АСЗ осуществляется на основе численного анализа поведения резонансных характеристик: критического (резонансного) аргумента (Мюррей, Дермотт, 2009), определяющего долготу соединения астероида и планеты, и его производной по времени, называемой резонансной «щелью» (Гребеников, Рябов, 1978). Для исследования регулярности или хаотичности движения в окрестности границ резонансных областей нами используется индикатор OMEGNO. Выявление сближений астероида с планетами производится путем интерполяции квадратов расстояний до планеты, полученных в процессе численного интегрирования (Шефер, 1986).

Для оценки вероятности столкновения астероида с Землей используется традиционный метод численного интегрирования уравнений движения тестовых частиц и реализованный в данной работе метод, основанный на линейных отображениях. Для предотвращения столкновения предлагается метод на основе превентивного разрушения во время предыдущего тесного сближения.

Наблюдения астероидов на телескопе Zeiss-2000 выполняются в двух режимах в зависимости от звездной величины и скорости астероида: с часовым ведением и с движением телескопа со скоростью смещения астероида по небесной сфере. Для калибровки снимков используется программа MaximDL (<https://diffractionlimited.com/help/maximdl/MaxIm-DL.htm>), обработка снимков осуществляется в программных пакетах IzmCCD (Измайлов и др., 2010), Astrometrica (<http://www.astrometrica.at/>) и Апекс-II (Девяткин и др., 2010).

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на семинарах Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Института прикладной астрономии Российской академии наук, Института астрономии Российской академии наук, кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета, Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук, а также на 40 научных конференциях: «Актуальные проблемы российской космонавтики» (Москва, 2007), 36-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2007), Международная конференция «Астрономия и астрофизика начала XXI века» (Москва, 2008), 41-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2012), Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково–2012» (Санкт-Петербург, 2012), 42-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2013), Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 135-летию Томского

государственного университета и 65-летию механико-математического факультета (Томск, 2013), Международная научная конференция «Околоземная астрономия–2013» (Краснодар, 2013), 43-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2014), V Пулковская молодежная астрономическая конференция (Санкт-Петербург, 2014), «Asteroids, Comets, Meteors» (Хельсинки, Финляндия, 2014), III научно-практическая конференция молодых специалистов ОАО «ИСС» «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» (Железногорск, 2014), «JOURNEES 2014. Systemes de reference spatio-temporels. Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry» (Санкт-Петербург, 2014), 44-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2015), III международная конференция «Метеориты, астероиды, кометы» (Челябинск, 2015), IX Международная конференция «Околоземная астрономия» (Терскол, 2015), Международная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2015), 45-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2016), IX всероссийская научная конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2016), Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2016), конференция «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» (Железногорск, 2017), X международная конференция «Околоземная астрономия» (Краснодар, 2017). 47-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2018), Расширенный научный семинар «Управление движением естественных небесных тел» (Таруса, 2018), Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2018), XI Международная научная конференция «Околоземная астрономия и космическое наследие» (Казань, 2019), 49-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2020), The Eleventh Moscow Solar System Symposium (Moscow, 2020), Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2019), X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020» (Томск, 2020), Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой «Астрономия и исследование космического пространства» (Екатеринбург, 2021), XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства (Москва, 2021), Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований» (Москва, 2021), The Twelfth Moscow Solar System Symposium 12M-S3 (Москва, 2021), Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и

молодых ученых «Астрономия и исследование космического пространства» (Екатеринбург, 2022), Научно-практическая конференция с международным участием «Околоземная астрономия – 2022» (Москва, 2022), The Thirteenth Moscow Solar System Symposium 13M-S3 (Москва, 2022), XII Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвящённая 55-летию НИИ ПММ ТГУ и 145-летию Томского государственного университета (Томск, 2023), International Conference «Non-Stable Phenomena in the Universe» dedicated to the 115th anniversary of V.A. Ambartsumian (Бюракан, Армения, 2023), The Fourteenth Moscow Solar System Symposium 14M-S3 (Москва, 2023).

Исследования проведены при поддержке 6 НИР: грант фонда им. Д.И. Менделеева № 8.1.54.2015–16 «Исследование динамики малых космических объектов, представляющих опасность для Земли и деятельности Человека в космосе», грант фонда им. Д.И. Менделеева № 8.1.28.2017 «Исследование динамики малых объектов Солнечной системы в условиях сложного наложения резонансов различной природы», грант фонда им. Д.И. Менделеева № 8.1.14.2018 «Исследование актуальных проблем динамики малых объектов Солнечной системы, связанных с реализацией существующих и планируемых космических миссий», грант РНФ №19-72-10022 «Исследование сложных задач динамики околоземных объектов методами компьютерного моделирования и машинного анализа данных» 2019–2024 гг., государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWM-2020-0049 по теме «Численное моделирование движения малых тел Солнечной системы на основе позиционных наблюдений» 2020–2023 гг., государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWM-2024-0005 по теме «Исследование структуры и динамики околоземных популяций малых тел Солнечной системы на основе наблюдений» 2024–2026 гг.

Личный вклад автора

По результатам исследования опубликовано 30 работ. Из них 18 статей в журналах, включенных в международные базы данных научного цитирования Scopus/Web of Science. Соискателем самостоятельно определены цель и задачи исследования. Во всех исследованиях соискатель принимал непосредственное участие в постановке задачи и анализе полученных результатов, соискателем лично получена значительная часть результатов по численному моделированию динамики астероидов. Кроме того, соискателю принадлежит существенный вклад в разработку программного обеспечения и проведение наблюдений. Научный консультант соискателя Бордовицына Т.В. принимала участие в постановке задачи и обсуждении результатов. Соавторы соискателя в основном внесли свой вклад в получение результатов численного моделирования динамики астероидов.

В совместных работах с В.А. Авдюшевым последнему принадлежит идея метода быстрого численного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой и разработка интегратора. В работе с Г.О. Рябовой последней

принадлежат оценки влияния эффекта Ярковского и реактивного эффекта на динамику астероида (3200) Phaethon. В работах со П.В. Скрипниченко последний участвовал в проведении и обработке наблюдений и выполнении численных расчетов. В работах с А.Г. Александровой, А.Б. Прищепенко, К.В. Холшевниковым и В.М. Чечеткиным соискателю принадлежит оценка вероятности выпадения осколков астероида на Землю. В работе с Г.Е. Самбаровым последний участвовал в разработке программного модуля для вычисления вековых резонансов, в численных расчетах и обсуждении результатов. В совместных работах с Л.Е. Быковой последняя принимала участие в постановке задачи и обсуждении результатов. В совместных работах с О.Н. Летнер последняя принимала участие в постановке задачи, обсуждении результатов и выполнении численного моделирования движения астероидов. В совместных работах с А.П. Батуриным последнему принадлежит программно-алгоритмическая реализация некоторых модулей. В работах с О.М. Сюсиной последняя принимала участие в численном моделировании движения астероидов и обсуждении полученных результатов. В совместных работах с Е.Н. Нигановой, С.А. Гурьяновым, А.А. Шагабутдиновым, Д.Л. Басхаевым последние принимали участие в получении численных результатов. В совместных работах с Г.Т. Кайзер, П.А. Левкиной и Шеиным А.В. последним принадлежит получение наблюдений. В работе с Баканас Е.С. последняя принимала участие в обработке наблюдений.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработанная методика исследования структуры возмущений позволила оценить, что на динамику астероидов с малыми перигелийными расстояниями помимо больших планет оказывают значительное влияние релятивистские эффекты от Солнца, эффект Ярковского и сжатие Солнца; при текущем уровне точности возмущениями от светового давления, Плутона, релятивистскими эффектами от других тел Солнечной системы можно пренебречь.

2. Изучение резонансной динамики показало, что среди 60-ти астероидов с малыми перигелийными расстояниями 33 движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно; 16 соизмеримостей из 50-ти являются устойчивыми; эффект Ярковского оказывает заметное влияние на неустойчивые резонансные соотношения.

3. Исследования вероятностной орбитальной эволюции астероидов с малыми перигелийными расстояниями продемонстрировали, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на вероятностное значение большой полуоси орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений; кроме того, в большинстве случаев его учет приводит к уменьшению неопределенности в векторе положения астероидов.

4. Оценки на основе реальных и модельных наблюдений показали, что для астероидов с хорошо определенной орбитой точность определения параметра эффекта Ярковского практически линейно зависит от интервала наблюдений,

причем для каждого астероида есть предельный мерный интервал, при достижении которого точность определения параметра перестает улучшаться без увеличения точности наблюдений.

5. Разработан метод быстрого оценивания вероятности столкновения, который дает тот же результат, что и численное интегрирование орбит тестовых частиц, но требует на порядки меньших временных затрат.

6. Модельная оценка последствий превентивного разрушения астероида демонстрирует, что предложенный метод предотвращения столкновения обеспечивает защиту от падения на Землю самого объекта и его осколков.

7. Созданное программно-алгоритмическое обеспечение дает возможность проводить детальное исследование динамики астероидов, сближающихся с Землей.

8. Разработанная и опробованная на реальных наблюдениях методика построения обзорных эфемерид показала высокую эффективность при работе с астероидами с плохо определенными орбитами.

Структура и объем диссертации

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 АСЗ, представлены основные методы исследования их динамики, освещена проблема астероидной опасности.

Раздел 1.1 посвящен обзору популяции АСЗ, к которой относят астероиды, перигелийное расстояние q которых не превышает 1.3 а.е. (Шустов и др., 2010). Проблема астероидной опасности описывается в разделе 1.2 и ее решение можно условно разделить на три этапа: выявление, каталогизация и наблюдения потенциально опасных для Земли астероидов; исследование движения известных объектов и оценка вероятности столкновения; предотвращение столкновения в случае необходимости. В разделе 1.3 рассматриваются основные методы, используемые на разных этапах исследования, обсуждаются их достоинства и встречающиеся проблемы.

Вторая глава посвящена методам исследования динамики астероидов, используемых в данной работе. Раздел 2.1 содержит вводные замечания.

В разделе 2.2 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 разделе 2.3 кратко представлены методы интегрирования Гаусса-Эверхарта (Авдюшев, 2010) и Lobbie (Авдюшев, 2022), которые являются модификацией метода Эверхарта (Everhart, 1974). Для подтверждения эффективности используемых интеграторов приведены диаграммы «точность–быстродействия» для рассматриваемых методов и популярного метода Грэгга-Булиша-Штера (Авдюшев, 2015).

В разделе 2.4 описываются используемые способы построения начального облака неопределенности в линейном и нелинейном случаях, которые разделяются на основании значения коэффициента нелинейности, предложенного в работе (Черницов и др., 2006). В линейном случае начальное облако неопределенности представляется в виде эллипсоида в шестимерном пространстве координат и компонент скорости. Для нелинейных случаев в данной работе использовался метод возмущенных наблюдений (Авдюшев, 2009), который состоит во внесении малых «возмущений» в наблюдения астероида и последующем многократном решении задачи наименьших квадратов. Как в линейной, так и в нелинейной постановке облако неопределенности задается в виде точек, плотно заполняющих всю область. Параметр эффекта Ярковского определяется путем включения его в число оцениваемых параметров.

Раздел 2.5 содержит описание алгоритма выявления тесных сближений астероида с планетами. В разделе 2.6 представлена численно-аналитическая методика выявления орбитальных и вековых резонансов, в частности введены такие резонансные характеристики, как критический (резонансный) аргумент β (Мюррей, Дермотт, 2009) и резонансная щель α (Гребеников, Рябов, 1978) и выписаны 20 апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков (Александрова и др., 2014). В разделе 2.7 приводятся формулы для вычисления параметров хаотичности MEGNO (Cincotta, Simo, 2000) и OMEGNO (Шефер, Коксин, 2016).

Раздел 2.8 содержит описание методики исследования структуры возмущений, которая основана на оценке не только номинальной орбиты, но и размеров начальной доверительной области. Методика включает в себя пять различных методов (Galushina et al., 2015) (в скобках приведены условные ключевые слова, которыми в дальнейшем для удобства будем обозначать методы):

1) на интервале наблюдений, полученных с сайта MPC, определяется момент среднего арифметического моментов наблюдений. На этот момент производится процедура улучшения элементов орбит с использованием полной модели сил. Далее рассчитывается орбитальная эволюция с варьированием модели (с попеременным отключением возмущающих факторов), в качестве исследуемого параметра используется разность векторов положений при полной модели и без учета исследуемого фактора Δr_1 («эволюция без улучшения»);

2) как и в предыдущем методе определяется момент времени, но процедура улучшения орбит производится с отключением одного из возмущающих

факторов. Расчет орбитальной эволюции производится при той же модели, что и при улучшении орбит, анализируется разность векторов положений при полной модели и без учета какого-либо возмущающего фактора Δr_2 («эволюция с улучшением»);

3) определяются максимальные значения мгновенного ускорения, создаваемые различными возмущающими факторами $\eta = |\ddot{\mathbf{x}}|_{\max}$ («ускорение»);

4) вычисляются среднеквадратические ошибки (О–С) при улучшении с полной моделью σ_0 и с отключением какого-либо возмущающего фактора σ . Значение $\psi = \sigma^2 / \sigma_0^2$ для каждого возмущающего фактора сравнивается с критическим значением

$$\psi_{\text{крит}} = \frac{\chi_{N-K}^2}{N-K}, \quad (1)$$

где χ_{N-K}^2 – распределение Пирсона для ряда наблюдений, N и K – число наблюдений и оцениваемых параметров соответственно («сигма»);

5) градация набора возмущающих факторов осуществляется по взаимному расположению и размерам областей начальной неопределенности, полученных при полной модели F и с отключением исследуемого фактора F^* . Вычисляется значение

$$\varepsilon = |\hat{\mathbf{q}}^* - \hat{\mathbf{q}}| / |\bar{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}|, \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{q}}^*$ и $\hat{\mathbf{q}}$ – оцениваемые орбитальные параметры $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_M)$, определенные методом наименьших квадратов с использованием моделей сил F^* и F соответственно; $\bar{\mathbf{q}}$ – значение, лежащее в пространстве параметров вдоль направления $(\hat{\mathbf{q}}^* - \hat{\mathbf{q}})$ на границе области неопределенности Φ_F (Сюсина и др., 2013) («область»).

В разделе 2.9 описывается численный метод быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с планетой (Авдюшев, Галушина, 2014). Метод основан на линейных отображениях начального облака виртуальных астероидов относительно столкновительной орбиты на моменты ожидаемого сближения астероида с планетой и регистрировании столкновений виртуальных объектов с массивным телом. Можно рекомендовать следующий алгоритм для программной реализации метода.

1. В пространстве орбитальных параметров статистическим методом формируем облако неопределенности.

2. Используя орбитальные параметры целевой орбиты (вначале в качестве нее выступает номинальная, полученная из наблюдений), выполняем численное интегрирование дифференциальных уравнений движения астероида совместно с дифференциальными уравнениями в вариациях до тех пор, пока вычисляемое положение объекта не достигнет минимального планетоцентрического расстояния.

3. Пользуясь матрицей перехода, отображаем линейно облако неопределенности на конечный момент интегрирования.

4. Из отображенных виртуальных положений объекта находим наиболее близкое к центру планеты.

5. Для задания целевой орбиты из начального облака неопределенности выбираем виртуальное динамическое состояние астероида, соответствующее минимальному планетоцентрическому расстоянию.

6. Если целевая орбита изменилась, возвращаемся к п. 2., иначе анализируем распределение перицентрических расстояний астероида и определяем количество столкновительных орбит.

7. Вычисляем вероятность столкновения астероида с планетой как отношение числа столкновительных орбит к общему числу виртуальных.

В третьей главе представляется программный комплекс ИДА, разработанный для изучения движения астероидов, с помощью которого выполнено большинство исследований в настоящей работе. Раздел 3.1 содержит обзор стороннего программного обеспечения для исследования динамики астероидов, таких как: онлайн система HORIZONS (JPL NASA), система EPOS (ГАО РАН), многоцелевой программный пакет AMPLE (ИПА РАН)

В разделе 3.2 перечислены задачи, решаемые программной системой ИДА: построение численной модели движения астероида с учетом заданных возмущающих факторов; улучшение орбиты астероида по данным позиционных наблюдений, исследование структуры возмущений; построение начального облака неопределенности линейными и нелинейными методами; исследование орбитальной эволюции начального облака неопределенности; выявление сближений и столкновений исследуемого астероида с большими планетами, Луной и Плутоном; оценка вероятности столкновения астероида с большими планетами и Луной; выявление соизмеримостей средних движений астероида и больших планет; выявление и исследование вековых резонансов; исследование хаотичности и оценка времени предсказуемости движения с помощью параметра OMEGNO; демонстрация движения астероида и планет на экране компьютера в различных системах координат.

Раздел 3.3 содержит перечень подсистем программного комплекса: подсистема «Асоль», которая позволяет исследовать орбитальную эволюцию номинальной орбиты и демонстрировать движение астероида и тестовых частиц на экране компьютера; подсистема «Наблюдения», предназначенная для улучшения орбиты астероида по данным позиционных наблюдений и построения начального облака неопределенности нелинейными методами; подсистема «Distribution», созданная для визуализации распределения наблюдений по орбите астероида; подсистема «Ансамбль частиц», которая позволяет получить начальное облако неопределенности в виде ансамбля тестовых частиц; подсистема «Evolution», созданная для исследования орбитальной эволюции ансамбля частиц; подсистема «OMEGNO», предназначенная для исследования хаотичности движения и оценки времени его предсказуемости; подсистема «Covar_coll», разработанная для оценки вероятности столкновения линейным методом. Подробное описание подсистем приведено в разделах 3.4 – 3.13.

Четвертая глава посвящена описанию результатов наблюдений, выполненных на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» ИНАСАН.

Раздел 4.1 содержит описание методики проведения позиционных наблюдений астероидов. В разделе 4.2 предложена методика расчета поисковых (обзорных) эфемерид астероидов (Быкова и др., 2007а) для тех случаев, когда не удастся обнаружить объект по расчетной эфемериде, даваемой на основе некоторой номинальной орбиты. Алгоритм расчета поисковой эфемериды астероида на основе области неопределенности его положения включает в себя решение следующих задач: построение численной модели движения астероида; построение начального облака неопределенности астероида по результатам наблюдений; построение облака неопределенности на момент наблюдения; проецирование облака на небесную сферу.

Раздел 4.3 содержит статистику проведенных наблюдений. В течение шести сеансов с 2020 года по 2023 год были проведены наблюдения десяти астероидов с малыми перигелийными расстояниями ((374158) 2004 UL, (137924) 2000 BD19, 1995 CR, 2008 MG1, (276033) 2002 AJ129, (289227) 2004 XY60, (3200) Phaethon, (386454) 2008 XM, (399457) 2002 PD43, (425755) 2011 CP4) и девяти астероидов с плохо определёнными орбитами (2020 PC5, 2020 PF7, 2020 PR3, 2020 QK6, 2014 WB363, 2003 MW7, 2014 BQ8, 2014 NV63, 2022 SG9). 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 разделах 4.4 – 4.7 представляются результаты наблюдений, выполненных в 2020–2023 годах, соответственно. 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 качестве примера на рисунке 1 показано облако неопределенности астероида 2022 SG9 на небесной сфере на момент первого наблюдения на Терскольской обсерватории. Облако представлено в виде 1000 тестовых частиц, черной точкой показано положение номинальной частицы, звездочкой – реально наблюдаемое положение астероида. Экваториальные координаты α и δ даны в минутах, причем нулевое значение соответствует $\alpha = 23^h$ и $\delta = 82^\circ$. Облако занимает почти все поле зрения телескопа, наблюденное положение не совпадает с номинальным, но находится внутри облака.

Благодаря терскольским наблюдениям удалось увеличить мерный интервал больше чем на месяц и существенно уменьшить область неопределенности. Результаты улучшения орбиты по разному набору наблюдений приведены в таблице 1. Здесь N , ΔT – число и интервал наблюдений, σ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений, $\sigma(x_0)$ и $\sigma(v_0)$ – среднеквадратическая ошибка координат и компонент скорости соответственно, V_e – объем доверительного эллипсоида в шестимерном пространстве координат и компонент скорости. Из таблицы 1 видно, что использование полученных нами

наблюдений в 14 раз увеличило мерный интервал, на 2 порядка уменьшило неопределенность в координатах и компонентах скорости и на 17 порядков уменьшило размер доверительного эллипсоида.

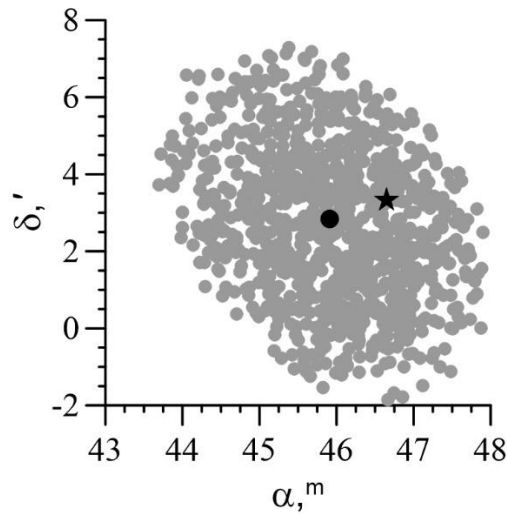


Рисунок 1 — Облако неопределенности на небесной сфере астероида 2022 SG9 на момент наблюдений 25 октября 2022 года

Таблица 1 — Результаты улучшения орбиты астероида 2022 SG9 по наблюдениям 2022-го года

N	ΔT , сут.	σ , ''	$\sigma(\mathbf{x}_0)$, а.е.	$\sigma(\mathbf{v}_0)$, а.е./сут.	V_e , а.е. ⁶ /сут. ³
19	3.34	0.17	$5.02 \cdot 10^{-3}$	$6.00 \cdot 10^{-5}$	$1.14 \cdot 10^{-33}$
45	43.00	0.33	$5.60 \cdot 10^{-5}$	$6.30 \cdot 10^{-7}$	$2.16 \cdot 10^{-40}$

Проведенные наблюдения, их анализ и обработка позволяют сделать следующие выводы:

1. При тщательном подборе режима работы телескопа и параметров съемки на Zeiss-2000 возможно наблюдение астероидов до 22^м, а также при прохождении ими тесного сближения с Землей.

2. Обзорные эфемериды облегчают поиск астероида на небесной сфере, однако в большинстве случаев они случайно попадают в поле зрения обзоров.

3. Полученные нами наблюдения соответствуют мировому уровню и способствуют уменьшению области неопределенности изучаемых астероидов.

В пятой главе приводятся результаты исследования динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями. Раздел 5.1 содержит общие сведения о популяции астероидов с малыми перигелийными расстояниями. В данной работе под астероидами с малыми перигелийными расстояниями понимаются объекты с $q \leq 0.15$ а.е. Согласно каталогу Э. Боуэлла на май 2023 года насчитывается 61 такой объект. Ближе всего к Солнцу среди всех известных

астероидов подходит 2005 HC4 ($q = 0.071$ а.е.). Особыми свойствами большинства астероидов данной группы являются большие эксцентриситеты их орбит (от 0.71 до 0.97) и принадлежность к сферической подсистеме Солнечной системы – 77% (47 астероидов) объектов имеют наклонения больше 8° .

В разделе 5.2 демонстрируются результаты исследования структуры возмущений с помощью методики, описанной в разделе 2.8. Результаты показали, что для части астероидов с плохо определенной орбитой четвертый и пятый метод не позволяют осуществить классификацию возмущающих факторов на сильные и слабые. Эта проблема обусловлена большим размером начального облака неопределенности и может быть решена только с появлением новых наблюдений. К данному подклассу относятся следующие астероиды: 2004 QX2, 2005 HC4, 2008 FF5, 2011 BT59, 2013 HK11, 2013 JA36, 2015 EV, 2015 HG, 2015 KO120, 2016 GU2, 2017 MM7, 2017 SK10, 2017 TC1, 2018 GG5, 2019 JZ6, 2019 UJ12, 2019 VE3, 2019 YV2, 2020 BU13, 2020 DD, 2020 GB2, 2020 HE, 2020 HY2, 2020 TS2, 2020 VL4, 2021 AF3, 2021 LM1, 2022 JX, 2022 XK1, 2022 YE4, 2023 CF, 2023 FS5, 2023 HJ7. Для перечисленных объектов в настоящий момент невозможно дать точную рекомендацию об использовании той или иной модели сил, поэтому, по-видимому, лучшим выходом будет использовать ту же модель, что и для остальных астероидов с малыми перигелийными расстояниями. Орбиты остальных астероидов ((3200) Phaethon, (137924) 2000 BD19, (276033) 2002 AJ129, (289227) 2004 XY60, (374158) 2004 UL, (386454) 2008 XM, (394130) 2006 HY51, (394392) 2007 EP88, (399457) 2002 PD43, (425755) 2011 CP4, (431760) 2008 HE, (465402) 2008 HW1, (504181) 2006 TC, 1995 CR, 2000 LK, 2007 GT3, 2007 PR10, 2008 MG1, 2010 JG87, 2011 KE, 2011 XA3, 2012 US68, 2013 YC, 2015 DU180, 2017 AF5, 2019 AM13, 2021 PH27, 2022 HB4) хорошо определены и использование пяти методов позволяет классифицировать возмущения на сильные и слабые. Проведенное исследование показало, что оптимальная модель сил для большинства изучаемых объектов включает учет влияния больших планет и Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. В некоторых случаях для повышения точности прогноза также желателен учет влияния крупных астероидов, а при очень тесных сближениях с Землей может потребоваться учет ее сжатия.

Оценки влияния светового давления на динамику астероидов с хорошо определенными физическими параметрами показали, что оно оказывает слабое влияние на начальное положение астероида, его влияние на эволюцию также незначительно. В большинстве случаев это возмущение меньше, чем сжатие Солнца и релятивистские эффекты от Солнца.

Особое внимание уделяется эффекту Ярковского, который оценивается для всех исследуемых объектов на основе реальных и модельных наблюдений, делается вывод о требуемой точности наблюдений. Эффект Ярковского оказывает существенное влияние как на начальное облако неопределенности, так и на движение большинства рассматриваемых объектов, в некоторых случаях даже большее, чем влияние релятивистских эффектов от Солнца. Причем

в отличие от светового давления, данный возмущающий фактор влияет не только в окрестности Солнца, что явно демонстрируют первые два метода.

В разделе 5.3 подробно рассмотрен эффект Ярковского в движении астероидов с малыми перигелийными расстояниями, в том числе поставлен и исследован вопрос влияния интервала и точности наблюдений на ошибку определения параметра эффекта Ярковского A_2 . Для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями на основе имеющихся на момент исследования наблюдений получены значения параметра A_2 и его среднеквадратические ошибки. Изучаемые астероиды можно условно поделить на две группы – астероиды с плохо определенной орбитой и интервалом наблюдений меньше 100 суток и объекты с интервалом наблюдения больше 1000 суток. С увеличением наблюдательного интервала точность определяемого параметра эффекта Ярковского значительно улучшается. С наилучшей точностью параметр A_2 определен для астероидов 1995 CR и (3200) Phaethon.

Для двух астероидов, (3200) Phaethon и (137924) 2000 BD19, наблюдавшихся на интервале 13622 и 7666 суток соответственно проведен эксперимент по уменьшению числа реальных наблюдений в 13 этапов от настоящего времени в прошлое. На каждом этапе получены значения параметра A_2 и его среднеквадратические ошибки. Результаты показаны на рисунке 2, где ΔT – мерный интервал, δA_2 – неопределенность значения параметра эффекта Ярковского. Уменьшение интервала и числа наблюдений приводит к потере точности определяемого параметра. Для обоих астероидов последние несколько групп наблюдений (появлений) практически не оказывают влияния на значение среднеквадратической ошибки A_2 . Моделирование наблюдений для астероида (3200) Phaethon на основе реальных с уменьшенной в 10 и 100 раз среднеквадратической ошибкой их представления привело к улучшению точности параметра эффекта Ярковского пропорционально порядку изменения σ . При этом само значение A_2 незначительно отличается для модельных и реальных наблюдений.

На примере астероидов 2008 MG1 и 2020 BU13 проведен эксперимент по увеличению мерного интервала путем использования модельных наблюдений. Данное исследование подтвердило, что увеличение интервала приводит к уменьшению неопределенности параметра A_2 .

В разделе 5.4 представлены результаты определения степени нелинейности задачи оценивания начальных параметров астероидов с малыми перигелийными расстояниями по состоянию на сентябрь 2021 года, когда было известно 53 таких объекта. Нелинейность оценивалась с помощью показателя χ , описанного в работе (Черницов и др., 2006). Задача оценивания начальных параметров астероидов была классифицирована следующим образом. Для 2015 KO120 задача является сильно нелинейной, для 6 объектов (2013 НК11, 2015 EV, 2020 НУ2, 2019 VE3, 2011 ВТ59 и 2020 HE) – умеренно, и для остальных 46 – слабо нелинейной.

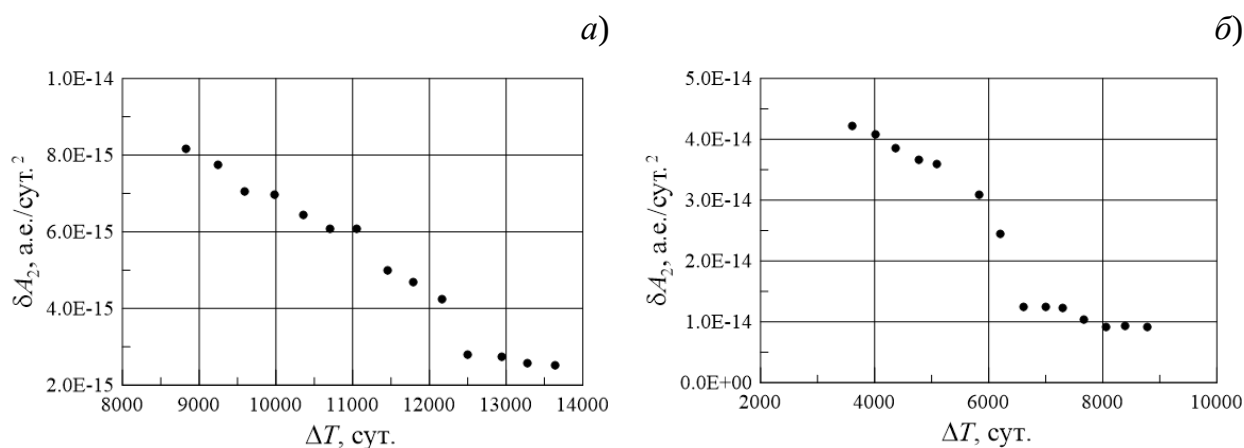


Рисунок 2 — Зависимость среднеквадратической ошибки параметра эффекта Ярковского δA_2 от мерного интервала ΔT реальных наблюдений для астероидов (3200) Phaethon (а) и (137924) 2000 BD19 (б)

Раздел 5.5 содержит результаты исследование динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями в окрестностях орбитальных и вековых резонансов. Были выявлены 33 астероида с малыми перигелийными расстояниями, которые движутся в окрестности орбитальных резонансов низких порядков с большими планетами. На основе полученных ранее значений параметра эффекта Ярковского (ЭЯ) оценено его влияние на резонансные характеристики: резонансную щель и критический аргумент. Для части астероидов вследствие скудного состава наблюдений значения параметра завышены, что приводит к катастрофическому влиянию эффекта – полному разрушению резонанса и даже падению на Солнце. Естественно, что данные результаты недостоверны и являются следствием плохо определенной орбиты. Остальные астероиды с адекватно определенным значением параметра Ярковского можно поделить на два класса: движущиеся в устойчивом и неустойчивом резонансе с планетами. Причем для части объектов устойчивый резонанс с Юпитером сопровождается неустойчивым с Землей. Результаты исследования орбитальной эволюции показали, что влияние эффекта Ярковского на устойчивые резонансные соотношения незначительно: он может несущественно менять амплитуду либрации, но не приводит к разрушению резонанса. В случае же неустойчивого резонанса изменяется число проходов через точную соизмеримость, а для некоторых объектов даже резонанс становится более устойчивым.

Что касается светового давления (СД), то среди 33 объектов этого класса, которые движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно, под рассмотрение попали всего три астероида ((3200) Phaethon, (394130) 2006 HY51, (137924) 2000 BD19), так как только для них с хорошей точностью известны физические параметры, позволяющие адекватно оценить влияние светового давления на их движение. Для этих астероидов была построена орбитальная эволюция с тремя моделями сил: с основной моделью без включения негравитационных возмущений от ЭЯ и СД и с добавлением в основную модель одного из факторов. Путем сравнения

результатов эволюции номинальных орбит астероидов с основной моделью и с включенным возмущением оценивалось влияние СД и ЭЯ на их динамику. Выявлены сближения астероидов с большими планетами и получены оценки времени предсказуемости их движения с помощью параметра хаотичности OMEGNO. Помимо характеристик орбитального резонанса построена и проанализирована эволюция характеристик вековых резонансов с планетами.

Среди рассмотренных астероидов два ((137924) 2000 BD19 и (3200) Phaethon) движутся в окрестности орбитальных резонансов с Венерой с разной соизмеримостью средних движений астероида и планеты. Астероид (137924) 2000 BD19 находится в устойчивом резонансе $3/4$ с Венерой. На рисунке 3 представлены графики эволюции характеристик орбитального резонанса $3/4$ с Венерой α (рисунки 5.20a1–a3) и β (рисунки 5.20b1–b3). Нумерация графиков отвечает за использование одной из моделей сил при исследовании и обозначает следующее: 1 – основная модель; 2 – основная модель с включенным возмущением от СД; 3 – основная модель с включенным возмущением от ЭЯ.

Из рисунка 3 видно, что световое давление влияет меньше на эволюцию резонансных характеристик, чем эффект Ярковского. С учетом ЭЯ изменение большой полуоси приводит к изменению поведения резонансных характеристик α и β : при интегрировании в прошлое уменьшается амплитуда колебаний α и β , а при интегрировании в будущее в конце интервала либрация аргумента переходит в циркуляцию, а α начинает колебаться по одну сторону от точной соизмеримости. Без учета эффекта Ярковского переход к циркуляции вызывает сомнение и скорее характеризует неустойчивость резонанса на этом промежутке времени.

Астероид (3200) Phaethon движется в окрестности резонанса $3/7$ с планетой, но на интервале исследования испытывает всего несколько проходов через точный резонанс. Астероид (394130) 2006 HY51 движется в окрестности резонансной области $7/1$ с Сатурном, но, скорее всего, не захвачен в резонанс, так как резонансная щель колеблется с небольшой амплитудой, периодически проходя через точную соизмеримость, но центр ее либрации смещен относительно нулевого значения, а критический аргумент медленно циркулирует.

Исследование с разными моделями сил показало, что учет светового давления и эффекта Ярковского практически не оказывает влияния на эволюцию орбитальных элементов астероидов, изменяя поведение большой полуоси лишь на концах интервала интегрирования. Вследствие такого влияния возмущений изменяются количество сближений астероидов с большими планетами и расстояние до них. Причем световое давление влияет заметно меньше, нежели эффект Ярковского. Эволюция параметра OMEGNO с учетом одного из факторов показала, что данные возмущения не влияют на интервал предсказуемости движения, но в некоторых случаях учет одного из возмущений приводит к замедлению или же к ускорению роста параметра вследствие изменения числа сближений и расстояния до планет.

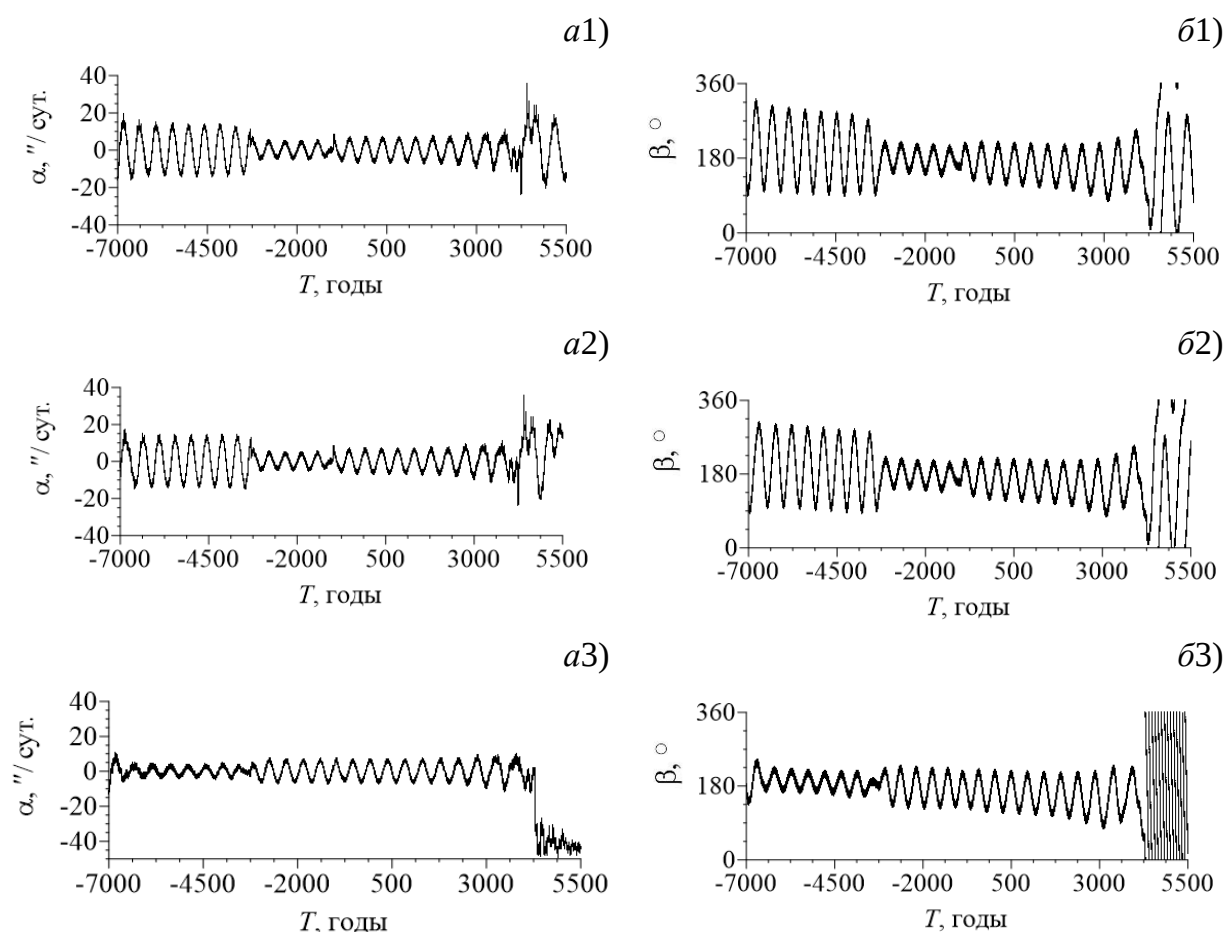


Рисунок 3 — Эволюция резонансной щели α (a1, a2, a3) и критического аргумента β (б1, б2, б3) для резонанса 3/4 (137924) 2000 BD19 с Венерой с основной моделью сил (1), с учетом светового давления (2) и с учетом эффекта Ярковского (3)

Что касается оценки влияния эффекта Ярковского и светового давления на характеристики вековых (апсидально-нодальных) резонансов, изменений в поведении этих характеристик не было отмечено, так как исследуемые возмущающие факторы не оказывают существенного влияния на эволюцию элементов орбит, лежащих в основе вычисления этих характеристик (долгота восходящего узла Ω и аргумент перигелия ω).

В разделе 5.6 приводятся результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции 14 астероидов с малыми перигелийными расстояниями. В ходе исследования решались задачи оценки влияния различных факторов на динамику изучаемых объектов. Задача построения вероятностной орбитальной эволюции астероидов включала в себя два основных этапа: построение облака вероятных значений начальных параметров и отображение полученного облака неопределенности во времени. В зависимости от степени нелинейности задачи оценивания целесообразно выбирать способ построения начального облака: классический линейный или нелинейный метод. Исследование нелинейности задачи для выбранных астероидов привели к выводу, что для пяти из них (2013 НК11, 2015 EV, 2019 VE3, 2022 JX, 2020 HE) нелинейность оценивается как умеренная, а для 2015 KO120 как сильно нелинейная, и для этого объекта

является целесообразным построение начальной области не только классическим линейным, но и нелинейным методом для проведения сравнительного анализа. Для астероидов 2017 TC₁, 2007 GT₃ и 2015 HG нелинейность задачи слабая, для них достаточно применения классического линейного метода.

Сравнительный анализ поведения частиц из разных областей показал, что для астероида со слабой нелинейностью (2008 MG₁) эволюция начальных вероятностных областей, построенных линейным и нелинейным методами на основе группы наблюдений, взятых с сайта Центра малых планет, визуально не отличается. Для этого астероида в 2022 году нами были получены новые наблюдения на Терскольской обсерватории. Группируя эти наблюдения с уже имеющимися в базе MPC, было сформировано начальное облако неопределенности линейным методом и отображено во времени с целью проведения анализа влияния добавления новых наблюдений на поведение вероятностной эволюции. Исследование показало, что область неопределенности при обработке расширенного состава наблюдений имеет меньший размер, а точность интегрирования оказывается выше, что дает возможность рассмотреть вероятностную орбитальную эволюцию астероида на более длительном интервале времени.

Кроме того, в данном разделе описываются результаты исследований вероятностной орбитальной эволюции ряда астероидов ((504181) 2006 TC, 2007 PR₁₀, (3200) Phaethon и (137924) 2000 BD₁₉) с учетом и без учета эффекта Ярковского. Выявлены сближения с планетами внутренней группы, рассмотрена вековая резонансная динамика (выявлен ряд апсидально-нодальных резонансов) и получена оценка времени предсказуемости движения астероидов с помощью параметра OMEGNO. Результаты исследований показали, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на большую полуось орбит астероидов, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений. Кроме того, в большинстве случаев учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению неопределенности положения астероидов.

Поиск орбитальных резонансов в движении астероидов показал, что (3200) Phaethon движется в окрестности орбитального резонанса 3/7 с Венерой. На рисунке 4 представлены графики эволюции большой полуоси (a_1 , b_1), сближения астероида с Меркурием (a_2 , b_2), с Венерой (a_3 , b_3), Землей (a_4 , b_4) и Марсом (a_5 , b_5). На всех рисунках левые панели соответствуют модели сил без учета эффекта Ярковского, правые – с учетом эффекта.

Из рисунка 4 видно, что ЭЯ оказывает значительное влияние на эволюцию большой полуоси a , что существенно отражается на числе сближений и расстоянии до планет. Без учета эффекта Ярковского астероид дольше находится в резонансе с планетой, нежели при учете эффекта, что говорит о необходимости его учета для более правильной картины. Астероид (137924) 2000 BD₁₉ движется в орбитальном резонансе 3/4 с Венерой. Сравнение результатов исследования с учетом эффекта Ярковского и без него показало, что учет данного эффекта оказывает влияние на величину сближений с Меркурием, и, как следствие, на величину неопределенности положения и скорости астероида.

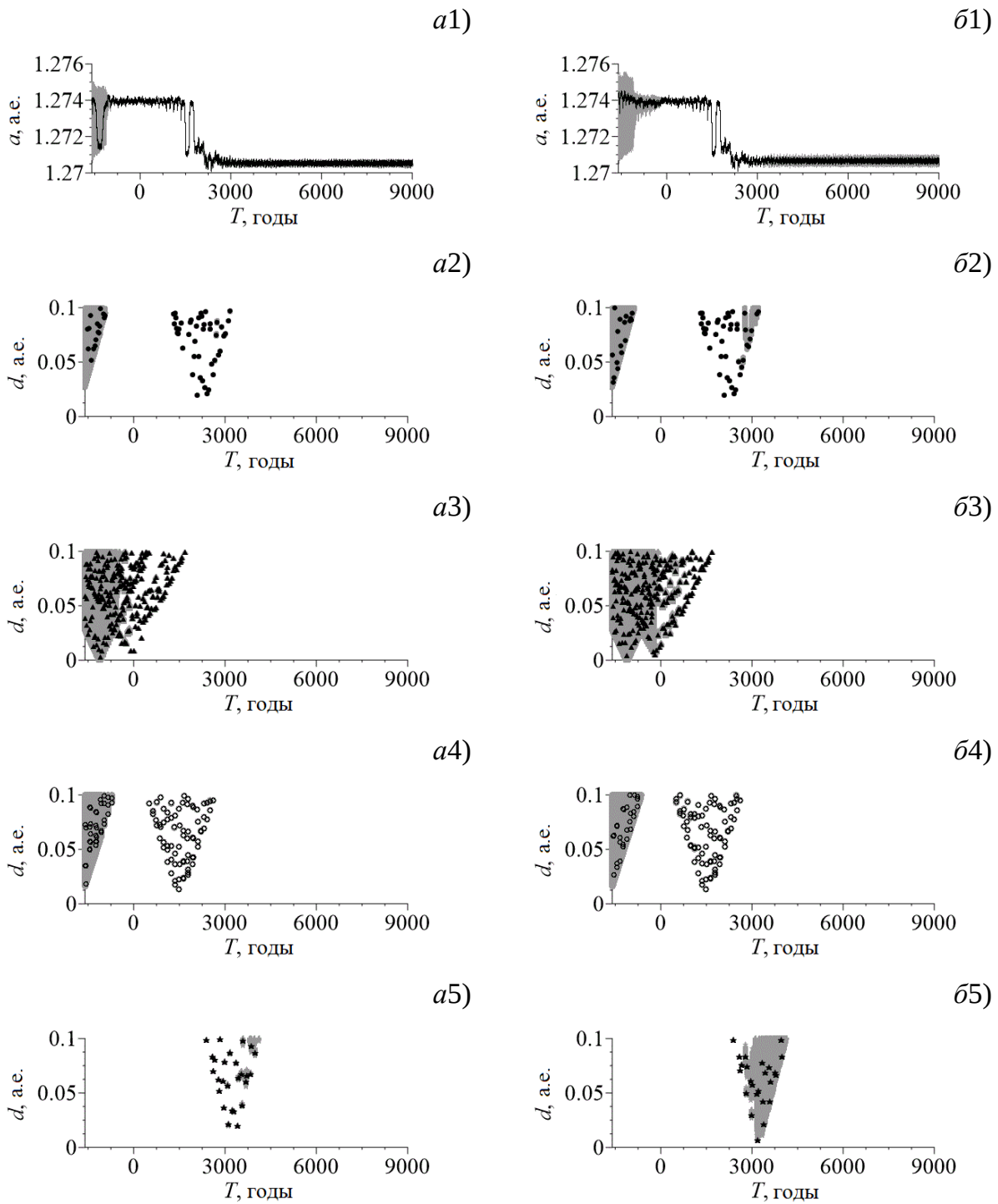


Рисунок 4 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида (3200) Phaethon

В шестой главе описываются результаты тестирования метода быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с Землей, а также представлен метод предотвращения столкновения, основанного на превентивном разрушении, 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. В разделе 6.2 представлены результаты тестирования

метода на примере следующих астероидов: 2011 AG5, 2007 VK184, 2008 JL3, 2006 JY26 и 2008 СК70. В процессе исследования сравнивались результаты, полученные рассматриваемым методом и численным интегрированием орбит тестовых частиц, кроме того, проведено сравнение с работами других авторов. Показано, что метод дает те же результаты, что и численное интегрирование всех орбит, но за существенно меньшее время.

Для подтверждения достоверности полученных результатов для ряда астероидов было выполнено сравнение с результатами других авторов, а именно – с результатами, представленными на сайте NASA и в работе (Vavilov, Medvedev, 2015) (таблица 2). Наибольшее отличие результатов наблюдается для астероида 2011 AG5, скорее всего данный факт обусловлен различиями начального облака неопределенности. Воспользовавшись той же ковариационной матрицей, что и авторы работы (Vavilov, Medvedev, 2015) мы получили значение $1.1 \cdot 10^{-4}$, которое находится в хорошем соответствии с представленным в последнем столбце таблицы 1.

Таблица 2 — Оценки вероятности столкновения в сравнении с другими авторами

Объект	Данная работа	NASA	Vavilov, Medvedev, 2015
2007 VK184	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-5}$
2011 AG5	$3.0 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$
2008 JL3	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-4}$
2006 JY26	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$

В разделе 6.3 описан метод предотвращения столкновения астероида с Землей, основанный на подрыве объекта во время предшествующего тесного сближения за несколько лет до столкновения. Превентивное уничтожение объекта задолго до последующего столкновения приводит к тому, что все или почти все осколки уходят с орбиты столкновения.

В разделе 6.4 описываются результаты оценки последствий разрушения на примере модельного объекта из облака неопределенности астероида (99942) Apophis. Рассмотрены шесть моментов взрыва:

- I) за 2 часа 34 мин. до сближения 2029 года;
- II) за 10 минут до сближения 2029 года;
- III) через 4 часа 38 мин. после сближения 2029 года;
- IV) через 9 часов 26 мин. после сближения 2029 года;
- V) через 19 часов после сближения 2029 года;
- VI) за 4 часа до сближения 2036 года.

На каждый из указанных моментов времени проведено моделирование взрыва. Далее эволюция каждого осколка была исследована численно с учетом влияния больших планет, Плутона, Луны, сжатия Земли и релятивистских эффектов от Солнца. В таблице 3 в качестве примера для трех вариантов взрыва

представлены: номер взрыва (соответствует приведенным выше моментам времени), процент частиц, сталкивающихся с Землей в разные годы N_{col} , минимальное расстояние от геоцентра d_{min} в различные годы. В столбце d_{min} стоит прочерк, если тестовые частицы не входят в сферу тяготения Земли. Общее число осколков во всех случаях составляло 100 тысяч.

Таблица 3 — Оценка последствий взрыва

Год	$N_{\text{col}}, \%$	d_{min}	$N_{\text{col}}, \%$	d_{min}	$N_{\text{col}}, \%$	d_{min}
	I		III		VI	
2029	0	11647	0	—	0	—
2013	$1 \cdot 10^{-3}$	4068	0	—		
2031	$2 \cdot 10^{-3}$	1012	0	—		—
2032	$1 \cdot 10^{-3}$	408	0	—	0	—
2033	0	6580	0	136708	0	—
2034	0	6567	0	38273	0	—
2035	$2 \cdot 10^{-3}$	348	$1 \cdot 10^{-3}$	4554	0	—
2036	$4 \cdot 10^{-3}$	674	0	88861	$644 \cdot 10^{-3}$	127
2037	$8 \cdot 10^{-3}$	1372	0	—	0	—
2038	0	8131	0	179212	0	—
2039	0	7120	0	—		

Как и следовало ожидать, наиболее опасным является взрыв перед сближением 2036 года (VI), который приводит к падению существенного числа осколков на Землю. Большинство остальных взрывов приводит к прохождению заметного количества обломков через сферу тяготения Земли и нескольким падениям в различные годы. Оптимальным представляется взрыв объекта сразу после сближения 2029 года (III).

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

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Авдюшев В.А., Галушина Т.Ю. Быстрое численное оценивание вероятности столкновения астероида с планетой // Астрономический вестник. — 2014. — Т. 48. № 4. — С. 309–317. // Переводная версия: Avdyushev V. A.; Galushina T. Yu. Quick numerical evaluation of the probability that an asteroid

- will collide with a planet // *Solar System Research*. – 2014. – Vol. 48. Is. 4. – P. 287-294. (DOI: 10.1134/S0038094614040017)
2. **Galushina T.Yu.**, Ryabova G.O., Skripnichenko P.V. The force model for asteroid (3200) Phaethon // *Planetary and Space Science*. – 2015. Vol. 118. – P. 296–301 (DOI 10.1016/j.pss.2015.06.014)
 3. Александрова А.Г., **Галушина Т.Ю.**, Прищепенко А.Б., Холшевников К.В., Чечеткин В.М. О превентивном разрушении опасного астероида // *Астрономический журнал*. – 2016. – Т. 93. № 6. – С. 595–602. Переводная версия: Aleksandrova A.G., **Galushina T.Yu.**, Prishchepenko A.B., Kholshevnikov K.V., Chechetkin V.M. The Preventive Destruction of a Hazardous Asteroid // *Astronomy Reports*. – 2016. – Vol. 60. No. 6. – P. 611–619. (DOI: 10.1134/S1063772916040016)
 4. **Галушина Т.Ю.**, Самбаров Г.Е. Исследование динамики астероида 3200 Phaethon под влиянием наложения различных резонансов // *Астрономический вестник*. – 2019. – Т. 53. № 3. – С. 231–239. Переводная версия: **Galushina T.Yu.**, Sambarov G.E. Dynamics of Asteroid 3200 Phaethon Under Overlap of Different Resonances // *Solar System Research*. – 2019. – Vol. 53. No. 3. – P. 215–223. (DOI 10.1134/S0038094619030018)
 5. **Galushina T.**, Bykova L., Letner O., Baturin A. IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing*. – 2019. – Vol. 29. – article id. 100301 (DOI: 10.1016/j.ascom.2019.100301)
 6. Александрова А.Г., **Галушина Т.Ю.**, Прищепенко А.Б., Холшевников К.В., Чечеткин В.М. О возможности безопасного разрушения угрожающего Земле астероида // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96. № 9. – С. 1–7. Переводная версия: Aleksandrova A.G., **Galushina T.Yu.**, Prishchepenko A.B., Kholshevnikov K.V., Chechetkin V.M. The Possibility of Harmless Destruction of an Asteroid Threatening the Earth // *Astronomy Reports*. – 2019. – Vol. 63. Is. 9. – P. 786–793.
 7. Aleksandrova A.G., **Galushina T.Yu.**, Kholshevnikov K.V. Comparison of different methods for preventive destruction of a hazardous asteroid // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1214. – article id. 012007.
 8. **Галушина Т.Ю.**, Летнер О.Н. Исследование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов с малыми перигелийными расстояниями // *Изв. Вузов. Физика*. 2020. Т. 63. № 1. С. 63–70. Переводная версия: **Galushina T.Yu.**, Letner O.N. Influence of the Yarkovsky effect on motion of asteroids with small perihelion distance // *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol. 63. Is. 1. – P. 71–78. (DOI 10.1007/s11182-020-02004-8)
 9. **Галушина Т.Ю.**, Сюсина О.М. Сравнительный анализ методик получения параметра эффекта Ярковского из наблюдений // *Изв. Вузов. Физика*. – 2020. – Т. 63. № 3. – С. 65–69. Переводная версия: **Galushina T.Yu.**, Syusina O.M. Comparative analysis of methods for obtaining the Yarkovsky effect parameter from observations // *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol. 63. № 3. – P. 420–425. (DOI 10.1007/s11182-020-02052-0)

10. Letner O.N., **Galushina T.Yu.** Motion features of the asteroid 137924 2000 BD19 // Planetary and Space Science. – 2020. – Vol. 181. – article id. 104818.
11. Сюсина О.М., **Галушина Т.Ю.** Определение значения эффекта Ярковского для астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. № 7 (764). – С. 151–156. Переводная версия: Syusina O.M., **Galushina T.Yu.** Determination of the Yarkovsky effect parameter for asteroids with small perihelion distances // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64. № 7. – P. 1351–1357. (DOI 10.1007/s11182-021-02460-w)
12. **Галушина Т.Ю.**, Летнер О.Н., Сюсина О.М. Оценка точности определения значения параметра эффекта Ярковского на основе реальных и модельных наблюдений астероидов // Изв. Вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. № 9 (766). – С. 170–174. Переводная версия: Galushina T.Yu., Letner O.N., Syusina O.M. Estimation of the precision of determining the Yarkovsky effect parameter based on real and model observations of asteroids // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 64. Is. 9. – P. 1774–1779. (DOI: 10.1007/s11182-022-02518-3)
13. **Galushina T.Yu.**, Letner O.N., Niganova E.N. Notes on force models for near-Sun asteroids // Planetary and Space Science. – 2021. – Vol. 202. – article id. 105232.
14. **Galushina T.Yu.**, Letner O.N. Modified version of IDA software and its application to the study of the motion of asteroid 2007 PR10 // Astronomical and Astrophysical Transactions. – 2021. – Vol. 32. Is. 4. – P. 355–370.
15. **Галушина Т.Ю.**, Летнер О.Н., Сюсина О.М., Ниганова Е.Н. Влияние эффекта Ярковского на орбитальные резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. № 5. – С. 105–112. (DOI: 10.17223/00213411/65/5/105) // Переводная версия: **Galushina T.Yu.**, Letner O.N., Syusina O.M., Niganova E.N. Influence of the Yarkovsky effect on the mean motion resonances of asteroids with small perihelion distances // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65. Is. 5. – P. 878–885.
16. Летнер О.Н., **Галушина Т.Ю.**, Гурьянов С.А. К вопросу о нелинейности задачи оценивания орбитальных параметров астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. № 3. – С. 72–80. (DOI: 10.17223/00213411/65/3/72) // Переводная версия: Letner O.N., **Galushina T.Yu.**, Gur`yanov S.A. About the Nonlinearity of the Problem of Estimating the Parameters of Asteroids with Small Perihelion Distances // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65. Is. 3. – P. 472–480. DOI: 10.1007/s11182-022-02657-7
17. **Галушина Т.Ю.**, Авдюшев В.А., Левкина П.А. Прогресс и проблемы в методах прогнозирования движения астероидов, сближающихся с Землей // Астрономический вестник. – 2023. – Т. 57. № 6. – С. 1–14. // Переводная версия: **Galushina T.Yu.**, Avdyushev V.A., and Levkina P.A. Advancements and Challenges in Methods for Near-Earth Asteroid Prediction // Solar System Research. – 2023. – Vol. 57. No. 6. – P. 636–647.
18. **Galushina T.Yu.**, Letner O.N., Shein A.V., Bakanas E.S., Levkina P.A. Observations and study of the orbital dynamics of some near-Sun asteroids // Planetary and Space Science. – 2024. – Vol. 240. – article id. 105814. (<https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105814>)

19. Быкова Л.Е., **Галушина Т.Ю.**, Батулин А.П. Построение поисковых эфемерид астероидов на основе областей их возможных движений. I. Алгоритм // Изв. Вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. – 2007. – Т. 50. № 12/2. – С. 5–12.
20. Быкова Л.Е., **Галушина Т.Ю.**, Батулин А.П. Построение поисковых эфемерид астероидов на основе областей их возможных движений. II. Программная система // Изв. Вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. – 2007. – Т. 50. № 12/2. – С. 13–19.
21. Быкова Л.Е., **Галушина Т.Ю.** Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землей, в среде параллельного программирования // Изв. Вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. № 10/2. – С. 12–19.
22. Быкова Л.Е., **Галушина Т.Ю.**, Батулин А.П. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. Вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. № 10/2. – С. 89 – 96.
23. Скрипниченко П.В., **Галушина Т.Ю.**, Кайзер Г.Т. К вопросу о методике оценки точности позиционных наблюдений астероидов на основе получения их высокоточных расчетных положений // Изв. Вузов. Физика. – 2012. Т. 55. – № 10/2. – С. 97–105.
24. Авдюшев В.А., **Галушина Т.Ю.** Линейные отображения для быстрого численного оценивания вероятности столкновения астероида с Землей // Изв. Вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6/3. – С. 182–184.
25. **Галушина Т.Ю.** К вопросу о терминологии в области астероидной опасности // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2013. – № 4. Т. 3. – С. 53–56.
26. **Галушина Т.Ю.**, Скрипниченко П.В. Апробация методики отбраковки наблюдений астероидов, выполненных на СБГ АО УрФУ // Изв. Вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 10/2. – С. 51–56.
27. Скрипниченко П.В., **Галушина Т.Ю.**, Шагабутдинов А.А. Исследование структуры возмущений некоторых АСЗ с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. Вып. 10/2. – С. 21–29.
28. **Галушина Т.Ю.** Популяция астероидов, сближающихся с Землей // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 4 (56). – С. 33–40.
29. Александрова А.Г., **Галушина Т.Ю.** Численное моделирование процесса формирования потоков частиц, образовавшихся в результате распада на орбите космических объектов // Изв. Вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. № 10/2. – С. 47–53.
30. Басхаев Д.Л., **Галушина Т.Ю.** Исследование эффективности интеграторов Гаусса – Эверхарта и Lobbie в задачах астероидной динамики // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2023. – Т. 66. № 1. – С. 109–116. (DOI: 10.17223/00213411/66/1/109)

Кроме того, 32 работы опубликовано в материалах конференций.

Благодарности

Автор диссертационной работы считает своим долгом выразить глубокую благодарность своему научному консультанту, доктору физико-математических наук Бордовицыной Татьяне Валентиновне за регулярные консультации, обсуждение полученных результатов и поддержку на протяжении всех этапов работы; кандидату физико-математических наук Летнер Оксане Никитичне за многолетнее плодотворное сотрудничество; доктору физико-математических наук Авдюшеву Виктору Анатольевичу за интересные идеи, а также всему коллективу отдела небесной механики и астрометрии НИИ ПММ за ценные замечания и полезные дискуссии. Кроме того, автор благодарен Институту астрономии Российской академии наук за возможность проводить наблюдения на телескопе Zeiss-2000.

Цитируемая литература

1. Авдюшев В.А. Новый метод для статистического моделирования возможных значений параметров в обратных задачах орбитальной динамики // *Астрономический вестник*. – 2009. – Т.43. № 6. – С. 565–574.
2. Авдюшев В.А. Интегратор Гаусса–Эверхарта // *Вычисл. технологии*. – 2010. – Т. 15. № 4. – С. 31–47.
3. Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит небесных тел // Томск: Издательский дом Томского государственного университета. 2015. 336 с.
4. Авдюшев В.А. Коллокационный интегратор Lobbie в задачах орбитальной динамики // *Астрон. вест.* – 2022. – Т. 56. № 1. – С. 36–46.
5. Александрова А.Г., Томилова И.В., Бордовицына Т.В. Анализ влияния вековых резонансов на динамическую эволюцию околоземных объектов, движущихся по почти круговым орбитам в области супер-ГЕО // *Изв. вузов. Физика*. – 2014. – № 10/2. – С. 95–102.
6. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра // Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит. 2010. – 384 с.
7. Виноградова Т.А., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А., Ягудина Э.И. Орбита астероида (99942) Апофис, определенная из оптических и радарных наблюдений // *Астрономический вестник*. – 2008. – Т. 42. № 4. – С. 291–300.
8. Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука. 1978 – 128 с.
9. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «Апекс-I» и «Апекс-II» для обработки астрономических ПЗС наблюдений // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. – 2010. – Т. 44. № 1. – С. 74–87.
10. Ивашкин В.В., Гуо П., Стихно К.А. Исследование характеристик вероятной области соударения астероида Апофис с Землей в 2036 г. // *Космические исследования*. – 2020. – Т. 58. – № 1. – С. 27–39.
11. Измайлов И.С., Ховричева М.Л., Ховричев М.Ю., Кияева О.В., Хруцкая Е.В., Романенко Л.Г., Грошева Е.А., Масленников К.Л., Калиниченко О.А. Астрометрические ПЗС-наблюдения визуально-двойных звёзд в Пулковской

- обсерватории. Письма в Астрономический журнал. – 2010. – Т. 36. № 5. – С. 365–371.
12. Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. Насколько точна орбита астероида (99942) Апофис и какова вероятность столкновения с ним в 2036–2037 гг. // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2009. – Т. 43. № 4. – С.338–347.
 13. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2009. 588 с.
 14. Соколов Л.Л., Кутеева Г.А., Петров Н.А., Эскин Б.Б., Баляев И.А., Васильев А.А. О характеристиках особых траекторий астероида Апофис и возможности увода его от соударений с Землей // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2021. – Т. 55. № 3. – С. 265–271.
 15. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А., Самбаров Г.Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6(3). – С. 235–237.
 16. Черницов А.М., Дубас О.М., Тамаров В.А. Способы уменьшения нелинейности задачи наименьших квадратов при построении областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. – 2006. Приложение. – Т. 49. № 2. – С. 44–51.
 17. Шефер В.А. Регуляризирующие и стабилизирующие преобразования в задаче исследования движения особых малых планет и комет: Автореф. дис. к.ф.-м.н. Казань. 1986. – 13 с.
 18. Шефер В.А., Коксин А.М. Вычисление показателей хаотичности орбит, основанных на касательных векторах: применение к ограниченной задаче трех тел // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6/3. – С.256–258.
 19. Шефер В.А., Коксин А.М. Быстрые ляпуновские индикаторы OFLI и OMEGNO: связь и отличительные особенности // Изв. вузов. Физика. 2016. – Т. 59. – № 1. – С. 58–62.
 20. Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., Железнов Н.Б. О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2012. – Т. 46. №. 2. – Р. 131–142.
 21. Bowell E., Muinonen K., Wasserman L.H. A public-domain asteroid data base. In Asteroids, Comets, Meteors, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. – 1994. – Р. 477–481.
 22. Brozovic M., Benner L.A.M., McMichael J.G., et al. Goldstone and Arecibo radar observations of (99942) Apophis in 2012–2013 // Icarus. – 2018. – Vol. 300. – Р. 115–128.
 23. Chesley S.R. Potential impact detection for near-Earth asteroids: The case of 99942 Apophis (2004 MN4) // Asteroids, Comets, Meteors: Proc. IAU Symp. 229th / Ets Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernandes J. A., Cambridge Univ. Press. – 2006. – Р. 215–228.
 24. Cincotta P.M., Simo C. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials – I // Astron. Astrophys. Sup. – 2000. – Vol. 147. – Р. 205–228.

25. Delbo M., Cellino A., Tedesco E.F. Albedo and size determination of potentially hazardous asteroids: (99942) Apophis // *Icarus*. – 2007. – Vol. 188. – P. 266–269.
26. Everhart E. Implicit Single Sequence Methods for Integrating Orbits // *Celestial Mechanics*. – 1974. – Vol. 10. – P. 35–55.
27. Farnocchia D., Chesley S.R., Vokrouhlický D., Milani A., Spoto F., Bottke W.E. Near-Earth asteroids with measurable Yarkovsky effect // *Icarus*. — 2013. — Vol. 224. Is. 1. — P. 1–13.
28. Giorgini J.D., Benner L.A.M., Ostro S.J., et al. Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis // *Icarus*. – 2008. – Vol. 193. Is. 1. – P. 1–19.
29. Hanuš J., Delbo M., Vokrouhlický D., et al. Near-Earth asteroid (3200) Phaethon: Characterization of its orbit, spin state, and thermophysical parameters // *Astronomy & Astrophysics*. – 2016. – Vol. 592. – A34. – 15 pp.
30. Jewitt D. Phaethon Near Earth // HST Proposal id.15343. Cycle 25. 08/2017.
31. Krüger H., Strub P., Srama R., et al. Modelling DESTINY+ interplanetary and interstellar dust measurements en route to the active asteroid (3200) Phaethon // *Planetary and Space Science*. – 2019. – Vol. 172. – P. 22–42.
32. Masiero J.R., Wright E.L., Mainzer A.K. Thermophysical Modeling of NEOWISE Observations of DESTINY+ Targets Phaethon and 2005 UD // *The Astronomical Journal*. – 2019. – Vol. 158. Is. 3. – article id. 97. – 7 pp.
33. Perez-Hernandez J.A., Benet L. Non-zero Yarkovsky acceleration for near-Earth asteroid (99942) Apophis // *Communications Earth & environment*. – 2022. — P. 3–10.
34. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. – 2013. – Vol. 342. Is. 6162. – P. 1069–1073.
35. Thuillot W., Bancelin D., Ivantsov A., et al. The astrometric Gaia-FUN-SSO observation campaign of 99942 Apophis // *Astronomy & Astrophysics*. – 2015. – Vol. 583. – id. A59. – 12 pp.
36. Vavilov D.E., Medvedev Yu.D. A fast method for estimation of the impact probability of near-Earth objects // *Monthly Notices of the Royal astronomical society*. – 2015. – Vol. 446. – P. 705–709.
37. Włodarczyk I. Possible impact solutions of asteroid (99942) Apophis // *Bulgarian Astronomical Journal*. – 2017. – Vol. 27. – P. 89–100.
38. Ye Q.-Z. Active Asteroid (3200) Phaethon during its unusually close approach to Earth // HST Proposal id. 15357. Cycle 25. 08/2017