

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИКИ РАН
Член-корреспондент РАН
Петрукович А.А.



2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук» на диссертацию Гуо Пэна «Исследование баллистико-навигационных задач для обеспечения астероидно-кометной безопасности Земли», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Создание современной космической обсерватории для массового обнаружения и определения орбит опасных небесных тел является одной из важнейших задач космонавтики в проблеме обеспечения астероидно-кометной безопасности Земли. В России исследуются несколько таких космических систем, в том числе система «Небосвод», проектируемая Корпорацией «Комета». Основная часть диссертации Гуо Пэна посвящена исследованию навигационных характеристик этой системы. При этом автором разработаны довольно эффективные методики и алгоритмы определения орбиты и оценки точности определения орбиты опасного астероида по оптическим космическим измерениям системы «Небосвод» с учетом реальных ограничений на проведение наблюдений и мешающих факторов. Численный анализ выполнен для несколько опасных астероидов, в частности, для Апофиса.

Кроме того, в работе рассмотрены две другие важные задачи, связанные с проблемой Апофиса. Определены и исследованы характеристики вероятной

области соударения Апофиса с Землёй в 2036 г. по результатам наблюдений 2005 г. Проанализирована возможность создания длительной, на несколько лет, стабильной орбиты спутника астероида Апофис. Наземные радиотехнические наблюдения такого спутника могут быть использованы для уточнения орбиты астероида.

Диссертация содержит четыре главы. Первая глава посвящена теоретической задаче разработки методики и алгоритмов решения навигационных задач по определению параметров орбиты опасного астероида на основе оптических космических измерений. Разработаны методика и алгоритмы определения орбиты и оценки точности определения орбиты опасного астероида при оптических космических измерениях системой «Небосвод» с учётом как случайных и систематических ошибок измерений, так и априорной информации, а также ряда мешающих факторов, таких как ошибки модели движения астероида, а также модели измерительной системы. Для анализа влияния ошибок мешающих параметров на результаты обработки измерений введен аналог коэффициента «отношение сигнал-шум».

Во второй главе, в соответствии с разработанными алгоритмами первой главы, выполнен численный анализ навигации для опасных астероидов: Апофис, 2008 TC₃, а также Челябинского метеороида. Получены оценки точностей навигации для оптических измерений системой «Небосвод» при определении орбит данных опасных небесных тел с учётом практических ограничений работы системы. Показано, что применение метода уточнения мешающих параметров позволяет заметно уменьшить влияние ошибок знания этих параметров на точность навигации по сравнению со случаем без их уточнения. Также показана потенциальная возможность наблюдений системой «Небосвод» и высокоточного определения орбит не только крупных и средних астероидов типа Апофиса (~320 м), но и также более мелких (до 4-50 м) тел, приближающихся к Земле, в том числе и дневных астероидов размером ~ 50 м и более. Оценка точностей навигации выполнена двумя способами: численно – методом Монте-Карло и аналитически – методом ковариационного анализа.

Совпадение результатов этих двух методов свидетельствует о достоверности полученных результатов и надежности разработанных алгоритмов оценки точностей навигации.

Третья глава посвящена задаче определения и исследования характеристик вероятной области соударения Апофиса с Землёй. Получена вероятная область падения Апофиса на поверхность Земли в 2036 г. для начальных данных его движения и их ошибок, полученных ИПА РАН по измерениям к 2005 г. Эта область имеет вид узкой длинной полосы на поверхности Земли. Исследованы геометрические, временные и энергетические характеристики столкновительных траекторий Апофиса и указанной области точек соударения астероида с Землёй. Совпадение этих результатов с данными НАСА тоже свидетельствует о надежности разработанных алгоритмов.

В четвёртой главе исследована возможность создания стабильной орбиты спутника астероида Апофис как однородного трёхосного эллипсоида. Разработана математическая модель орбитального пассивного движения КА вокруг астероида с учётом возмущений от притяжения небесных тел, давления солнечного света и несферичности астероида. Разработаны алгоритмы определения потенциала и ускорения притяжения астероида как однородного трёхосного эллипсоида. Получено аналитическое представление для эллиптических интегралов в формуле Дирихле, выраженное в виде быстро сходящихся рядов. Приведены результаты анализа пассивного движения основного КА и мини-спутника (с радиомаяком) вокруг Апофиса. Показана возможность обеспечения длительного (до 9 лет) стабильного движения КА вокруг Апофиса. Это может быть использовано для уточнения орбиты астероида с помощью проведения наземных радиотехнических измерений спутника астероида и последующей обработкой этих измерений.

Основная **научная новизна** диссертации состоит в следующем:

1. Разработаны методика и алгоритмы определения параметров орбитального движения астероида по оптическим измерениям космической системы «Небосвод» и оценки точностей навигации с учетом ошибок модели

движения астероида, ошибок модели измерительной системы, априорной информации о начальном состоянии и систематических ошибок измерений. Введен аналог коэффициента «отношение сигнал/шум» для оценки влияния интенсивности ошибок мешающих параметров на точность навигации.

2. Получены оценки точности навигации при наблюдении астероида Апофис, астероида 2008 TC₃ и Челябинского метеороида с помощью моделирования измерений космической системы «Небосвод» при учете реальных ограничений по видимости, звездной величине астероида и засветке Солнцем. Показана возможность уточнения навигации за счет учета мешающих параметров.

3. Разработаны методика и алгоритмы определения характеристик падения астероида на Землю. Эти алгоритмы использованы для получения и исследования геометрических, временных и энергетических характеристик вероятных столкновительных траекторий и вероятной модельной области падения Апофиса на Землю.

4. Разработана математическая модель орбитального движения КА вокруг астероида как однородного трёхосного эллипсоида с учетом возмущений от притяжения небесных тел и давления солнечного света. Для вычисления потенциала и силы притяжения однородного трёхосного эллипсоида получено аналитическое представление эллиптических интегралов в формуле Дирихле. Показана возможность создания стабильных орбит спутника астероида Апофис с движением спутника вокруг астероида в течение нескольких лет.

Достоверность полученных в диссертации научных результатов обеспечивается адекватностью примененных и разработанных моделей и методик современным теориям и данным, проверкой и тестированием разными способами, апробацией теоретических результатов численными расчетами, а также сравнением полученных результатов с исследованиями других авторов.

Практическая и теоретическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1) Разработанный математический аппарат решения задачи анализа

навигационных характеристик космической системы, предназначенной для обнаружения и определения орбит опасных небесных тел (ОНТ), важен для проектирования отечественной космической системы «Небосвод» и для совершенствования методов определения и прогнозирования орбиты ОНТ по оптическим космическим измерениям с учетом наличия ряда мешающих факторов.

- 2) Разработанные алгоритмы определения характеристик падения астероида на Землю важны для анализа структуры множества попадающих траекторий и выявления воздействий столкновения опасного астероида с Землёй.
- 3) Анализ орбитального движения спутника астероида Апофис как трёхосного эллипсоида важен для развития методов определения гравитационного потенциала и силы притяжения эллипсоида и для выявления стабильных пассивных движений спутника Апофиса.

Результаты работы получены лично автором. Материалы диссертации опубликованы в 23 научных работах, в том числе в 7 статьях и 3 препринтах ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Среди них 8 работ – в рекомендованных ВАК РФ изданиях.

Автореферат соответствует диссертации.

В качестве **замечаний** автору следует отметить следующее:

- 1). В модели движения астероида следовало бы учесть влияние эффекта Ярковского.
- 2). Вопросы, связанные с применением введенного коэффициента ОСШ (отношение сигнал/шум), следовало бы описать подробнее.

Данные недостатки **не снижают** положительной оценки выполненной работы Гуо Пэна, они носят характер пожеланий в дальнейших исследованиях.

Выводы. Диссертация Гуо Пэна «Исследование баллистико-навигационных задач для обеспечения астероидно-кометной безопасности Земли» является завершённой научно-квалификационной работой, содержит результаты, обладающие научной новизной и имеющие теоретическую и практическую значимость. Она полностью удовлетворяет всем требованиям,

предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, соответствует паспорту специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, а её автор, Гуо Пэн, безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Отзыв составил:

Кандидат технических наук по специальности «Динамика полёта и управление движением летательных аппаратов», ведущий научный сотрудник отдела «Космической динамики и математической обработки информации» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук» (ИКИ РАН).

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, <http://www.iki.rssi.ru/>, E-mail: iki@cosmos.ru.

Тел: +7(495) 333-10-78, E-mail: Natan Eismont neismont@iki.rssi.ru

«01» ноября 2019 г.

Н.А. Эйсмонт

Подпись Эйсмонта Натана Андреевича удостоверяю.

Учёный секретарь ИКИ РАН

Кандидат физ.-мат. наук, Садовский А.М.

