

космического аппарата.

В связи с этим тема диссертационной работы, направленная на создание методов и алгоритмов математического моделирования для обеспечения успешности перспективных отечественных космических проектов, а также на разработку комплексов программ для отечественной бортовой вычислительной техники, является безусловно актуальной и имеющей важное государственное значение.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

В диссертации получен ряд новых научных результатов, среди которых наиболее существенными являются:

1. **Разработка архитектуры и комплекса бортовых программ автономной навигационной системы**, способной определять орбиту космического аппарата по малому количеству видимых навигационных спутников, в том числе за пределами штатного навигационного поля. Предложенная двухпроцессорная архитектура (сигнальный и навигационный процессоры) обеспечивает независимость получения измерений от результатов решения навигационной задачи, что является ключевым фактором надёжности. Созданные алгоритмы поиска и слежения за сигналом эффективно работают при высоких динамических характеристиках космического аппарата и скоростях до ± 10 км/с.

2. **Создание нового трёхэтапного численного метода определения орбиты на борту КА**, который включает первоначальное определение, уточнение на короткой дуге с использованием расширенного фильтра Калмана и финальную обработку нормальных мест методом наименьших квадратов. Для компенсации вычислительных ошибок бортовой ЭВМ в методе использована адаптация метода Левенберга-Маркардта, а для повышения быстродействия разработан оригинальный метод вычисления гравитационных возмущений от Луны и Солнца без использования больших таблиц заранее вычисленных коэффициентов.

3. Построение комплексной математической модели измерений навигационных систем ГЛОНАСС и GPS, включающей аналитические модели движения спутников, модели формирования информационных кадров и дальномерных кодов, а также условия радиовидимости. На основе этой модели создан имитационный комплекс сигналов, позволивший провести всестороннюю отработку алгоритмов автономной навигационной системы в условиях, максимально приближенных к реальным.

4. Разработка комплекса математических моделей и бортовых алгоритмов для управления движением КА при посадке на поверхность Луны. Созданы модели всех ключевых навигационных приборов (звёздного датчика, инерциального блока, доплеровского измерителя скорости и дальности) и сложной двигательной установки, включающей пятнадцать двигателей четырёх типов с двумя топливными системами. Разработан и реализован эффективный численный метод терминального управления на этапе основного торможения, который был использован в проекте «Луна-25».

5. Создание инструментов и методов баллистического проектирования для анализа и выбора траекторий межпланетных перелётов. Предложен комплексный подход, объединяющий аналитические методы (интеграл Якоби, параметр Тиссерана, диаграммы Тиссерана-Пуанкаре, инвариантная сфера) и статистическое моделирование пучков траекторий на основе ЛПт-последовательностей И.М. Соболя. Эффективность подхода продемонстрирована на задачах проектирования миссий к полярным областям Солнца, к спутникам Юпитера и к Венере.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии методов небесной механики и астродинамики применительно к новым задачам навигационного обеспечения и баллистического проектирования. В частности, предложены оригинальные подходы к интегрированию уравнений движения на бортовых компьютерах с ограниченной разрядностью, разработаны

рекуррентные методы фильтрации для слежения за сигналом, а также введены в практику баллистического анализа инструменты (обобщённая формула Резерфорда, диаграммы Тиссерана-Пуанкаре), позволяющие эффективно исследовать свойства пучков траекторий.

Практическая значимость работы подтверждена многолетним успешным применением разработанных методов и программных комплексов.

1. Методы и алгоритмы АНС используются в составе бортовой аппаратуры серии космических аппаратов на высокоэллиптических орбитах.
2. Разработанное программное обеспечение применялось для навигационного обеспечения реальных космических миссий: «МКА-ФКИ (ПН1) «Зонд-ПП», «МКА-ФКИ (ПН2) «Рэлек», «Спектр-РГ», а также при запусках разгонного блока «Фрегат» с космодрома во Французской Гвиане.
3. Методы, алгоритмы и программы были включены в бортовой комплекс управления движением и в стенды полунатурных испытаний КА «Луна-25», что сыграло ключевую роль в отработке режимов посадки.

Достоверность и обоснованность результатов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечивается корректным применением фундаментальных законов механики и апробированных методов математической статистики, а также подтверждается широкой апробацией результатов. Основные положения работы докладывались на всероссийских и академических семинарах и чтениях. Решающим подтверждением является успешная эксплуатация разработанного программного обеспечения в составе реальных космических аппаратов и при сопровождении запусков, а также верификация результатов моделирования данными лётных испытаний (например, подтверждение точности измерений автономной навигационной системы на высокоэллиптической орбите).

Структура и содержание работы.

Диссертация имеет классическую структуру, состоит из введения, пяти

глав, заключения и шести приложений, изложена на 439 страницах, содержит 120 рисунков и 88 таблиц. Список литературы включает 274 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены фундаментальные основы наземного навигационного **обеспечения**. Подробно рассмотрены математические модели движения КА, методы небесно-механической интерпретации измерений (с учётом тропосферных, ионосферных и аппаратурных задержек) и итерационные алгоритмы определения орбиты. Приведены результаты обработки данных реальных миссий, включая идентификацию космического аппарата при групповом запуске. Предложен новый статистический критерий для отбраковки аномальных измерений.

Вторая глава посвящена созданию автономной навигационной системы. Представлена оригинальная двухпроцессорная архитектура, математическая модель коррелятора, алгоритмы поиска и слежения за сигналом, а также трёхэтапный метод бортового определения орбиты. Результаты математического моделирования и лётных испытаний подтверждают высокую точность работы системы на высокоэллиптических орбитах (среднеквадратичное отклонение составило 24 м по положению и 3 мм/с по скорости).

Третья глава является теоретической базой для отработки автономной навигационной системы. В ней представлены детальные математические модели сигналов систем ГЛОНАСС и GPS, включая модели движения спутников, формирования эфемерид, альманахов и модулирующих функций. Описан созданный имитационный комплекс, позволивший провести всесторонние вычислительные эксперименты.

Четвертая глава посвящена моделированию ключевого этапа лунной миссии – посадки. Представлены математические модели всех навигационных приборов и сложной двигательной установки. Описан бортовой алгоритм терминального управления на основе решения краевой задачи. Результаты

моделирования, включая анализ нештатной ситуации с космическим аппаратом «Луна-25», демонстрируют адекватность разработанных моделей.

В пятой главе рассмотрены методы баллистического проектирования межпланетных миссий. Систематизированы аналитические инструменты (интеграл Якоби, параметр Тиссерана, диаграммы), и показано их совместное применение со статистическим моделированием для анализа гравитационных манёвров и выбора траекторий в проектах «Интергелиозонд» и «Лаплас-П».

Заключение содержит итоговые выводы, соответствующие поставленным задачам.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Полученные в диссертации результаты целесообразно использовать в организациях ракетно-космической отрасли, занимающихся проектированием, созданием и эксплуатацией космических аппаратов, а также разработкой систем управления и навигации, таких как АО «НПО Лавочкина», АО «ЦНИИмаш», АО «РКЦ «Прогресс», ПАО «РКК «Энергия» и других. Разработанные математические модели, методы и программные комплексы могут найти применение при создании перспективных миссий по изучению Луны, планет Солнечной системы, а также для совершенствования систем автономной навигации на всех типах орбит.

Список замечаний по работе.

1. Не ясно, какова вычислительная сложность ключевых алгоритмов определения орбиты в автономной навигационной системе (глава 2) на короткой дуге и при обработке нормальных мест, и как она соотносится с ограничения по вычислительным ресурсам отечественных бортовых компьютеров.

2. Присутствует ошибка в формуле условий затенения цифровой телевизионной камеры БОКЗ-МФ Солнцем (глава 4, стр. 279). Видимо, пропущен \arccos .

3. Автор не изучил влияние аберрации на точность измерения

БОКЗ-МФ (глава 4, стр. 277, формула (4.16)).

Вопросы и замечания, возникшие в ходе прочтения работы, не влияют на общее положительное впечатление о диссертации.

Заключение по диссертационной работе Тучина Дениса Андреевича.

Материал, изложенный в диссертации, соответствует специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты работы прошли достаточную апробацию на научных семинарах и конференциях и были опубликованы в 70 печатных изданиях, 59 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 24 - в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 – в тезисах докладов, 2 – в монографиях. 5 работ опубликовано без соавторов. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ. Библиография к диссертации из 274 источников достаточно полно представляет публикации по теме исследования.

Автор диссертации сделал доклад по материалам диссертации на заседании семинара ИКИ РАН «Механика, управление и информатика» имени П.Е. Эльясберга 21 ноября 2025 г.). Доклад вызвал большой интерес аудитории и был единодушно одобрен.

Представленный выше анализ диссертации позволяет сделать **заключение** о том, что диссертация Д.А. Тучина является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, конкретно – в выполнение Федеральной космической программы. Диссертация соответствует требованиям п. 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с последующими изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор заслуживает

присуждения искомой учёной степени.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании отдела оптико-физических исследований ИКИ РАН 25 февраля 2026 года.

Отзыв составили

Г.н.с., заслуженный деятель науки РФ,
профессор, д.т.н.

Аванесов Генрих Аронович

С.н.с., д.т.н.

Жуков Борис Сергеевич

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук
Сокращённое наименование организации	ИКИ РАН
Организационно-правовая форма	75103: Федеральное государственное бюджетное учреждение
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тип организации	Бюджетное учреждение
Почтовый адрес	117997, ГСП-7, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32
Адрес юридического лица	117485, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Коньково,, ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14
Телефон	+7 (495) 333 52 12
Факс	+7 (495) 333 12 48
Адрес электронной почты	iki@cosmos.ru
Веб-сайт	iki.cosmos.ru

Подписи Аванесова Г.А. и Жукова Б.С. заверяю:

Учёный секретарь ИКИ РАН, к.ф.-м.н.



/ Садовский А.М. /



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

25 ФЕВ 2026

№ 11204 /

1061/26-57

на № _____

от _____

Председателю диссертационного совета
24.1.237.01
на базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
академику РАН
Б.Н. Четверушкину

Уважаемый Борис Николаевич!

Направляю Вам отзыв ведущей организации по диссертации Тучина Дениса Андреевича «Математические модели и методы навигационного обеспечения и баллистического проектирования полётов космических аппаратов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Приложение - Отзыв ведущей организации

в 2 экз. на 8 л.

Заместитель директора ИКИ РАН
по научной работе,
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.

А.А. Лутовинов

Исп. Жуков Б.С.
Тел. +7 (919) 411-86-18

