

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИПМ

им. М.В. Келдыша РАН

член-корр. РАН, д.ф. -м.н.



М.В. Якововский

13 марта 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация «Математические модели и методы навигационного обеспечения и баллистического проектирования полётов космических аппаратов» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Денис Андреевич Тучин работал в отделе № 5 «Механика космического полёта и управление движением», в секторе № 2 «Механика и управление движением космических аппаратов» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в должности старшего научного сотрудника и ведущего научного сотрудника.

Д.А. Тучин в 1999 году окончил Московский государственный институт электроники и математики (технический университет) по специальности «Прикладная математика».

Учёная степень кандидата физико-математических наук присуждена решением диссертационного совета ИПМ им. М.В. Келдыша РАН 25 мая 2004 г и утверждена 8 октября 2004 г. (КТ № 131773).

По итогам обсуждения диссертации «Математические модели и методы навигационного обеспечения и баллистического проектирования полётов космических аппаратов» принято следующее **заключение**.

Актуальность темы исследования.

Реализация сложных отечественных проектов исследований ближнего и дальнего космоса требует обеспечения высокой вероятности успеха и минимизации просчётов и ошибок. Численные методы, алгоритмы и реализующие их комплексы программ должны быть разработаны с учётом развития отечественной наземной и бортовой вычислительной техники. Перед реализацией любого космического проекта необходимо провести вычислительные эксперименты с применением методов математического моделирования с целью надёжного выполнения поставленных задач.

В решении навигационных задач по определению орбиты космического аппарата определяющим является состав траекторных измерений.

Актуальной задачей становится разработка методов и алгоритмов навигационного обеспечения полётов космических аппаратов одним измерительным пунктом, что понижает стоимость реализации проектов.

Реализация на борту космического аппарата функций наземной обработки траекторных измерений исключает ошибки, вызванные человеческим фактором. Использование измерений систем спутниковой навигации, предназначенных для наземного пользователя можно использовать на больших высотах и автономно на борту космического аппарата определять параметры движения на геостационарных и эксцентричных орбитах по малому составу измерительной информации. Разработка методов и алгоритмов определения орбиты по одному навигационному спутнику является актуальной задачей в области навигационного обеспечения полёта космических аппаратов. Актуальной задачей является создание алгоритмов и программных комплексов, реализуемых на отечественных бортовых вычислительных средствах.

Наземная отработка бортовых навигационных систем и систем управления движением космического аппарата возможна только при проведении

вычислительных экспериментов методами математического моделирования. Разработка методов математического моделирования работы бортовой навигационной системы и системы управления космическим аппаратом на стендах полунатурных испытаний требует описания динамической системы и небесно-механической интерпретации траекторных измерений. Актуальной задачей является разработка математических моделей радиосигнала космических систем спутниковой навигации в разрывном навигационном поле.

Актуальной задачей также является разработка математической модели системы управления космическим аппаратом отечественной лунной программы, особенностью которой является контур обратной связи изменения состояния динамической системы.

Важной задачей является проектирование полётов космических аппаратов в Солнечной системе на основе быстро выполняемого статистического моделирования перелётных траекторий между небесными телами с использованием реализованного комплекса программ по решению задач навигационного обеспечения и управления движением. Эффективная работа созданного программного комплекса подтверждена лётными испытаниями. Статистическое моделирование траекторий позволяет оперативно отвечать на актуальные вопросы баллистического проектирования при разработке эскизных проектов исследования космического пространства.

Целью диссертационной работы является создание методов и алгоритмов математического моделирования для повышения вероятности успеха реализации перспективных отечественных проектов исследования ближнего и дальнего космоса, а также создание комплексов программ на отечественной вычислительной технике для работы на борту космического аппарата.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**.

1. Созданы численные методы, алгоритмы и комплекс бортовых программ автономной навигационной системы космического аппарата, которая позволяет определять орбиту по малому количеству видимых навигационных спутников.

2. Создан комплекс бортовых программ режимов управления движением космического аппарата с посадкой на поверхность Луны. Выполнено математическое моделирование работы бортовых систем навигации и управления на всех участках полёта к Луне и выполнения посадки.

3. Создан унифицированный программный комплекс статистического моделирования пучков перелётных траекторий между телами Солнечной системы. Создан инструмент, позволяющий оперативно анализировать варианты при баллистическом проектировании перспективных космических проектов. Решённая задача позволила выявить новые направления научных исследований в области баллистического проектирования.

Научная новизна.

1. Впервые разработан численный метод определения орбиты на борту космического аппарата, выходящего за пределы навигационного поля спутниковых навигационных систем. Реализован комплекс программ для отечественного бортового компьютера.

2. Впервые разработана архитектура автономной навигационной системы, обеспечивающая реализацию функций баллистического центра на борту космического аппарата, работающего в режиме реального времени.

3. Выполнено оригинальное исследование обнаружения аномальных измерений траектории движения космического аппарата, в результате создан критерий идентификации и отбраковки аномальных измерений.

Теоретическая значимость.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в создании архитектуры, методов, алгоритмов и комплекса программ автономной навигационной системы, предназначенной для работы на борту космического аппарата в разрывном навигационном поле. Созданный инструмент баллистического проектирования позволяет теоретически рассчитывать и анализировать множество траекторий перелётов в Солнечной системе, а также выявлять новые направления научных исследований в этой области.

Практическая значимость.

1. Разработанные методы, алгоритмы и программы используются в составе бортовой автономной навигационной системы шести космических аппаратов на орбитах с большим эксцентриситетом.

2. Выполнено исследование навигационных алгоритмов в перспективных проектах исследования Луны и разработаны комплексы программ управления движением космического аппарата, включая посадку на поверхность.

3. Разработанные методы и алгоритмы использовались в навигационном обеспечении полёта космических аппаратов научного назначения «МКА-ФКИ (ПН1) «Зонд-ПП», «МКА-ФКИ (ПН2) «Рэлек», «Спектр-РГ» и разгонного блока «Фрегат» при запусках с космодрома во Французской Гвиане.

4. Методы, алгоритмы и программы включены в бортовой программный комплекс управления режимами движения и в стенды аппаратно-программной отладки систем космического аппарата «Луна-25» при наземной отработке и проведении лётно-конструкторских испытаний.

Достоверность полученных научных результатов диссертационной работы подтверждена работой навигационной системы на шести космических аппаратах на орбитах с большим эксцентриситетом. Правильность и безотказность разработанных комплексов программ подтверждена лётными испытаниями космических аппаратов научного назначения «МКА-ФКИ (ПН1) «Зонд-ПП», «МКА-ФКИ (ПН2) «Рэлек», «Спектр-РГ», запусками разгонного блока «Фрегат» с космодрома во Французской Гвиане. Методы математического моделирования с проведением вычислительных экспериментов, разработанные бортовые и наземные комплексы программ обеспечили впервые за последние пятьдесят лет перелёт и выход на орбиту искусственного спутника Луны космическим аппаратом «Луна-25».

Личный вклад. Все результаты диссертационной работы получены лично автором. Пять публикаций написаны автором единолично. Автором единолично разработаны методы, алгоритмы и комплексы программ для бортового вычислительного комплекса по определению геостационарных орбит и орбит

с большим эксцентриситетом, включая реализацию операционных систем для решения навигационных задач и приёма измерений на отечественных процессорах. В решении задач баллистического проектирования предложено использовать метод И.М. Соболя для моделирования траекторий. Совместно с А.С. Гаммалом разработан бортовой программный комплекс управления движением космического аппарата «Луна-25».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Впервые разработан численный метод определения орбиты на борту космического аппарата, выходящего за пределы навигационного поля спутниковых навигационных систем. Реализован комплекс программ для отечественного бортового компьютера. (Соответствует п. 1 специальности.)
2. Впервые разработана архитектура автономной навигационной системы, которая обеспечивает реализацию функций баллистического центра и работает в режиме реального времени на борту космического аппарата. (Соответствует п. 2 специальности.)
3. Разработан рекуррентный метод фильтрации измерений при обеспечении слежения за сигналами навигационных систем для сокращения используемой памяти бортового компьютера. (Соответствует п. 2 специальности.)
4. Разработан численный метод минимизации ошибки вычислений при интегрировании уравнений движения и формировании матрицы нормальных уравнений метода наименьших квадратов при обработке измерений на борту космического аппарата. (Соответствует п. 2 специальности.)
5. Разработан быстродействующий метод вычисления на борту космического аппарата гравитационных возмущений от Луны и Солнца. (Соответствует п. 2 специальности.)
6. Выполнено оригинальное исследование обнаружения аномальных измерений траектории движения космического аппарата, в результате создан критерий идентификации и отбраковки аномальных измерений. (Соответствует п. 8 специальности.)

7. Создан инструмент, позволяющий оперативно анализировать варианты при баллистическом проектировании перспективных космических проектов. Созданы методы и алгоритмы поиска оперативного решения задач нахождения окон старта при полётах в Солнечной системе и определения соответствующих начальных условий с учётом полной модели гравитационных возмущений. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. (Соответствует п. 3 специальности.)

8. Разработаны численные методы определения параметров движения космического аппарата, которые позволили решить задачи высокоточного определения орбиты низкоорбитальных космических аппаратов с использованием измерений одного наземного измерительного пункта и бортовой телеметрической информации. (Соответствует п. 1 специальности.)

9. Созданы методы, алгоритмы и программы реального времени, которые включены в бортовой программный комплекс управления режимами движения и в стенды аппаратно-программной отработки систем перспективных космических аппаратов исследования Луны. (Соответствует п. 3 специальности.)

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 68 печатных изданиях, 57 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.

Приведён список основных публикаций.

1. Тучин Д.А. Определение орбиты на борту космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. — 2020. — № 3. — С. 126—147. — URL: <https://doi.org/10.31857/S0002338820020122>. — (WoS, Scopus, ВАК).

2. Тучин Д.А. Алгоритмы приёма сигналов навигационных спутников на борту космического аппарата с использованием коррелятора // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2018. — № 4. — URL: <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-4>. — (ВАК).

3. Тучин Д.А. Селекция аномальных измерений при первичной обработке в определении орбиты по траекторной информации наземной станции Кобальт-Р. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2022. — № 58. — URL: <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-58>. — (ВАК).
4. Тучин Д.А. Автономное определение орбиты на борту космического аппарата // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2019. — № 7. — URL: <https://doi.org/10.20948/prepr-2019-7>. — (ВАК).
5. Тучин Д.А. Кодовые измерения псевдодалности системы GPS. Модель ошибок и априорная оценка точности определения вектора положения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2002. — № 30. — URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2002-30>. — (ВАК).
6. Гордиенко Е.С., Ильин И.С., Мжельский П.В., Михайлов Е.А., Паламарчук Е.А., Погодин А.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Филиппова Е.Н., Худорожков П.А., Ярошевский В.С. Баллистико-навигационное обеспечение полёта малых космических аппаратов «Зонд-ПП» и «Рэлек» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. — 2016. — № 2. — С. 31—43. — (ВАК).
7. Сергеева Ю.Р., Тучин Д.А. Алгоритм определения параметров аналитической модели движения навигационных спутников // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2016. — № 109. — URL: <https://doi.org/10.20948/prepr-2016-109>. — (ВАК).
8. Аким Э.Л., Астахов А.П., Бакитько Р.В., Польщиков В.П., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Ярошевский В.А. Автономная навигационная система околоземного космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. — 2009. — № 2. — С. 139—158. — (WoS, Scopus, ВАК).
9. Komovkin S.V., Lavrenov S.M., Tuchin A.G., Tuchin D.A., Yaroshevsky V.S. Celestial-Mechanical Interpretation of the Two-Way Radio Measurements of Radial Velocity of Spacecraft for Scientific Applications // Solar System Research. — 2016. — Vol. 50, no. 7. — P. 593—596. — URL: <https://doi.org/10.1134/S003809461607011X>. — (WoS, Scopus, ВАК).

10. Жуков Б.И., Лихачев В.Н., Сихарулидзе Ю.Г., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Федотов В.П. Системы управления движущимися объектами управление на этапе основного торможения при посадке на Луну космического аппарата с комбинированной двигательной установкой // Изв. РАН. ТиСУ. — 2016. — № 2. — С. 104—114. — URL: <https://doi.org/10.7868/S0002338816010121> . — (WoS, Scopus, ВАК).
11. Жуков Б.И., Лихачев В.Н., Розин П.Е., Сихарулидзе Ю.Г., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Управление движением космического аппарата при посадке на поверхность Луны // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. — 2021. — № 4. — С. 22—30. — (ВАК).
12. Арефьев В.А., Лутовинов А.А., Мольков С.В., Погодин А.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Решение навигационной задачи с использованием измерений сигналов рентгеновского пульсара по данным космического аппарата «Интеграл». // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2025. — № 6. — URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2025-6> . — (ВАК).
13. Ильин И.С., Заславский Г.С., Лавренов С.М., Сазонов В.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Ярошевский В.С. Баллистическое проектирование траекторий перелёта с орбиты искусственного спутника Земли на гало-орбиту в окрестности точки L2 системы Солнце-Земля // Космич. исслед. — 2014. — Т. 52, № 6. — С. 476—320. — URL: <https://doi.org/10.7868/S0023420614060028> . — (WoS, Scopus, ВАК).
14. Заславский Г.С., Захваткин М.В., Ильин И.С., Корянов В.В., Самотохин А.С., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Шишов В.А., Ярошевский В.С. Баллистико-навигационное обеспечение полёта космического аппарата Спектр-Р. // Космонавтика и ракетостроение. — 2014. — Т. 74, № 1. — С. 15—29. — (ВАК).
15. Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Точки бифуркации при проведении гравитационных манёвров в системе Юпитера // ДАН. — 2015. — Т. 462, № 2. — С. 154—157. — URL: <https://doi.org/10.7868/S0869565215140108> . — (WoS, Scopus, ВАК).

16. Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Методика формирования больших наклонений орбит космических аппаратов с использованием гравитационных манёвров // ДАН. — 2017. — Т. 472, № 4. — С. 403—406. — URL: <https://doi.org/10.7868/S0869565217040090> . — (WoS, Scopus, ВАК).
17. Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Синтез орбит космических аппаратов с большим наклонением посредством гравитационных манёвров около Венеры // ДАН. — 2019. — Т. 484, № 3. — С. 281—284. — URL: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524843281-284> . — (WoS, Scopus, ВАК).
18. Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Обобщение формулы Резерфорда для синтеза цепочек гравитационных манёвров // ДАН. — 2021. — Т. 501, № 1. — С. 5—7. — URL: <https://doi.org/10.31857/S2686740021060109> . — (WoS, Scopus, ВАК).
19. Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Корянов В.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А. Универсальное свойство интеграла Якоби для гравитационных маневров в Солнечной системе // Космич. исслед. — 2020. — Т. 58, № 4. — С. 312—320. — URL: <https://doi.org/10.31857/S0023420620040068> . — (WoS, Scopus, ВАК).
20. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Лаврентьев В.Г., Тучин Д.А., Лавренов С.М., Корянов В.В., Романов С.В., Ярошевский В.С., Грушевский А.В. Программно-моделирующий комплекс для расчёта схем межпланетных траекторий полета КА к планетам и телам (включая полеты к Марсу и Луне) Солнечной системы в интересах реализации проектов, планируемых в рамках ФКП-2025, и последующих программах / Госкорпорация Роскосмос . — № 2018619769; заявл. 13.07.2018 ; опубли. 10.08.2018, 2018617318 (Рос. Федерация).

Учитывая вышеизложенное, постановили

Диссертационная работа Дениса Андреевича Тучина «Математические модели и методы навигационного обеспечения и баллистического проектирования полётов космических аппаратов» соответствует паспорту специальности и критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней (п. 9), утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024 № 62) и рекомендуется к защите на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на расширенном заседании семинара отдела № 15 «Математическое моделирование» (рук. член-корр. РАН, д.ф.-м.н. В.Ф. Тишкин и д.ф.-м. н. А.А. Кулешов) 13 марта 2025 г., протокол № 1.

На заседании присутствовали академик РАН, д.ф.-м.н. Б.Н. Четверушкин, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. В.Ф. Тишкин, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. А.И. Аптекарев, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. М.В. Якобовский, д.ф.-м.н. А.А. Кулешов, д.ф.-м.н. Г.К. Боровин, д.ф.-м.н. А.В. Грушевский, д.ф.-м.н. А.Г. Тучин и др.

Заключение принято единогласно.

Член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отделом № 15



В.Ф. Тишкин

д.ф.-м.н., г.н.с. отдела № 15



А.А. Кулешов