

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук» член-корреспондент РАН  
А.И. Аптекарев



«11» января 2024 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Исследование динамики управляемого относительного движения группы малых космических аппаратов на низкой околоземной орбите» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» отделе №7 «Динамика космических систем».

В период подготовки диссертации соискатель Монахова Ульяна Владимировна работала в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в отделе №7 «Динамика космических систем» младшим научным сотрудником и обучалась в

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

В 2019 г. окончила магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 03.04.01 «прикладные математика и физика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана 19 декабря 2023 года Федеральным государственным учреждением «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент Иванов Данил Сергеевич работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в отделе №7 «Динамика космических систем» старшим научным сотрудником.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Монаховой У.В. посвящена актуальной тематике управления группой малых космических аппаратов (МКА) на низкой околоземной орбите. В силу значительных ограничений на размеры, массу и энергетику космических аппаратов во многих случаях невозможна установка активной двигательной системы управления относительно движением. Вследствие этого появляется проблема управления группы МКА средствами, не требующими расхода топлива. В диссертационной работе в качестве такого средства предлагается рассмотреть силу атмосферного сопротивления, действующую на аппараты на низкой околоземной орбите. В первой главе автор

рассматривает группу МКА с учетом ограничений на межспутниковую связь, которые заключаются в том, что каждый аппарат может получать информацию об относительном движении только тех аппаратов, которые находятся не дальше определенного расстояния от него. Вследствие ошибок выведения и незнания аппаратами относительного движения всей группы, МКА могут начать удаляться друг от друга, что приведет к разделению группы. Таким образом, требуется построение алгоритма управления относительным движением, учитывающего коммуникационные ограничения и сохраняющего целостность группы. Монаховой У.В. были предложены два алгоритма управления, учитывающие данные ограничения, и проведено исследование управляемого движения с использованием теории графов. Далее в диссертационной работе рассматривается задача построения треугольной формации при пролете над экваториальной зоной Земли. В данной задаче соискателем было рассмотрено влияние второй зональной гармоники и атмосферного сопротивления на движение группы, что позволило выбрать наклонения орбит и предложить алгоритм фазирования аппаратов вдоль орбиты. Для разработанного алгоритма было проведено численное исследование, которое показало, как влияет солнечная активность и ошибки выведения на качество получаемой треугольной формации на всём протяжении миссии. В третьей главе для реализации требуемой величины атмосферного сопротивления, действующего на аппарат, соискателем был предложен новый алгоритм активного магнитного управления ориентацией с матрицей параметров управления, выбор которых осуществляется с использованием теории Флоке. Было проведено исследование времени сходимости и точности стабилизации управляемого углового движения и продемонстрировано применение разработанного алгоритма для задачи управления треугольной формации из второй главы.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы и получены лично автором. Постановки задач и результаты исследований обсуждались с научным руководителем Д.С. Ивановым и соавторами.

Достоверность полученных научных результатов и выводов подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях, а также апробацией на конференциях и семинарах. Обоснованность результатов обеспечивается выбором общепринятых моделей относительного движения космических аппаратов в группе. Полученные аналитические оценки подтверждаются проведением численного моделирования.

Научная новизна заключается в том, что получены конечные выражения для требуемого размера коммуникационной области для МКА в зависимости от ошибок выведения во время кластерного запуска. Разработан алгоритм управления движением группы, состоящей из трёх аппаратов, для достижения требуемого относительного положения при пролете над экваториальной зоной. Предложена и обоснована методика построения опорного углового движения МКА, которая позволяет обеспечить требуемое значение ускорения, создаваемого силой аэродинамического сопротивления.

Практическая значимость состоит в том, что предложенный подход к управлению движением группы трёх спутников планируется реализовать в миссии по исследованию гамма-вспышек в атмосфере Земли совместно с НИИЯФ МГУ. Результаты исследования управляемого движения группы малых спутников с учетом коммуникационных ограничений могут быть использованы при проектировании миссий, в которых участвуют аппараты с оптической системой относительной навигации. Предложенный

алгоритм активного магнитного управления применим для малых спутников формата 3U кубсат или ТНС-0.

Диссертационная работа Монаховой Ульяны Владимировны соответствует требованиям, предъявленным к кандидатской диссертации по специальности 1.1.7 «Теоретическая механика, динамика машин» и соответствует паспорту специальности (ПС) по ряду направлений. Рассматриваемые механические системы состоят из нескольких МКА и Земли. При анализе уравнений движения группы МКА используются методы аналитической механики (направление 1 ПС) и динамики космических аппаратов (направление 10 ПС). Построенные законы управления как для движения МКА относительно друг друга, так и для движения МКА относительно центра масс опираются на методы теории устойчивости (направление 2 ПС). Для верификации моделей и алгоритмов управления проводилось математическое и компьютерное моделирование кинематики и динамики (направление 14 ПС) группы МКА, оснащенных магнитной системой ориентации. Работа имеет выраженный фундаментальный характер и поэтому относится к физико-математической отрасли наук.

Диссертация соответствует требованиям, установленным пунктом 14 положения о присуждении ученых степеней. Основные результаты диссертационной работы были доложены и опубликованы в трудах международных и российских конференций, таких как International Astronautical Congress, Академические чтения по космонавтике, International Workshop on Satellite Constellations & Formation Flying, IAA Symposium on Small Satellites for Earth observation. Также диссертационная работа обсуждалась на следующих семинарах:

1. Семинар «Динамика космических систем» отдела №7 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (под рук. М.Ю. Овчинникова).

2. Московский городской научно-методический семинар по теоретической механике МГТУ им. Н.Э. Баумана (под рук. проф. И.Г. Благовещенского).
3. Семинар по механике, управлению и информатике ИКИ РАН (под рук. Р.Р. Назирова)
4. Семинар «Механика космического полета», проводимый на кафедре «Космические системы и ракетостроение» МАИ (под рук. В.Г. Петухова).
5. Научный семинар «Механика и управление движением космических аппаратов» Баллистического центра ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (под рук. А.Г. Тучина).
6. Семинар отдела №5 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (под рук. проф. Ю.Ф. Голубева).

Основные положения и результаты диссертации полно представлены в 8 работах в рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК:


1. Ivanov D., Monakhova U., Ovchinnikov M., Nanosatellites swarm deployment using decentralized differential drag-based control with communicational constraints, *Acta Astronautica*, 2019, V. 159, P. 646-657. ([doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.02.006](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.02.006)).
2. Monakhova U., Ivanov D., Roldugin D., Magnetorquers attitude control for differential aerodynamic force application to nanosatellite formation flying construction and maintenance, *Advances in the Astronautical Sciences*, 1st IAA/AAS SciTech Forum on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials, 2020, P. 385-397.
3. Ivanov D., Monakhova U., Ovchinnikov M., Roldugin D., Decentralized Control of Nanosatellites Swarm Spatial Distribution in LEO Using

- Magnetorquers, *Advances in Space Research*, 2020, V. 67, № 11, P. 3489-3503 ([doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.024)).
4. Monakhova U., Ivanov D., Mashtakov Ya., Shestakov S., Approaches to studying the performance of swarm decentralized control algorithms, *Proceedings of 72<sup>nd</sup> International Astronautical Congress (IAC)*, 2021, 9 P.
  5. Monakhova U., Ivanov D., Mashtakov Ya., Shestakov S., Ovchinnikov M., Communication Area Estimation for Decentralized Control of Nanosatellites Swarm, *Acta Astronautica*, 2023, V. 211, P. 49-59, ([doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.06.003](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.06.003)).
  6. Roldugin D., Okhitina A., Monakhova U., Ovchinnikov M., Comparison of Feedback Three-Axis Magnetic Attitude Control Strategies, *Aerospace*, 2023, V. 10(12), 975, 13 P. ([doi.org/10.3390/aerospace10120975](https://doi.org/10.3390/aerospace10120975)).
  7. Monakhova U., Ivanov D., Mashtakov Ya., Magnetorquers attitude control for formation flying in LEO, *Proceedings of 74<sup>th</sup> International Astronautical Congress (IAC)*, 2023, 5 P.
  8. U. V. Monakhova, S. A. Shestakov, Ya. V. Mashtakov, D. S. Ivanov, Decentralized Swarm Control of Small Satellites for Communication Connectivity Maintenance, *Cosmic Research*, 2024, V. 62(1), P. 106–116, ([doi.org/10.1134/S0010952523700776](https://doi.org/10.1134/S0010952523700776))

Диссертация «Исследование динамики управляемого относительного движения группы малых космических аппаратов на низкой околоземной орбите» Монаховой Ульяны Владимировны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 «Теоретическая механика, динамика машин».

Заключение принято на заседании семинара отдела №5 «Механика и управление движением» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (под рук. проф. Ю.Ф. Голубева). Присутствовало на заседании 15 человек, из них 4 докторов наук по специальности, соответствующей тематике диссертации.

Выступили с положительной оценкой диссертации: д.ф.-м.н. проф. Ю.Ф. Голубев, д.ф.-м.н. проф. В.А. Карташев, д.ф.-м.н. проф. М.Ю. Овчинников.  
Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – нет, «воздержалось» – 1 чел., протокол № 63 от «7» декабря 2023 г.

  
\_\_\_\_\_  
«26» декабря 2023 г.

Ю.Ф. Голубев, д.ф.-м.н., профессор,  
г.н.с. отдела №5, и.о. заведующего отделом,  
руководитель семинара