

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН
чл.-корр РАН А.А. Петрукович
16 декабря 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской Академии наук (ИКИ РАН)

Диссертационная работа «Автономная оптическая навигация космических аппаратов при полетах к Луне и малым телам Солнечной системы» выполнена старшим научным сотрудником Жуковым Борисом Сергеевичем в отделе Оптико-физических исследований Федерального государственного учреждения науки Институт космических исследований Российской Академии наук (ИКИ РАН).

Жуков Борис Сергеевич окончил факультет Аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института в 1975 г. по специальности «Экспериментальная ядерная физика». В 1983 г. защитил диссертацию на тему «Исследование метода спектрополяризационной съемки и возможности его использования в дистанционном зондировании Земли» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Геофизика».

Б.С. Жуков работает в отделе Оптико-физических исследований ИКИ РАН с 1978 г. В 80-ые годы прошлого века он принимал активное участие в решении научных и навигационных задач в проектах «Вега» и «Фобос», в проектах по созданию и использованию съемочных систем дистанционного зондирования Земли из космоса. В связи с новым проектом

«Фобос-Грунт» в начале 2000-х годов Б.С. Жуков сосредоточился на решении задач автономной оптической навигации космических аппаратов в окрестностях малых тел Солнечной системы. В этом проекте он был ведущим по программе эксперимента и программно-алгоритмическому обеспечению Телевизионной системы навигации и наблюдения (ТСНН). Впервые в практике полетов к спутнику Марса телевизионная система должна была выполнить широкий комплекс автономных оптических навигационных измерений, включая измерения высоты и боковой скорости при снижении КА и построение карты риска для автономного выбора безопасного места посадки. Запуск КА «Фобос-Грунт» в 2011 г. окончился неудачей, однако в ходе подготовки ТСНН был получен ценный опыт по разработке автономных оптических навигационных систем, который был использован и развит в следующих проектах.

При ведущей роли Б.С. Жукова была разработана оптическая навигационная система для Пилотируемого транспортного корабля, которая должна выполнять автономные навигационные измерения на трассе перелета Земля-Луна и на окололунных орбитах и, тем самым, резервировать традиционные наземные радиотехнические измерения. В настоящее время Б.С. Жуков является ведущим по концепции и программно-алгоритмическому обеспечению телевизионной системы навигации и наблюдения ТСНН-2 для миссии «Луна-27». Задачами данной миссии являются автономные траекторные измерения на этапе основного торможения для повышения точности вывода КА в район посадки, а на заключительном этапе снижения – построение карты риска для выбора безопасной площадки для посадки.

В течение ряда лет в отделе проводится систематическое тестирование разработанного автором программно-алгоритмического обеспечения автономной оптической навигации с использованием данных Комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС-2) на КА серии «Метеор-М».

Б.С. Жуков выполнил работу по оптимизации углов стереоскопических наблюдений для Лунной стереотопографической камеры (ЛСТК), которая должна выполнить топографическое картирование поверхности Луны в миссии «Луна-26» для подготовки следующих лунных посадочных миссий.

Кроме того, Б.С. Жуков выполняет физико-техническое обоснование и других космических проектов.

По результатам рассмотрения представленной Б.С. Жуковым диссертационной работы «Автономная оптическая навигация космических аппаратов при полетах к Луне и малым тел Солнечной системы» принято следующее заключение.

Актуальность темы исследования. В настоящее время с помощью глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и др. реализована автономная навигация на околоземных орбитах. При полетах в дальний космос, в основном, используются традиционные наземные навигационные радиотехнические методы (одно-, двух-, трехпутевая доплеровская радиолокация, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), а также наземная навигационная обработка получаемых телевизионных изображений. Это требует значительного времени, затрачиваемого на распространение радиосигнала, на его наземную обработку и накопление измерений при движении КА по орбите. Например, после вывода КА на окололунную орбиту, а также после коррекций орбиты для достижения точности определения орбиты в несколько сотен метров требуется мерная база порядка 1 суток. На орбите Марса точность навигационных измерений с использованием глобальной системы больших радиотелескопов НАСА для дальнего космоса Deep Space Network составляет ~2 км.

Автономная оптическая навигация позволяет определять положение КА на орбите с точностью лучше ~100 м путем бортовой обработки изображений, получаемых оптическими съемочными системами. Она незаменима в случаях, когда требуется автоматически определять и

корректировать орбиту КА в реальном времени. Такая ситуация может возникать:

- при выводе КА на околопланетную орбиту, а также после коррекций орбиты,
- при пролете вблизи малых тел Солнечной системы, орбиты которых недостаточно хорошо известны,
- на траекториях снижения при подлете КА к местам посадки на поверхность небесных тел.

Кроме того, резервирование автономной оптической навигацией традиционных наземных радиотехнических измерений повышает надежность и безопасность космических миссий, что особенно важно при пилотируемых полетах.

Важной задачей автономной навигации при посадке космических аппаратов на поверхность небесных тел является выбор наиболее безопасной площадки без опасных наклонов и камней. Об этом свидетельствует опыт посадки космических аппаратов на Луну и другие небесные тела, часть из которых могла быть потеряна из-за посадки на неровный участок поверхности. Посадка спускаемого модуля КА «Rosetta» на комету Чурюмова-Герасименко на крутой склон значительно уменьшило время его функционирования из-за затенения. Посадка американского зонда Intuitive Machines 1 (IM-1) на Луну на площадку с большим наклоном привело к сползанию и опрокидыванию аппарата, что ограничило его работоспособность.

Состояние исследований. При аэрофотосъемке определение траектории летательного аппарата по контрольным (опорным, реперным) точкам, т.е. картографически привязанным ориентирам, и/или относительным ориентирам (связным точкам), априорно не привязанным к карте, но наблюдаемым на перекрывающихся аэрофотоснимках является частью классической фотограмметрической задачи восстановления маршрута съемки. Обработка результатов проводится на Земле.

При полетах в дальний космос определение орбиты КА по измерению направления на горизонт или центр небесного тела с наземной обработкой полученных телевизионных снимков широко используется в космических миссиях.

Для автономной оптической навигации телевизионные приборы впервые в отечественной практике были использованы в проекте «Вега» в 1984 – 1986 годах. Тогда при пролете КА вблизи ядра кометы Галлея телевизионная система ТВС и аналоговый датчик наведения АДН осуществили автоматическое наведение платформы с научными приборами на объект наблюдения. В разработке и математическом моделировании работы АДН автор принимал непосредственное участие.

Позднее метод автономной навигации по центру яркости применялся для наведения научной аппаратуры (с использованием дополнительного вращения КА) с помощью разработанной в JPL (США) автономной оптической навигационной системы AvtoNav при пролете малых тел (комет и астероидов) в миссиях Deep Space 1, STARDUST, Deep Impact, EPOXI и STARDUST NEХТ.

Распознавание контрольных точек на земной поверхности лежит в основе полетной геометрической калибровки съемочных систем и географической привязки космических изображений Земли. Подобная полетная калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА серии «Метеор-М» ежегодно проводится под руководством автора и по разработанным им алгоритмам.

В задачах машинного (технического) зрения методы автоматического распознавания объектов хорошо развиты, однако для условий космической съемки требуется их адаптация и оптимизация с учетом как характера снимаемых объектов, так и ограниченных вычислительных возможностей бортовых процессоров.

Практически автономная оптическая навигация на околопланетных орбитах до сих пор не использовалась. Отсутствовали также каталоги контрольных точек, пригодные для этой цели.

Однако автономная оптическая навигация начала широко применяться при посадке космических аппаратов. С помощью ТСНН в проекте «Фобос-Грунт» (2011 г.), в разработке которой автор играл ведущую роль, планировалось реализовать автономные стерео-измерения высоты и горизонтальной скорости КА, а также построение карты риска для выбора наиболее безопасного места посадки.

Автономная оптическая навигация на траектории подлета к району посадки на Марсе использовалась в американской миссии Mars-2020. Для этого применялся метод TRN (Terrain Relative Navigation – относительная навигация на местности), основанный на использовании предварительно полученных с орбиты изображений района посадки, с которыми осуществляется корреляция получаемых изображений. Метод позволяет также уклоняться от крупных препятствий, которые могут быть распознаны на изображениях при их разрешении (6-12 м в миссии Mars-2020) и занесены в используемую при посадке априорную карту риска. Из-за больших объемов требуемой памяти на хранение полных изображений данный метод применим только для навигации на относительно небольших участках, таких как расчетные районы посадки. Метод TRN применялся также при посадке зонда IM-1 в 2024 г. на Луну.

При посадке китайских зондов Chang'E-3-6 в 2013-2024 гг. на поверхность Луны и зонда Tianwen-1 на поверхность Марса оптическая навигация на этапе основного торможения не применялась, однако на последнем этапе использовалась автономная система уклонения от препятствий. Непосредственно после начала вертикального спуска по ТВ изображениям строилась карта риска для уклонения от крупных (более ~1 м) неровностей рельефа. Алгоритм построения карты риска основан на пороговом методе по яркости и по градиенту яркости. На высоте 100 м для

уклонения от более мелких препятствий использовалась трехмерная модель поверхности, которая строилась в реальном времени по результатам лидарного сканирования.

На индийском КА Chandrayaan-3 (2023 г.), который успешно сел в районе южного полюса Луны, стояли несколько ТВ камер для выбора безопасного места посадки при выходе в расчетный и нерасчетный районы посадки, а также для контроля горизонтальной скорости КА.

Цель диссертации. Целью исследования является комплексная разработка и внедрение методов автономной оптической навигации космических аппаратов на примере полетов к Луне и к Фобосу.

Конкретными задачами исследований являются:

- разработка и исследование методов автономной оптической навигации на околопланетных орбитах и на трассе перелета и оценка их точности;
- разработка и исследование методов автономной оптической навигации на траектории подлета к местам посадки и оценка их точности;
- разработка принципов формирования каталогов контрольных точек для задач автономной оптической навигации и создание каталогов контрольных точек на поверхности Луны;
- разработка методов автономного выбора места посадки по телевизионным изображениям;
- внедрение разработанных методов автономной оптической навигации на окололунных орбитах и на трассе перелета Земля-Луна в оптическую навигационную систему (ОНС) для Пилотируемого транспортного корабля (ПТК);
- внедрение разработанных методов автономной оптической навигации при посадке на поверхность небесных тел в систему ТСНН для проекта «Фобос-Грунт» и в систему ТСНН-2 для следующих лунных посадочных миссий.

Основные положения, выдвигаемые на защиту:

В рамках диссертационной работы «Автономная оптическая навигация космических аппаратов при полетах к Луне и малым телам Солнечной системы» автором выполнено физико-техническое обоснование возможности создания системы, решающей задачу получения навигационных параметров на основе бортовой обработки данных телевизионных измерений направлений на горизонт планеты, объекты на ее поверхности и звезды путем их распознавания с использованием соответствующих каталогов. На этой концептуальной основе базируется разработка методов измерений, состава и параметров технических средств, а также программно математического обеспечения и технологии его отработки.

На защиту выносятся следующие результаты диссертационной работы:

1. Метод автономных оптических навигационных измерений по горизонту планеты (*соответствует п.2 паспорта научной специальности*).

Реализуется на околопланетных орбитах и на трассах перелета с учетом: условий освещения, характеристик камеры, положения тела в поле зрения, наличия помех и др.

По результатам математического моделирования и стендовых измерений установлено, что среднеквадратическая ошибка (СКО) определения координат КА по горизонту Луны на окололунных орбитах высотой до 800 м не превышает 3-6 км в зависимости от высоты.

2. Метод автономных оптических навигационных измерений по контрольным точкам (КТ) (*соответствует п.2 паспорта научной специальности*).

Реализуется на околопланетных орбитах и при посадке космических аппаратов. За счет использования трехмерных моделей КТ обеспечивается автоматическая адаптация к изменению структуры изображения КТ на поверхности безатмосферных тел при изменении условий освещения.

По результатам математического моделирования и стендовых измерений, СКО определения горизонтальных координат КА по КТ на

окололунных орбитах составляет ~50 м, при посадке ~20 м. При топографическом картировании районов посадки будущих лунных миссий с помощью лунной стереотопографической камеры (ЛСТК) в миссии «Луна-26» абсолютная навигация по КТ будет возможна на всей траектории подлета к районам посадки и СКО координатных измерений может быть уменьшено до ~10 м.

3. Алгоритм и программное обеспечение формирования каталогов контрольных точек на поверхности безатмосферных тел для задач автономной оптической навигации (*соответствует п.4 паспорта научной специальности*).

Каталоги КТ строятся на основе критериев оптимальной локализации, уникальности в области поиска, инвариантности к условиям наблюдения в широком диапазоне за счет использования трехмерных моделей КТ, независимости от объектов, не входящих в область определения КТ, и соответствия используемым алгоритмам навигационных измерений.

С использованием предложенного алгоритма построен специализированный глобальный каталог контрольных точек на поверхности Луны для задач автономной оптической навигации.

4. Метод построения фотометрической карты риска для определения направления на наиболее безопасную площадку для посадки КА на поверхность безатмосферных тел (*соответствует п.2 паспорта научной специальности*).

Реализуется на основе критериев минимизации относительной дисперсии яркости площадки и порогов по теням и средней яркости площадки.

На примере района посадки КА «Луна-25» размером 10x30 км с площадной долей опасных уклонов 38% показано, что данный метод позволяет уменьшить вероятность посадки на опасные уклоны до 10-14%. При выборе более ровного района размером 1,2x1,2 км с площадной долей опасных уклонов 16%, выведение КА в который с необходимой точностью

требует использования автономной оптической навигации на этапе подлета, данный метод позволяет уменьшить вероятность посадки на опасные уклоны до ~3%.

5. На основе разработанных методов предложен новый подход к построению систем автономной оптической навигации для работы на околопланетных орбитах и на трассах перелета, сочетающий навигационные измерения по горизонту и по контрольным точкам с использованием одновременных измерений ориентации космического аппарата и времени (*соответствует п.1 паспорта научной специальности*).

6. Разработанные в диссертации методы и подходы к решению задач автономной оптической навигации использованы при построении следующих систем (*соответствует п.1 паспорта научной специальности*):

- телевизионная система навигации и наблюдения ТСНН для КА «Фобос-Грунт» для навигационных измерений при посадке на Фобос,

- оптическая навигационная система для Пилотируемого транспортного корабля для навигационных измерений на трассе перелета Земля-Луна и на окололунных орбитах,

- определены структура и основные характеристики системы ТСНН-2 для КА «Луна-27» для навигационных измерений на траектории подлета к району посадки и выбора безопасного места посадки.

Научная новизна. В автономном режиме траекторные измерения по горизонту на околопланетных орбитах и на трассах перелета для определения положения КА в планетоцентрической системе координат до настоящего времени не проводились. Разработанный автором метод автономных навигационных измерений по горизонту планеты с помощью телевизионных систем, учитывающий все основные эффекты (геометрические свойства камеры, наличие терминатора, форму тела, наличие помех, ограничение поля зрения и др.), является новым. Новыми являются также оценки точности этого метода на окололунных орбитах и на трассе перелета Земля-Луна.

Разработанный автором метод автономной навигации по контрольным точкам (КТ) основан на известных фотограмметрических принципах, но оптимизирован для проведения автономных измерений в реальном времени на околопланетных орбитах. За счет использования трехмерных моделей КТ обеспечивается автоматическая адаптация к изменению структуры изображения КТ на поверхности безатмосферных тел при изменении условий освещения. В автономном режиме подобные измерения до настоящего времени не проводились. Новыми являются также оценки точности этого метода при наличии и отсутствии независимых измерений ориентации КА.

Автономная оптическая навигация на околопланетных орбитах требует наличия специализированных каталогов контрольных точек, оптимизированных для этих целей. Имеющиеся каталоги кратеров на поверхности Луны и других небесных тел для этой цели не подходят из-за трудности распознавания кратеров в автоматическом режиме, а также из-за их сходной структуры. Оптимальными являются ориентиры со сложной и уникальной структурой в области их определения. Автор разработал алгоритм построения специализированных каталогов КТ для целей автономной оптической навигации в окрестности безатмосферных тел по их топографическим моделям и на этой основе впервые сформировал такие каталоги для Луны.

Разработанный автором метод комбинированной навигации по контрольным точкам и относительным ориентирам при посадке на поверхность Луны и других небесных тел имеет ряд преимуществ по сравнению с применяемым в американских миссиях методом относительной навигации TRN по ранее полученным изображениям. К этим преимуществам относятся инвариантность к условиям освещения за счет использования 3D-моделей контрольных точек, учет высоты рельефа и перспективных искажений (что особенно важно на траектории основного торможения при посадке на Луну, где отклонения оси визирования от надира могут достигать $\pm 30^\circ$, и значительная (на 1-2 порядка) экономия бортовой памяти. Новыми

являются также оценки точности этого метода на траектории подлета к местам посадки на Луну при использовании существующих и перспективных топографических моделей Луны.

Новой является предложенная автором методика комбинирования навигационных измерений по горизонту и по контрольным точкам на околопланетных орбитах. В соответствии с ней положение КА первоначально определяется по горизонту, а далее уточняется по контрольным точкам. При этом используются дополнительные измерения ориентации звездными датчиками. Данная методика позволяет проводить навигационные измерения в полностью автономном режиме без использования прогнозной баллистической информации. Новой является реализующая эту методику концепция полностью автономной оптической навигационной системы для ПТК.

Предложенный автором метод построения фотометрической карты риска (ФКР) для выбора наиболее ровной площадки для посадки КА основан на применении простейшей и широко используемой характеристики текстуры изображений – дисперсии яркости. Новыми являются результаты исследования связи этого критерия с характеристиками кратеров, а также оптимизация разрешения съемочной системы для применения этого критерия. Данный метод был реализован автором в ПАО ТСНН «Фобос-Грунт» в 2011 г. и далее был доработан для учета общего наклона площадки. Его преимущество перед использовавшимся в последующие годы на китайских зондах «Чанъэ 3-6» и Tianwen-1 для уклонения от крупных препятствий методом, основанным на пороговых и дифференциальных тестах – вычислительная простота и чувствительность как к крупным, так и к небольшим (камни) опасным неровностям поверхности.

Теоретическая и практическая значимость. Методы автономной оптической навигации, разработанные автором, позволяют повысить надежность и безопасность космических полетов к Луне, Марсу, Венере и малым телам Солнечной системы, предусмотренных Федеральной

космической программой. На трассе перелета и на околопланетных орбитах автономное уточнение орбиты в реальном времени особенно важно после коррекций орбиты КА, при пролете мимо малых тел Солнечной системы, а также в нештатных ситуациях. Резервирование автономной оптической навигацией традиционных радиотехнических методов позволит повысить безопасность пилотируемых полетов.

Автономная оптическая навигация на этапе снижения и подлета к району посадки КА на поверхность небесных тел позволит радикально повысить точность вывода КА к району посадки, что даст возможность выбирать для посадки районы меньших размеров и в большей степени ориентироваться на научные задачи миссии, а не на наличие больших ровных площадей.

Безопасность посадки космических аппаратов на поверхность небесных тел напрямую связана с уклонением в реальном времени от опасных наклонов поверхности и камней, которые вследствие относительно малого размера могут не быть распознаны предварительно на имеющихся картах или на полученных с орбиты снимках вследствие их недостаточного разрешения. Кроме того, как показано автором, вследствие значительных размеров эллипса рассеяния точки посадки (от сотен метров до километров) в его пределах всегда будет иметься значительное число опасных неровностей поверхности.

Приоритетной задачей стерео-картирования Луны с помощью ЛСТК в ближайшей миссии «Луна-26» поставлено построение трехмерных моделей участков подлета к местам посадки будущих отечественных лунных посадочных миссий с разрешением лучше 10 м, что обеспечит эффективное применение разработанных автором методов автономной оптической навигации в следующих лунных посадочных миссиях.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту методы автономных оптических навигационных измерений и реализующее их базовое программно-алгоритмическое обеспечение разработаны автором лично. При

внедрении в оптическую навигационную систему для ПТК и в телевизионные системы навигации и наблюдения ТСНН на КА «Фобос-Грунт» и ТСНН-2 для миссии «Луна-27» автор играл ведущую роль в определении концепции и основных характеристик указанных систем, создании их программно-алгоритмического обеспечения и его стендовой отработке.

Достоверность и апробация результатов исследования подтверждается результатами математического моделирования, стендовой отработки реальных космических систем и обработки данных реальных космических съемок.

Основные результаты диссертации опубликованы в 24 статьях в журналах из списка ВАК и в 6 статьях в рецензируемых иностранных журналах.

Результаты работы докладывались на следующих Всероссийских и международных конференциях и семинарах и опубликованы в их трудах:

- Всероссийских научно-технических конференциях «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов» (Таруса, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2021 гг.),
- Международных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2006, 2007, 2008, 2011, 2013, 2014, 2015 гг.),
- Научно-технической конференции-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами» (Таруса, 2010),
- Научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления» (Москва, 2011),
- Международной научно-практической конференции «Системы и комплексы автоматического управления летательными аппаратами» (Москва, 2013),
- 7th International Symposium "Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations " (IKI, Moscow, 2007),

- International Colloquium and Workshop "Ganymede Lander: scientific goals and experiments" (IKI, Moscow, 2013).

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях.

Публикации в журналах из списка ВАК:

1. *Аванесов Г.А., Бонев Б.И., Кемпе Ф., ..., Жуков Б.С. и др.* Телевизионные съемки Фобоса: первые результаты // Письма в Астрон. Ж. 1990. Т. 16. № 4. С. 378-388.

2. *Аванесов Г.А., Гордеев З.В., Гришин В.А., Жуков Б.С. и др.* Телевизионная система навигации и наблюдения // Астрон. Вестник. 2010. Т.4. №5. С. 473-479.

3. *Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С. и др.* Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» №1: три года на орбите. // Исследование Земли из космоса. 2013. №2. С. 74-83.

4. *Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Сметанин П.С. и др.* Отработка технологии автономной навигации космических аппаратов дальнего космоса на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т.17. № 7. С. 41-49. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-41-49.

5. *Аванесов Г.А., Бережков А.В., Бессонов Р.В., ..., Жуков Б.С. и др.* Служебная телевизионная система КА Луна-25 // Астрономический Вестник. 2021. Т. 55. №6. С. 601-617. DOI: 10.31857/S0320930X21060013.

6. *Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Сметанин П.С.* Стенд для отработки технологии автономной припланетной оптической навигации КА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т.18. № 3. С. 108-117. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-108-117.

7. *Балдина Е.А., Бессонов Р.В., Гришин В.А., Жуков Б.С. и др.* Оценка возможности использования карты береговых линий GSHHG для автономной оптической навигации космических аппаратов // Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 217–228. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-217-228.

8. *Гришин В.А., Жуков Б.С.* Особенности проблемы распознавания образов применительно к задачам относительной навигации при стыковке космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 58-66. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-58-66.

9. *Жуков Б.С., Василейский А.С., Жуков С.Б. и др.* Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т 1. С. 260–266.

10. *Жуков Б.С., Жуков С.Б.* Алгоритм автономного выбора места посадки КА «Фобос-Грунт» по телевизионным изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №2. 281-288.

11. *Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В. и др.* Полетная радиометрическая кросскалибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» №1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123-137.

12. *Жуков Б.С., Жуков С.Б., Фори А.А.* Возможности навигационных измерений по лимбу Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т.12. № 2. С.61-76.

13. *Жуков Б.С., Полянский И.В., Жуков С.Б.* Автономная оптическая навигация на окололунных орбитах и при посадке на Луну с помощью сверхширокоугольной камеры. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т.14. № 2. С.24-35. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-24-35.

14. Жуков Б.С., Гришин В.А., Жуков С.Б. и др. Моделирование оптических навигационных измерений на траектории подлета к районам посадки на Луну // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т.15. № 6. С. 154-168. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-154-168.

15. Жуков Б.С., Гришин В.А., Жуков С.Б. и др. Моделирование оптических навигационных измерений при вертикальном спуске на поверхность Луны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т.15. № 6. С. 169-179. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-169-179.

16. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Кондратьева Т.В. и др. Автоматизация полетной геометрической калибровки Комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» №2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т.15. № 6. С. 201-212. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-212.

17. Жуков Б.С., Гришанцева Л.А., Кондратьева Т.В. и др. Полетная геометрическая калибровка Комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т.16. № 6. С. 93-100. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100.

18. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В. Межгодовой тренд чувствительности камер комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» №2 по результатам полетной калибровки в 2015-2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 53-60. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60.

19. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В. Коррекция автоматической географической привязки изображений комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М» №2-2 //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т.18. № 2. С. 75-81. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81.

20. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Никитин А.В. и др. Полетная геометрическая калибровка комплекса аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т.21. № 1. С. 185-193. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193.

21. Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Пермитина Л.И. и др. Сопоставление радиометрических данных КМСС-М КА «Метеор-М» №2 с данными MODIS КА «Terra» и OLI Landsat-8 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 19-28. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-19-28.

22. Орловский И.В., Михайлов М.В., Рожков С.Н., ..., Жуков Б.С. Сближение и причаливание космических аппаратов по измерениям аппаратуры спутниковой навигации, совмещенной с оптической подсистемой причаливания // Космическая техника и технологии. 2021, Т.33. №2. С. 88-97. DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-2-88-97.

23. Полянский И.В., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В. Комплекс многозональной спутниковой съемки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.

24. Сагдеев Р.З., Аванесов Г.А., Крювелье П., ..., Жуков Б.С. и др. Телевизионный эксперимент по наблюдению кометы Галлея с КА "Вега" // Письма в Астрон. Ж. 1986. Т. 12. № 8. С. 593-603.

Публикации в иностранных рецензируемых журналах:

1. Avanesov G.A., Bonev B.I., Kempe F., ..., Zhukov B.S. et al. Television observations of Phobos: first results // Nature. 1989. Vol. 341. No. 6243. P. 585-587.

2. *Avanesov G.A., Zhukov B., Ziman Ya, et al.* Results of TV imaging of Phobos (Experiment VSK-FREGAT) // *Planet. Space Sci.* 1991. Vol. 39. No. 1/2. P. 281-295.

3. *Kolyuka Yu., Tikhonov V., Ivanov N., ..., Zhukov B. et al.* Phobos and Deimos astrometric observations from the Phobos mission // *Astron. & Astrophys.* 1991. Vol. 244. P. 236-241.

4. *Polyansky I., Zhukov B., Zubarev A. et al.* Stereo Topographic Mapping Concept for the Upcoming Luna-Resurs-1 Orbiter Mission // *Planetary and Space Science.* 2018. Vol.162. P. 216-232. DOI:[10.1016/j.pss.2017.09.013](https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.09.013).

5. *Sagdeev R.Z., Avanesov G.A., Barinov I.V., ..., Zhukov B.S. et al.* Comet Halley: nucleus and jets (results of the VEGA mission) // *Adv. Space Res.* 1986. Vol. 5. No. 12. P. 95-104.

6. *Sagdeev R.Z., Szabo F., Avanesov G.A., ..., Zhukov B.S.* Television observations of comet Halley from Vega spacecraft // *Nature.* 1986. Vol. 321. No. 6067. P. 262-266.

Соответствие паспорту специальности «1.3.1 Физика космоса, астрономия». Диссертация соответствует специальности «1.3.1 Физика космоса, астрономия» (отрасль науки - техническая) по направлениям:

п1. Наземная и бортовая, в т.к. спутниковая аппаратура, детекторы и измерительные комплексы для астрофизических и космических исследований, включая исследования Земли из космоса.

п2. Разработка методов навигации на Земле и в космосе, включая классические методы и современные глобальные навигационные системы.

п4. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для научной аппаратуры и обработки данных для всех областей космических исследований, включая методы передачи, хранения и использования астрометрических данных, создание, поддержка и использование архивов, каталогов и баз данных.

Вывод. В диссертации Жукова Бориса Сергеевича изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие навигационного обеспечения космических миссий.

Диссертация соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук.

Диссертация Жукова Бориса Сергеевича «Автономная оптическая навигация космических аппаратов при полетах к Луне и малым телам Солнечной системы» рекомендуется к защите по специальности «1.3.1 Физика космоса, астрономия» (отрасль науки - техническая).

Заключение принято на заседании Научно-технического совета Отдела оптико-физических исследований ИКИ РАН. Присутствовало на заседании 26 человек, в том числе 2 доктора наук, 4 кандидата наук.

Результаты голосования: «за» - 26, «против» - нет, «воздержалось» - нет.

Председатель НТС отдела 57

д.т.н.

Р.В. Бессонов

Секретарь НТС отдела 57

к.т.н.

С.В. Воронков