

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор  
Института прикладной математики  
им. М.В. Келдыша РАН,  
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.



М.В. Якобовский

12 апреля 2025 г.

### Отзыв ведущей организации

на диссертацию Бориса Сергеевича Жукова «Автономная оптическая навигация космических аппаратов при полетах к Луне и малым телам Солнечной системы», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия (технические науки)»

Автономная оптическая навигация даёт возможность определять положение космических аппаратов в реальном времени посредством бортовой обработки изображений, получаемых оптическими съёмочными системами. Усилия многих исследовательских коллективов направлены на использование потенциала этих систем для навигации космических объектов. Поэтому не вызывает сомнений **актуальность** темы диссертации.

**Структура** диссертации следующая: она состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы.

Во введении автор обосновывает актуальность выбранной темы диссертации, определяет объект и предмет исследования, формулирует цели и задачи работы, приводит основные положения диссертации, выносимые на защиту, выделяет научную новизну, указывает на практическую значимость работы.

В первой главе сформулированы общие принципы автономной оптической навигации космического аппарата (КА). Глава содержит обзор используемых систем координат и времени, геометрических и топографических моделей, отражательных характеристик тел Солнечной системы.

Во второй главе рассмотрен метод автономной оптической навигации по горизонту для реализации в реальном времени на борту КА. Исследуется его потенциальная точность по результатам математического моделирования.

В третьей главе описывается метод автономной оптической навигации по абсолютным и относительным ориентирам для реализации в реальном времени на борту КА. Под абсолютной оптической навигацией понимается навигация по контрольным точкам (КТ). Потенциальная точность метода оценивается по результатам математического моделирования. Автором разработана методика построения каталогов КТ на поверхности безатмосферных тел. Эта методика основана на принципах оптимальной локализуемости КТ (т.е. чувствительности изображений КТ к смещениям), уникальности КТ в области поиска, инвариантности к условиям наблюдения за счёт использования многомасштабных пирамид трёхмерных моделей КТ. По предложенной методике разработан глобальный каталог КТ на поверхности Луны, содержащий более 40 тыс. объектов. В главе подробно описаны алгоритмы автономной оптической навигации на основе использования абсолютных и относительных ориентиров.

В четвёртой главе анализируется проблема автономного выбора по телевизионным изображениям наиболее безопасного места посадки на поверхность небесного тела. Автор разработал метод построения фотометрической карты риска (ФКР) на основе критерия относительной дисперсии яркости. Метод был реализован в Телевизионной системе навигации и наблюдения (ТСНН) на КА «Фобос-Грунт» и в дальнейшем был доработан для будущих лунных миссий. Исследована взаимосвязь

выбранного критерия с характеристиками кратеров и оптимизировано разрешение изображений для его применения.

В пятой главе описывается разработанная при решающей роли автора Оптическая навигационная система (ОНС) для Пилотируемого транспортного корабля (ПТК) на основе предложенного автором подхода, основанного на сочетании навигационных измерений по горизонту и по контрольным точкам с независимыми измерениями ориентации. Предлагаемый подход обеспечивает автономность и высокую точность навигационных измерений. ОНС отработана на стенде и с использованием реальных космических данных, полученных на околоземных орбитах Комплексом многозональной спутниковой съёмки (КМСС) на КА серии «Метеор-М», а также снимков Луны, выполненных камерами СТС-Л на КА «Луна-25». ОНС сдана Заказчику.

В шестой главе описывается использование в ТСНН методов абсолютной и относительной навигации, а также автономного выбора места посадки. Автор активно участвовал в разработке ТСНН для КА «Фобос-Грунт» и ТСНН-2 для КА «Луна-27». В этих ТСНН автором внедрены упомянутые методы. Показано, что точность вывода КА в район посадки может быть улучшена на порядок по сравнению с использованием только инерциальных систем, а вероятность попадания точки посадки на опасные уклоны – существенно уменьшена по сравнению со случаем посадки «вслепую».

В Заключении автором сформулированы основные результаты работы, даны рекомендации по их использованию, а также рассмотрены перспективы дальнейшей разработки темы.

**Научная новизна.** В настоящее время перед проведением коррекций орбиты положение КА уточняется путём телевизионной съёмки небесных тел с обработкой снимков на Земле, как правило, в ручном режиме по центру яркости тела или по расстоянию между его горизонтом и известной яркой

звездой. Автор предлагает проводить обработку на борту в реальном времени. С этой целью им были разработаны новые методы автоматической обработки получаемых изображений, использующие экономичные вычислительные алгоритмы, учитывающие условия космической съёмки и отражательные характеристики тел Солнечной системы. Для реализации методов потребовалось также создание каталогов контрольных точек на поверхности тел. Получение навигационных измерений в реальном времени повышает надёжность, точность и оперативность расчёта и выполнения манёвров КА, что особенно критично при посадке КА.

Инфракрасные датчики горизонта входят в систему ориентации большинства КА на околоземных орбитах. В дальнем космосе с этой целью могут использоваться телевизионные системы. В автономном режиме навигация по горизонту для определения положения КА до настоящего времени не применялась. Для её реализации может быть использован разработанный автором и отлаженный на стенде новый эффективный в вычислительном отношении метод навигации по горизонту, учитывающий геометрию съёмки, проекционные свойства камеры, положение небесного тела в поле зрения, наличие терминатора, световых помех и позволяющий проводить обработку изображений в реальном времени.

В аэрофотосъёмке восстановление маршрута съёмки по абсолютным и относительным ориентирам является классической задачей фотограмметрии. При этом обработка полученных снимков обычно проводится на Земле. В практике космических полётов данный метод в автономном режиме до настоящего времени не применялся. Для его технической реализации автор решил задачу выбора эффективных и экономичных методов распознавания абсолютных ориентиров (КТ) для реализации на борту в реальном времени с учётом условий наблюдения. При этом также учитывалась зависимость изображений Луны и других безатмосферных небесных тел от направлений освещения и наблюдения. Разработаны специализированные каталоги контрольных точек. Предложено характеризовать КТ многомасштабной

пирамидой их трёхмерных моделей, по которым рассчитываются эталонные изображения КТ в реальном времени для конкретных условий наблюдения, что делает метод инвариантным к условиям наблюдения. Эта инвариантность является существенным преимуществом данного метода перед используемым при посадке американских космических аппаратов методом относительной навигации (Terrain Relative Navigation – TRN) по ранее полученным орбитальным изображениям. Метод TRN применим только в тех условиях, в которых эталонные орбитальные изображения были получены. Кроме того, в этом случае предлагаемый автором метод требует существенно меньше бортовой памяти.

Предложенная автором методика формирования специализированных каталогов КТ на поверхности Луны и других небесных тел для задач автономной оптической навигации является новой. Подобные каталоги до настоящего времени отсутствовали. В отличие от имеющихся каталогов кратеров, которые трудно детектируются в автономном режиме и имеют схожую структуру, каталоги КТ строятся на принципе выбора оптимально локализуемых КТ с уникальной структурой, которые легко детектируются известными методами. Для обеспечения инвариантности к условиям наблюдения контрольные точки описываются многомасштабными пирамидами трёхмерных моделей. На основе данной методики разработан глобальный каталог КТ на поверхности Луны и продемонстрирована возможность построения детальных каталогов на выбранные места посадки по их топографическим моделям.

В настоящее время идёт подготовка к миссии «Луна-26». Предполагается стереокартирование Луны с помощью Лунной стереотопографической камеры (ЛСТК), в разработке которой автор принимал непосредственное участие. Для ЛСТК поставлена приоритетная задача: построение трёхмерных моделей участков подлёта к местам посадки будущих отечественных лунных посадочных миссий с разрешением лучше

10 м, что обеспечит эффективное применение разработанных автором методов автономной оптической навигации.

Предложенный автором метод построения фотометрической карты риска основан на использовании широко применяемого критерия дисперсии яркости изображения. Автор впервые исследовал взаимосвязь этого критерия с характеристиками кратеров и разрешением получаемых изображений и оптимизировал разрешение для детектирования опасных кратеров. Метод был впервые реализован на ТСНН для КА «Фобос-Грунт». В последующие годы альтернативные методы построения карт риска использовались при посадке китайских аппаратов «Чанъэ-3–6» в 2013-2024 гг. на поверхность Луны и зонда «Тяньвэнь-1» на поверхность Марса в 2021 г. В отличие от метода, разработанного автором, эти альтернативные методы использовались только для уклонения от крупных препятствий размером более 1 м. На американских модулях IM-1 и IM-2 (2024-2025 гг.) для выбора места посадки на поверхности Луны использовались априорные орбитальные изображения (в рамках метода TRN), разрешение которых недостаточно для обнаружения камней и опасных уклонов. В результате оба модуля совершили посадку на опасные уклоны, что привело к опрокидыванию модулей.

Автором предложен новый подход к построению систем автономной оптической навигации для работы на околопланетных и окололунных орбитах, а также на трассах перелёта. Этот подход сочетает навигационные измерения по горизонту и по контрольным точкам с использованием одновременных измерений ориентации КА и времени, что обеспечивает как автономность, так и высокую точность навигационных измерений.

Предложенные в диссертации методы и подходы к решению задач автономной оптической навигации получили техническое внедрение в следующие новые оптические навигационные системы, разработанные при ведущей роли автора:

– Телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН) для КА «Фобос-Грунт» с целью навигационных измерений при посадке на Фобос (2011 г.),

– Оптическая навигационная система для Пилотируемого транспортного корабля с целью навигационных измерений на трассе перелёта Земля–Луна и на окололунных орбитах (сдана Заказчику),

– Телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН-2) для КА «Луна-27» с целью навигационных измерений на траектории подлёта к району посадки и выбора безопасного места посадки (в настоящее время находится в стадии разработки).

**Научная и практическая ценность** диссертации. Результаты диссертации представляется целесообразным использовать при разработке навигационных систем космических аппаратов для исследования тел Солнечной системы. Перспективным является сочетание традиционных методов навигации (наземных радиотехнических на трассах перелёта и околопланетных орбитах, инерциальных и альтиметрических методов на траекториях посадки) и разработанных автором методов автономной оптической навигации.

Предложенные автором методы и подходы к построению систем автономной оптической навигации позволяют повысить надёжность и безопасность космических полётов к Луне, Марсу, Венере и малым телам Солнечной системы. Повышение безопасности обретает особую важность при пилотируемых полётах.

Автономное уточнение орбиты в реальном времени особенно важно при выводе КА на околопланетную орбиту и после коррекций орбиты, а также в нештатных ситуациях. Оно может также существенно помочь в реализации баллистически сложных проектов. При полётах к планетам Солнечной системы с выходом на орбиты их искусственных спутников требуется высокая точность выполнения манёвров. В настоящее время для

этой цели используются интерферометрические измерения, проведение которых не всегда возможно и требует больших затрат. Использование автономной оптической навигации, обеспечивающей высокую точность угловых измерений, совместно с наземными измерениями радиальной скорости и наклонной дальности должно обеспечить точность, необходимую для маневрирования при выходе на орбиту искусственного спутника планеты.

Автономная оптическая навигация на этапе основного торможения при посадке КА на поверхности небесных тел позволит радикально повысить точность вывода КА к месту посадки. Это позволит существенно сэкономить топливо (и тем самым увеличить вес научной аппаратуры), а также даст возможность выбирать для посадки районы меньших размеров и в большей степени ориентироваться на научные задачи миссии, а не на наличие больших ровных площадей.

К диссертации можно высказать следующие **замечания**.

1. Автор не провёл исследования влияния абберации на точность измерения направления на контрольную точку.

2. Автор не рассмотрел актуальный вопрос использования автономных бортовых оптических измерений (передаваемых в составе телеметрии) совместно с наземными траекторными измерениями для повышения точности определения параметров орбиты.

3. На с.137 автор вводит термин «Относительная дисперсия яркости изображения», но не даёт его определения.

Наряду с общим положительным впечатлением от диссертационной работы нельзя обойти вниманием отдельные недостатки её **оформления**. Поэтому выскажем ряд замечаний, разбив их на группы.

### Замечания по оформлению основной части диссертации

1. В тексте диссертации десятичный разделитель – запятая, а на рисунках (а также в таблице 2.1 (с. 74)) – точка. Такое смещение недопустимо.

2. С. 89. В формуле (3.13)

$$\lambda_{\min} = \frac{1}{2} \left( \langle I_x^2 \rangle + \langle I_y^2 \rangle - \sqrt{\left( \langle I_x^2 \rangle - \langle I_y^2 \rangle \right)^2 + 4 \langle I_x I_y \rangle^2} \right)$$

имеется досадная опечатка в индексе четвертого члена в правой части. Правильная формула:

$$\lambda_{\min} = \frac{1}{2} \left( \langle I_x^2 \rangle + \langle I_y^2 \rangle - \sqrt{\left( \langle I_x^2 \rangle - \langle I_y^2 \rangle \right)^2 + 4 \langle I_x I_y \rangle^2} \right)$$

3. С. 51, 1-я строка после формулы (2.8). Автор вводит для выражения  $k = a^2/c^2 - 1$  термин «коэффициент эллиптичности». Этот термин уже используется в электрооптике и аэродинамике и определяется в этих областях техники иначе, чем это сделал автор. Лучше этот термин просто убрать из текста. На с. 105 то же выражение  $k = a^2/c^2 - 1$  названо коэффициентом несферичности эллипсоида.

4. С. 190. Допущена опечатка в формуле (5.7)

$$L_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}^2}{A}.$$

Нужно убрать символ возведения в квадрат после квадратного корня:

$$L_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A}.$$

Ниже автор упоминает ««определитель в соотношении (5.7)»». По-видимому, имеется в виду подкоренное выражение.

### Замечания к списку сокращений и условных обозначений

1. «КМОП – комплиментарная структура металл-оксид-волупроводник» заменить на «КМОП (комплементарная структура металл – оксид – полупроводник)»

2. "ЛСТК – лунная стереотопографической камеры в миссии «Луна-26»" заменить на "ЛСТК – лунная стереотопографическая камера в миссии «Луна-26»"
3. "LRO – Lunar Reconnaissance Orbiter" заменить на "LRO – Lunar Reconnaissance Orbiter"
4. "LROC – Lunar Reconnaissance Orbiter Camera" заменить на "LRO – Lunar Reconnaissance Orbiter Camera"
5. "MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer" заменить на "MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer"
6. Следовало ввести в список сокращений:

АКН – априорная карта наклонов поверхности (введено на с. 150);

ИК (введено без расшифровки на с. 191);

МНК (упомянут на с. 49);

ПСТ – подспутниковая точка (введено на с. 161);

ФКР – фотометрическая карта риска (введено на с. 150).

### **Замечания к списку литературы**

(в квадратных скобках указан номер элемента списка)

1. [72] «Forstner W. n the Geometric» заменить на «Forstner W. On the Geometric».
2. [75] Hapke B.W. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2012. 455 p.  
Неверное библиографическое описание книги (неправильно указано количество страниц, не указана двойная пагинация). Должно быть:  
Hapke B.W. Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. – 2nd ed. – Cambridge [et al.] : Cambridge University Press, 2012. – xiv, 513 p.
3. [111] «Selestial» заменить на «Celestial».
4. [116] «Flight testing d real-time» заменить на «Flight testing a real-time».

### **Орфографические и синтаксические ошибки.**

Приведём несколько примеров.

С. 12, 4-я строка сверху. «сознание каталогов» нужно заменить на «создание каталогов».

С. 17, 4-я строка сверху. «...СКО координатных измерений может быть уменьшено...» заменить на «...СКО координатных измерений может быть уменьшена...» в соответствии с расшифровкой, приведённой в списке сокращений: «СКО – среднеквадратическая ошибка».

С. 24, 3-я строка снизу. «программно- алгоритмического» заменить на «программно-алгоритмического».

С. 65 «в интервале от 80 до 90°». В соответствии с п. 8.13 ГОСТ 8.417-2024 такой диапазон должен указываться следующим образом «в интервале от 80° до 90°».

С. 82, 5-я строка снизу. «конструкционную матрицы» заменить на «конструкционную матрицу».

С. 104, 5-я строка сверху. «достаточной количество» заменить на «достаточное количество».

С. 137. После формулы (4.3) перечисляются величины, которые в неё входят. При этом упоминается постоянный коэффициент  $k$ , который в формуле отсутствует.

С. 193, 6-я строка сверху. С. 34 подписи под рис. 1.2, 1.3. Пропущен символ градуса.

Сделанные замечания не снижают научной ценности диссертации, и их следует рассматривать как рекомендации по дальнейшей научной деятельности автора.

Автор работает по тематике диссертации более 40 лет, начиная с проекта «Вега-1,2». Автору принадлежит большой вклад в подготовку телевизионных экспериментов, включая решение навигационных задач, в проектах «Фобос-2», «Фобос-Грунт», «Луна-25», в будущих проектах «Луна-26», «Луна-27» и на Пилотируемом транспортном корабле. Разработанные

при решающем участии автора приборы помогут реализовать отечественные космические проекты исследований Солнечной системы.

Предложенные в диссертации методы и подходы подтверждены результатами математического моделирования, стендовой отработки созданных и разрабатываемых оптических навигационных систем, ТСНН, ТСНН-2, систематической навигационной обработки данных Комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС-2) на КА серии «Метеор-М», обработки реальных космических снимков Луны и Фобоса.

Материал, изложенный в диссертации, соответствует специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия (технические науки)». Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в научных журналах, в том числе рекомендованных ВАК для публикации статей соискателями учёной степени доктора или кандидата наук. Результаты работы докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах. Библиография к диссертации насчитывает 119 источников и достаточно полно представляет публикации по теме исследования.

Представленный выше анализ диссертации позволяет сделать **заключение** о том, что диссертация Б.С. Жукова 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.

Автор сделал доклад по материалам диссертации на расширенном заседании семинара «Механика и управление движением космических аппаратов» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (протокол № 255 от 19 марта 2025 г.). Доклад вызвал большой интерес аудитории и был единодушно одобрен.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании семинара «Механика и управление движением космических аппаратов» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (протокол № 258 от 23 апреля 2025 г.).

Автор сделал доклад по материалам диссертации на Общеинститутском семинаре ИПМ РАН 29 апреля 2025 г. Доклад был одобрен.

И.о. зав. отделом № 5  
«Механика космического полёта  
и управление движением»,  
г.н.с., д.ф.-м.н.

Боровин Геннадий Константинович

г.н.с., д.ф.-м.н.

Грушевский Алексей Васильевич

### **Сведения о ведущей организации**

*Полное наименование:* Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

*Сокращённое наименование:* ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

*Адрес:* 125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская пл., 4.

*Телефон:* +7 (499) 220-72-33. *Факс:* +7 (499) 972-07-37.

*Адрес электронной почты:* office@keldysh.ru. *Сайт:* <http://keldysh.ru>.