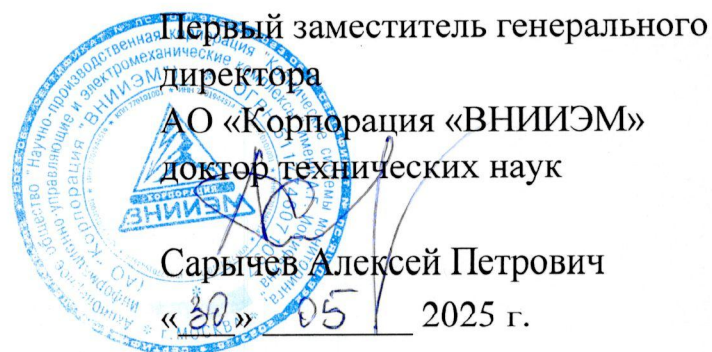


УТВЕРЖДАЮ



Первый заместитель генерального
директора

АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

доктор технических наук

Сарычев Алексей Петрович

«30» 05 2025 г.

Отзыв на автореферат диссертации Жукова Бориса Сергеевича
«Автономная оптическая навигация космических аппаратов при
полетах к луне и малым телам солнечной системы», представленной
на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 1.3.1 - «Физика космоса, астрономия»

Автономная оптическая навигация находит всё более широкое применение в практике космических исследований планет и малых тел Солнечной системы. Автономная оптическая навигация, позволяет определять положение космического аппарата (КА) путём бортовой обработки изображений, получаемых оптическими съёмочными системами, она незаменима в случаях, когда требуется автоматически определять и корректировать орбиту КА в реальном времени. Такая ситуация может возникнуть при выводе КА на околопланетную орбиту и после коррекций орбиты, при пролёте малых тел Солнечной системы, орбита которых недостаточно хорошо известна, и особенно при автоматической посадке КА на поверхность небесных тел для повышения точности вывода КА в район посадки до сотен метров. Кроме того, резервирование автономной оптической навигацией традиционных наземных радиотехнических измерений повышает надёжность и безопасность космических миссий, что особенно важно при пилотируемых полётах. Важной задачей автономной навигации при посадке КА на поверхность небесных тел является также уклонение от препятствий. Перечисленные вопросы рассматриваются в диссертационной работе, что свидетельствует об актуальности темы.

Основные положения, выносимые на защиту, заключаются в следующем.

1. В автономном режиме траекторные измерения по горизонту на околопланетных орбитах и на трассах перелёта 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 перелёта «Земля – Луна».

2. Предлагаемый 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 счёт использования трёхмерных моделей КТ обеспечивается автоматическая адаптация к изменению структуры изображения КТ на поверхности безатмосферных тел при изменении условий освещения. В автономном режиме подобные измерения на околопланетных орбитах до настоящего времени не проводились. Новыми являются также оценки точности этого метода на окололунных орбитах.

3. Автономная оптическая навигация на околопланетных орбитах требует наличия специализированных каталогов КТ, 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.

4. 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 орбитальным изображениям. К этим преимуществам относятся инвариантность к условиям освещения за счёт использования 3D-моделей КТ, учёт 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 подлёта к местам

посадки на Луну при использовании существующих и перспективных топографических моделей Луны.

5. Предложенная автором новая методика комбинирования навигационных измерений по горизонту и по контрольным точкам на околопланетных орбитах, в соответствии с которой положение КА первоначально определяется по горизонту, а далее уточняется по КТ. При этом используются дополнительные измерения ориентации звёздными датчиками (ЗД) и привязка к абсолютному времени. Данная методика позволяет проводить навигационные измерения в полностью автономном режиме без использования дополнительной баллистической информации. Новой является реализующая эту методику концепция полностью автономной оптической навигационной системы для ПТК.

6. 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 - относительной дисперсии яркости площадки. Новыми являются результаты исследования связи этого критерия с характеристиками кратеров, а также оптимизация разрешения съёмочной системы для применения этого критерия. Данный метод был реализован автором в ПАО ТСНН «Фобос-Грунт» в 2011 г. и далее был доработан для учёта 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.

Научная новизна работы в целом не вызывает сомнений. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, судя по автореферату, достаточно обоснованы. Основные положения диссертации достаточно полно отражены в статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ. Автореферат аккуратно оформлен и содержит множество иллюстраций.

Вместе с тем, по автореферату имеются замечания.

1. Значительный интерес представляет стендовая отработка программно-алгоритмического обеспечения оптической навигации, однако из содержания автореферата не ясно, как практически был реализован сам стенд.

2. Автором справедливо отмечено, что для оптимизации алгоритмов оптической навигации необходимо повышение производительности бортовых

процессоров, однако требуемые количественные характеристики не приведены.

Замечания не снижают общего положительного впечатления от работы. Судя по автореферату, диссертация отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, поскольку в работе решена важная научно-техническая задача повышения эффективности автономной оптической навигации. Автор работы, Жуков Борис Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.1 - «Физика космоса, астрономия».

Начальник отдела общих научно-технических исследований

АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,

доктор технических наук, доцент

Захаренко Андрей Борисович.

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

107078, РФ, г. Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1,

тел. (495) 366 26 44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.

30 мая 2025 г.