

"Утверждаю"
Директор ФГБУН «Институт
космических исследований РАН»
Зеленый Лев Матвеевич



20 17 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Институт космических исследований РАН»

117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32,

(495)333-52-12, сайт: www.iki.rssi.ru, E-mail: iki@cosmos.ru

на диссертацию М.Г. Широбокова «Баллистико-навигационные аспекты миссий малых космических аппаратов к Луне и точкам либрации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика

Диссертация Широбокова М.Г. представляет собой законченную научную работу, целью которой является решение задач в области динамики и управления полетом космических аппаратов, актуальность которых в последнее время подтверждается ростом числа проектов космических исследований, предполагающих миссии в окрестности коллинеарных точек либрации L1 и L2 в системах Земля-Луна и Солнце-Земля. Начало выполнения этих миссий было положено еще в 1978 году, когда был успешно запущен аппарат ISEE-3 в окрестность солнечно-земной точки либрации L1. За ним последовал десяток миссий, реализованных в рамках американских, европейских и китайских проектов. К точкам либрации системы Земля-Луна до сих пор было реализовано лишь две миссии: ARTEMIS и Change'5.

Рецензируемая работа адресована, в первую очередь, на исследования проблем космического полета в окрестности точек либрации системы Земля-

Луна. С учетом вновь вернувшегося интереса к изучению Луны, проблематика проектирования полетов в окололунную область получает новые запросы и вызовы. Это вызвано не только задачами баллистики как таковыми, но и новыми инструментами их решения.

Работа в значительной мере посвящена использованию этих инструментов. Речь идет о применении электроракетных двигателей малой тяги и резонансных орбит в окрестности Луны в системе Земля-Луна. Исследования, опирающиеся на эффективное применение разработанных для этих инструментов методов, является, на наш взгляд, новым словом в области динамики полета и управления космическими аппаратами и позволяет значительно повысить эффективность соответствующих операций. В работе это убедительно показано моделированием полета в условиях полного гравитационного поля.

Обращает на себя внимание еще одна существенная сторона работы: в качестве объекта применения полученных результатов предполагаются малые космические аппараты. Эта тенденция в космических исследованиях получает все более выраженный характер. Учитывая, что в работе автора существенным образом используется указанная особенность, позволяющая исследовать применимость предлагаемых решений проблем на примерах аппаратов с совершенно конкретными двигательными установками, можно утверждать, что практическая значимость полученных результатов имеет уровень их непосредственного внедрения.

Диссертация М.Г. Широкова состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Во введении обосновывается актуальность темы исследования, упомянуты независимые результаты анализа рынка малых космических аппаратов, где и отмечена тенденция на увеличение количества запусков такого рода аппаратов. Упоминается современная концепция точек либрации как транспортных узлов для передвижения в Солнечной системе. Эта концепция является главенствующей во всех частях диссертации.

Первая глава описывает необходимые теоретические сведения, которые всюду далее используются в диссертации. Сюда относится преимущественно сведения об ограниченной задаче трех тел и свойствах динамики в окрестности точек либрации. Подробно описаны используемые автором численные методы оптимизации.

Вторая глава посвящена задаче перелета малого космического аппарата с околоземной орбиты на гало-орбиту вокруг точки L_1 Земля-Луна с

использованием двигателя малой тяги. Проведено большое количество расчетов: характеристики траекторий были получены для различных классов малых аппаратов, различных гало-орбит, различных относительных конфигурациях орбиты аппарата, Луны и Солнца. Важнейшим результатом данного исследования явилось создание процедуры расчета последовательных резонансных сближений с Луной. Эта автоматическая процедура позволяет анализировать все практически важные последовательности резонансных сближений и формировать некое терминальное множество, на которое аппарат должен нацеливаться после раскрутки своей орбиты с Земли.

Третья глава продолжает вторую, были найдены окологрунтные орбиты, достижимые малыми аппаратами, снабженными двигателями малой тяги и движущихся по гало-орбитам вокруг точек либрации L_1 и L_2 . Было показано, что малые аппараты могут с малыми затратами топлива перейти на окологрунтные окологрунтные орбиты. В данной главе был приведен также обзор исследований, касающихся перелета между орбитами вокруг различных точек либрации, как в рамках одной системы трех тел, так и разных.

Четвертая глава посвящена навигационному аспекту миссий малых космических аппаратов вокруг точек либрации системы Земля-Луна и Солнце-Земля. Здесь с динамической точки зрения анализируется ситуация, когда в результате сбоя коррекции орбиты аппарат удаляется от номинальной орбиты и встает задача спасения миссии. В диссертации справедливо отмечается, что, согласно опыту уже реализованных проектов, в которых использовались многократные маневры с применением электроракетных двигателей малой тяги и гравитационные маневры, решающее значение имеет гибкость планирования операций. В соответствии с этим тезисом автор провел исследования, результатом которых стали методы планирования и управления, которые позволяют оптимальным образом достигать целей миссии в нештатных ситуациях. Было показано, что часто применявшийся до настоящего времени подход, когда при задержке исполнения маневра новый маневр планируется исходя из предположения необходимости достижения ранее запланированных параметров орбиты, не является эффективным решением. Оптимальное решение достигается модификацией целевых параметров. В работе приводятся конкретные примеры реализации такой стратегии, подтверждающие ее высокую эффективность. Отметим, что разработанная методика не только повышает

эффективность операций, но и позволяет повысить надежность реализации проектов в целом.

В заключении приведены основные выводы работы. В приложение помещены таблицы коэффициентов разложения гало-орбит вокруг точек L1 и L2 системы Земля-Луна в ряды Фурье. Аналогичные таблицы уже встречались в других исследованиях, но только для орбит в системе Солнце-Земля.

Полученные результаты представляют непосредственный практический интерес в части их реализации в проектах текущего планирования.

Автореферат соответствует диссертации.

По работе имеются следующие замечания:

1. Как известно, определение параметров орбитального движения космических аппаратов в случае использования электроракетных двигателей малой тяги имеет свои особенности, которые надо принимать во внимание при планировании операций. В работе ничего не сказано о способах или необходимости учета возникающих при этом требований к выполнению траекторных измерений и их обработке.
2. Очевидно, что рецензируемая работа не может включать в себя решение всех задач управления при полете в окрестности точек либрации. Однако такой ключевой момент, как обеспечение максимального энергоснабжения (означающее выполнение требований по ориентации солнечных батарей) и оптимального направления вектора тяги, может приводить к ограничениям по реализации операций управления орбитальным движением. Поэтому читатель работы вправе ожидать минимальных разъяснений по этому вопросу.

Указанные недостатки не меняют общей положительной оценки диссертационного исследования, главные результаты которого с необходимой полнотой представлены в публикациях автора и правильно отражены в автореферате.

Диссертационная работа выполнена на исключительно высоком научном уровне и полностью удовлетворяет требованиям Положения ВАК (в текущей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика, а ее автор – Широбоков Максим Геннадьевич – заслуживает присуждения ему искомой степени.

Отзыв одобрен и принят на заседании семинара «Механика, управление и информатика» Института космических исследований РАН 18 апреля 2017 года, Протокол № 1.

Отзыв составил:

Кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник

отдела космической динамики и математической обработки информации
Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Институт космических исследований РАН»

117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32, www.iki.rssi.ru,

тел. (495)333-10-78, E-mail: neismont@iki.rssi.ru  Н.А. Эйсмонт

