УТВЕРЖДАЮ
Директор ИКИ РАН
академик РАН _____ А.А. Петрукович
«18» 09 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Проскурякова Александра Игоревича
«Задача оптимизации траектории выведения космического аппарата на целевую орбиту со сбросом отделяемых частей средств выведения в атмосферу Земли»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.7. «Теоретическая механика, динамика машин»

В условиях постоянного совершенствования средств ракетно-космической техники и разработки все более сложных сценариев космических миссий вопросы оптимизации траекторий управляемого движения космических аппаратов (КА) имеют первостепенное значение. Также все более актуальными становятся вопросы, связанные с очисткой околоземного пространства от различных объектов космического мусора как неизбежного следствия непрерывно возрастающего числа выводимых на орбиту и эксплуатируемых КА. В этой связи теоретические и прикладные исследования в области оптимизации траекторий КА, а также по проблеме космического мусора остаются в центре внимания специалистов по космической динамике. Данный аспект обуславливает **актуальность** рассматриваемой диссертационной работы, **целью** которой является решение задачи оптимального управления перелетом КА с низкой круговой орбиты искусственного спутника Земли на геопереходную («целевую») орбиту со сбросом двух ступеней разгонного блока в атмосферу Земли.

Диссертационная работа А.И. Проскурякова состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 167 страниц, работа содержит 18 рисунков, список литературы включает 127 наименований.

Итогом проведенного автором исследования стали следующие **результаты**, сформулированные в виде положений, выносимых на защиту:

1. Постановка задачи оптимизации траектории перелета КА с реактивным двигателем большой ограниченной тяги с опорной низкой круговой орбиты на целевую эллиптическую со сбросом разделяемых ступеней разгонного блока в атмосферу Земли.

2. Реализация методики “лестница задач” — предложение серии вспомогательных задач, последовательное решение которых с использованием продолжения решения по параметру привело к решению целевой задачи.

3. Аналитическое исследование и численное решение задачи в импульсной постановке с фазовыми ограничениями и промежуточными условиями.

4. Численное построение экстремалей Понтрягина — решение краевых задач принципа максимума сложной структуры с промежуточными условиями.

5. Определение параметров траектории перелета и целевой орбиты, при которых дополнительные топливные затраты на сброс двух ступеней разгонного блока в атмосферу малы.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

1. Сформулирована задача оптимального управления перелетом КА с реактивным двигателем большой ограниченной тяги с опорной орбиты искусственного спутника Земли на целевую орбиту со сбросом дополнительного топливного бака и центрального блока разгонного блока в атмосферу Земли. На основе принципа максимума Л.С. Понтрягина нелинейная задача оптимального управления с разрывным управлением и промежуточными условиями сведена к многоточечной краевой задаче, численно построены экстремали и проведен их анализ.

2. На основе известных моделей движения КА в центральном ньютоновском гравитационном поле сформирована и решена серия вспомогательных задач, реализующая методику «лестница задач» и приводящая к решению исходной задачи.

Научные положения, вынесенные на защиту, сделанные в работе выводы и заключения **являются обоснованными и достоверными**. Достоверность полученных результатов основывается на строгой математической постановке задач, применении хорошо изученных методов. Результаты диссертации являются оригинальными и опубликованы в открытой печати.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в том, что задачи оптимального управления движением КА с двигателем большой ограниченной тяги нетривиальны и требуют для своего решения синтеза методов теоретической механики, оптимизации и вычислительной математики. Решение каждой новой сложной (нелинейной, с промежуточными условиями, разрывными управлениями и разрывами фазовых переменных) задачи оптимального управления развивает методику численного решения такого рода задач. Построенные экстремали Понтрягина могут использоваться при отработке методик проверки условий второго порядка локальной оптимальности и условий оптимальности на основе принципа Кротова.

Практическая значимость исследования определяется тем, что полученная в работе информация об оптимальных траекториях выведения КА с низкой круговой орбиты искусственного спутника Земли на целевую геопереходную орбиту со сбросом дополнительного топливного бака и центрального блока разгонного блока в атмосферу Земли может быть использована при создании и оценке реальных систем управления движением центра масс КА с реактивным двигателем большой ограниченной тяги; методика численного решения может быть применена при решении других актуальных и требующих решения оптимизационных задач; построенные экстремали Понтрягина могут использоваться в качестве известных решений при оценке оптимальности траекторий, построенных с использованием простых схем управления и других упрощающих предположений.

Апробация работы обеспечена представлением и обсуждением ее результатов на многочисленных отечественных и международных научно-технических конференциях, научных семинарах.

Следует отметить, что текст диссертации написан на высоком научном уровне, материал изложен логично и последовательно, должным образом оформлен и проиллюстрирован. **Автореферат** диссертации достаточно полно и точно отражает структуру, основное содержание и результаты выполненной автором диссертационной работы.

К диссертационной работе А.И. Проскурякова могут быть высказаны следующие **замечания**:

1. Судя по названию диссертации, целью работы является оптимизация выведения КА на целевую орбиту, включая сброс ступеней разгонного блока в атмосферу; из текста диссертации понятно, что "целевая орбита" – это некоторая промежуточная орбита при выведении КА на геостационарную орбиту (ГСО). На наш взгляд, целью должна быть оптимизация манёвров выведения КА на ГСО, а не на "целевую орбиту". Кроме того, не следовало использовать в названии термин, значение которого не определено. Да и сам термин "целевая орбита" неудачен. Целью всего маневрирования является выведение КА на ГСО, т.е. ГСО является целевой орбитой. А то, что автор называет целевой орбитой, следовало назвать переходной или промежуточной орбитой.
2. Структура диссертации представляется не вполне логичной: сначала рассматриваются апсидальные импульсы (т.е. импульсы в апогеях и перигеях помежуточных орбит, глава 2), а потом доказывается их оптимальность (глава 3). Следовало поступить наоборот.
3. В диссертации повсеместно используется термин "наклон орбиты" вместо общеупотребительного термина "наклонение орбиты".
4. Также крайне неудачным является применение термина "накладные расходы", относящегося скорее к области финансов. Лучше было использовать термин "дополнительные затраты характеристической скорости" или "…топлива".
5. Оптимизация перелёта КА производится в том числе с учётом влияния второй зональной гармоники (или, попросту говоря, сжатия Земли). Однако совершенно очевидно, что влияние сжатия Земли на высокоапогейные орбиты (каковыми являются все переходные орбиты КА при выведении на ГСО) ничтожно мало.
6. Не следовало пояснять, что такое перигей и апогей на стр. 24, это понятия широко известные.
7. Фраза "Решение задачи с простой отстыковкой ступеней хорошо известно [100] и в настоящей работе приводится для сравнения" на стр. 27 не соответствует действительности – ничего подобного в работе [100] (Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Наука, 1997. 320 с) нет и никакое сравнение в диссертации не производится.
8. Вместо тяжеловесной неуклюжей фразы "решение задачи перелета КА с опорной орбиты на целевую эллиптическую без априорного предположения об апсидальности импульсов совпадает с решением аналогичной задачи с априорным предположением об апсидальности импульсов…" на стр. 64 следовало просто написать "оптимальными являются апсидальные манёвры".
9. В главе 3 приводятся результаты для так называемых "импульсов довыведения" величиной 0.5, 1 и 1.5 км/с. Но "импульсами довыведения" (как их определил автор) 0.5 и 1 км/с невозможно вывести КА на ГСО; минимальная величина суммарного "импульса довыведения" достигается при бипараболическом переходе и составляет 1.27 км/с. Таким образом, результат автора является ошибочным.

Однако указанные замечания не затрагивают сути диссертационной работы и не снижают ее общий научный уровень и значимость. Эти замечания могут быть рассмотрены в качестве рекомендаций для проведения дальнейших исследований по данной теме.

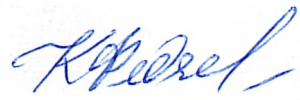
Таким образом, по рассматриваемой диссертационной работе может быть сделано следующее **заключение**:

Диссертационная работа Проскурякова Александра Игоревича **«Задача оптимизации траектории выведения космического аппарата на целевую орбиту со сбросом отделяемых частей средств выведения в атмосферу Земли»** представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи, имеющей важное научное и практическое значение. Данная работа соответствует паспорту специальности 1.1.7. «Теоретическая механика, динамика машин».

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов, содержанию и оформлению рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Проскуряков Александр Игоревич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. «Теоретическая механика, динамика машин».

Результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на семинаре ИКИ РАН «Механика, управление и информатика» им П.Е. Эльясберга 12 сентября 2025 года. Отзыв обсужден и одобрен на заседании Научно-технического совета отдела 58 ИКИ РАН (протокол №2/09-25 от 15 сентября 2025 года).

Ведущий научный сотрудник,
канд. физ.-мат. наук Суханов Александр Александрович

Научный сотрудник,
канд. физ.-мат. наук  Федяев Константин Сергеевич