

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Попандопуло Никиты Андреевича
на тему «Численное моделирование особенностей динамики
окололунных объектов»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация Н.А. Попандопуло посвящена решению одной из актуальных проблем современной небесной механики — исследованию динамической эволюции объектов в окрестности Луны. Планируемый переход к практическому освоению Луны невозможен без использования космических аппаратов, длительное время функционирующих на орбитах вокруг Луны. Задача поиска устойчивых орбит, удовлетворяющих требованиям по времени существования объектов и условиям как по наблюдению поверхности Луны, так и по видимости космических аппаратов с поверхности Луны является важной и **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем диссертации 120 страниц, включая 66 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 85 наименований.

Во **Введении** изложены актуальность и цель работы, решаемые задачи, описаны новизна, достоверность и методы исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены основные публикации по теме диссертации, выполнен краткий анализ результатов, обозначен вклад автора в совместных исследованиях, описаны основные разделы диссертации.

В **первой главе** дается описание разработанной диссертантом численной модели движения систем искусственных спутников Луны.

Введены системы координат, записаны уравнения движения, сформирована модель возмущающих сил, учитывающая несферичность гравитационного потенциала Луны, притяжение Земли и Солнца как точечных масс, влияние светового давления. Дана оценка точности коллокационного интегратора Lobbie, применяемого в численной модели. Описан подход к распараллеливанию вычислений для эффективного использования суперкомпьютеров. Приведена методика исследования влияния вековых и орбитальных резонансов.

Вторая глава посвящена описанию общей структуры возмущений, действующих на искусственный спутник Луны. На основе результатов численного моделирования динамической эволюции объектов на круговых орбитах в окололунном пространстве на интервале 10 лет, получены оценки влияния гравитационного поля Луны, Земли и Солнца на положение искусственного спутника Луны.

В **третьей главе** исследуются особенности динамической эволюции спутников на низких окололунных орбитах. Поскольку для этих орбит возмущения от третьих тел малы, диссертант основное внимание уделяет анализу гравитационных возмущений, обусловленных неоднородным гравитационным полем Луны.

Четвертая глава посвящена анализу динамической эволюции спутников на средних и высоких орбитах. Показано, что для полярных и приполярных орбит наблюдается значительный рост эксцентриситета, приводящий к сокращению времени существования спутников. Исследованы вековые резонансы, включая механизм Лидова–Козаи, вызывающие увеличение эксцентриситета орбит искусственных спутников Луны.

В **пятой главе** исследуется влияние светового давления на орбитальную эволюцию окололунных объектов с отношением площади миделева сечения к массе 0.1 и 1 м²/кг. Показано, что под влиянием возмущений от светового давления в окололунном пространстве формируются дополнительные области, в которых наблюдается рост

эксцентриситета орбит, сокращающий продолжительность существования искусственных спутников Луны. Сделан вывод, что световое давление влияет на резонансную структуру окололунного пространства, приводя к расширению области устойчивого влияния всех рассмотренных вековых резонансов.

Шестая глава посвящена эскизному проектированию лунной глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Для поиска и исследования устойчивой конфигурации лунной ГНСС использованы стационарные решения теории Лидова–Козаи. На основе результатов моделирования выполнен анализ структурной устойчивости системы и получены оценки видимости спутников с поверхности Луны. Определены оптимальные начальные параметры орбит лунной ГНСС, при которых достигаются минимальные возмущения эксцентриситета на интервале 10 лет. Предложенный проект лунной ГНСС обеспечивает высокий уровень покрытия – на значительной части поверхности Луны одновременно наблюдаются 10–11 спутников.

Заключение диссертации посвящено краткому обзору основных полученных результатов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждена публикациями в высокорейтинговых журналах и выступлениями на всероссийских и международных конференциях. Все математические выводы подкреплены ссылками на научные статьи диссертанта. Для сравнения полученных результатов используются опубликованные источники, авторитетность которых не подвергается сомнению. При вычислении возмущений, обусловленных несферичностью гравитационного потенциала Луны, используется современная модель селенопотенциала GRAIL1200. Для определения координат возмущающих тел применяется численная эфемерида больших планет и Луны DE438/LE438.

Основные научные положения, выводы и рекомендации опубликованы автором в научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.013.1 по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Н.А. Попандопуло является первым автором в шести статьях. Во всех совместных статьях вклад автора четко обозначен. По результатам диссертации Н.А. Попандопуло были сделаны устные доклады на всероссийских и международных конференциях.

Научная новизна диссертационной работы Н.А. Попандопуло состоит в следующем:

- проведено численное моделирование движения окололунных объектов в широком диапазоне начальных значений больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит и выполнен анализ влияния различных возмущающих факторов;
- разработана численно-аналитическая методика выявления влияния вековых и орбитальных резонансов на динамическую эволюцию окололунных объектов, применяемая для широкого диапазона эксцентриситетов и наклонов;
- впервые построены карты распределения вековых резонансов, показывающие зоны их значительного влияния на орбитальную эволюцию;
- выполнен комплексный анализ механизма Лидова–Козаи: выявлены все характерные режимы (эффект Лидова–Козаи, слабый и точный резонансы) и установлено, что долгоживущие устойчивые «замороженные» орбиты на средних и больших высотах связаны с захватом в точный резонанс;
- построены карты устойчивости орбит в пространстве аргумента перигеллия, наклона и эксцентриситета с учетом гравитационных возмущений от Земли и Солнца;
- дано объяснение особенностей динамической эволюции низколетящих окололунных объектов;

- исследовано влияние светового давления на орбитальную динамику искусственных спутников Луны и резонансную структуру движения этих объектов;
- предложена эскизная модель лунной ГНСС с оценками структурной устойчивости и видимости спутников системы с поверхности Луны.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы Н.А. Попандопуло заключается в разработке численно-аналитической методики выявления вековых и орбитальных резонансов; проведении масштабного численного моделирования движения окололунных объектов; построении карт окололунного пространства, позволяющих выявлять области с долговременной устойчивостью; предложении модели лунной ГНСС с устойчивой конфигурацией и высоким уровнем покрытия поверхности.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Есть несколько замечаний к выполненному исследованию и его описанию в диссертации.

1. По всему тексту диссертации автор использует термин: «стабильность», в частности, «стабильность орбит». Есть теория устойчивости движения. В чем отличие «стабильности» от «устойчивости»? Или «стабильность» используется как синоним «устойчивости»?
2. Вопрос по главе 3. Исследовалась ли зависимость результатов от начальной эпохи? Изменяются ли начальные значения долготы восходящего узла, соответствующие орбитам с минимальной и максимальной вариацией эксцентриситетов, при выборе другой начальной эпохи?
3. В разделах 4.1.1 (страница 65, строка 2 сверху), 6.3 (страница 86, строки 3–4 сверху) при указании диапазона начальных значений эксцентриситетов и наклонов для численного моделирования желательно было указать шаг сетки вариантов по этим элементам орбиты.

4. Вопрос по главе 5. С чем связан выбор двух значений отношения площади миделева сечения к массе $A/m = 0.1$ и $1 \text{ м}^2/\text{кг}$? У полноразмерных (не кубсатов) космических аппаратов, которые работали на орбите Луны, отношение A/m , как правило, не превосходит $0.04 \text{ м}^2/\text{кг}$.
5. Что означают изолинии на рисунке 6.6? Процент времени, в течение которого для данной точки поверхности над горизонтом находится указанное количество спутников?
6. При эскизном проектировании лунной ГНСС в модель возмущающих сил не включено влияние светового давления. С чем это связано?
7. Предложенная схема построения лунной ГНСС обеспечивает одновременную видимость 10–11 спутников ГНСС в любой точке поверхности Луны. Если принцип навигации в проектируемой системе будет аналогичен современным земным ГНСС, то требуется одновременная видимость не менее 4 спутников. В этом случае предлагаемый состав спутникового сегмента лунной ГНСС представляется избыточным.

Несколько примеров, в которых требуется корректировка стиля изложения.

1. Раздел 1.1, абзац 1, предложение 2: «возмущающие факторы на спутники». Требуется глагол. Например: «возмущающие факторы, действующие на спутники».
2. Страница 20: « $\mathbf{R}_z(\gamma_0)$ — выполняет поворот СК вокруг оси Z на угол W ». Указан угол W , а аргумент матрицы γ_0 .
3. Страница 24, строки 3, 4: в соответствии с общепринятой терминологией «крупных планет» заменить на «больших планет».
4. Страница 49, абзац 2, предложение 2: «влияние гравитационного поля Луны достаточно велико (резонанс 1:27) при незначительном влиянии (резонанс 1:9).» Требуется согласование между частями предложения.
5. Страница 58, абзац 2, предложение 2: «долгота перицентра относительно узла». Требуется уточнение терминологии. Видимо, речь идет об

аргументе перицентра, отсчитываемом от восходящего узла орбиты. Долготы же отсчитываются от оси абсцисс.

6. На рисунках 6.1 следовало бы указать положение наблюдателя: вид с северного полюса, вид в экваториальной плоскости и т.п.
7. Страница 96, абзац 2 снизу, предложение 1: словосочетание «Наиболее оптимальные конфигурации» следует заменить на «Оптимальные конфигурации». Оптимальный – это лучший в своем классе. Дополнительное усиление этого определения излишне.

В тексте диссертации встречаются опечатки. Например:

1. Страница 6, строка 5 снизу: «ориентированная» заменить на «ориентированную».
2. Страница 7, строка 8 сверху: «; Авторы» заменить на «; авторы».
3. Раздел Методология исследования, абзац 2, предложение 1: отсутствует точка.
4. Страница 28: «на рисунках 1.3б–3д» заменить на «на рисунках 1.3б–1.3д».
5. Страница 50, строка 4 сверху: пропущен индекс у резонансного аргумента Φ_4 .
6. Страница 50, абзац 2 снизу, последнее предложение: «превышающие-те».
7. Страница 62, строки 1–2 снизу: «проявляться» заменить на «проявляется».
8. Страница 100, строка 2 снизу: «они оказывает малое влияние» заменить на «они оказывают малое влияние».
9. Список литературы, источник 65: «Тимашкова Е.И.» заменить на «Тимошкова Е.И.».

Вместе с тем, указанные замечания ни в коей мере не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном

университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Попандопуло Никита Андреевич безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
ЗАВЕДУЮЩИЙ КАФЕДРОЙ астрономии, геодезии, экологии и
мониторинга окружающей среды Института естественных наук и математики
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
ВЕДУЩИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК Научной лаборатории
астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и
мониторинга окружающей среды Института естественных наук и математики
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»

КУЗНЕЦОВ Эдуард Дмитриевич

06 октября 2025 г.

Контактные данные:

тел.: 7(343)3899587, e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.03.01 — Астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19,
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕРВОГО
ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА, Институт естественных наук и
математики, кафедра астрономии, геодезии, экологии и мониторинга
окружающей среды
Тел.: 88001005044; e-mail: contact@urfu.ru

Подпись сотрудника УрФУ Э. Д. Кузнецова удостоверяю: