

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

Актуальность рассматриваемой работы обусловлена фундаментальными и практическими аспектами исследования. Современные космические миссии требуют точного координатно-временного обеспечения. Последнее непосредственным образом связано с методами и способами по определению прецизионного положения космического аппарата (КА) в пространстве. Для этого используются как системы внешнего сканирования КА, так и всевозможные датчики для привязки космического аппарата к небесной системе координат. На основе всех этих систем уточняется орбита КА и создаются условия для использования спутниковой группировки, например, в ГНСС. Поэтому работы, направленные на увеличение точности всех систем по определению ориентации космического корабля в пространстве являются востребованными и актуальными. Диссертационное исследование Попандопуло Никиты Андреевича как раз и направлено на решение задач по разработке новых теоретических моделей и подходов для получения точных параметров ориентации КА на основе численного моделирования.

Новизна работы заключается в том, что решены задачи по комплексному исследованию резонансных механизмов в динамике окололунных спутников. При этом выполнен совместный анализ как орбитальных, так и вековых резонансов, проведен учет влияния светового давления на резонансную структуру движения ИСЛ и исследовано их влияния на долговременную эволюцию окололунных орбит. Также были получены новые оценки времени жизни спутников на орбите, определены

оптимальные параметры для долговременных орбит, проведено планирование манёвров и коррекций орбитальных параметров для обеспечения эффективности миссий.

Практическая значимость работы заключается в использовании программного обеспечения, позволяющего моделировать параметры навигационных спутниковых систем с целью определения эффективных орбит искусственных спутников Луны для космических миссий, требующих высокоточное позиционирование для данных спутников. Такой программный комплекс в перспективе позволит решать широкий спектр научно-прикладных задач и задач двойного назначения.

Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов диссертации подтверждается апробацией разработанного программного обеспечения на синтетических модельных данных. Полученные в работе результаты опубликованы в 9 статьях в журналах систем цитирования РИНЦ, Web of Science, Scopus, и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Основные результаты диссертационной работы доложены на 10 международных и всероссийских конференциях.

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. В автореферате указан вклад диссертанта в получение результатов, их анализ и публикацию.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников (85 наименований) и двух приложений. Общий объем работы составляет 120 страниц.

Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации. Автореферат содержит краткое изложение результатов диссертации, основные выводы и результаты проведенного исследования, описание его актуальности и степени новизны.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся

задачи работы, обосновываются научная новизна и практическая значимость работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

Первая Глава посвящена описанию численной модели движения систем ИСЛ, определены используемые системы координат и уравнения движения, рассмотрены модели возмущений гравитационного поля Луны, влияния притяжения Земли, Солнца и светового давления, дан обзор коллокационного интегратора Lobbie и рассмотрена организация вычислительного процесса и элементов программного интерфейса.

Во второй Главе рассматриваются вопросы влияния возмущений на орбитальные параметры ИСЛ. На основе численного моделирования изучена динамика 5000 объектов в окололунном пространстве в течение 10-летнего периода. Исследуется орбитальная устойчивость, в том числе стабильности эксцентриситета в зависимости от величины большой полуоси, наклона плоскости орбиты и долготы восходящего узла. Отдельно изучено влияние орбитальных резонансов, вызванных вариациями гравитационного поля Луны.

Третья Глава посвящена особенностям динамики спутников на низких окололунных орбитах. В основном анализируется влияние гравитационного поля Луны на эксцентриситет и продолжительность жизни спутников на низких орбитах.

Четвертая Глава описывает динамику ИСЛ на средних и высоких орбитах с учетом влияния вековых резонансов на эволюцию орбит, рассмотрен механизм Лидова-Козаи, при котором удалённое массивное тело вызывает долгопериодические изменения наклона и эксцентриситета орбиты другого тела. Дискутируется проблема формирования долгоживущих устойчивых («замороженных») орбит. Как результат найдены оптимальные орбитальные элементы, при которых влияние резонансных явлений на долговременную устойчивость орбит спутников Луны будут минимальными.

В Пятой Главе проведен анализ влияния светового давления на орбитальные элементы окололунных спутников с учетом их парусности. С целью определения устойчивых орбитальных систем рассмотрено влияние светового давления на резонансные составляющие в динамике орбит.

Шестая Глава посвящена численному моделированию движения высокоэллиптических окололунных спутников при различных орбитальных параметрах. Автором диссертации считается, что такие объекты могут стать основой лунной ГНСС. Также анализируется влияние орбитальных элементов на стабильность спутниковых группировок и полноту навигационного покрытия лунной поверхности.

В **Заключение** приведены основные результаты диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

- 1) Во Введении как приоритет развития лунных исследований упоминаются программы космического исследования Луны NASA "Artemis", международный проект Европейского космического агентства "Лунная деревня", программа Массачусетского технологического института и архитектурного агентства SOM и ни слова не говорится о планируемых российских лунных миссиях и программах
- 2) Там же написано (в качестве перспективы) «Обнаружение молекул воды на освещенной Солнцем поверхности Луны SOFIA NASA». Этот факт никоим образом не подтверждает перспективы для создания баз, которые могут обеспечить ресурсы для долгосрочных миссий на поверхность Луны, здесь речь могла бы идти о затененных кратерах на лунных полюсах.
- 3) Там же: «создание стабильных орбит вокруг Луны». Судя по официальным докладам и презентациям космических агентств (Роскосмос, NASA, ESA) в ближайших перспективных планах при создания лунной ГНСС не планируется построения отдельной спутниковой группировки в окололунном пространстве, а считается целесообразным распространение наземной ГНСС, например ГЛОНАСС, на окололунное пространство, учитывая, что создание стабильных орбит вокруг Луны, в первую очередь, связано с большими трудностями из-за вариаций лунного гравитационного поля, а их привязка к селеноцентрической системе координат на данный момент не реализуема из-за недостаточно точного

определения положения опорных реперов и параметров физической либрации Луны.

- 4) Там же: «Несмотря на то, что миссия "Луна-25" не достигла всех своих целей из-за технических сложностей, она предоставила ценные данные для анализа и понимания особенностей окололунной орбиты». Не понятно, о каких ценных данных идет речь?
- 5) Там же: «Эти миссии (речь идет о "Луна-25" и Chang'e) подчеркивают необходимость детального исследования особенностей движения на окололунных орбитах для обеспечения успешного выполнения космических миссий, связанных с посадкой на поверхность Луны, а также создания и использования окололунных орбитальных станций». Никак не обосновано, почему миссии "Луна-25" и Chang'e что то «подчеркивают», выполнение отдельных исследований для них - это неблагодарная задача.
- 6) Во Введении написано «минимизацию возмущений в позиционных параметрах орбит системы в течение срока её активного существования и обеспечения плотной видимости её навигационных спутников на поверхности Луны для широкого спектра исследовательских и прикладных задач?» Это же на стр. 9 «Оптимальная структурная устойчивость и видимость спутников системы на лунной поверхности» и на стр. 10. Наверное все-таки речь идет не «на поверхности Луны», а «с поверхности Луны».
- 7) Там же: в предложении «исследования динамических свойств окололунного пространства» не ясно, какие «динамические свойства окололунного пространства» изучаются и вообще, в чем суть такого исследования.

- 8) Там же: «Они создают необходимые условия для разработки методов и технологий успешного освоения Луны и дальнейшего использования её ресурсов», возникает вопрос - кто создает?
- 9) Там же: «Например, авторы [14] проанализировали влияние наклона на время жизни низколетящих ИСЛ на орбите», о каком наклоне идет речь, из текста не понятно.
- 10) Диссертант очень часто употребляет слово «Авторы», или просто ссылки на определенные работы, желательно было бы упомянуть и ФИО этих авторов, а не только ссылки на их работы.
- 11) На стр. 6 написано «Авторы [27] провели анализ покрытия навигационных созвездий на орбитах Halo и дальних ретроградных орбит (DRO), выявив, что комбинация этих орбит позволяет достичь глобального покрытия Луны, при этом обеспечивая непрерывное покрытие полярных регионов» данный фрагмент сложен для адекватного понимания сути текста.
- 12) Там же написано «программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЛ», возникает вопрос, кто автор данной программы и что она из себя представляет?
- 13) На стр. 9 в выражении «определялось путем анализа силы, представленной в виде составляющих орбитальной системы координат» - не понял заложенного в текст смысла.
- 14) На стр. 10 написано «построены карты устойчивости орбит ИСЛ в пространстве параметров аргумента перигея, наклона и эксцентриситета» - диссертант обязан пояснить суть сказанного, в противном случае, этот набор слов остаётся не понятным.

- 15) На стр. 18 при определении «Инерциальная селеноэкваториальной СК», на наш взгляд, диссертант или перепутал ее с «инерциальной небесной системой координат» (ЕСИ), или им не дано чёткого определение направление координатных осей в рассматриваемой им системе координат.
- 16) Там же «лунный начальный меридиан» - впервые встречаю такой термин
- 17) На стр. 20 в описании «Инерциальной СК относительно орбитальной плоскости Земли» - неясно, что от чего отсчитывается, правда обещается, что она «будет подробно рассмотрена в шестой главе диссертации», чего, в итоге, не оказалось в наличии.
- 18) В параграфе «1.2 Уравнения движения» достаточно сложно ориентироваться, какие системы координат автор использовал из параграфа «1.1 Используемые системы координат». Здесь необходимо ввести хотя бы аббревиатуры для каждой из них.
- 19) На стр. 20 определение «фонд координат крупных планет DE438/LE438» правильно было бы называть «эфемерида DE438/LE438».
- 20) На стр. 28 в выражении «Пересечение диска Солнца с диском Земли имеет общую площадь с пересечением диска Солнца с диском Луны» не понятно, в чем суть этого выражения. В дальнейшем по тексту при упоминаниях о перекрытиях дисков Солнца Земли и Луны приходится только догадываться, с каких положений в пространстве все это наблюдается и анализируется.
- 21) В параграфе 2.1 «Для каждого спутника начальные условия задавались в виде круговой орбиты с определёнными значениями большой полуоси и наклона, при этом

остальные орбитальные параметры принимались равными нулю» и далее то же самое по тексту. Возникает вопрос: так все-таки круговая орбита или эллиптическая? Вообще по всему тексту диссертации присутствует путаница понятий круговой орбиты и эллиптической.

- 22) На стр. 43 записано «В исследовании использовался модельный объект с высотой орбиты 100 км над поверхностью Луны и почти круговой полярной орбитой», в таком случае, почему не рассматривались другие лунные области?
- 23) В параграфе 2.2 не ясно, каким образом производился учет возмущений: подходами, описанными в первой главе или какими-то другими методами? Аналогичный вопрос касается и влияния начальных орбитальных параметров спутников на их срок нахождения на орбите.
- 24) В главе 3 представлены оценки времени жизни объектов на орбите высотой 100 км над лунной поверхностью. Возникает вопрос: каких спутников - любых или, например, приполярных, или других?
- 25) Вначале в Главе 3 рассматриваются спутники на орбите высотой 100 км, далее с большими полуосями от 1800 км до 2500 км, а что в промежутке?
- 26) В параграфе 4.1.2 пишется: «Для анализа результатов численного моделирования и классификации резонансов по степени устойчивости были использованы два подхода: обученная искусственная нейронная сеть [78] и ручной анализ», но не обозначается, где, как и какой подход использовался.
- 27) В главе 5 пишется «Сначала была рассчитана динамика 5180 окололунных объектов». Нами понятно так - это модельные объекты, тогда возникает вопрос, что это за

объекты, почему их 5180, какие они, так как до этого рассматривались точечные ИСЛ?

- 28) При описании на стр. 82 построении нейросети не обозначается, какая архитектура использовалась и на каком материале сеть обучалась, без этого неясны ее свойства и характеристики.
- 29) На стр. 86 написано «существуют области, где амплитуды колебаний эксцентриситетов окололунных орбит не превышают 0.2, а наклонений — 10° » а далее на стр. 89 «Однако колебания наклона до величины, равной 12° , могут существенно повлиять на видимость спутников с поверхности Луны», таким образом возникает вопрос, какие же требуются пределы колебаний наклонов и соблюдается ли данное правило для всех окололунных орбит?
- 30) На стр. 91 написано «На более низких орбитах, наоборот, колебания оказываются минимальными, особенно при определенных начальных условиях, что может быть полезно для создания долговременных стабильных траекторий», но какие основания утверждать, что низкоорбитальные орбиты ИСЛ действительно более устойчивые и при этом востребованны для построения ГНСС?
- 31) Если во введении записано «Шестая глава посвящена эскизному проектированию лунной ГНСС, основанной на высокоэллиптических орбитах и состоящей из 24 спутников», то в самой шестой главе об этих параметрах уже не упоминается и рассматриваются 12 ИСЛ, а также нигде по тексту диссертации нет расшифровки, что, например, 4RM - это четыре радиуса Луны.
- 32) В Заключение, к сожалению, отсутствуют сведения о перспективах дальнейшего развития полученных в

диссертации результатов, о российских организациях и проектах, в которых могли бы использоваться полученные данные, а также правильным было бы в Заключении выразить благодарность как сотрудникам, помогавшим в осуществлении данного диссертационного труда, и ну хотя-бы своему научному руководителю.

Помимо замечаний 1-32 встречаются опечатки и другие технические ошибки. Например:

- 1) На стр. 9 «В качестве метода исследования выступает численно-аналитическое моделирование движения объектов Численное» отсутствует точка
- 2) На стр. 28 записано «возможны четыре случая. ведём вспомогательные параметры», является явной опiskой.
- 3) На стр. 91 в тексте «с увеличением большой полуоси амплитуды колебаний...» желательно было бы указать «большой полуоси орбиты...».

Вместе с тем, указанные замечания 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 заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры астрономии и космической геодезии Института физики
Федерального государственного автономного учреждения высшего
образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
научный руководитель Астрономической обсерватории имени В. П.
Энгельгардта Института физики Федерального государственного
автономного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский)
федеральный университет», главный научный сотрудник Научно-
исследовательского центра превосходства киберфизических систем, IoT и
IoE Института физики Федерального государственного автономного
учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный
университет»

НЕФЕДЬЕВ Юрий Анатольевич

29.09.2025

Контактные данные:

тел.: +7 (843) 221 34 64 , e-mail: yuriy.nefedev@kpfu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.03.01 астрометрия и небесная механика

Адрес места работы: 420008, Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Казанский
(Приволжский) федеральный университет» (ФГАОУ ВО КФУ), Институт
физики, Кафедра астрономии и космической геодезии г. Казань, ул.
Кремлевская, д. 18

Тел.: +7 (843) 292-77-97; e-mail: phys.dep@kpfu.ru

Подпись сотрудника ФГАОУ ВО КФУ Ю. А. Нефедьева удостоверяю: