

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

Актуальность темы

Диссертация **Никиты Андреевича Попандопуло** посвящена изучению движения систем окололунных объектов под влиянием вековых резонансов, когда учитывается воздействие гравитационного поля Луны до высокого порядка, притяжение Земли и Солнца, рассматриваемых как материальные точки, а также влияние светового давления.

Искусственные спутники Луны - это космические аппараты, запущенные с Земли на орбиту вокруг Луны для изучения нашего естественного спутника и его окрестностей. Первый ИСЛ — советская автоматическая станция «Луна-10» (1966 г.). В 1969 г. Армстронг впервые вступил на поверхность Луны. Сейчас интерес к Луне как объекту исследований значительно возрос.

Это объясняется тем, что Луна представляет большой интерес как потенциальный объект для долгосрочного заселения и использования её ресурсов. На поверхности Луны обнаружен водяной лед, это открывает перспективы для создания баз, которые могут обеспечить ресурсы для долгосрочных миссий на Луну, а также поддерживать функционирование пилотируемых и автоматических аппаратов для исследования и освоения окололунного пространства.

Для реализации этих программ важное значение имеет научная сторона программы, которая включает в себя изучение динамики стабильных и опасных орбит в окололунном пространстве. Ценные данные для анализа и

понимания особенностей гравитационного поля Луны и окололунных орбит предоставили в свое время миссии Lunar Prospector, Kaguya, GRAIL, Clementine, а в наше время - китайская миссия Chang'e, доставившая грунт с обратной стороны Луны и российская АМС "Луна-25". Полученные знания о динамике искусственных спутников Луны (ИСЛ) позволят перейти к проектированию глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) вокруг Луны. Прогресс в изучении динамики искусственных небесных тел в пространстве вокруг Луны напрямую связан с освоением огромного массива наблюдательной информации, с необходимостью детально знать фигуру Луны и структуру её гравитационного поля, что и предопределяет актуальность данной диссертационной работы.

Диссертация состоит из Введения, 6 глав, Заключения, списка использованных источников (85 наименований) и двух Приложений, содержит 66 рисунков и 11 таблиц. Общий объем работы составляет 120 страниц.

Во **Введении** показана и обоснована актуальность работы, обозначены цели и задачи исследования, подчеркивается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Первая глава посвящена разработке численной модели движения искусственных спутников Луны. Здесь описываются системы координат, представлены уравнения движения и указаны силы, действующие на ИСЛ, включая возмущения от несферичности гравитационного потенциала Луны до гармоник 50-го порядка, притяжения Земли и Солнца, рассматриваемых как материальные точки, а также возмущения от светового давления.

Интегрирование уравнений движения проводится с использованием коллокационного интегратора Lobbie (Авдюшев, 2022), который обеспечивает скорость и точность расчетов. Точность интегрирования дифференциаль-

ных уравнений движения ИСЛ оценивалась путем варьирования порядка задаваемой точности интегратора и сравнения результата с эталонной орбитой. Для анализа были выбраны три модельных объекта с большой полуосью a , равной 2 тыс., 10 тыс. и 20 тыс. км, при нулевых значениях остальных орбитальных элементов. Прогнозирование движения выполнено на интервале в 1 год. Результаты оценки точности показывают, что для окололунных объектов на средней и высокой орбитах ошибки округления имеют значения на уровне 10^{-1} мм, а на низкой высоте — 10^{-3} мм.

Большое внимание в первой главе отводится описанию методики исследования влияния вековых резонансов на орбитальную динамику. Приводится описание метода распараллеливания вычислительного процесса, что позволяет эффективно использовать суперкомпьютеры для моделирования движения большого числа объектов. Описан интерфейс программного обеспечения, необходимый для работы с моделью.

В Главе 2 приводится описание структуры возмущений, действующих на ИСЛ. Здесь изложены теоретические результаты и алгоритмы, разработанные другими авторами, которые были использованы автором диссертации при получении результатов, представленных в публикациях. Выполнено численное моделирование динамики 5180 объектов на круговых орбитах в окололунном пространстве в течение 10-летнего периода. Оцениваются влияния гравитационного поля Луны, Земли и Солнца на положение ИСЛ.

Одной из основных особенностей в динамике окололунных объектов является увеличение со временем эксцентриситета орбит. В диссертации исследуется, как начальные параметры орбит - большая полуось, наклонение и долгота восходящего узла - воздействуют на орбитальную стабильность. Особое внимание уделено анализу изменений эксцентриситета и времени жизни объектов на орбитах в зависимости от этих параметров. Показано, что большой рост эксцентриситета наблюдается у объектов с начальными наклонениями в диапазоне 60° – 120° и для орбит с большой полуосью, пре-

вышающей 8500 км. Как и следовало ожидать, срок существования объектов на орбите тесно связан с ростом их эксцентриситета.

Выполнен численный анализ влияния некоторых орбитальных резонансов на динамику искусственных спутников Луны. Рассмотрены резонансы 1:9 и 1:27, расположенные в областях окололунного пространства с различной интенсивностью воздействия гравитационного поля Луны. Резонанс 1:9 - это $a = 20443$ км, а резонанс 1:27 - $a = 9828$ км. Установлено, что резонансное взаимодействие носит локальный характер, и в целом оказывает слабое влияние на долгосрочную эволюцию орбит. Показано, что в гравитационном поле Луны существует по крайней мере 8 аномалий, способных вызывать резонансные эффекты в динамике окололунных объектов. Выявлено, что признаки устойчивой либрации критических аргументов наблюдаются лишь для двух компонент резонансных мультиплетов — $\Phi 1$ и $\Phi 4$. При этом влияние компоненты $\Phi 1$ сопровождается появлением долгопериодических вариаций большой полуоси, тогда как воздействие компоненты $\Phi 4$ выражается в слабом вековом увеличении среднего значения эксцентриситета без существенных изменений других орбитальных элементов. Остальные компоненты мультиплетов признаков устойчивого резонансного поведения не демонстрируют.

Третья глава посвящена изучению особенностей динамики спутников на низких окололунных орбитах. Показано, что доминирующее влияние на движение объектов на малых высотах оказывает гравитационное поле самой Луны.

Ранее проведенные исследования (Song et al., 2010; Gupta et al., 2011), а также данные, представленные в главе 2, свидетельствуют о том, что большинство окололунных объектов на низких орбитах обладают коротким временем существования. Малый срок существования ИСЛ на низких орбитах как раз и связан с ростом эксцентриситета.

Для определения причины, вызывающей такие изменения в эксцентриситете, были рассмотрены вариации гравитационной силы Луны, действу-

ющей на объекты на низких высотах в орбитальной системе координат. Результаты сравниваются с воздействием гравитационного поля Луны на три составляющих силы: радиальную (S), трансверсальную (T) и бинормальную (W) в зависимости от наклона орбиты. Сопоставление графиков показывает, что сила, действующая вдоль радиальной составляющей, визуальнo коррелирует с графиком изменения эксцентриситета. При этом воздействие по радиальной составляющей превосходит проекции силы по трансверсальной и бинормальной составляющим на два порядка.

В *четвёртой главе* диссертации изложены результаты анализа динамики спутников, движущихся на средних и высоких орбитах. Показано, что окололунные объекты на этих орбитах демонстрируют значительный рост эксцентриситета и сокращение времени существования в полярных и приполярных зонах. Известно, что одной из ключевых особенностей воздействия вековых резонансов является увеличение эксцентриситета орбит околопланетных объектов. В связи с этим в диссертации было выполнено углублённое исследование влияния вековых резонансов на динамику ИСЛ.

Было рассмотрено влияние вековых апсидально-нодальных резонансов 1–4 порядков и полувековых резонансов со средним движением третьих тел 2–5 порядков. Анализ влияния вековых резонансов проводился на основе динамики аргумента возмущающей функции: если наблюдается либрация аргумента, резонанс считается устойчивым; сочетание либрации и циркуляции указывает на неустойчивый резонанс, а циркуляция свидетельствует об отсутствии резонанса.

По результатам численного моделирования построены карты распределения апсидально-нодальных вековых резонансов. Для анализа построена карта в плоскости $\{i, a\}$, показывающая число одновременно действующих устойчивых и неустойчивых резонансов: на рисунке 5а выделено влияние неустойчивых резонансов, на рисунке 5б — области либрации резонансных аргументов, на рисунке 5в — их совокупное воздействие. Эти данные де-

монстрируют, что зоны вековых резонансов охватывают значительную часть окололунного орбитального пространства, что подчёркивает их ключевую роль в эволюции спутниковых орбит.

Особое внимание уделено механизму Лидова–Козаи, имеющего резонансную природу. Механизм Лидова–Козаи является важной характеристикой иерархических тройных систем, где одно из тел (внешнее возмущающее) находится на большом расстоянии от двух других (центрального и внутреннего возмущаемого тела). При выполнении определенных условий орбитальное движение возмущаемого (среднего) тела характеризуется существенными вариациями эксцентриситета и наклона (эффект Лидова–Козаи), а также изменением аргумента перицентра (резонанс Лидова–Козаи).

Если внешнее возмущающее тело движется по круговой орбите, то усредненные уравнения движения возмущаемого тела содержат сохраняющуюся величину — третью компоненту орбитального углового момента, известную как интеграл Моисеева–Лидова–Козаи $c_1 = \sqrt{(1 - e^2)} \cos i = \text{const.}$

Влияние резонанса Лидова–Козаи определяется наклоном орбиты объекта относительно орбиты возмущающего тела. Согласно теории (Lidov, 1962; Вашковьяк, 2016), острый резонанс, приводящий к быстрому увеличению эксцентриситета, возникает, когда долгота перицентра относительно узла $\omega = \pm 90^\circ$, значение интеграла c_1 приближается к нулю, а интеграл

Лидова $c_2 = \left(\frac{2}{5} - \sin^2 \omega \sin^2 i \right) e^2$ имеет отрицательное значение.

Методом численного моделирования были проанализированы различные типы проявления механизма Лидова–Козаи. На рисунке 6 представлены фазовые траектории в плоскости "аргумент перицентра — эксцентриситет" в зависимости от постоянных c_1 и c_2 , позволяющие выделить три характерных формы проявления механизма Лидова–Козаи: сам эффект, резонанс и точный резонанс.

Несмотря на то что внешнее тело может вызывать значительные возмущения в орбитальных элементах внутреннего тела, в теории Лидова–Козаи имеются стационарные решения

$$a = \text{const}, \quad \omega = \pm 90^\circ, \quad 1 - e^2 = c_1 \sqrt{5/3}, \quad \cos^2 i = c_1 \sqrt{3/5}.$$

При начальных значениях орбитальных элементов, близких к стационарным решениям, соответствующие орбитальные параметры демонстрируют либрационное поведение. Ввиду схожести с либрационными возмущениями, возникающими при орбитальных резонансах (рисунок 6), это явление называют резонансом Лидова–Козаи, а стационарные решения — точным резонансом Лидова–Козаи.

На основе численного эксперимента была проведена оценка области, в которой проявляется резонанс типа Лидова–Козаи для окололунных спутников (рисунок 7а). Результаты, приведенные на рисунке 7а, показывают, что область влияния резонанса Лидова–Козаи расширяется вдоль большой полуоси примерно до 6000 км. При этом с увеличением высоты зона устойчивого влияния резонанса остается в диапазоне наклонений от 60° до 105° . Анализ динамики ИСЛ также показал, что для большинства из них характерно проявление эффекта Лидова–Козаи, граница этой области выделена красной линией.

Важно отметить, что область проявления эффекта Лидова–Козаи имеет заметную корреляцию с зонами окололунного пространства, в которых наблюдается значительный рост эксцентриситета (рисунок 7б). Поэтому причиной роста эксцентриситета на средних и больших высотах окололунного пространства главным образом являются проявления механизма Лидова–Козаи.

Дополнительно отметим, что вне области, обведённой на рисунке 7а красным контуром, механизм Лидова–Козаи может проявляться как постепенный захват в резонанс при довольно слабом эффекте Лидова–Козаи. Пример такого воздействия представлен на рисунке 8. Отметим, что на графиках эволюции орбитальных элементов (рисунок 8а) между наклоном и эксцентрисите-

том отсутствует взаимосвязь, присущая проявлению эффекта Лидова–Козаи. Однако на упомянутом рисунке наблюдается небольшой рост эксцентриситета орбиты вследствие влияния резонанса типа Лидова–Козаи, наличие которого подтверждается поведением резонансных характеристик, представленных на рисунках 8б и 8в.

Эффект Лидова–Козаи проявляется при циркуляции аргумента перигентра и сопровождается взаимосвязанными колебаниями эксцентриситета и наклона. Интересно отметить, что в проявлении эффекта типа Лидова–Козаи присутствуют свои особенности при учёте несферичности Луны. Как показано на рисунке 9 влияние сжатия Луны частично подавляет чистый эффект типа Лидова–Козаи (графики, отмеченные зелёным цветом). При этом если в движении ИСЛ учитывается полное гравитационное поле Луны, то эффект типа Лидова–Козаи проявляется в его динамике раньше.

Точный резонанс Лидова–Козаи наблюдается вблизи стационарных решений, где орбитальные параметры сохраняются практически неизменными, обеспечивая наибольшую устойчивость орбиты. Пример орбитальной эволюции, демонстрирующий результат влияния точного резонанса Лидова–Козаи приведён на рисунке 10.

Пятая глава связана с исследованием влияния давления света на орбитальную динамику окололунных объектов. Рассматриваются численные модели, учитывающие воздействие светового давления на орбиты спутников с параметрами парусности 0.1 и 1 м²/кг. Проведен анализ изменений орбитальных параметров, включая рост эксцентриситета и сокращение времени существования орбит, вызванное дополнительным влиянием светового давления. Результаты представлены на рисунке 11.

Результаты на рисунке 11 демонстрируют, что воздействие светового давления приводит к увеличению эксцентриситетов орбит на определенных участках окололунного пространства, что в свою очередь сокращает продолжительность жизни ИСЛ.

Для объяснения причины дополнительного роста эксцентриситета из-за влияния светового давления был применён подход, описанный в третьей главе для изучения динамики низколетящих ИСЛ. На рисунке 12 представлены результаты вклада светового давления в движение окололунных объектов в орбитальной системе координат.

Сравнение рисунков 11 и 12 показывает наличие корреляции между ними. Появление дополнительных областей в окололунном пространстве, где отмечаются рост эксцентриситета и сокращение времени жизни, объясняется влиянием светового давления, действующего преимущественно вдоль радиального направления.

Дополнительно было обнаружено воздействие светового давления на резонансную структуру движения ИСЛ. Резонансные карты, построенные в главе 4, были дополнены результатами с учётом влияния светового давления для двух вариантов парусности. Основным следствием воздействия светового давления на орбитальную динамику окололунных объектов является расширение области устойчивого влияния вековых резонансов. Данный вывод справедлив для всех рассмотренных вековых резонансов, пример одного такого случая приведён на рисунке 13.

Шестая глава посвящена эскизному проектированию лунной ГНСС. Как было описано в главе 4, в теории Лидова–Козаи выделяют стационарные решения, позволяющие минимизировать колебания орбитальных параметров и обеспечивающие долгосрочную стабильность орбиты. Данные знания были использованы для поиска и исследования устойчивой конфигурации лунной ГНСС.

Для достижения этой цели была разработана система, включающая три высокоэллиптические орбиты, которые обслуживают северное полушарие Луны, и три орбиты, предназначенные для южного полушария. Спутники лунной ГНСС равномерно распределены по средней аномалии на каждой орбите, что подробно представлено в таблице 1.

Для поиска устойчивой конфигурации лунной ГНСС была выполнена серия расчетов эфемерид на 10-летний временной интервал для каждой орбиты спутниковой группировки, при этом варьировались начальные орбитальные элементы: $i \in [40^\circ, 65^\circ]$, $e \in [0.0, 0.7]$ и $a/R_M \in \{4, 6, 8, 10, 12\}$. На рисунке 14 представлен пример зависимости максимальных амплитуд колебаний эксцентриситета (Δe_{\max}) и наклона (Δi_{\max}) от параметров i , e и a . Для улучшения визуализации оценок структурной устойчивости ГНСС эти графики были получены путем осреднения величин (Δe_{\max}) и (Δi_{\max}) по шести орбитам лунной ГНСС.

В ходе исследования видимости окололунных навигационных спутников была проведена оценка покрытия поверхности Луны спутниковой системой. Для иллюстрации результатов были построены карты, позволяющие визуализировать покрытие лунной поверхности системой спутников и оценить плотность навигационного покрытия.

Учитывая, что спутники ГНСС равномерно распределены на орбитах и их движение приводит к повторению конфигурации через $1/4$ орбитального периода, были **осреднены** карты видимости за данный период. Пример такой карты приведён на рисунке 15. На данном примере видно, что примерно с 70% поверхности Луны одновременно наблюдают в среднем 9–10 навигационных спутников.

Чтобы получить полное представление о возможностях видимости навигационной системы, было выполнено численное моделирование для ряда других конфигураций орбит ГНСС, варьируя значения орбитальных параметров a , e и i в тех же диапазонах, что и в результатах, полученных для исследования структурной устойчивости ГНСС. Пример оценки видимости представлен на рисунке 16 для большой полуоси, равной $8R_M$.

Путём экспериментального подбора среди результатов структурной устойчивости и оценок видимости были определены оптимальные начальные параметры орбит лунной ГНСС: $a = 8R_M$, $e = 0.7$ и $i = 58^\circ$, при которых достигаются минимальные возмущения эксцентриситета за десятилетний пери-

од (таблица 2). Карта видимости для этой навигационной системы представлена на рисунке 17.

Данные таблицы 2 демонстрируют, что даже при больших значениях наклонения и эксцентриситета колебания остаются в допустимых пределах, что подтверждает устойчивость предложенной орбитальной конфигурации. Колебания наклонения Δi_{\max} варьируются от 8.76° до 13.85° , что также указывает на приемлемый уровень стабильности орбит. Как видно из карты видимости на рисунке 17, для оптимальной конфигурации лунной ГНСС на значительной части поверхности Луны одновременно наблюдаются 10 или 11 навигационных спутников, что обеспечивает высокий уровень покрытия.

В **Заключении** перечислены основные результаты, представленные в диссертационной работе.

1. Разработана численная модель движения систем ИСЛ, учитывающая воздействие гравитационного поля Луны до высокого порядка и степени, притяжение Земли и Солнца, рассматриваемых как материальные точки, а также влияние светового давления. Модель основана на численном решении системы ДУ второго порядка с использованием интегратора Lobbie, обеспечивающего высокую точность и адаптивность при сложных условиях движения спутников. ПМО разработано для среды параллельных вычислений, что существенно повышает быстродействие вычислительного процесса за счёт одновременного моделирования движения нескольких ИСЛ. Разработан программный интерфейс, который упрощает взаимодействие пользователя с программой.

2. Реализована методика анализа вековых резонансов, основанная на изучении поведения аргументов резонансных соотношений, что позволяет более детально исследовать влияние вековых резонансов на орбитальную динамику ИСЛ.

3. Выполнено тестирование модели, подтвердившее её соответствие современным требованиям точности и эффективности. Кроме того, проведе-

но сравнение с результатами других авторов, что позволило убедиться в достоверности получаемых с помощью данного ПМО результатов.

4. Проведено моделирование динамики большого количества объектов в течение 10-летнего периода. Начальные условия задавались в виде круговых орбит с уникальными значениями большой полуоси и наклона.

5. Выполнен общий анализ влияния гравитационного поля Луны, а также притяжения от Земли и Солнца на ИСЛ, который показал, что вариации начальных значений большой полуоси и наклона орбит существенно влияют на прогнозируемые положения окололунных объектов. Так учёт полного гравитационного поля Луны приводит к резкому сокращению времени жизни объектов на низких орбитах вследствие роста эксцентриситетов орбит. Установлено, что при наклонах 60° – 120° и больших полуосях свыше 8500 км эволюция эксцентриситетов орбит достигает величин, приводящих к значительному сокращению времени жизни спутников на их орбитах. Выявлено также, что начальные значения долгот восходящего узла существенно влияют на орбитальную эволюцию, определяя долгосрочную стабильность орбит.

6. Выявлено в гравитационном поле Луны 8 аномальных зон, способных генерировать резонансы в движении ИСЛ. На основе численного анализа высокопорядковых орбитальных резонансов (1:9 и 1:27) установлено, что на динамику ИСЛ они оказывают малое влияние. Компоненты Φ_1 и Φ_4 резонансных мультиплетов демонстрируют устойчивые признаки резонансного взаимодействия, приводя к незначительным долгопериодическим вариациям большой полуоси и слабому вековому росту эксцентриситета орбит. Остальные компоненты резонансных мультиплетов устойчивого влияния не оказывают.

7. Исследованы особенности динамики объектов на низких орбитах в окололунном пространстве. Установлено, что основным фактором, влияющим на динамику спутников, является составляющая полного гравита-

ционного поля Луны вдоль радиального направления, которая приводит к значительному росту эксцентриситета орбит. Выявлены диапазоны наклонов и больших полуосей, при которых воздействие гравитационного поля наиболее сильно влияет на эволюцию орбитальных параметров, что приводит к сближению ИСЛ с лунной поверхностью. Проведён также анализ влияния начальной долготы восходящего узла на орбитальную эволюцию ИСЛ, показано, что её выбор оказывает незначительное влияние на динамику низкоорбитальных спутников.

8. Рассмотрена динамика объектов в средневысотном и высокоорбитальном сегментах окололунного пространства. Установлено, что влияние вековых резонансов, и прежде всего механизма Лидова–Козаи, имеющего резонансную природу, очень существенно в этой области окололунного пространства. Показано, что полученные в рамках осредненной задачи трёх тел, особенности действия механизма Лидова–Козаи актуальны и при учёте всех гравитационных возмущений в движении окололунных объектов. Численное моделирование даёт все три проявления механизма Лидова–Козаи: слабый резонанс, который приводит к не катастрофическому росту эксцентриситетов орбит; точный резонанс или стационарное решение, который стабилизирует орбиту на больших интервалах времени, и эффект Лидова–Козаи, представляющий собой взаимосвязанные колебания эксцентриситетов и наклонов орбит с большими амплитудами. Проведён анализ влияния вековых резонансов и построены карты зон наложения их устойчивого и неустойчивого влияния в окололунном пространстве. Установлено, что области наложения резонансов коррелируют с зонами значительного роста эксцентриситетов орбит, что приводит к сокращению времени жизни спутников. Полученные результаты позволяют определить орбитальные параметры, которые минимизируют рост эксцентриситета и увеличивают стабильность орбит.

9. Рассмотрено влияние СД на орбитальную динамику окололунных объектов. В качестве параметров парусности были использованы значения

0.1 и 1 м²/кг. Проведён анализ роста эксцентриситетов орбит и сокращения времени их существования под воздействием СД. Установлено, что рост эксцентриситета усиливается с увеличением парусности на всех высотах орбит, включая низкие, что приводит к расширению зон с коротким временем жизни. При учёте СД наблюдаются значительные изменения динамики объектов: появляются области роста эксцентриситета, обусловленные дополнительным вкладом СД в радиальную составляющую силы, действующей на ИСЛ. Проведено исследование влияния СД на резонансную структуру, показавшее расширение областей влияния вековых апсидально-нодальных резонансов и возникновение новых зон их наложения.

10. Проведено эскизное проектирование лунной ГНСС, основанной на высокоэллиптических орбитах. Для поиска оптимальной конфигурации навигационной системы были выполнены численные моделирования движения на множестве орбит с варьированием больших полуосей (4–12 радиусов Луны), эксцентриситетов (до 0.7) и наклонений (40°–65°). Для оценки стабильности орбит построены карты устойчивости в параметрическом пространстве аргумента перигея, наклона и эксцентриситета, на которых выделены области долговременной стабильности орбит. Дополнительно проведён анализ видимости спутников: составлены карты покрытия поверхности Луны, подтвердившие, что выбранная конфигурация лунной навигационной системы обеспечивает высокий уровень охвата. В результате получена оптимальная конфигурация, включающая шесть орбит с позиционными параметрами: большая полуось — 8 радиусов Луны, эксцентриситет — 0.7, наклонение — 58°. Полученная конфигурация обеспечивает структурную устойчивость орбит в течение 10 лет и плотное навигационное покрытие с одновременной видимостью в среднем 10–11 спутников ГНСС на всей поверхности Луны.

Полученные результаты вносят значительный вклад в понимание динамики окололунных объектов, включая особенности влияния гравитацион-

ного поля Луны, притяжения третьих тел, СД, и резонансных явлений на эволюцию орбитальных параметров. Разработанные ПМО и методы анализа позволяют более детально изучить особенности динамики ИСЛ. Полученные результаты создают основу для проектирования высокоэффективных лунных навигационных систем, обеспечивающих стабильное покрытие поверхности Луны и минимизацию затрат на орбитальную коррекцию за счет структурной устойчивости ГНСС.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Все выносимые на защиту результаты являются новыми, опубликованы в научной печати и прошли апробацию, подтвердившую их значимость и новизну. Новизна диссертационного исследования не вызывает сомнений.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- проведено численное моделирование движения большого числа окололунных объектов в диапазонах большой полуоси от 1838 км до 26070 км и наклона от 0° до 180° на круговых и эллиптических орбитах окололунного орбитального пространства с целью анализа влияния на них различных возмущающих факторов;
- разработана численно-аналитическая методика выявления влияния вековых и орбитальных резонансов на динамику окололунных объектов, позволяющая эффективно исследовать объекты с различными эксцентриситетами и наклонами орбит;
- впервые построены карты распределения вековых резонансов в окололунном пространстве, показывающие зоны значительного влияния резонансов на орбитальную эволюцию лунных спутников;
- впервые выполнен комплексный анализ влияния механизма Лидова–Козаи на динамику окололунных спутников: выявлены все характерные режимы проявления этого механизма (эффект Лидова–Козаи, слабый резо-

нанс и точный резонанс) и установлено, что существование долгоживущих устойчивых “замороженных” орбит на средних и больших высотах обусловлено захватом ИСЛ в точный резонанс Лидова–Козаи;

- построены карты устойчивости орбит ИСЛ в пространстве параметров аргумента перицентра, наклона и эксцентриситета (с учётом гравитационных возмущений от Земли и Солнца), позволяющие наглядно выявить области долговременной стабильности окололунных орбит;

- дано объяснение особенностей динамики низколетящих окололунных объектов;

- исследовано влияние СД на орбитальную динамику ИСЛ и резонансную структуру движения этих объектов;

- представлена эскизная модель лунной ГНСС с оценками структурной устойчивости и видимости системы на поверхности Луны.

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации влияние Земли и Солнца на спутники Луны рассматривается лишь в самом простом варианте - как притяжение шара или материальной точки. Но представляет интерес учесть влияние на орбиты ИСЛ и от полярного сжатия Земли. Справка: как известно (Кондратьев, 2012), полярное сжатие Земли оказывает влияние даже на очень малую физическую либрацию Луны.
2. Кроме *пробных* орбит, в диссертации желательно было бы рассмотреть движение и *реальных* объектов (NASA, Индия, Китай), населяющих ныне окололунное космическое пространство.
3. Для полноты исследования желательно было рассмотреть также влияние резонансов в движении ИСЛ со средним движением Солнца.
4. В будущем важным также является исследование движения ИСЛ в окрестности точек либрации в системе «Солнце-Земля-Луна»
Есть и ряд мелких замечаний.

- В названии диссертации «**Численное моделирование особенностей динамики окологлунных объектов**» слово **особенностей** является лишним. Более удачно автор формулирует задачу в названиях третьей и четвертой глав, где пишет - исследование динамической структуры окологлунного орбитального пространства и **особенностей** движения окологлунных объектов.
- Вместо слов «Механизм Лидова–Козаи является **важной характеристикой** иерархических тройных систем» точнее сказать: механизм Лидова–Козаи является **важным инструментом в исследовании** иерархических тройных систем.
- Во фразе «Учитывая выше сказанное,...» второе и третье слова надо писать вместе.
- В тексте встречаются и другие опечатки. Так, на стр. 28 Автореферата читаем «были **осредненный** карты» вместо правильного «были **осреднены** карты».

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, профессор,
профессор кафедры небесной механики, астрометрии и гравиметрии Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», ведущий научный сотрудник отдела небесной механики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», ведущий научный сотрудник лаборатории динамики Галактики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук

Кондратьев Борис Петрович

10 октября 2025 года

Контактные данные:

тел.: 7(495)939 26-50, e-mail: work@boris-kondratyev.ru.

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

Адрес места работы:

19234, Москва, Университетский проспект, д. 13, ГАИШ МГУ

Телефон: +74959392046, e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ Б. П. Кондратьева удостоверяю:

начальник отдела канцелярии

Л. Н. Новикова