

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Загидуллина Артура Александровича
на тему «Разработка численной теории
физической либрации для модели упругой Луны»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация А.А. Загидуллина посвящена решению одной из фундаментальных задач небесной механики — теории физической либрации Луны. Изучение неравномерности вращения лунного тела позволяет с одной стороны раскрыть его внутреннюю структуру, ответить на вопросы, связанные со сценариями формирования системы Земля — Луна, с другой стороны, Луна является самым близким к Земле небесным телом и космические полеты к нему в гравитационном поле невозможны без знаний о вращении Луны. Планируемое Роскосмосом изучение Луны с помощью космических аппаратов позволит повысить точность моделирования динамики Луны, используя сейсмические методы и лазерную локацию Луны, но основой всех этих экспериментов останется теоретическая часть, связанная с селенодезическими динамическими параметрами. С этой точки зрения работы по исследованию физической либрации Луны и ее внутреннего строения являются важными и **актуальными**.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 137 страниц, включая 31 рисунок и 12 таблиц. В списке литературы 109 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 обзор литературы по теории физической либрации Луны. Проанализированы работы Н.К. Петровой по аналитической теории в рамках главной проблемы, Б.П. Кондратьева о разработке оригинального метода решения задачи физической либрации, Ю.В. Баркина по аналитической теории физической либрации для двухслойной модели Луны. Приведены результаты сравнения аналитической теории Ю.В. Баркина с полуэмпирической теорией Williams. Также рассмотрена численная теория Williams и рассмотрены вопросы, связанные с лунной динамикой.

Вторая глава посвящена решению главной проблемы физической либрации Луны. Описана сущность используемой модели. Приводятся аргументы в ее пользу: 1) твердотельная структура лунного тела, 2) независимость вращательного и орбитального движения. Дано обоснование необходимости решения задачи трех тел даже в первом приближении. Построены гамильтоновы уравнения для описания вращательного движения лунного тела. В качестве канонических переменных выбраны самолетные углы, позволяющие перейти от инерциальной системы координат, в качестве которой была выбрана эклиптическая система координат, к вращающейся системе отсчета, с осями, совпадающими с главными осями инерции Луны. Потенциал гравитационного поля Луны раскладывается в ряд по сферическим функциям. Возмущающее тело считается точечным. Подробно описана используемая аналитическая теория движения Луны. Рассмотрены особенности учета притяжения со стороны Солнца. Система дифференциальных уравнений первого порядка интегрируется численно методом Рунге–Куты 10-го порядка.

В третьей главе рассматриваются вопросы о начальных данных Коши при использовании динамической эфемериды DE421, верификации алгоритмов извлечения параметров либрации Луны и параметров орбит тел

Солнечной системы. Диссертант обосновывает использование в исследовании численной эфемериды DE421, приводит алгоритм перевода углов Эйлера, заложенных в DE421, в самолетные углы и, соответственно, в сопряженные импульсы.

Четвертая глава посвящена уточненной модели физической либрации, в которой: 1) используется орбита Луны, реализованная в DE421, 2) учитывается 4-я гармоника селенопотенциала при построении разложения гравитационного поля Луны, 3) рассматривается прямое гравитационное взаимодействие с планетами Солнечной системы, 4) принимается во внимание упругость лунного тела путем учета изменения коэффициентов Стокса второго порядка и коэффициентов тензора инерции. Влияние приливных членов учитывается по методике Williams, суть которой состоит во введении усредненных слагаемых от прилива в коэффициенты Стокса. Этот подход позволил снизить на порядок амплитуду остаточных разностей в либрации по широте при переходе к численной эфемериде DE421. Методика учета влияния приливных сил реализована в первом приближении и отвечает предъявляемым требованиям. В конце главы проведено обсуждение направлений совершенствования построенной теории физической либрации путем учета временной задержки в приливном отклике Луны и влияния лунного ядра.

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 расчете орбитальных характеристик

используется принятая международным астрономическим сообществом численная эфемерида Луны DE421. Выполненные численные расчеты подтверждены полученными свидетельствами в Роспатенте о регистрации программ для ЭВМ. Диссертант принимал активное участие в российских и международных конференциях.

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, а именно: «Астрономический журнал», «Advances in Space Research», «Meteoritics and Planetary Science». По результатам диссертации А.А. Загидуллиным были сделаны устные доклады на всероссийских и международных конференциях, включая Всероссийскую астрономическую конференцию 2021 года (ГАИШ МГУ), Третью астрометрическую конференцию-школу «Астрометрия вчера, сегодня, завтра», Всероссийскую астрометрическую конференцию «Пулково-2018» (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН).

Новизна диссертационной работы А.А. Загидуллина состоит, во-первых, в использовании впервые в мировой практике самолетных углов при построении численной теории физической либрации, во-вторых, в использовании современной динамической теории движения Луны DE421.

Практическая значимость решаемой задачи подтверждается тем, что ключевая работа по расширенной проблеме физической либрации Луны в 2022 году вошла в подборку Highlighted on Springer Nature.

Аннотация в полной мере соответствует содержанию диссертации.

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

1. Страница 42. Обоснование использования твердотельности лунного тела приведено достаточно поверхностно, требуется более детальные исследования реологии лунных недр с привлечением сейсмических данных.

2. Страница 47. Не обосновано удобство использования самолетных углов по сравнению с углами Эйлера, Андуайе и другими.
3. Страница 48. Вывод кинематических соотношений на основе самолетных углов пропущен.
4. Страницы 63–67. Не приведено решение линеаризованной системы Гамильтона, которое необходимо для начального решения поставленной задачи.
5. Описание метода Рунге–Кутты в разделе 2.4.1 слишком лаконичное. Как минимум, следует пояснить используемые обозначения и объяснить возникновение задачи «верификация коэффициентов с целью их приведения к единой системе».
6. При решении физической задачи требуется сравнение результатов с наблюдениями. Приведенное в диссертации сравнение было опосредованным с использованием численной эфемериды DE421. Было бы хорошо в дополнение к полученным результатам также использовать данные лазерной локации Луны, радионаблюдений и сейсмических данных для построения лунной динамической модели.

Есть ряд замечаний, относящихся к оформлению диссертации:

1. На странице 13 в списке конференций, на которых докладывались результаты исследований, пункты 5 и 7 совпадают.
2. В тексте диссертации для разделения целой и дробной частей десятичных дробей используются как точка, так и запятая, что затрудняет восприятие информации.
3. Неоднократно используется запись, в которой перечисляемые параметры следуют подряд, без разделения запятыми (см., например страницу 54), что затрудняет восприятие формул.
4. В ряде случаев следующие подряд формулы не отделяются друг от друга запятыми и пробелами (см., например формулы (2.2.10) и (2.2.16)), что не просто затрудняет восприятие текста диссертации, а может привести к неверному толкованию приведенных формул.

5. В некоторых случаях точкам и запятым придается одинаковый смысл. Например в комментарии к формуле (3.3.2): «Здесь $r_1 = (1. 0. 0)^T$ направлен вдоль оси Ox , а $r_2 = (0, 0, 1)^T \dots$ » и таблице 8 Приложения.
6. На рисунках 2.6 и 2.7, используемых при получении отношения гелиоцентрических расстояний Земли и Луны, одни и те же объекты — Земля, Солнце — имеют разные обозначения.
7. На странице 83 идет речь о юлианской и календарной датах, но для их обозначения используются понятия «Юлианская и Григорианская шкалы времени», что может ввести в заблуждение.
8. На странице 86 при вычислении эклиптических координат следует использовать стандартное обозначение обратной тригонометрической функции арккосинус — \arccos .
9. Обозначения, приведенные в таблице 2, являющейся примером данных для формулы (3.3.1), не совпадают с обозначениями, используемыми в выражении (3.3.1). Чему равна продолжительность интервала «век», используемого в таблице 2? Также желательно дать комментарии к обозначениям «Фурье» и «Пуассон» в таблице 2.
10. Желательно пояснить, чем вызвана замена обозначения «2000» на «ММ» в формуле (3.3.4).
11. Необходимо описать векторы \bar{i} , \bar{j} , \bar{k} , используемые в формулах (3.3.4) и (3.3.5).
12. Для констант, приведенных в таблице 9 Приложения, желательно указать источник (рекомендация, стандарт, резолюция и т.п.), которому они соответствуют.

Несколько примеров, в которых требуется корректировка стиля изложения.

1. Подпись к рисунку 4.8: «Остаточные разности в угл. сек. с DE без учета приливов ...»
2. Заголовок таблицы 4: «... на 80 летнем периоде лет».

Несколько опечаток, которые могут повлиять на выводы по результатам диссертации.

Страницы 12 и 119: «ИНАСАН РАН» следует заменить на «ИНАСАН».

Страница 112: « c_{12} » следует заменить на « c_{21} ».

Страница 113: «0.3 угл. сек.» следует заменить на «0.03 угл. сек.».

В таблице 4 Приложения приводятся два варианта результатов сравнения теорий DE430 и DE421. Надо пояснить в чем их отличие. Или это опечатка?

Кроме того, встречаются технические ошибки. Например:

1. В оглавлении пункт Приложения указан с ошибкой в страницах вместо 134, указана стр. 133, но все остальные страницы совпадают.
2. В таблицах 5–7 Приложения степени времени указаны некорректно: T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 . Должно быть: T^0 , T^1 , T^2 , T^3 , T^4 .
3. В таблицах 8 и 10 не подписаны столбцы, как это было сделано в таблице 9 и в остальных таблицах Приложения.

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 Загидуллин Артур Александрович 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

08 мая 2024 г.

Контактные данные:

тел.: 7(343)3899587, e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защита 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: