

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

Актуальность темы

Диссертация Загидуллина Артура Александровича посвящена изучению физической либрации Луны и разработке методов и программного алгоритма, необходимых для построения высокоточной теории вращательного движения естественного спутника Земли.

Задача о движении и вращении Луны является классической. Она оказала огромное стимулирующее воздействие на развитие небесной механики, и сейчас составляет важную часть этой широко разросшейся дисциплины. Интерес к исследованиям Луны остаётся неизменным: накапливаются многолетние лазерные наблюдения, проводятся многочисленные лунные и окололунные эксперименты, открывающие неизвестные ранее факты, и все это требует развития теории для адекватного описания как динамики Луны, так и её внутреннего строения. Актуальность лунных исследований обусловлена необходимостью решения не только фундаментальных проблем небесной механики, но и реализацией выходящих на передний край практических задач по освоению Луны. Все это и предопределяет актуальность данной диссертационной работы.

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключение, списка использованных источников (109 наименований) и одного Приложения, содержит 32 рисунка и 10 таблиц. Основной текст диссертации составляет 126 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 и указан вклад автора в совместных исследованиях.

Первая Глава начинается с описания современного состояния спин-орбитальных теорий физической либрации Луны. Дано краткое описание аналитических теорий Н.К. Петровой, рассматривающей задачу ФЛЛ в рамках т.н. главной проблемы, Ю.В. Баркина, включившего в рассмотрение жидкое эллиптическое лунное ядро, и Б.П. Кондратьева, предложившего векторный метод для изучения физической либрации Луны.

В исследовании вращения Луны на протяжении полувека важную роль играет метод с использованием данных лазерной локации (Lunar Laser Ranging – LLR). Лазерная локация Луны позволила не только открыть удаление Луны от Земли на 38 мм в год, но и способствовала созданию эффективного метода специальных рядов, объединившего результаты лазерных наблюдений и динамической теории DE421 движения Луны. Сущность данного подхода в том, что полученные методом частотного анализа коэффициенты эмпирического ряда позволяют находить периоды и амплитуды свободной и вынужденной либрации Луны, не решая самих уравнений физической либрации. На этом пути было открыто жидкое ядро Луны и вычислена его эллиптичность. С ядром Луны связана диссипация механической энергии, обусловленная, в основном, приливным трением.

Но в эмпирических рядах остались некоторые гармоники малой амплитуды, физическая причина которых была понята далеко не сразу. Сейчас выяснилось, что появление некоторых из новых частот связано с характером вращения жидкого ядра относительно мантии Луны. Были обнаружены также периодические отклонения полюса Луны на 0.26 угловых секунд от главной

плоскости Кассини, которые тоже связаны с диссипацией энергии лунного вращения.

Приливы играют важную роль и в формировании фигуры Луны. Для учета этого влияния в диссертации предложен приближенный метод введения приливообразующего потенциала как добавки к моментам инерции и к коэффициентам Стокса второго порядка твердого тела Луны.

В заключении первой главы приводится анализ современных численных динамических эфемерид.

Вторая глава посвящена разработке и построению теории вращения Луны в рамках модели абсолютно твёрдого тела. Отправной точкой в сложной и многогранной проблеме ФЛЛ являются три эмпирических закона Кассини. Именно отклонения от этих законов и приводят к малым поворотным колебаниям Луны, которые и представляют эффект физической либрации.

Модель, которая рассматривается в диссертации как первое приближение предполагает, что:

1. Луна – абсолютно твёрдое тело, потенциал которого описывается с точностью до гармоник второго, третьего и четвертого порядков;
2. Возмущающими факторами являются Земля и Солнце, которые при гравитационном взаимодействии с Луной рассматриваются как точечные объекты;
3. Орбитальное и вращательное движения рассматриваются как независимые, что позволяет использовать готовые решения для описания движения центра масс Луны.

В первом разделе дано обоснование использования модели упругой Луны. Далее подробно рассматривается алгоритм математического построения уравнений ФЛЛ. Здесь автор излагает путь от геометрического описания положения тела Луны в инерциальной системе координат, вывода кинематических уравнений, определяющих положение оси вращения Луны в динамической системе координат, до построения динамических уравнений на основе

числовых значений параметров лунного тела и влияния внешних сил, оказывающих возмущающее действие на вращательную динамику Луны.

Спецификой диссертации является частичный отказ от традиционных углов Эйлера при описании ФЛЛ, и использование вместо них самолётных углов μ , ν , π , задающих вращение лунного тела относительно эклиптики. Сами уравнения вращения Луны получены в Гамильтоновой форме. Подробно рассматривается вывод формулы кинетической энергии Луны и гармоник возмущающего потенциала. Заметим, что вывод гармоник 4-го, 5-го и 6-го порядка в разложении селенопотенциала является весьма трудоемкой процедурой.

Для описания движения центра масс Луны относительно Земли использовалась аналитическая теория орбитального движения Луны Гутцвиллера-Шмидта, а для описания движения второго возмущающего тела - Солнца – применяется простая модель кеплеровской орбиты.

В итоге, в канонической форме получена система из шести дифференциальных уравнений, описывающих либрационные колебания Луны. После линеаризации эти уравнения принимает более простой вид. Как и ожидалось, в линейном приближении либрация в долготе не зависит от либрации в широте. Решение системы линейных дифференциальных уравнений проводится через построение соответствующего характеристического уравнения. Корни этого характеристического уравнения и дают искомые частоты малых колебаний в проблеме физической либрации Луны.

В конце второй главы рассматривается численный метод решения системы дифференциальных уравнений. Здесь автор опирается на классический метод Рунге-Кутты 10-го порядка, обеспечивающий точность до 4-го знака после запятой. Диссертант подробно излагает структуру составленного им обширного программного комплекса для реализации численного решения системы уравнений ФЛЛ.

Третья глава посвящена рассмотрению некоторых эффектов, позволяющих уточнить модель физической либрации, заложенную в решение глав-

ной проблемы. Напомним, что это решение построено на основе аналитической теории движения центра масс Луны, точность которой существенно уступает точности современных численных орбитальных теорий. Поэтому следующий этап в развитии теории и улучшении базовой модели связан с переходом на современную численную эфемериду DE421.

Эмпирические ряды, полученные путём последовательного применения частотного анализа и метода наименьших квадратов, являются удобным инструментом для тестирования алгоритмов по извлечению параметров ФЛЛ из численной эфемериды. Основываясь на сравнении параметров, полученных непосредственно из эфемериды, с данными, полученными по эмпирическим рядам, корректируется алгоритм вычислений с целью минимизации остаточных разностей. Для извлечения параметров либрации Луны использовались программы, созданные в лаборатории реактивных исследований JPL NASA.

Как уже отмечалось, при переходе на численную эфемериду автор отказывается от Эйлеровых углов, в которых описывается ФЛЛ в эфемериде DE421, и переходит к самолётным углам. В диссертации проводятся аналитические и численные расчёты для установления явной связи между двумя видами углов и их производными. Разработка этих вспомогательных формул сделала возможным учет эффектов влияния планет и приливных деформаций на тело Луны.

Автор подробно излагает методику перехода от менее точной теории движения Луны Гутцвиллера-Шмидта к теории DE421. Наличие полуэмпирического решения позволило провести сравнение построенных алгоритмов.

После перехода на эфемериду DE421, амплитуда в остаточных разностях при сравнении численного интегрирования и решения, заложенного в DE421 составила: для либрации в широте около 11 угловых секунд, а для либрация в долготе - 1.5 угловых секунд. Причиной столь

больших значений остаточной разности явилось то, что численная теория DE 421 построена на более точной модели вращения Луны, в то время как в диссертации проводится сравнение лишь с решением главной проблемы.

В четвертой главе дано некоторое усовершенствование модели ФЛЛ, описанной во второй главе, за счёт включения в разложение потенциала Луны 4-й гармоники, а также приливного воздействия на Луну со стороны Земли и планет. Вклад 4-й гармоники составил по амплитуде в либрацию по широте примерно 1 угловую секунду с основным периодом, близким к собственному периоду 2.9 года. В либрации по широте выделяется также период, близкий к собственному периоду системы в 27 дней, причем размах в угле ν составил 0.3 угловых секунды, а в угле π 0.6 угловых секунд. Отмечается, что вклад 3-й и 4-й гармоник в либрацию по долготе вызывает смещение оси инерции от лунного нулевого меридиана.

При учете гравитационных возмущений от других планет Солнечной системы, возмущения можно разделить на косвенные и прямые. Косвенные возмущения определяются влиянием планеты на орбиту Луны, что автоматически учитывается при переходе на орбиту эфемериды DE421. Прямое влияние планет учитывается через расчет потенциальной энергии взаимодействия точечной планеты с телом Луны, описываемой второй гармоникой селенопотенциала. Выяснилось, что учет возмущений от планет оказывает пренебрежимо малое влияние на либрацию: амплитуда в либрации по долготе составляет порядка 10^{-5} угловой секунды, а по широте (как в угле ν , так и в угле π) 10^{-4} угловых секунд.

Еще одним фактором, повышающим точность ФЛЛ, является учет приливного влияния Земли. Для этого был применен приближенный метод с введением усредненных поправок к коэффициентам Стокса 2-го порядка. В итоге, учёт приливного влияния Земли уменьшил амплитуду в остаточных разностях по широте на один порядок.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- В диссертации в рамках модели упругого тела Луны проведены обширные аналитические и числовые исследования по теории физической либрации нашего естественного спутника. Учет новых факторов позволил оценить их влияние на параметры либрации Луны;

- выполнен переход к эфемериде движения Луны DE421, что позволило упростить вычисление углов либрации и установить контроль за точностью полученных данных. Точность результатов перехода к эфемериде DE421 оценивалась по значениям остаточных разностей между величинами, полученными в диссертации, и аналогичными решениями других авторов;

- проведена детальная и кропотливая работа по верификации параметров, определяющих орбитальное и вращательное движение Луны;

- построен вариант теории ФЛЛ в самолетных углах μ, ν, π , описывающих ориентацию лунных осей инерции по отношению к эклиптике. В то же время, в численных эфемеридах параметры либрации σ, ρ, τ задавались в системе классических углов Эйлера. Получены уравнения, описывающие переход от эйлеровых к самолетным углам;

- создано и протестировано программное обеспечение, необходимое для определения либраций Луны в узле, наклоне и долготе с использованием рядов. Полученные результаты сравниваются с имеющимися наблюдениями;

- намечен и частично реализован план следующего этапа по усовершенствованию модели ФЛЛ. Оценен вклад прямого и косвенного воздействия на физическую либрацию Луны со стороны Венеры и Юпитера;

- разработан метод учета влияния приливного воздействия Земли на фигуру Луны. С этой целью в члены тензора инерции и коэффициенты Стокса вносятся дополнительные члены за приливное сжатие, полученные из наблюдений лазерной локации Луны. Это способствовало сокращению отклонения широтных остаточных разностей приблизительно в 10 раз;

- учет четвертой гармоники селенопотенциала позволил устранить некоторые несоответствия в прежней динамической теории. Отмечено, что 4-я гармоника дает малый вклад в смещении положения оси инерции Луны от линии Луна-Земля;

- учет дополнительных факторов способствовал созданию более точной и полноценной модели ФЛЛ. Вместе с тем, разности между теорией и наблюдениями остаются пока достаточно большими по сравнению с внутренней точностью 1 мс.

В Заключение делаются основные выводы по результатам диссертационного исследования.

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. Достоверность полученных автором диссертации результатов также не вызывает сомнений. Отметим наиболее важные результаты:

- разработка математического метода и программного алгоритма для описания вращения твердого тела Луны;

- вывод канонической системы уравнений ФЛЛ с использованием самолетных углов;

- анализ гравитационного поля Луны с точностью до гармоник 3-4-го порядков в разложении по сферическим функциям;

- Исследование влияния на физическую либрацию Луны от возмущений Земли и Солнца, представленных как точечные объекты;

- использование аналитической теории Гутцвиллера – Шмидта для описания движения Луны относительно Земли;

- разработка модели и методов, обеспечивающих решение задачи физической либрации Луны с учетом дополнительных возмущений, выходящих за рамки модели главной проблемы.

Все эти результаты диссертационной работы обладают научной и практической ценностью.

Замечания по диссертационной работе

1. По общему оформлению диссертации. В тексте я насчитал 32 рисунка, в автореферате говорится только о 27. Под номером 4.4 стоит два разных рисунка. Кроме того, несмотря на указанные ранее замечания по тексту диссертации, в ней и сейчас встречаются опечатки, грамматические ошибки и несогласованные предложения. Некоторые из замечаний приводятся ниже, полный же перечень неточностей занял бы много места.

Одно общее замечание. Автор пишет «В диссертационной работе была создана теория ФЛЛ для упругой модели Луны». Это терминологически неточно. Точнее говорить, что в диссертации в рамках модели упругой Луны проведены обширные аналитические и числовые исследования по теории физической либрации.

2. В тексте есть несколько неверных утверждений. Так, на стр. 17 автор пишет: «...энергия вращения Земли намного больше, чем потенциальная энергия взаимодействия с другими небесными телами.»

Это не так. Расчет дает:

$$\frac{T_{\text{вращ}\oplus}}{|W_{\oplus}|} \approx 2.78; \quad \frac{T_{\text{вращ}\opl�}}{|W_{\opl�}|} \approx 4 \cdot 10^{-5}.$$

3. На той же стр. 17 читаем «Луна в ходе долгой приливной эволюции пришла к стационарному вращению: скорость собственного вращения синхронизирована в отношении 1:1 с орбитальной скоростью.»
Здесь правильно говорить не о синхронизации орбитальной и скорости вращения Луны, а о синхронизации именно двух угловых скоростей или периодов двух движений. Аналогичная неточность встречается и на стр. 41.
4. На стр. 50 в сильно искаженном виде приводится центральная формула (2.2.14) разложения в ряд потенциала гравитационного поля.

5. Стр. 52. Неаккуратно (без пробела) записаны две формулы (2.2.16). То же самое для уравнений (2.2.10).

6. Стр. 56. Не «биномом Ньютона», а просто бином Ньютона.

7. На стр. 60 читаем «...в уравнениях Гамильтона потенциальная энергия входит как частная производная по каноническим координатам **и импульсам.**»

Однако, по определению, потенциальная энергия зависит только от координат, и частных производных по импульсам не дает.

8. Стр. 63. Читаем «...либрация по долготе не зависит от либрации по широте в линеаризованном случае и это является особенностью либрационного типа вращения Луны».

Последняя половина этого предложения лишняя, так как на самом деле, это не особенность вращения Луны, а просто следствие линеаризации самих уравнений либрации.

9. На стр. 64 читаем «... Луна имела бы резонансное вращение, вытянутость её фигуры была бы направлена всё время на Землю...».

Здесь следует заметить, что главная ось Луны направлена не на Землю, а примерно на свободный фокус орбиты Лун и совершает относительно него малые колебания.

10. Также на стр. 64 читаем «...Математически это означает включение в собственную частоту соответствующих коэффициентов из разложения потенциальной энергии. В результате все описанное выше должно увеличить третий период 74.4 г примерно в два раза.»

Эти аргументы автора об удвоении периода колебаний Луны в 74.4 г изложены невнятно. Это странно, так как ниже автор говорит о геометрической интерпретации колебаний уже с правильной частотой ω_3 .

Кроме того, указанные в диссертации частоты

$$\omega_2 = 0.230184 \text{ рад / сут}$$

$$\omega_3 = 2.303155 \cdot 10^{-4} \text{ рад / сут}$$

были ранее найдены в работе [22].

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 Загидуллин Артур Александрович 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 РАН

Кондратьев Борис Петрович

02 мая 2024 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,

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Го-
сударственный астрономический институт имени П.К. Штернберга

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

Подпись сотрудника МГУ Б.П. Кондратьева удостоверяю: