

Построение модели лунного ядра с использованием наблюдений лазерной локации Луны

© А.А. Загидуллин,^{1,2} Н.К. Петрова,² Ю.А. Нефедьев,¹ А.О. Андреев^{1,2}

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия
e-mail: star1955@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2023 г.

В окончательной редакции 22 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Рассмотрена проблема разработки теории физической либрации Луны для модели, учитывающей наличие жидкого ядра в теле Луны. Представлены факты, свидетельствующие в пользу существования у Луны небольшого жидкого ядра. Рассмотрены возможности определения из наблюдений эффектов существования лунного ядра и определения его характеристик, в первую очередь, сжатия ядра. Дано описание решения проблемы включения в рассмотрение двухслойной модели для задачи численного решения уравнений теории физической либрации Луны.

Ключевые слова: лазерная локация, свободная нутация лунного ядра, физическая либрация.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56812.f231-23

Космические эксперименты обеспечили высокое качество данных о внутренней структуре небесных тел. Помимо получения высокоточной информации о гармониках селенопотенциала [1], немало важных фактов получено о структуре лунного тела. В ходе многолетней лазерной локации Луны (ЛЛЛ) и определения на основе этих данных физической либрации Луны (ФЛЛ) выявились признаки диссипации лунного вращения, причиной которой являются не только приливное трение, но и, предположительно, турбулентные процессы на границе твердой мантии и гипотетического (на тот момент) жидкого ядра. Путем компьютерного моделирования специалистам JPL NASA удалось оценить размеры внешнего жидкого и внутреннего твердого ядер Луны, их химический состав. Прямые доказательства наличия у Луны ядра были получены после переработки сейсмограмм миссии „Аполлон“ с помощью новых методов обработки отраженной и преобразованной сейсмической энергии [2]. Выяснилось, что Луна имеет горячее металлическое ядро, которое с внешней стороны окружено частично расплавленной (10–30%) оболочкой, а внутри содержит твердое железное ядро, удалось также оценить и размеры этих трех составляющих ядра — 330 ± 20 , 480 ± 20 , 240 ± 10 km соответственно. Подтверждение этих данных получено китайскими учеными [3], которые, основываясь на модели гравитационного поля высокого разрешения GL1500E (миссия GRAIL) с учетом данных ЛЛЛ, оценили в тех же величинах не только размеры трех составляющих лунного ядра, но также и плотность и химический состав каждой из них. Кронрод и др. [4] на основе различных методов компьютерного моделирования физико-химического и теплового состояния лунного ядра оценили и диапазон возможного размера внутреннего ядра, химический состав, и показали, что

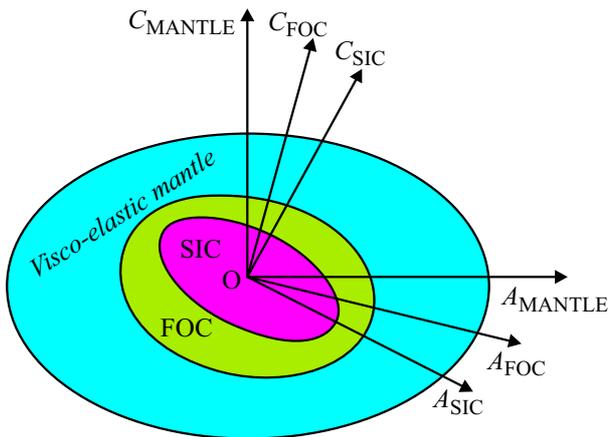
размер ядра, составляющий менее 1% массы Луны, слабо зависит и от химического состава, и от теплового режима мантии. Несмотря на эти исследования, остались нерешенными вопросы — каково сжатие ядра, его скорость вращения, наклон оси вращения к оси вращения мантии и т. д.

Ядро Луны может проявиться и в виде дополнительных мод свободной либрации, которые возникают из-за несовпадения осей вращения внешнего и внутреннего ядер с вращением мантии (см. рисунок). Оценки периодов таких либраций могут быть сделаны теоретически [5]. Были сделаны оценки периодов этих либраций, наиболее значимой из них является так называемая свободная нутация ядра (Free Core Nutation — FCN). Ее период в инерциальной системе координат оценивается по формуле:

$$P_{FCN} = T_{\Omega}(1 + R_c)/f_c. \quad (1)$$

Моделирование (см. рисунок) показало, что вследствие относительно медленного собственного вращения Луны $T_{\Omega} = 27.32$ дня, период FCN при небольшом сжатии ядра $f_c = 3.8 \cdot 10^{-4}$ достигает сотен лет и слабо зависит от размера ядра R_c . Поэтому обнаружить эту гармонику из наблюдений достаточно сложно. Анализ данных GRAIL позволил оценить величину $P_{FCN} \sim 300$ лет.

Для достижения необходимой точности необходим учет всех гармоник, связанных с ядром. Данный подход на основе теории Баркина описан детально в [6]. Были проанализированы теоретические данные, полученные при сравнении результатов аналитической теории ФЛЛ, построенной для модели Луны, содержащей внутри жидкое ядро, с полуэмпирическими рядами (Semi empirical series — SES) [7], построенными на основе данных



Поперечное сечение Луны вдоль оси ее вращения. Внешнее жидкое ядро (the fluid outer core — FOC) и твердое внутреннее ядро (the solid inner core — SIC) осесимметричны: $A_{\text{MANTLE}} = B_{\text{MANTLE}}$, $A_{\text{FOC}} = B_{\text{FOC}}$, $A_{\text{SIC}} = B_{\text{SIC}}$ — это экваториальные моменты инерции для мантии и обоих ядер. Моменты C_{MANTLE} , C_{FOC} , C_{SIC} — это максимальные моменты инерции.

ЛЛЛ и динамической теории спин-орбитального движения Луны DE421 [8]. SES, помимо известных членов вынужденной и свободной либрации Луны, содержат гармоники с малыми амплитудами, природу которых не удалось ранее определить, их обозначили, как неизвестные гармоники символом Un . Оказалось, что большинство неизвестных гармоник совпадают с рассчитанными теоретически гармониками, обусловленным наличием у Луны ядра. Амплитуда таких гармоник в SES действительно мала — менее 30 ms, но тем не менее совпадение их частот с рассчитанными косвенно указывает, что свободные либрации Луны во вращении существуют, так же, как и свободные либрации в мантии Луны.

Аналитические исследования, связанные с включением в либрационные уравнения модели двухслойной Луны, нами были продолжены в рамках численного подхода. Была разработана методика построения теории ФЛЛ в рамках модели твердой Луны с приближенным учетом ее приливной деформации [9]. В рамках гамильтонова подхода было необходимо улучшить модель ФЛЛ за счет включения в нее жидкого ядра. Для этого мы воспользовались моделью Пуанкаре. Эта модель описывает свободное вращение жидкого ядра в теле твердой мантии. В рамках этой модели мы смогли построить 12 уравнений для шести параметров вращения Луны (по три параметра для твердой мантии и жидкого ядра и соответствующих им шести сопряженных импульсов). Однако для численного решения этих уравнений нам необходимо было получить начальные значения параметров вращения ядра, которые пока не определены из наблюдений. Поскольку ядро очень мало, его взаимодействием с внешними телами обычно пренебрегают, и рассматривается только его свободное вращение. Для оценки сжатия ядра в (1) были использованы данные теории [5] и значение P_{FCN} из этой теории. Но из

аналитических вычислений нельзя получить значения амплитуды и фазы FCN. Поэтому для их вычисления были использованы характеристики лунного ядра и его свободной либрации из работы [6]: радиус ядра 240–330 km (вычисленные из переобработки сейсмических измерений), сжатие — $7 \cdot 10^{-4}$, для FCN период = 77757.032 суток (205.7 лет), амплитуда = $0^{\circ}0395$, фаза = -134° (на эпоху 2000). Для сравнения период FCN, вычисленный для указанных параметров ядра по модели [5], составляет от 144.02 до 200.2 лет.

Второй способ определения начальных значений для параметров вращения ядра был основан непосредственно на применении полуэмпирических рядов [7]. Ряды представляют собой аналитическое описание ФЛЛ для трех ее параметров — долготной либрации (τ), широтной (ρ) и либрации в узле (σ). Следуя выводам [6], что те члены SES, которые обозначены как члены неизвестной природы (Un), являются производными от свободной либрации, были рассчитаны начальные значения параметров либрации на эпоху J2000. Амплитуды членов Un не превышают десятков миллисекунд, поэтому итоговые значения начальных параметров получились на уровне миллисекунды и меньше: $\tau = 0.76$, $\rho = 0.12$, $\sigma = 3.41$ ms. Эти же значения по теории [6] оказались равными соответственно 1.05, 0.23, 7.01 ms.

В процессе моделирования параметров лунного ядра и при сравнении их с результатами вычислений с использованием полуэмпирических рядов определены условия, при которых достигается минимум в остаточных разностях для частот, определенных как гармоники неизвестной природы. Согласно выводам аналитической теории [6], именно эти гармоники подтверждают наличие жидкого ядра. В результате моделирования получены оптимальные значения для радиуса и сжатия ядра и уточнены значения периода свободных нутаций ядра. Эти данные повысили вероятность обнаружения параметров ядра в наблюдениях PhLL. Как итог, в результате исследования нами получена информация о возможности обнаружения в наблюдениях PhLL гармоник, подтверждающих наличие лунного ядра. С помощью моделирования параметров ядра была исследована динамика таких гармоник и определены перспективы планируемых экспериментов с применением лунных телескопов для нахождения параметров свободной нутации ядра и уточнения его характеристик.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом, грант 22-72-10059.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Cuk, D.P. Hamilton, S.T. Stewart. *J. Geophys. Res. Planets*, **124** (11), 2917 (2019). DOI: 10.1029/2019JE006016
- [2] R.F. Garcia, A. Khan, M. Drilleau, L. Margerin, T. Kawamura, D. Sun, M.A. Wicczorek, A. Rivoldini, C. Nunn, R.C. Weber, A.G. Marusiak, P. Lognonné, Y. Nakamura, P. Zhu. *Space Sci. Rev.*, **215**, 1 (2019). DOI: 10.1029/2012GL052362
- [3] Z. Zhong, T. Zhang, L. Duan, Y. Li, H. Zhu. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **46** (2), 238 (2021). DOI: 10.13203/j.whugis20190124
- [4] E. Kronrod, O. Kuskov, K. Matsumoto, V. Kronrod. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1705** (1), 012024 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1705/1/012024
- [5] A.A. Zagidullin, V.S. Usanin, N.K. Petrova, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1697** (1), 012018 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012018
- [6] Н.К. Петрова, Ю.А. Нефедьев, А.А. Загидуллин, А.О. Андреев. *Астроном. журн.*, **95** (12), 920 (2018). [N.K. Petrova, Y.A. Nefedyev, A.A. Zagidullin, A.O. Andreev. *Astron. Rep.*, **62** (12), 1021 (2018). DOI: 10.1134/S1063772918120120]
- [7] A. Briaud, A. Fienga, D. Melini, N. Rambaux, A. Mémin, G. Spada, C. Saliby, H. Hussmann, A. Stark, V. Viswanathan, D. Bagnat. *Icarus*, **394**, 115419 (2023). DOI: 0.1016/j.icarus.2023.115426
- [8] Y. Yang, Q. He, J. Ping, J. Yan, W. Zhang. *Astrophys. Space Sci.*, **364**, 1 (2019). DOI: 10.1007/s10509-019-3684-z
- [9] А.А. Загидуллин, В.С. Усанин, Н.К. Петрова, Ю.А. Нефедьев, А.О. Андреев, Т.В. Гудкова. *Астроном. журн.*, **98** (1), 75 (2021). [A.A. Zagidullin, V.S. Usanin, N.K. Petrova, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev, T.V. Gudkova. *Astron. Rep.*, **64** (12), 1093 (2020). DOI: 10.1134/S1063772921010066]