

## ГЛОБАЛЬНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЛУНЫ

<sup>1</sup>Гусев А.В., <sup>2</sup>Мен Чжиго, <sup>3</sup>Пин Цзиньсонг

<sup>1</sup>Институт Геологии и Нефтегазовых Технологий (ИГиНГТ),  
Казанский Федеральный Университет (КФУ), Казань, Россия.

[agusev33@gmail.com](mailto:agusev33@gmail.com)

<sup>2</sup>Колледж геологоразведочных работ и технологий, Университет  
Цзилинь, Чанчунь, Китай. [mengzg@jlu.edu.cn](mailto:mengzg@jlu.edu.cn)

<sup>3</sup>Национальные астрономические обсерватории Китайской академии  
наук, Пекин, Китай [jsping@bao.ac.cn](mailto:jsping@bao.ac.cn)

Палеомагнитный анализ образцов привезенных лунных пород и орбитальные магнитные измерения современной Луны показывают активные периоды работы лунной динамо-машины. Измерения магнитного поля некоторых датированных ударных бассейнов Луны позволяют предположить, что динамо-машина лунного ядра сохранилась до периода с примерно 3,9 до 3,8 миллиардов лет назад. Исследования образцов Аполлона и ЧангЕ-5 с использованием современных методов показывают, что поле в целом было активным между 4,25 и 1,92 млрд лет назад. В период до 3,56 млрд лет магнитное поле было сравнимо с земными значениями, но в дальнейшем резко уменьшилось и исчезло [Wieczorek, 2022].

Тепловая конвекция в двухслойном ядре Луны может обеспечивать энергию динамо-машины в течение первых нескольких сотен миллионов лет, в то время как кристаллизация внутреннего ядра могла поддерживать динамо-машину до 1 млрд лет назад. Другие механизмы, такие как прецессия мантии и/или внутреннего ядра, изменения скорости вращения лунной мантии, вызванные ударами, и базальтовый океан магмы, также могут потенциально привести в действие динамо-машину в течение значительного периода лунной эволюционной летописи [Weiss, 2014]. Возможно, что воздействия, связанные с солнечной и земной плазмой, недостаточны для существенного намагничивания лунной коры, хотя они могут усилить уже существовавшее магнитное поле Луны [Li, 2021].

Остаточная намагниченность лунных пород несет в себе историческую информацию о древней лунной динамо-машине. Характеристики этого динамо тесно переплетены с размером ядра Луны, состоянием и историей тепловой эволюции. Луна в настоящее время не имеет глобального дипольного поля, как было обнаружено с помощью спутников Луны 2, Луны 10 и Эксплорера 35. Однако есть

неопровержимые доказательства того, что когда-то на Луне работала генерация глобального динамо-поля. Первоначально это было замечено в результатах палеомагнитного анализа лунных пород, возвращенных Аполлоном-11, затем в орбитальных измерениях с Аполлона-15 и Аполлона-16, а также недавних зондов, таких как Лунный Проспектор и Кагуя, которые отметили значительную неоднородность в распределении магнитных полей лунной коры, при этом самая сильная область магнитного поля была сосредоточена в районе кратера Солтон на Южном полюсе Луны. Измерения прилунного магнитного поля в регионах с низкими широтами, таких как 4 миссии «Аполлон» и «Луноход-2», выявили существенные изменения в направлениях магнитного поля в масштабах от сотен метров до километров [Dolginov, 1976].

За последние несколько десятилетий был достигнут большой прогресс в понимании эволюции Луны; однако ряд критических проблем остается нерешенным. До сих пор ведутся споры о том, возникла ли намагниченность лунной коры, особенно таких сильных полей, как магнитная аномалия, расположенная на северо-западе края Южного полюса – бассейна Эйткен, внутренним динамо-полем или внешними плазменными процессами, возникающие в результате сильных ударов. Наличие многочисленных изолированных магнитных аномалий может отражать неизвестные геологические процессы, т.е. богатые железом ударные выбросы из крупных бассейнов, таких как Имбриум. Однако причина исключительно интенсивного палеомагнитного поля (от ~ 40 до 110 мкТл), найденная в образцах возрастом между 3,85 и 3,56 млрд лет, остается неясной, учитывая, что ни одна из существующих моделей лунного динамо не может объяснить такие сильные динамо-поля [Mighani, 2020].

**Лунный палеомагнетизм.** За последние несколько десятилетий было проведено 11 успешных миссий по отбору проб с Луны: 6 из проекта «Аполлон», 3 из проекта «Луна» и 2 из проекта «Чанъэ». Во время миссии «Аполлон-14» были приняты особые меры предосторожности путем помещения двух образцов в контейнеры с магнитным экраном для уменьшения магнитного загрязнения из окружающей среды возвращаемого космического корабля. Образцы, возвращенные Аполлоном, можно разделить на 4 основные категории: морские базальты, лунный высокогорный анортозит, многокомпонентная брекчия и лунный реголит. Образцы Чанъэ-5, которые были отобраны отдельно от предыдущих миссий, выявили самую молодую вулканическую активность ( $2030 \pm 4$  миллиона лет назад) на Луне, хотя более молодые базальты возрастом между 3 и 1 млрд лет назад были предложены хронологией подсчета кратеров.

Миссия Chang'e-5, расположенная в северо-восточной части Oceanus Procellarum, автоматически извлекла 1731 г лунного реголита с помощью черпака и двухтрубного колонкового ствола с максимальной глубиной более 100 см. Миссия Chang'e-6 привезла 1935.3 грамма реголита с невидимой стороны южного полюса Луны. К сожалению, максимальная глубина бурения всех лунных миссий по отбору проб составляет всего около 3 м, что намного меньше средней толщины лунного реголита (~5 м), что ограничивает получение информации о лунных коренных породах [Zhou, 2022].

Палеомагнитные исследования образцов Аполлона показывают, что Луна когда-то обладала относительно сильным магнитным полем. Данные о палеонапряженности в эпоху Аполлона (в 1970-е и 1980-е годы) варьируются от 0,1 до 120 мкТл и охватывают временные рамки от 200 млн лет до 4,0 млрд лет [Weiss, 2014]. Большинство современных исследований лунного палеомагнетизма сосредоточено на изучении палеонапряженности, в то время как немногочисленные исследования сосредоточены на информации о палеонаправлении лунного магнитного поля. Курнед с коллегами использовали измерения анизотропии магнитной восприимчивости (AMS), чтобы получить палеогоризонтальность и палеонаклон магнитного поля для некоторых образцов Аполлона, и пришли к выводу, что результаты потенциально могут быть согласованы с геометрией осевого дипольного поля Луны [Cournède, 2012].

**Магнетизм лунной коры и динамо-механизмы.** Магнитометры и магнитометры электронного отражения (ER) на борту спутников «Аполлон-15» и «Аполлон-16» зарегистрировали региональные магнитные поля коры Луны на масштабах 100 км и от ~7 км до ~500 км соответственно [Lin, 1979]. Особенности магнетизма лунной коры и возможные интерпретации измерения как палеомагнитного, так и орбитального магнитного поля показали, что лунная кора намагничена. Однако распределение намагниченности весьма неоднородно. Сильные и слабые магнитные аномалии распределены неравномерно. Некоторые магнитные аномалии связаны с поверхностными геологическими процессами, а другие — нет. Как палеомагнитные записи из образцов Аполлона, так и магнитные наблюдения за полем лунной коры позволяют предположить существование древнего лунного динамо, существовавшего более ~1 миллиарда лет [Wieczorek, 2022]. Для работы лунной динамо-машины **требуется жидкое металлическое ядро и источник энергии**, способный вызывать достаточно быстрые движения жидкости в жидком ядре. Считается, что Луна обладает небольшим двухслойным ядром радиусом от ~200 до 380 км, которое даже в настоящее время частично расплавлено [Gusev, 2008]. Таким

образом, существование жидкого ядра в прошлом для динамо-машины вполне реалистична. Для дальнейшего ясного продвижения и нашего понимания лунного динамо решающее значение имеет междисциплинарный подход, включающий результаты исследования недр Луны, динамики мантии, геохимии и физики минералов, палеомагнитного анализа и многое другое.

## Литература

- [1] Wieczorek M, Weiss BP, Breuer D, Cebson D, Fuller M, Garrick-Bethell I, Gattacceca J, Halekas JS, Hemingway DJ, Hood LL, et al. // Lunar magnetism. Rev Mineral Geochem. 2022, V.8, P. 207–241.
- [2] Weiss BP, Tikoo SM. // The lunar dynamo. Science. 2014, V.346, P. 1198.
- [3] Li QL, Zhou Q, Liu Y, Xiao Z, Lin Y, Li JH, Ma HX, et al. // Two-billion-year-old volcanism on the moon from Chang'e-5 basalts. Nature, 2021, V.600, P.54–58.
- [4] Dolginov SS, Yeroshenko YG, Sharova VA, Vnuchkova TA, Vanyan LL, Okulesky BA, Bazilevsky A.T. // Study of magnetic field, rock magnetization and lunar electrical - conductivity in Bay Le Monnier. Moon Planets. 1976, V.15, Number 1–2, P. 3–14.
- [5] Mighani S, Wang H, Shuster DL, Borlina CS, Nichols CIO, Weiss BP. // The end of the lunar dynamo. Sci. Advance., 2020; V.6, Number 0883.
- [6] Zhou CY, Jia Y, Liu J, Li H, Fan Y, Zhang Z, Liu Y, Jiang Y, Zhou B, He Z, et al. // Scientific objectives and payloads of the lunar sample return mission-Chang'E-5. Advance Space Res. 2022, V. 69, P.823–836.
- [7] Cournède C, Gattacceca J, Rochette P. // Magnetic study of large Apollo samples: Possible evidence for an ancient centered dipolar field on the moon. Earth Planet Sci. Lett., 2012, V.331, P. 31–42.
- [8] Lin RP. // Constraints on the origins of lunar magnetism from electron reflection measurements of surface magnetic-fields. Phys Earth Planet Inter. 1979, V.20, Number 2–4, P.271–280.
- [9] Gusev A.V., Petrova N.K. // The Moon -2012+ : Spin-orbit evolution, geophysics and selenodesy of the Moon. Advance of Space Research, 2008, V. 42, P.289-293.

## GLOBAL AND LOCAL MAGNETIC FIELDS OF THE MOON

**<sup>1</sup>Gusev A.V., <sup>2</sup>Meng Zhiguo, <sup>3</sup>Ping Jinsong**

<sup>1</sup>Institute of Geology and Oil & Gas Technologies (IGINGT), Kazan Federal University (KFU), Kazan, Russia. [agusev33@gmail.com](mailto:agusev33@gmail.com);

<sup>2</sup>College of Exploration and Technology, Jilin University, Changchun, China. [mengzq@jlu.edu.cn](mailto:mengzq@jlu.edu.cn);

<sup>3</sup>National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, [jsping@bao.ac.cn](mailto:jsping@bao.ac.cn)

The review discusses: 1) Paleomagnetic analysis of lunar rock samples, thermal convection and crystallization in the two-layer core of the Moon, 2) Magnetism of the lunar crust and dynamo-mechanisms. 3) Lunar paleomagnetism and magnetic anomalies.