

## Прогресс в исследованиях окололунного пространства

© М. Ван<sup>1</sup>, Д. Пин<sup>1</sup>, М. Ван<sup>2</sup>, С. Хан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальные астрономические обсерватории Китайской академии наук, г. Пекин, КНР

<sup>2</sup>Пекинский аэрокосмический центр управления, г. Пекин, КНР

### Реферат

Несмотря на то, что Луна является одним из наиболее исследованных объектов, степень изученности окололунного пространства, в отличие от околоземного, до сих пор недостаточна. В данной статье представлен обзор достижений современных исследований и существующих проблем в изучении лунной космической среды, которые были выявлены в радиоэкспериментах и исследованиях на поверхности Луны. По результатам запуска двух программ НАСА, ARTEMIS и LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, «Программа исследования лунной атмосферы и пылевого окружения»), на сегодняшний день доступна информация об электромагнитном поле Луны и лунной пыли. Радиоэксперименты были проведены с участием автоматических станций Луна-19 и Луна-22, КА Selene и КА для облёта Луны, возвращения и вхождения в плотные слои земной атмосферы. Результаты наблюдений подтвердили, что ионосфера вокруг Луны действительно существует, максимальная концентрация столба электронов составляет около  $0.5 \times 10^{16}$  электронов/м<sup>2</sup>. Различия значений концентрации столба электронов в ионосфере Луны, измеренных различными КА, говорит о том, что необходимы дополнительные наблюдения для понимания изменений лунной ионосферы во времени. Низкочастотное радиоастрономическое экспериментальное оборудование на борту ретрансляционных спутников и посадочного аппарата Chang'E-4 было предназначено для записи низкочастотных радиосигналов и могло обнаруживать возможные волны в плазме, что способствует дальнейшему изучению окололунного пространства.

**Ключевые слова:** Луна, лунная пыль, лунная ионосфера, КА Chang'E-4, низкочастотная радиоастрономия.

*Контакты для связи:* Ван Минян ([wangmy@nao.cas.cn](mailto:wangmy@nao.cas.cn)).

*Статья поступила в редакцию 20.01.2020, принята к публикации 25.02.2020, опубликована 01.10.2020.*

**Для цитирования:** Ван М., Пин Д., Ван М., Хан С. Прогресс в исследованиях окололунного пространства // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 18–22.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.18-22>

## Advance in Research on Lunar Space Environment

M. Wang<sup>1</sup>, J. Ping<sup>1</sup>, M. Wang<sup>2</sup>, S. Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Astronomical Observatories of China, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

<sup>2</sup>Beijing Aerospace Control Center, Beijing, China

### Abstract

Although the Moon is one of the most extensively explored objects apart from the Earth, the space environment of the Moon is still a mystery. In this paper the current research progress and existing problems of the lunar space environment, which were revealed by in-situ technique and radio experiments, are reviewed. In the course of in-situ exploration, NASA's missions ARTEMIS and LADEE (the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) yielded information about the electromagnetic and dust environments of the Moon. The radio experiments were operated by Luna19&22, SELENE and the circumlunar return and reentry spacecraft. These observations confirmed that the ionosphere does exist around the Moon and the maximum electron column concentration is about  $0.5 \times 10^{16}$  electrons/m<sup>2</sup>. The changes in the electron column concentration in the lunar ionosphere observed in different missions suggest that more observations are needed to understand the time variation of lunar ionosphere. The low frequency radio astronomical payloads carried by Chang'E-4 relay satellite and the lander were designed to record the low frequency radio signals and were able to detect the possible plasma waves and thus help us better understand the lunar space environment.

**Keywords:** Moon, space environment, lunar dust, lunar ionosphere, Chang'E-4, low frequency radio astronomy.

*Contacts:* Ming Yuan Wang ([wangmy@nao.cas.cn](mailto:wangmy@nao.cas.cn)).

*Received January 20, 2020, accepted February 25, 2020, published October 1, 2020.*

**For citation:** Wang M., Ping J., Wang M., Han S. Advance in research on lunar space environment // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 18–22.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.18-22>

## Введение

Начиная с первых полетов к Луне в 60–70-х гг. прошлого века особое внимание ученые уделяли изучению пыли на поверхности Луны и плазмы в окололунном пространстве. Исследования экзосферы Луны и плазмы успешно проводились в ходе астрономических и радиотехнических наблюдений в Советском Союзе, в Европейском космическом агентстве (ЕКА), в Японском агентстве по исследованию космического пространства (JAXA), а также в НАСА. Эти наблюдения привели к различию в результатах, что указывает на сложность и изменчивость космической среды вблизи Луны. Оно также говорит о том, что влияние Земли, Солнца и солнечной активности, межпланетной космической среды, как и особенности окололунного пространства, требуют дальнейших исследований.

## Окололунная среда

### Лунная пыль

В 60–70-х гг. прошлого века бортовые камеры КА Surveyor and Apollo НАСА фиксировали не только рассеянный свет солнечной короны эклиптической зоны до восхода и после заката Солнца (рис. 1), но и четко просматриваемое горизонтальное лунное свечение [1], что являлось доказательством существования над поверхностью Луны вещества, способного рассеивать и преломлять солнечный свет. Механизм образования этих явлений

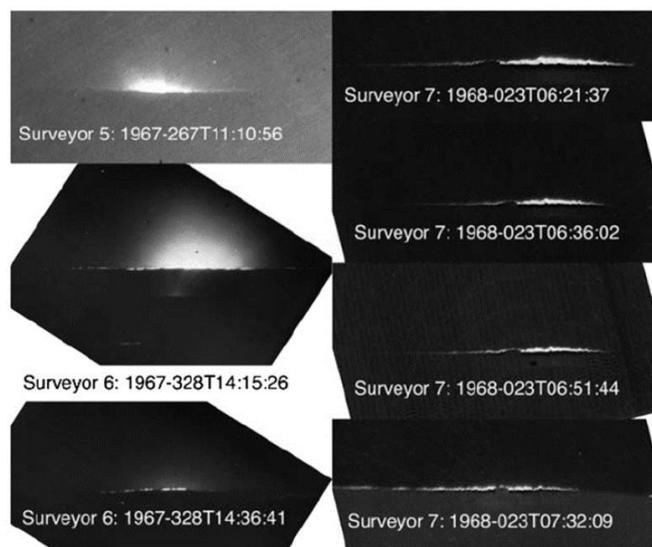


Рис. 1. Горизонтальное лунное свечение, полученное во время сеансов, проведенных КА Surveyor, показывает, что прямой рассеянный солнечный свет на лунном терминаторе исходит от частиц пыли, летающих над поверхностью Луны. В двух левых верхних изображениях свечения у горизонта виден рассеянный свет, исходящий от солнечной короны и эклиптической зоны (фотографии НАСА) [2–4]

и этого вещества — один из ключевых вопросов при исследовании окололунного пространства.

Известно, что пространство в системе Земля – Луна заполнено множеством метеороидов и частиц межпланетной пыли. Когда эти объекты на относительно высокой скорости сталкиваются с поверхностью планеты, лишенной атмосферы, образуется плазма или нейтральная пыль и газ, а также вторичные разреженные пылевые частицы. Возникающие таким образом гравитационно связанные облака – выбросы образуют экзосферу планет, лишенных атмосферы [5–7]. Экзосфера таких планет наблюдалась с помощью встроенных детекторов пыли во время полетов к ледяным спутникам Юпитера и Сатурна, однако никогда с тех пор подобное явление не обнаруживалось вокруг планеты с преломляющей средой.

Горизонтальное свечение Луны, наблюдаемое Apollo 15–17 на большой высоте, показало, что, скорее всего, вблизи лунного терминатора находится облако пыли высокой плотности. Исходя из предположения, что радиус пылевых частиц равен 0.1 мкм, путем моделирования на основе фотографических результатов бортовой камеры автоматической станции Clementine [8], был вычислен количественный состав лунного пылевого облака, оказавшийся равным 5–30 см<sup>-2</sup>, а моделирование на основе наблюдений ультрафиолетового спектрометра автоматической станции LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) [9] дало оценку количественного состава лунного пылевого облака в 10 см<sup>-2</sup>. Обе оценки оказались в 10<sup>4</sup> меньше, чем при наблюдениях Apollo.

В сентябре 2013 г. НАСА запустило КА LADEE, который был оборудован для проведения экспериментов по исследованию лунной пыли LDEX (Lunar Dust Experiment), и имел на борту ультрафиолетовый/оптический спектрометр UVS (UV-Vis Spectrometer) для исследования лунной пылевой среды. Изучение лунной пыли являлось одной из двух основных научных целей этого КА, который работал 150 дней на окололунной орбите с высотой 20–100 км. Затем LADEE был выведен на близкую к экваториальной ретроградную орбиту. За 184 дня было сделано около 140000 наблюдений пылевой среды, суммарно охватывающих 80-дневный интервал. Анализ наблюдений пыли приборами LADEE и обработка данных, полученных спектрометром UVS, показали существование постоянного асимметричного пылевого облака около Луны с диаметрами пылевых частиц 20–300 нм. Скорее всего, это облако возникает в результате воздействия частиц кометной пыли, движущейся с высокой скоростью по орбитам с большими эксцентриситетами, а не микро-астероидами, движущимися с меньшей скоростью по почти круговым орбитам. Во время ежегодного метеорного потока плотность облака выбрасывае-

мой Луной пыли увеличивается, так как Луна также подвергается воздействию этого потока [10–12]. Плотность выбрасываемого Луной пылевого облака меняется также из-за вращения Луны вокруг Земли [13].

#### Лунная ионосфера

По данным аппаратуры КА Apollo 14 плотность электронов в течение дневного лунного времени на высоте в несколько сот метров, определенная в результате исследований заряженных частиц в окололунном пространстве в ходе эксперимента CPLEE (The Charged Particle Lunar Environment Experiment), составила  $104 \text{ эл/см}^3$  [14].

В ходе полетов автоматических станций Луна-19 и Луна-22 были проведены наблюдения радиопокрытий. По результатам наблюдений, с учетом предположения сферической симметрии, была определена электронная плотность и ее максимумы, которые составили  $500\text{--}2300 \text{ эл/см}^3$  на высоте около 10 км, уменьшаясь по мере приближения к поверхности Луны [15]. Авторы [16] рассматривают эти плотности как слишком высокие и отмечают, что все они получены с дневной стороны Луны.

В первом десятилетии нашего века в рамках европейского проекта SMART-1 и японского проекта SELENE были проведены эксперименты по изучению лунной ионосферы методом радиопокрытий. Результаты, полученные SMART-1, до сих пор не опубликованы. По программе SELENE было обработано и проанализировано около 400 наблюдений. Пик электронной плотности лунной ионосферы составил  $300 \text{ эл/см}^3$  или 20 % от аналогичных оценок Луна-19 и Луна-22 [17–18].

Китайский лунный КА CRRS (Circumlunar return and reentry spacecraft) был запущен 23 октября 2014 г. и являлся аппаратом для обработки будущей китайской экспедиции по доставке лунного грунта с помощью возвращаемых на Землю КА. После экспериментов по отработке возвращения на Землю и повторного входа в плотные слои атмосферы, 11 января 2015 г. служебный модуль снова вышел на лунную орбиту, чтобы получить изображение зоны посадки для тогда еще не обнародованной программы по созданию китайского посадочного возвратного аппарата. В это же время были проведены двухчастотные наблюдения радиопокрытий для измерений электронной концентрации в лунной ионосфере. Показатели максимумов электронной концентрации оказались в пределах между  $\sim 0.4 \times 10^{16}$  и  $\sim 0.5 \times 10^{16} \text{ эл/м}^2$ , что было в два раза больше по сравнению с результатами, полученными КА Луна-19 и Луна-22, и на 1–2 порядка выше данных, полученных КА SELENE, но они сопоставимы с результатами CPLEE.

Результаты, полученные с помощью КА Луна-19, Луна-22, CRRS и CPLEE, вполне сопоставимы и доказывают, что лунная ионосфера существует и что она намного плотнее, чем ожидалось. Однако данные КА SELENE показывают, что лунная ионосфера очень разрежена. Таким образом, полученные в разное время результаты не совпадают, что свидетельствует о том, что лунная ионосфера может существенно изменяться. Механизм быстрого изменения электронной плотности лунной ионосферы остается неизвестным.

#### Низкочастотные радиоастрономические приборы КА Chang'E-4

На борту КА Chang'E-4 размещено два низкочастотных радиоастрономических прибора.

Низкочастотный бортовой радиоспектрометр LFRS (Low Frequency Radio Spectrometer) установлен на борту стартовавшего в декабре 2018 г. посадочного аппарата Chang'E-4. LFRS предназначен для обнаружения низкочастотного радиосигнала, который из-за поглощения земной атмосферой и ионосферой невозможно принять на Земле. Основные параметры радиоспектрометра LFRS приведены в табл. 1. Антенны LFRS были развернуты в январе 2019 г (рис. 2).

Таблица 1  
Основные параметры радиоспектрометра LFRS

Параметры	Значения
Полоса	100 кГц – 40 мГц
Динамический диапазон	$\geq 5 \text{ дБ}$
Чувствительность	$\leq 10 \text{ нВ/sqrt, Гц}$
Антенна	3 ортогональных монополя, 5 м
Поляризация	Все
Масса	$\leq 14 \text{ кг}$
Мощность	$\leq 24 \text{ Вт}$
Срок службы	6 месяцев



Рис. 2. LFRS на борту посадочного аппарата Chang'E-4

Таблица 2

Основные параметры NCLE на спутнике-ретрансляторе, запущенном в рамках программы Chang'E-4

Параметры	Значения
Частота	0.1 мГц – 80 мГц
Чувствительность	~100 Ян 10 мГц (полоса 10 кГц)
Динамический диапазон	~84 дБ
Спектральное разрешение	0.1–2.0 мГц: 1 кГц 1.0–10 мГц: 10 кГц 10–80 мГц: 100 кГц
Антенна	3 ортогональных монополя, 5 м
Мощность	≤ 20 Вт
Масса	10 кг

Голландско-китайский прибор для исследований на низких частотах NCLE (The Netherlands-China Low Frequency Explorer) находится на борту спутника-ретранслятора, запущенного в рамках программы Chang'E-4 в мае 2018 г. Антенны NCLE развернуты в ноябре 2019 г. (рис. 3).

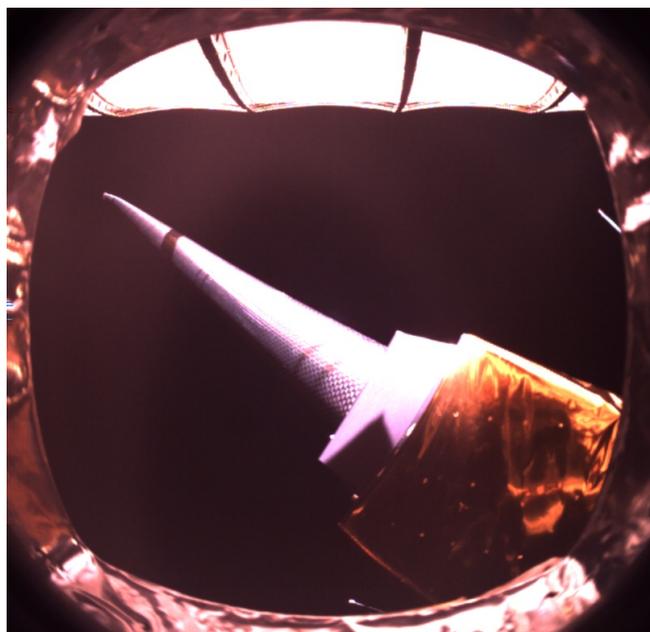


Рис. 3. NCLE на борту спутника-ретранслятора

## Выводы

Описанные бортовые устройства в течение всего срока службы LFRS и NCLE регистрируют солнечные вспышки 2-го типа, частота электромагнитных волн которых может находиться в диапазоне нескольких десятков кГц. Электроны в лунной ионосфере могут прерывать или блокировать радиосигнал от солнечной вспышки на соответствующей частоте.

Данные, полученные в процессе реализации программ изучения лунной ионосферы Луна-19, Луна-22, CRRS и CPLEE, являются основой и налагают определенные динамические ограничения для достижения научных целей, поставленных для низкочастотных радиоастрономических приборов в рамках программы Chang'E-4.

## Благодарности

Исследование проведено при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 41604150 и № 41590851).

## Литература

1. Grün E., Horányi M., Sternovsky Z. The lunar dust environment // *Planetary & Space Science*. 2011. Vol. 59, no. 14. P. 1672–1680.
2. Colwell J. E., Batiste S., Horányi M., et al. Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics // *Reviews of Geophysics*. 2007. Vol. 45, no. 2. P. 1–26.
3. Criswell D. R. Horizon-glow and the motion of lunar dust. In: *Photon and Particle Interaction in Space*. 1973. P. 545.
4. Rennilson J. J., Criswell D. R. Surveyor observations of lunar horizon-glow // *The Moon*. 1974. Vol. 10, no. 2. P. 121–142.
5. Auer A., Sitte K. Detection technique for micrometeoroids using impact ionization // *Earth and Planetary Science Letters*. 1968. Vol. 4, no. 2. P. 178–183.
6. Collette A., Sternovsky Z., Horányi M. Production of neutral gas by micrometeoroid impacts // *Icarus*. 2014. Vol. 227. P. 89–93.
7. Hartmann W. K. Impact experiments: 1. Ejecta velocity distributions and related results from regolith targets // *Icarus*. 1985. Vol. 63, no. 1. P. 69–98.
8. Glenar D. A., Stubbs T. J., Hahn J. M., et al. Search for a high-altitude lunar dust exosphere using Clementine navigational star tracker measurements // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2014. Vol. 119, no. 12. P. 2548–2567.
9. Feldman P. D., Glenar D. A., Stubbs T. J., et al. Upper limits for a lunar dust exosphere from far-ultraviolet spectroscopy by LRO/LAMP // *Icarus*. 2014. Vol. 233. P. 106–113.
10. Horányi M., Szalay J. R., Kempf S., et al. A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon // *Nature*. 2015. Vol. 522, no. 7556. P. 324–326.
11. Stubbs T. J., Glenar D. A., Farrell W. M., et al. On the role of dust in the lunar ionosphere // *Planet Space Sci*. 2011. Vol. 59. P. 1659–1664.
12. Wooden D. H., Cook A. M., Colaprete A., et al. Evidence for a dynamic nanodust cloud enveloping the Moon // *Nature Geoscience*. 2016. Vol. 6. P. 665–668.
13. Szalay J. R., Mihály Horányi. Annual variation and synodic modulation of the sporadic meteoroid flux to the Moon // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 10580–10584.

14. *Pluchino S., Schillirò F., Salerno E., et al.* Radio occultation measurements of the lunar ionosphere // *Mem. S. A. It. Suppl.* 2008. Vol. 12. P. 53–59.

15. *Vyshlov A. S.* Preliminary results of circumlunar plasma research by the Luna 22 spacecraft. In: *Proceedings of the Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences.* Berlin: Akademie-Verlag GmbH, 1976. P. 945–949.

16. *David R. C., Bibhas R. D.* Intense localized photoelectric charging in the lunar sunset terminator re-

gion, 2. Supercharging at the progression of sunset // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82(7). P. 999–1004.

17. *Ando H., Imamura T., Nabatov A., et al.* Dual-spacecraft radio occultation measurement of the electron density near the lunar surface by the SELENE mission // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2012. Vol. 117. P. 516–525.

18. *Imamura T., Nabatov A., et al.* Radio occultation measurement of the electron density near the lunar surface using a subsatellite on the SELENE mission // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* 2012. Vol. 117, no. A6. P. 1–8.