

УДК 523.34–834

## АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВОДОРОДА В ТЕКТОНИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ УДАРНОМ КРАТЕРЕ В РАЙОНЕ ЮЖНОГО ПОЛЮСА ЛУНЫ

© 2024 г. А. Б. Санин<sup>а,\*</sup>, И. Г. Митрофанов<sup>а</sup>, А. Т. Базилевский<sup>б</sup>,  
М. Л. Литвак<sup>а</sup>, М. В. Дьячкова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

\* e-mail: sanin@np.cosmos.ru

Поступила в редакцию 06.06.2023 г.

После доработки 15.08.2023 г.

Принята к публикации 02.09.2023 г.

В статье приведено описание кратера в краевой зоне южной полярной области Луны с координатами центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш. Диаметр кратера составляет 34 км. Он обладает трещиноватым дном, что считается признаком внедрения магмы в подкратерное пространство. Абсолютный возраст образования изучаемого кратера был оценен равным ~3.85 млрд лет по пространственной плотности наложенных на его вал малых кратеров. В окрестностях изучаемого кратера преобладает низкожелезистый анортозитовый материал. Можно утверждать, что бассейн исследуемого кратера очень сухой по сравнению с его окрестностью. Существенная потеря водорода/воды и ее перераспределения со дна кратера на территорию вокруг кратера могли быть вызваны переработкой поверхности вследствие внедрения магмы под кратер, следы которого прослеживаются по наличию трещин на днище кратера.

**Ключевые слова:** Луна, кратер, трещиноватое днище, ложбины, текстура реголита, возраст кратера, возраст материала дна, магматическая активность, ЛЕНД, WEN, водород, вода

**DOI:** 10.31857/S0320930X24010073, **EDN:** OHKJIN

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время полярные и приполярные области Луны вызывают большой интерес у научного сообщества, так как там находятся локальные участки, где могли сохраниться залежи летучих веществ, включая водяной лед (см., например, Pieters и др., 2009; Colaprete и др., 2010; Mitrofanov и др., 2010; Sanin и др., 2017). Только в 2023 г. были осуществлены запуски двух посадочных аппаратов, которые, как планировалось, должны были прилуниться в окрестности 70 параллели в южном полушарии Луны. К сожалению, российская посадочная станция Луна-25 (планировавшееся место посадки: 43.544° в. д., 69.545° ю. ш., Казмерчук и др., 2016; Митрофанов и др., 2021) была потеряна в результате столкновения с поверхностью Луны. Индийская посадочная станция Chandrayaan-3 с небольшим луноходом Pragyan 23 августа совершила успешную посадку в точке с координатами 32.319° в. д., 69.373° ю. ш. (по данным индийского космического агентства [https://www.isro.gov.in/chandrayaan3\\_gallery.html](https://www.isro.gov.in/chandrayaan3_gallery.html)).

Считается, что водяной лед может присутствовать на дне вечнотененных полярных кратеров, где температура достигает всего нескольких десятков кельвинов (см., например, Watson и др., 1961; Vasavada и др., 1999). К сожалению, такие кратеры малоприспособлены и труднодоступны для посадок космических аппаратов. Тем не менее орбитальные исследования на борту аппарата NASA Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) показали, что повышенное содержание водорода обнаруживается и в освещенных районах, где водяной лед мог сохраниться под верхним сухим изолирующим слоем реголита (Mitrofanov и др., 2012; Sanin и др., 2017).

Таким образом, изучение любых форм лунного рельефа, включая относительно небольшие кратеры, находящиеся в околополярных районах, представляет интерес с точки зрения возможного присутствия летучих веществ.

В материковой местности в краевой зоне южной полярной области Луны находится кратер диаметром 34 км с координатами центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш. Он обладает трещиноватым дном,

что считается признаком внедрения магмы в подкратерное пространство (см., например, Schultz, 1976; Jozwiak и др., 2012). Фотогеологический анализ снимков LROC WAC и NAC показал, что кратер образовался ~3.85 млрд лет назад, а трещиноватость его дна, указывающая на внедрение под него магмы, возникла в интервале (200–300) млн – 1 млрд лет назад (Базилевский и др., 2024). Сравнительная близость этого кратера к полюсу заставляет думать, что в реголите на его дне может быть примесь льда  $H_2O$  и других летучих компонентов. А это вызывает вопрос, как типичные для полярных областей Луны скопления замороженных летучих в реголите могли реагировать с эффектом внедрения магмы: 1) никак, 2) не накапливаясь за счет подогрева снизу или 3) пары магматических летучих могли быть дополнительным источником для замороженных летучих реголита.

### ОПИСАНИЕ КРАТЕРА

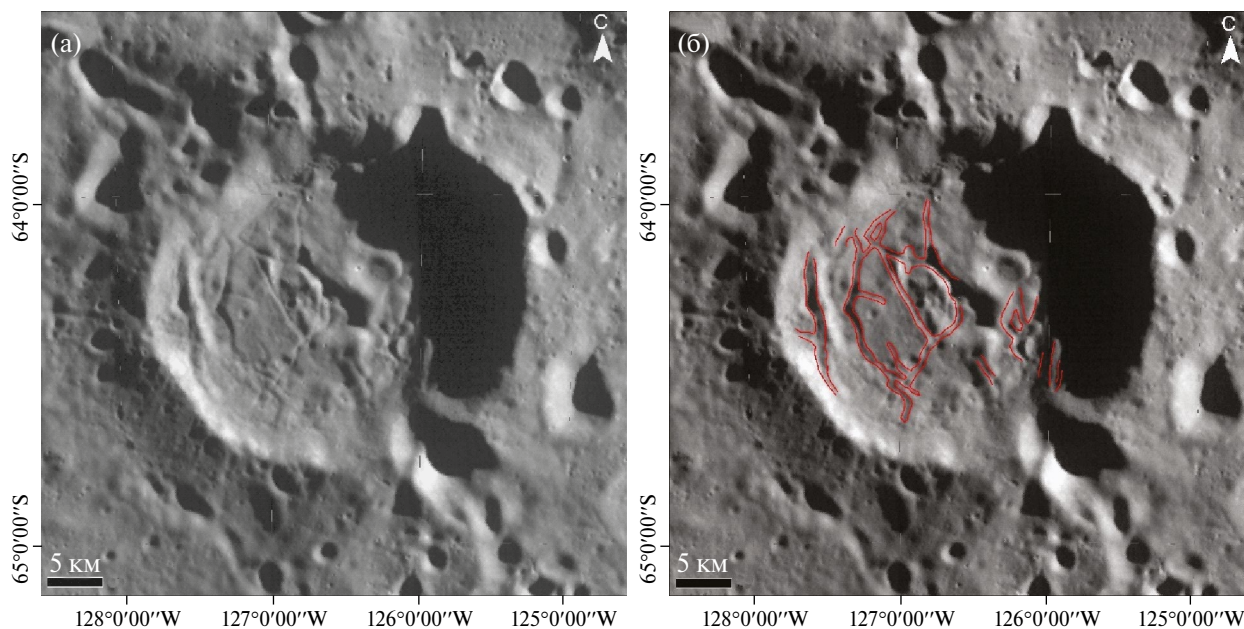
Изучаемый кратер (рис. 1) располагается в типичной материковой области, где преобладающие формы рельефа – это ударные кратеры диаметром в десятки километров и более, наложенные на равнины материкового типа, по-видимому, родственные равнинам места посадки КК Apollo-16 (Hodges, Muehlberger, 1981).

На рис. 1 видно, что основные элементы рельефа поверхности дна изучаемого кратера – холмы и ложбины, иногда уступы. Они полого-склонные с крутизной склонов не более  $10^\circ$  –  $15^\circ$ , в редких случаях до  $20^\circ$ . В ряде мест внутренних

склон изучаемого кратера переходит в дугообразные в плане (параллельные очертаниям вала кратера) ложбины глубиной 50–150 м от среднего уровня поверхности дна (Базилевский и др., 2024). Эта особенность части кратеров с трещиноватыми днами отмечалась в упомянутых выше работах Schultz (1976) и Jozwiak и др. (2012). Ложбины, а это сглаженной формы трещины, характеризуются длиной от 2 до 10 км, шириной 0.3–1 км и глубиной 50–150 м. Расположение ложбин в плане полигональное с элементами дугообразного. Уступы наблюдаются в околосклонных частях дна на севере, юге и юго-востоке. Их длина 6–10 км и высота 50–150 м.

Морфология дна кратера также изучалась на снимках LROC NAC с разрешением около 1 м, полученных при высотах Солнца над горизонтом  $14.3^\circ$  и  $24.1^\circ$ . На этих изображениях видно, что на краях ложбин нет резких уступов. Крутизна их внутренних склонов сверху вниз постепенно увеличивается, а потом уменьшается.

На краю одной из ложбин находится кратер диаметром около 700 м. На изображении, полученном при высоте Солнца  $14.3^\circ$ , восточная часть кратера затенена, т. е. крутизна верхней части его внутреннего склона больше  $14.3^\circ$ . Край тени находится примерно в центре этого кратера. А это значит, что отношение глубины этого кратера к его диаметру примерно 0.25. Судя по крутизне внутреннего склона этого кратера, он относится к морфологическому классу В, но с необычно большим отношением глубины к диаметру. Согласно этим характеристикам, абсолютный возраст этого кратера не более 1 млрд лет (Basilevsky,



**Рис. 1.** Изображение изучаемого кратера: (а) – фрагмент мозаики снимков WAC – WAC\_GLOBAL\_P900S0000\_100M; (б) – то же с показанными двойными красными линиями ложбинами (трещинами) на дне кратера.

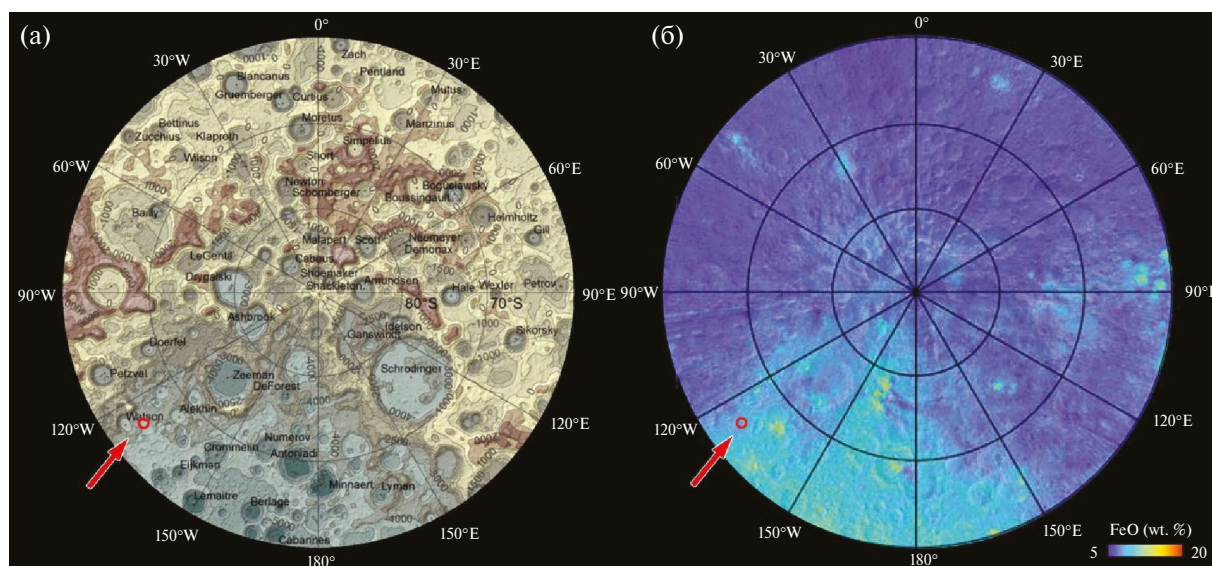


Рис. 2. Положение изучаемого кратера (красные стрелка и кружок): (а) — на гипсометрической карте южной полярной области Луны (Гришакина и др., 2014); (б) — на карте содержания FeO в этой же области по Lemelin и др. (2022).

1976; Базилевский, 2015). Кратер диаметром 700 м в момент образования должен был проникнуть через слой реголита в скальное основание. Но на его валу не видно камней. Очевидно, они разрушились под воздействием ударов метеоритов и суточных колебаний температуры поверхности. Из оценок Basilevsky и др. (2013; 2015) и Li и др. (2018) следует, что время, необходимое для практически полного разрушения камней метрового диапазона размеров на поверхности Луны, составляет 200–300 млн лет. Таким образом, возраст этого 700-метрового кратера, вероятно, находится в пределах (200–300) млн – 1 млрд лет (Базилевский и др., 2024).

Абсолютный возраст образования изучаемого 34-километрового кратера был оценен по пространственной плотности наложенных на его вал малых кратеров (Базилевский и др., 2024) и оказался равным ~3.85 млрд лет назад. Следует, однако, отметить, что в окрестностях изучаемого кратера, включая его вал, много вторичных кратеров и какая-то часть малых кратеров, использованных для оценки возраста, могут быть вторичными. То есть приведенная оценка может быть завышена. Подсчет пространственной плотности малых кратеров на днище изучаемого кратера привел к двум оценкам: ~1 млрд лет и ~3.5 млрд лет. Первая, возможно, соответствует возрасту переработки поверхности при внедрении под кратер магмы и, соответственно, возрасту образования трещин растяжения, что согласуется с оценкой, приведенной в предыдущем абзаце этой статьи. А второй — возрасту изучаемого кратера. Очевидно, внедрение магмы в подкратерное пространство произошло гораздо позже образования изучаемого кратера (Базилевский и др., 2024).

Минералогический и химический состав поверхности в южной полярной области, включая окрестности изучаемого кратера, рассматривался в работе Lemelin и др. (2022) по данным измерений Kaguya Spectral Profiler. На рис. 2 приведена гипсометрическая карта южной полярной области и результаты измерений там FeO в материале поверхности.

На этом рисунке видно, что в окрестностях изучаемого кратера преобладает низкожелезистый, очевидно, анортозитовый материал. По данным Taylor и др. (1991), в пристинных анортозитах Луны содержится от 0.2 до 6% FeO (таблица A6.11 у Taylor и др., 1991). По-видимому, изучаемый кратер образован в анортозитовой мишени.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ WEN

Данные о распределении водорода в окрестности исследуемого кратера могут быть получены из измерений российского прибора ЛЕНД, установленного на борту КА NASA LRO. Многолетняя непрерывная работа на орбите Луны начиная с 2009 г. позволила накопить достаточную статистику и построить карты распределения водорода в приповерхностном лунном грунте (на глубину до 1 м) не только полярных, но и приполярных областей, а коллимирующая способность прибора — отличить кратер с характерным размером 30 км от его окружения. Лунные карты эквивалентной воды (обозначается термином WEN — понятие, в котором весь обнаруженный водород приписывается водному эквиваленту) с высоким пространственным разрешением были представлены в работе Sanin и др., (2017), где было показано, что ряд локальных областей внутри и в окрестности

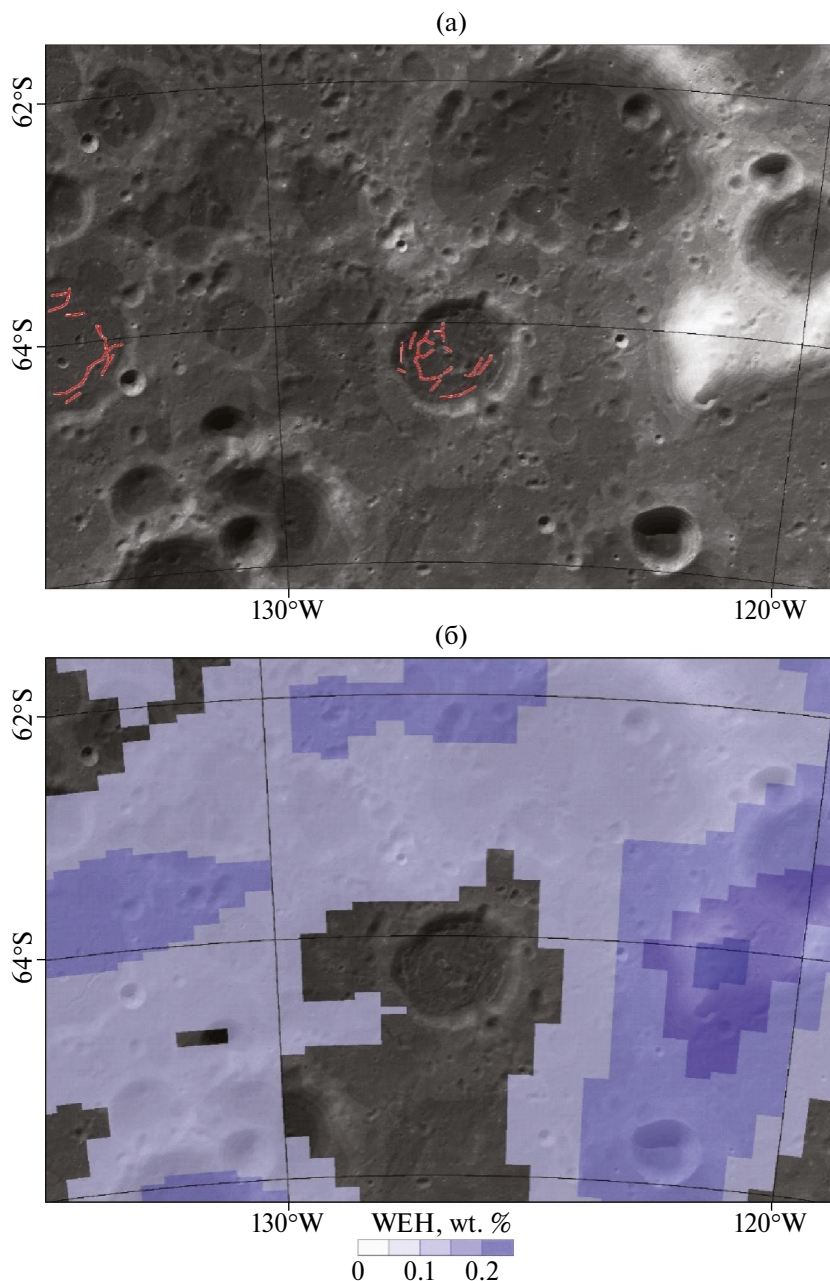
вечнозатененных лунных кратеров может содержать в среднем до 0.5% водяного льда по массовой доле. При проверке гипотезы о двухслойном строении грунта, когда сухой верхний слой с толщиной от нескольких десятков см до 1 м покрывает водосодержащий слой, численные оценки показали, что содержание водяного льда может достигать до нескольких процентов по массовой доле.

В этой работе мы воспользовались алгоритмом оценки содержания WEN, предложенным в работе Sanin и др. (2017), и построили карту распре-

ления WEN в окрестности исследуемого кратера, которая показана на рис. 3. Из карты хорошо видно, что величина WEN варьируется от нескольких десятков ppm (частей на миллион) до 250 ppm.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольший интерес в полученном результате представляет тот факт, что с высокой статистической значимостью можно утверждать,



**Рис. 3.** Окрестности изучаемого кратера: (а) — LROC WAC изображение; красные линии — трещины / ложбины на дне изучаемого кратера (в центре изображения) и на дне другого кратера, расположенного в 70 км к западу от изучаемого; (б) — концентрации водного эквивалента водорода (WEN), при концентрациях <0.05% голубой заливки нет и видно LROC WAC изображение.

что бассейн исследуемого кратера очень сухой по сравнению с его окрестностью (рис. 3). Подобное соотношение не является уникальным. Так, в работе Stagg и др. (2018) были рассмотрены 300 кратеров с диаметром 30–100 км, лежащих в средних и высоких широтах. Анализ темпа счета эпитепловых нейтронов, измеренного прибором ЛЕНД, показал более низкое содержание водорода во внутренней части кратеров по сравнению с типичными значениями во внешней окрестности кратера на данной широте. Было показано, что темп счета эпитепловых нейтронов во внутренней части кратера в среднем возрастает на 0.1 отсч/с, а значимость этого эффекта составляет ~9σ. Lawrence и др. (2015), сравнивая данные темпа счета эпитепловых нейтронов (прибор LPNS на борту КА Lunar Prospector) и значения альбедо лунной поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне 750 нм, по данным КА Clementine, показали, что существует связь между наличием водорода в лунном реголите на умеренных широтах и параметрами зрелости лунного реголита. Более “свежий” и непроработанный лунный реголит меньше насыщен водородом/молекулами воды, которые образуются при облучении лунной поверхности протонами солнечного ветра (так называемая солнечная вода). В свою очередь, Stagg и др. (2018) также исследовали корреляцию между нейтронным темпом счета и зрелостью поверхности. Было показано, что для подгруппы из 30 кратеров, демонстрирующих наиболее высокие значения эпитеплового нейтронного потока, наблюдаются очень высокие значения показателя параметра ОМАТ (комбинация показателей альбедо поверхности в диапазонах 750 нм и 950 нм (Lucey и др., 2000)), который характеризует степень зрелости поверхности. В данном случае высокие значения параметра ОМАТ соответствуют наиболее молодым и незрелым кратерам.

Возраст исследуемого кратера, по разным оценкам (см. предыдущий раздел статьи), составляет от 3.5 до 3.85 млрд лет, а возраст переработки его днища — от сотен миллионов до 1 млрд лет. Это не позволяет выделить его по оптическим параметрам зрелости, которые работают для поверхности, возраст которой не превышает несколько сотен миллионов лет, и плохо выделяются для поверхности, возраст которой составляет до 1 млрд лет (Lucey и др., 2000). Можно, однако, предположить, что солнечная вода, накопленная в этом достаточно старом кратере, могла испытывать существенные вариации на шкале времени и одним из важных факторов здесь является переработка поверхности вследствие внедрения магмы под кратер, следы которого прослеживаются по наличию трещин на дне кратера. Это могло привести к существенной потере водорода/воды и ее

перераспределения со дна кратера на территорию вокруг кратера.

Авторы признательны С.С. Красильникову и М.А. Иванову за помощь в этой работе.

Работа по оценке концентрации воды/водорода выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Тема ОСВОЕНИЕ, № 122042500014–1 (для А.Б. Санина, И.Г. Митрофанова, М.Л. Литвака и М.В. Дьячковой).

Работа была финансово поддержана грантом Российского научного фонда № 21–17–00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны (для А.Т. Базилевского)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А.Т. Оценка абсолютного возраста ударных кратеров Луны, Меркурия и Марса по степени их морфологической выраженности // Исследования Солнечной системы: Космические вехи. Материалы научной сессии, посвященной 80-летию академика М.Я. Марова. Четвертый Международный симпозиум по исследованию Солнечной системы. ИКИ РАН, Москва, 14–18 октября 2013. Сер. Механика, управление и информатика / Ред. Захаров А.В. Москва. 2015. С. 213–228.
- Базилевский А.Т., Красильников С.С., Иванов М.А. Ударный кратер со следами тектонических деформаций в южной полярной области Луны // Астрон. вестн. 2024. Т. 58. № 1. С. DOI: 10.31857/S0320930X22020050. (Bazilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Ivanov M.A. Impact crater with traces of tectonic deformation in the south polar region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2024. V. 58. № 1. P.).
- Гришакина Е.А., Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф., Шевченко В.В. Гипсометрическая карта Луны // ГАИШ МГУ, МИИГАиК, 2014.
- Казмерчук П.В., Мартынов М.Б., Москатиньев И.В., и др., Космический аппарат “Луна-25” — основа новых исследований Луны // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 9–19.
- Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М., Третьяков В.И., Калашников Д.В. Луна-25: первая полярная миссия на Луну // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 497–508. DOI:10.31857/S0320930X21060098. (Mitrofanov I.G., Zelenyi L.M., Tret'yakov V.I., Kalashnikov D.V. Luna-25: The First Polar Mission to the Moon // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 6. P. 485–495. DOI:10.1134/S0038094621060095).
- Basilevsky A.T. On the evolution rate of small lunar craters // Proc. 7<sup>th</sup> Lunar Sci. Conf. 1976. P. 1005–1020.
- Basilevsky A.T., Head J.W., Horz F. Survival times of meter-sized boulders on the surface of the Moon // Planet. and Space Sci. 2013. V. 117. P. 118–126.
- Basilevsky A.T., Head J.W., Horz F., Rumsley K. Survival times of meter-sized rock boulders on the surface of airless bodies // Planet. and Space Sci. 2015. V. 89. P. 312–328.

- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermalyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R.C., Goldstein D., Summy D., Bart G.D., Asphaug E., Korycansky D. and 2 coauthors. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // *Science*. 2010. V. 330 (6003). P. 463–468.
- Hodges C.A., Muehlberger W.R. Geology of the Apollo 16 area, Central Lunar Highlands // *US Geol. Surv. Prof. Paper* 1048 / Eds: Ulrich G.E., 1981. 133 p., DOI:10.3133/pp1048.
- Jozwiak L.M., Head J.W., Zuber M.T., Smith D.E., Neumann G.A. Lunar floor-fractured craters: Classification, distribution, origin and implications for magmatism and shallow crustal structure // *J. Geophys. Res.*: 2012. V. 117. id. E11005. DOI:10.1029/2012JE004134
- Lawrence D.J., Peplowski P.N., Plescia J.B., Greenhagen B.T., Maurice S., Prettyman Th.H. Bulk hydrogen abundances in the lunar highlands: measurements from orbital neutron data // *Icarus*. 2015.V. 255. P. 127–134. DOI:10.1016/j.icarus.2015.01.005
- Lemelin M., Lucey P.G., Camon A. Compositional maps of the lunar polar regions derived from the Kaguya spectral profiler and the Lunar Orbiter Laser Altimeter Data // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3. P. 1–14.
- Li Yuan, Basilevsky A.T., Xie Minggang, Ip Wing-Huen. Correlations between ejecta boulder spatial density of small lunar craters and the crater age // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 52–61.
- Lucey P.G., Blewett D.T., Taylor G.J., Hawke B.R. Imaging of lunar surface maturity // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105(E8). P. 20377–20386. DOI:10.1029/1999JE001110
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazari-co E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M. and 14 coauthors. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND // *Science*. 2010.V. 330(6003). P. 483. DOI:10.1126/science.1185696
- Mitrofanov I., Litvak M., Sanin A., Malakhov A., Golovin D., Boynton W., Droege G., Chin G., Evans L., Harshman K., Fedosov F., Garvin J., Kozyrev A., McClanahan T., Milikh G. and 9 coauthors. Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations onboard LRO // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117 id. E00H27. DOI:10.1029/2011JE003956
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N., Annadurai M., Boardman J., Buratti B., Combe J.-P., Dyar M.D., Green R., Head J.W., Hibbitts C., Hicks M., Isaacson P., Klima R., Kramer G. and 14 coauthors. Character and spatial distribution of OH/H<sub>2</sub>O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 // *Science*. 2009.V. 326(5952). P. 568–572. DOI:10.1126/science.1178658
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D.V., Kozyrev A.S., Livengood T.A., Malakhov A.V., McClanahan T.P. and 5 coauthors. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 20–30. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.06.002
- Schultz P.H. Floor-fractured lunar craters // *Moon*. 1976. V. 15. P. 241–273.
- Taylor G.J., Warren P., Ryder G., Delano J., Pieters C., Lofgren G. Lunar rocks // *Lunar sourcebook. A User's Guide to the Moon* / Eds: Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. 1991. P. 183–284.
- Starr R.D., Litvak M.L., Petro N.E., Mitrofanov I.G., Boynton W.V., Chin G., Livengood T.A., McClanahan T.P., Sanin A.B., Sagdeev R.Z., Su J.J. Crater age and hydrogen content in lunar regolith from LEND neutron data // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 105–112. DOI: 10.1016/j.pss.2017.08.001
- Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits // *Icarus*. 1999. V. 141. P. 179–193.
- Watson K., Murray B.C., Brown H. The behavior of volatiles on the lunar surface // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66 (9). P. 3033–3045. DOI:10.1029/JZ066i009p03033