

УДК 523.3–834

КРАТЕР, ОБРАЗОВАННЫЙ УДАРОМ КА ЛУНА-25

© 2024 г. А. Т. Базилевский^{а, *}, Б. А. Иванов^б, В. П. Долгополов^в

^а Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

^б Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

^в НПО им. С.А. Лавочкина, Химки, Московская область, Россия

*e-mail: atbas@geokhi.ru

Поступила в редакцию 14.09.2023 г.

После доработки 04.10.2023 г.

Принята к публикации 20.10.2023 г.

11 августа 2023 г. стартовала автоматическая станция Луна-25 с задачей совершить посадку в южной полярной области Луны и провести исследования грунта и приповерхностной экзосферы. Она благополучно долетела до окрестностей Луны и вышла на орбиту ее спутника. Посадка аппарата была запланирована на 21 августа. В соответствии с программой полета 19 августа был выдан тормозной импульс для формирования предпосадочной орбиты. Но тормозной двигатель проработал дольше, чем планировалось, и аппарат врезался в лунную поверхность. Команда телевизионной камеры LROC KA Lunar Reconnaissance Orbiter, получив от Роскосмоса информацию о месте крушения Луны-25, провела съемку этого места и 24 августа получила снимок, на котором виден морфологически свежий кратер диаметром около 10 м, которого не было на предыдущих снимках этого места. В работе описываются региональная топографическая и геологическая характеристики этого места. Выполнен фотогеологический анализ LROC- снимков места удара. Сделана оценка ожидаемого диаметра кратера, образовавшегося в результате удара Луны-25. Из нашего рассмотрения следует, что описанный в сообщении NASA 10-метровый кратер, по-видимому, действительно образовался в результате удара Луны-25. Его размер соответствует оценкам, рассчитанным по параметрам удара. Отсутствие яркого гало выбросов, типичного для очень молодых лунных кратеров, вероятно, связано с тем, что удар был относительно низкоскоростным, и в данном случае кратер это, скорее, депрессия вдавливания и/или с тем, что находящиеся в аппарате около полутонны неизрасходованного топлива “запачкали” поверхность около кратера.

Ключевые слова: Луна, полярная область, посадка, орбита, удар, кратер

DOI: 10.31857/S0320930X24020019, **EDN:** NURTXG

ВВЕДЕНИЕ

11 августа 2023 г. с космодрома Восточный стартовала автоматическая станция Луна-25 с задачей совершить посадку в южной полярной области Луны и провести поиск воды и других летучих соединений в полярном реголите, получить данные о его элементном и изотопном составе, а также провести исследования плазменной и пылевой компонент лунной приповерхностной экзосферы. Это была первая попытка российского полета на Луну после КА Луна-24 в 1976 г. Луна-25 благополучно долетела до окрестностей Луны и вышла на орбиту ее спутника. На 21 августа была запланирована посадка аппарата. В соответствии с программой полета 19 августа был выдан тормозной импульс для формирования предпосадочной эллиптической орбиты. Но тормозной двигатель проработал дольше, чем планировалось, и аппарат врезался в лунную поверхность (<https://tass.ru/kosmos/18546219>).

Команда телевизионной камеры LROC на Lunar Reconnaissance Orbiter, получив от Роскосмоса информацию о месте крушения Луны-25, провела съемку этого места и 24 августа получила снимок M1447547309R, на котором виден морфологически свежий кратер диаметром около 10 м, которого не было на предыдущих снимках этого места, последний из которых был сделан в июне 2022 г. (<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2023/lro-luna-25-impact>). По-видимому, этот кратер образован в результате удара КА Луна-25. В данной статье будет кратко описано место удара и, примерно зная массу и скорость аппарата в момент удара и угол, под которым произошел удар, мы выполним оценку размера образованного кратера. Если оценка совпадет с наблюдаемым размером, это будет дополнительным аргументом в пользу того, что наблюдаемый на снимке M1447547309R кратер образован в результате удара Луны-25.

ВОЗМОЖНОЕ МЕСТО ПАДЕНИЯ

В заявлении NASA США от 31 августа 2023 г. сказано, что новый кратер находится в точке с координатами 57.865° ю. ш., 61.360° в. д. на крутом (>20°) внутреннем склоне кратера Понтекулан G (Pontécoulant G). Это примерно в 400 км северо-восточнее планировавшегося места посадки Луны-25 (рис. 1, 2, 3).

На рис. 1–3 видно, что предполагаемое место падения Луны-25 находится в материковой области примерно в 35 км к западу от 90-километрового

кратера Понтекулан на внутреннем юго-восточном склоне кратера Понтекулан G (Pontécoulant G) диаметром около 40 км. Fortezzo и др. (2020) считают этот кратер вторичным, образованным выбросами из ударных бассейнов нектарианского возраста (подразделение Nbsc). Этот кратер наложен на равнину, образованную выбросами из тоже нектарианских, но более древних бассейнов и кратеров (подразделение Ntp). Реголит в этом месте по составу должен быть типично материковым, похожим на таковой в местах посад-

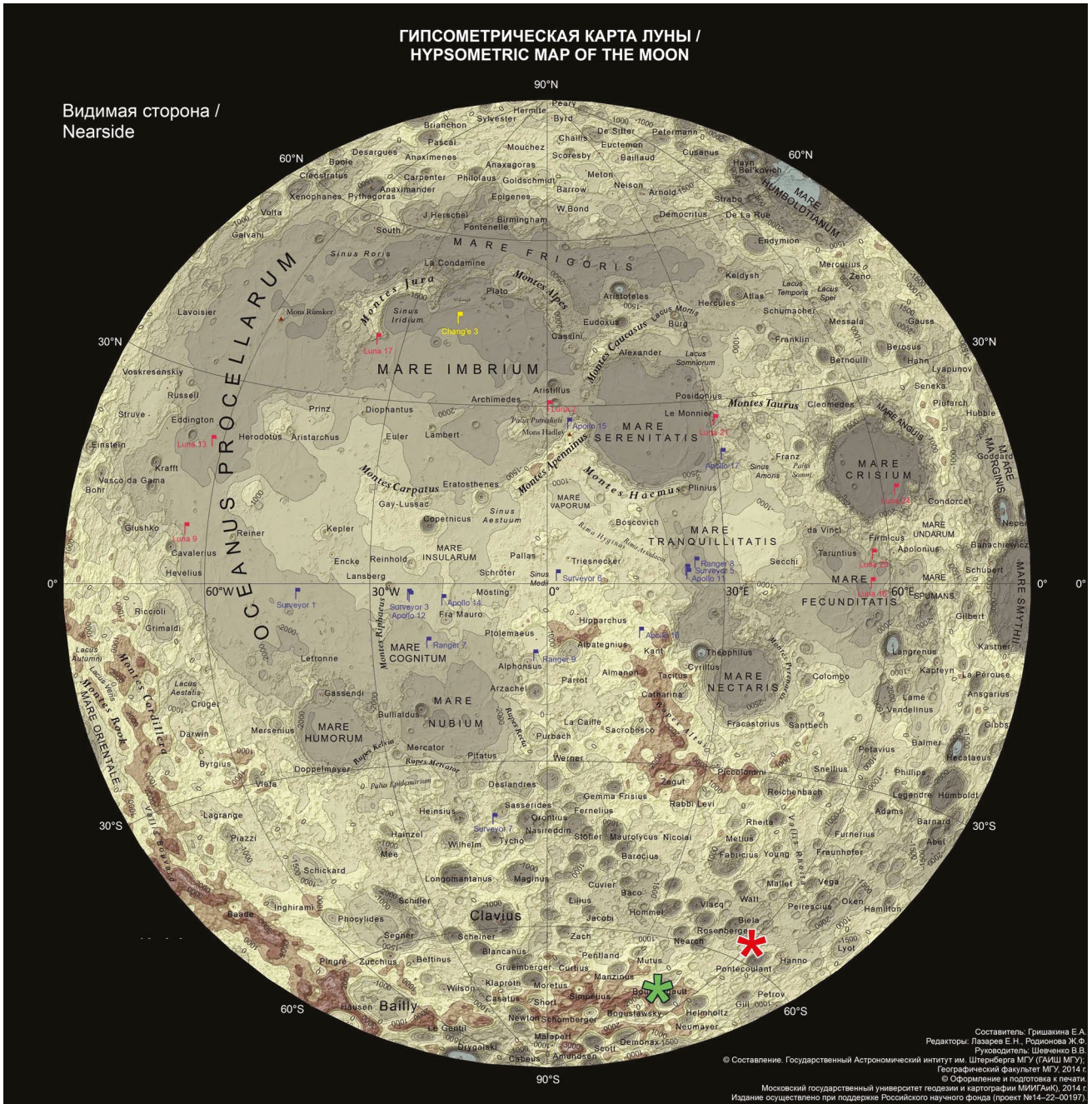


Рис. 1. Карта видимого полушария Луны: красная звездочка – предполагаемое место падения КА Луна-25; зеленая звездочка – планировавшееся место посадки. Фрагмент гипсометрической карты Луны (Гришакина, 2014).

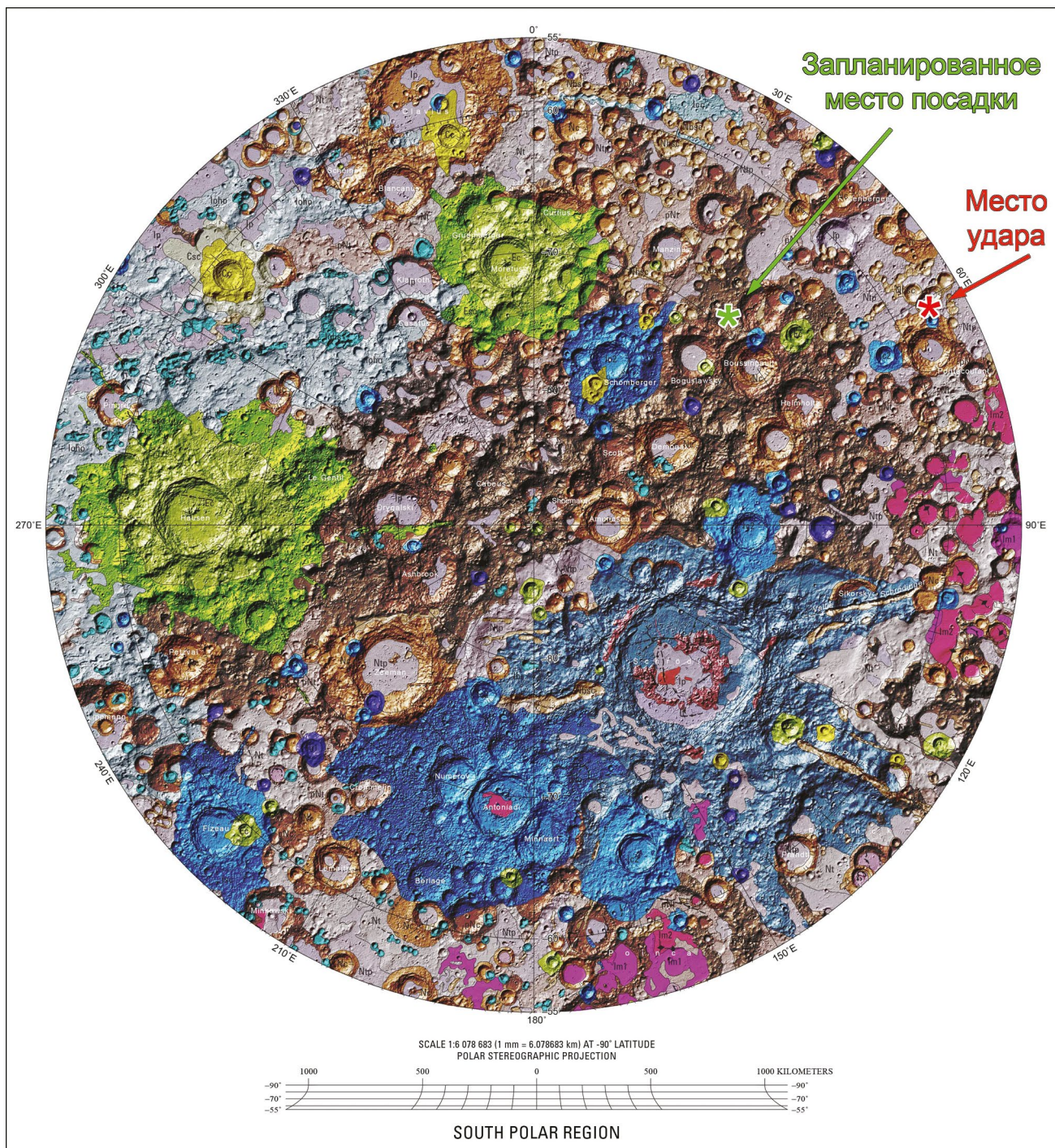


Рис. 2. Геологическая карта южной полярной области Луны: красная звездочка – предполагаемое место падения КА Луна-25; зеленая звездочка – планировавшееся место посадки. Фрагмент геологической карты Луны (Fortezzo и др., 2020).

ки Луны-20 и Apollo-16 (см., например, Флоренский и др., 1981; МсКау и др., 1991). Положение вновь образованного кратера на крутом ($>20^\circ$) склоне предполагает, что за счет движения материала поверхности вниз по склону реголит этого места постоянно перемешивается и должен быть гранулометрически сравнительно незрелым (см.,

например, Флоренский и др., 1975). Планировавшееся место посадки Луны-25 находится юго-западнее места падения на холмистой местности, сложенной выбросами из кратеров донектарианского возраста (подразделение rNb). На рис. 4 показаны фрагменты LROCNAC-снимков места падения Луны-25.

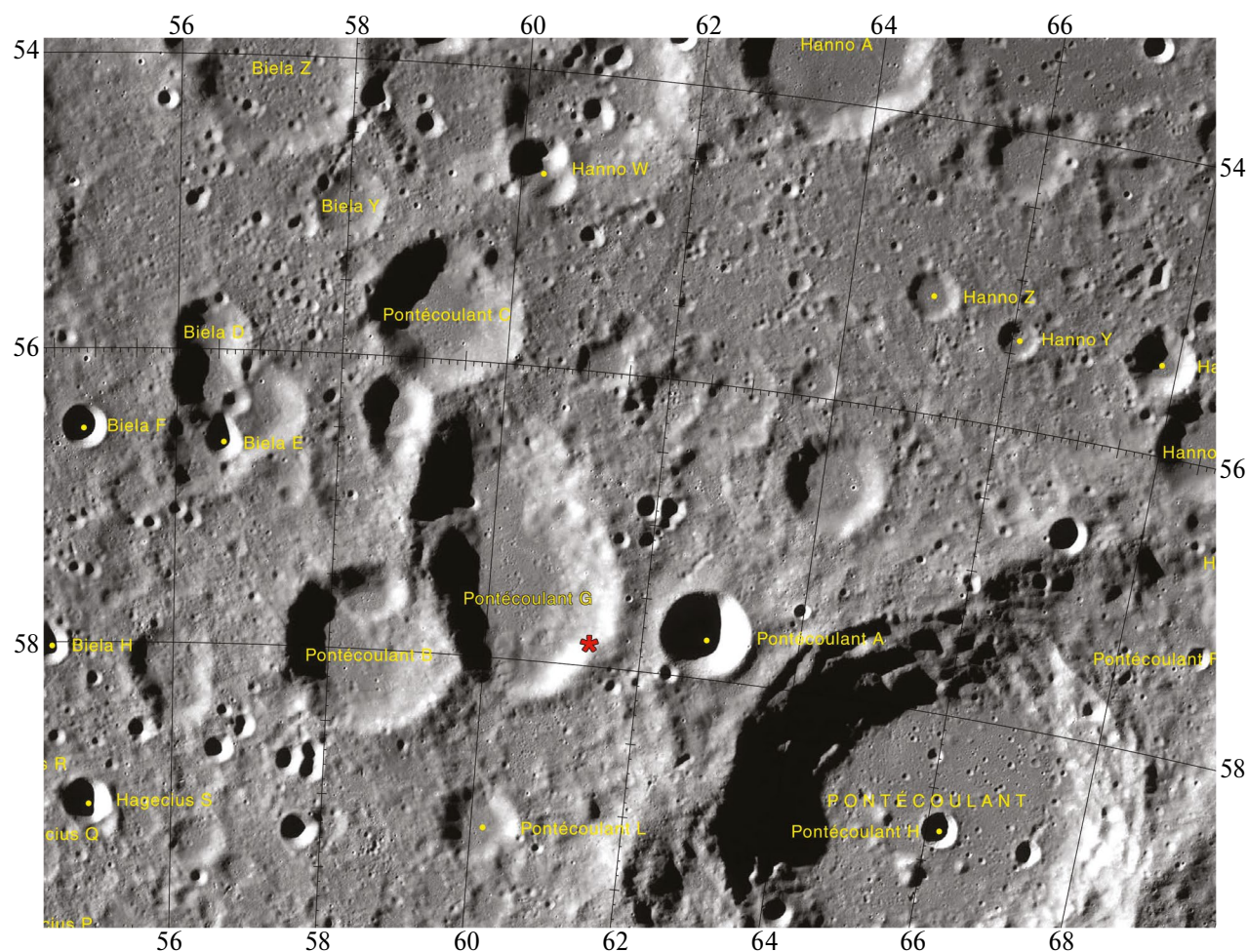


Рис. 3. Место падения КА Луна-25 (красная звездочка немного ниже центра рисунка) на фрагменте карты LAC128WAC; источник: NASA/GSFC/ASU.

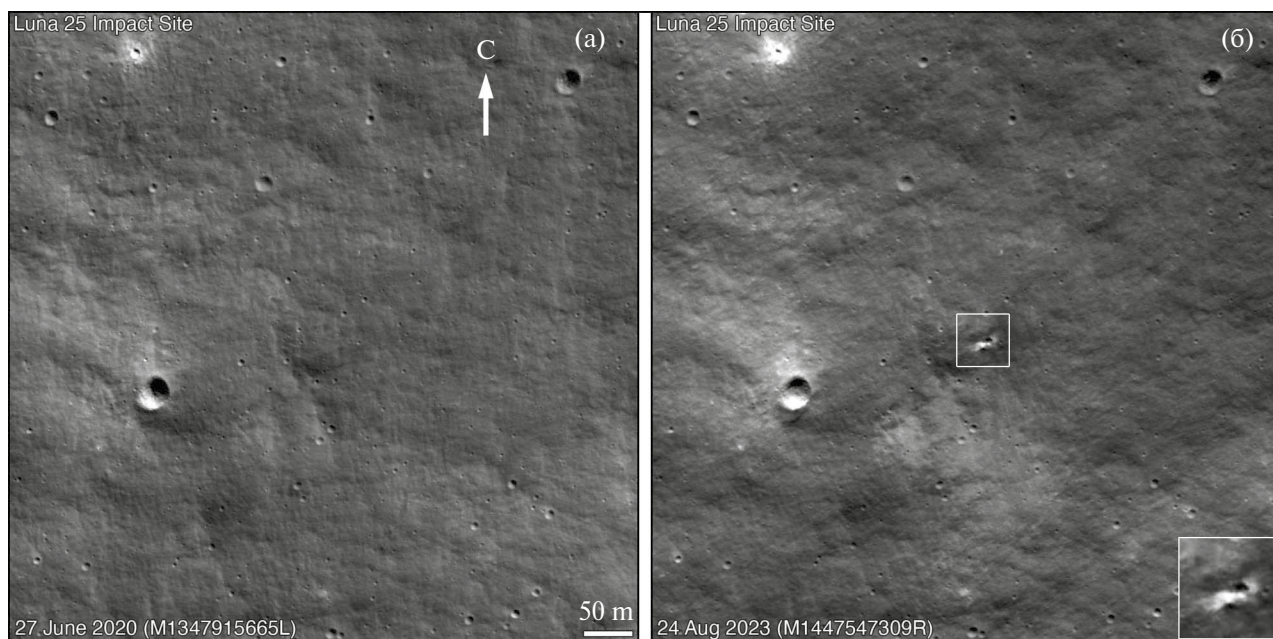


Рис. 4. Предполагаемое место падения КА Луна-25: (а) – снимок, сделанный за три года до падения; (б) – снимок, сделанный через 5 дней после падения. Источник: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2023/lro-luna-25-impact>.

На рис. 4 видно, что новообразованный кратер находится на пологоволнистой поверхности с небольшим количеством малых кратеров, что типично для сравнительно крутых лунных склонов. Диаметр наиболее крупного на этом участке поверхности кратера около 35 м. У этого кратера виден четкий, возвышающийся над окружающей поверхностью вал. Снимок M1347915665L, фрагмент которого представлен на рис. 4а, сделан при высоте Солнца над горизонтом около 25°. Верхняя часть внутренних склонов, ориентированных от Солнца, затенена, что означает, что их крутизна более 25°. На освещенной части внутренних склонов видны бугорки поперечником несколько метров, по-видимому, каменные блоки. Эти характеристики позволяют отнести данный кратер к морфологическому классу А-АВ, а его возраст оценить как не более 2.5 млн лет (Базилевский, 2015; Basilevsky, 1976).

Новообразованный кратер виден на рис. 4б, в основе которого снимок M1447547309R. Диаметр этого кратера около 10 м. Данные о характеристиках снимка M1447547309R еще не опубликованы. Но очевидно, что Солнце в момент съемки M1447547309R было несколько выше, чем при съемке M1347915665L. Это следует из того, что тень внутри 35-метрового кратера на

рис. 4б немного короче, чем на рис 4а, а светлый ореол выбросов вокруг 10-метрового кратера в северо-западном углу рассматриваемого участка на рис. 4б ярче и больше, чем на рис. 4а. Важно отметить, что у кратера, который, возможно, образован в результате удара Луны-25 и который, конечно, моложе упомянутого кратера, в северо-западном углу рассматриваемого участка светлого ореола почти нет. Виден лишь светлый выброс с юго-западной стороны кратера – примерно вниз по склону.

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ КРАТЕРА, ОБРАЗОВАННОГО УДАРОМ КА ЛУНА-25

Общая теория оценок размеров кратера в лунном реголите по параметрам удара описана в обзоре (Werner and Ivanov, 2015). В этом обзоре на рис. 2а собраны основные данные по лабораторным ударным кратерам в сухом песке (хороший аналог лунного реголита для кратеров больше ~5 м в диаметре). Там же даны ссылки на основные публикации по законам подобия. Для построения приведенных размеров кратеров мы должны предположить скорость удара, наклон траектории, массу и плотность (массу и объем ударника).



Рис. 5. КА Луна-25 в сборочном цехе. Снимок Роскосмоса. Источник: <https://www.aex.ru/news/2023/7/18/259700/>.

По данным НПО им. С.А. Лавочкина, посадочный блок КА Луна-25 имел массу 1605 кг в заправленном виде (1000 кг из них – топливо), а удар произошел под углом 45° . Если аппарат до удара израсходовал лишь часть топлива, то, по экспертным оценкам НПО, его масса снизилась до 800–1000 кг, если допустить полное расходование – масса при ударе может быть всего ~600 кг. Размеры (“средняя плотность”) аппарата могут быть оценены по фотографии ТАСС, сделанной в сборочном цехе (рис. 5). Максимальную скорость удара можно считать такой же, как для взлетных моделей КА Apollo-12, -14, -15, и приблизительно равной 1.7 км/с (Whitaker, 1972). Минимально возможную скорость примем равной 1 км/с.

Считая рост человека за 1.8 м, получим грубую оценку формы аппарата как цилиндра диаметром 1.8 м и высотой 2 м (объем ~5 м³). При таком объеме средняя плотность конструкции оценивается в 0.16–0.2 г/см³. Для сравнения средняя плотность других КА, образовавших кратеры в реголите Луны, оцениваются как: КА Ranger – 0.2 г/см³, ракета Saturn SIVB – 0.027 г/см³, взлетный модуль КА Apollo (-12, -14, -15) – 0.05 г/см³, КА GRAIL – 0.13–0.16 г/см³.

Тогда можно нанести оценки параметров подобия π_2 и π_D на единый график, на который на-

несены и оценки по Луна-25, считая, что диаметр кратера, образованный в результате ее удара, равен 10 м (рис. 6).

Таким образом, приведенный в сообщении NASA и измеренный на снимке M1447547309R размер кратера (около 10 м) близок к тренду для кратеров, образованных другими КА со схожей “пустотелой” структурой (Rajšić и др., 2021). Судя по соответствию ранее опубликованным данным о кратерах от падения на Луну пустотелых фрагментов космических аппаратов, наиболее подходящим представляется образование кратера значительно заторможенным КА с полностью израсходованным запасом топлива. Подтвердить или отвергнуть такой вывод можно будет после опубликования более полных данных телеметрии и проведения дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенного выше рассмотрения следует, что описанный в сообщении NASA от 31 августа 10-метровый кратер, показанный на рис 46, может быть образован ударом Луны-25. Его размер находится на краю интервала оценок, сделанных по законам подобия для ударов в лунный реголит. Отсутствие яркого гало выбросов,

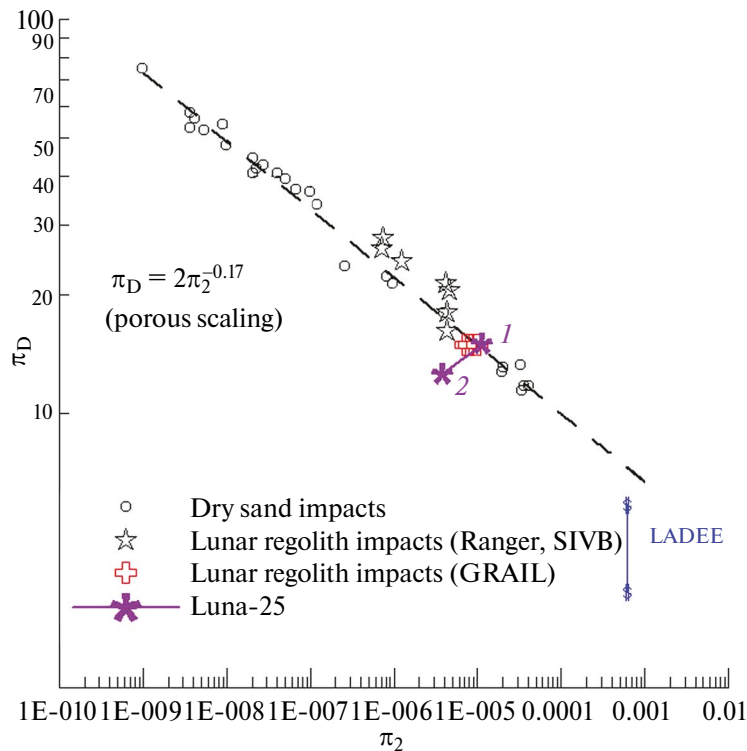


Рис. 6. Приведенные параметры кратеров в лунном реголите, образованных в результате падения КА, в сравнении с лабораторными опытами в сухом песке. Два фиолетовых значка для Луны-25 означают две комбинации величин массы и скорости удара: 1–600 кг и 1 км/с; 2–1000 кг и 1.7 км/с. Данные по искусственным кратерам взяты из (Whitaker, 1972; Plescia и др., 2016) и с сайта NASA (<https://moon.nasa.gov/resources/32/grail-impact-sites/>; <https://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-s-lro-spacecraft-captures-images-of-ladee-s-impact-crater>).

типичного для очень молодых лунных кратеров, вероятно, связано с тем, что удар был относительно низкоскоростным, и в данном случае кратер это скорее депрессия вдавливания, и/или с тем, что, возможно, оставшиеся в аппарате около полутонны топлива “запачкали” поверхность около кратера.

Авторы признательны П.Д. Писаренко за помощь в работе.

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.
- Гришакина Е.А.* Гипсометрическая карта Луны. Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет геодезии и картографии. 2014.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Иванов А.В.* Роль экзогенных факторов в формировании лунной поверхности // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 439–452.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бурба Г.А., Волков В.П., Иванов А.В., Кузьмин Р.О., Назаров М.А., Николаева О.В., Пронин А.А., Родэ О.Д., Яковлев О.И., Ярошевский А.А.* Очерки сравнительной планетологии. М.: Наука, 1981. 326 с.
- Basilevsky A.T.* On the evolution rate of small lunar craters // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. Pergamon Press, 1976. P. 1005–1020.
- Fortezzo C.M., Spudis P.D., Harrel S.L.* Unified geologic map of the Moon. USGS. 2020.
- McKay D.S., Heiken G., Basu A., Blanford G., Simon S., Reedy R., French B.M., Papike J.* The lunar regolith // Lunar Sourcebook. A User Guide to the Moon / Eds: Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. Cambridge Univ. Press, 1991. P. 285–356.
- Plescia J.B., Robinson M.S., Wagner R., Baldrige R.* Ranger and Apollo S-IVB spacecraft impact craters // Planet. and Space Sci. 2016. V. 124. P. 15–35.
- Rajšić A., Miljković K., Wojcicka N., Collins G.S., Onodera K., Kawamura T., Lognonne P., Werner S.C., Ivanov B.A.* Exogenic Dynamics, Cratering, and Surface Ages. Treatise on Geophysics (Second Edition). 2015. V. 10. P. 327–365.
- Werner S.C. Ivanov B.A.* 2015. Exogenic dynamics, cratering, and surface ages (Chapter 10.10). In: Treatise on Geophysics (Second edition). Ed. G. Schubert, Elsevier, Oxford. 327–365.
- Wieczorek M.A., Daubar I.J.* Numerical simulations of the Apollo S-IVB artificial impacts on the Moon // Earth and Space Sci. 2021. V. 8(12). id. e2021EA001887.
- Whitaker E.A.* Artificial lunar impact craters: Four new identifications // Apollo 16 Preliminary Science Report. NASA SP-315, 1972. P. 29–39–29–45.