

УДК523–83

УДАРНЫЙ КРАТЕР СО СЛЕДАМИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЮЖНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ ЛУНЫ

© 2024 г. А. Т. Базилевский^а*, С. С. Красильников^б, М. А. Иванов^а

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

^б Лаборатория дистанционного зондирования планет, Отдел землеведения и геоинформатики, Гонконгский политехнический университет, Гонконг, Китай

* e-mail: atbas@geokhi.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 15.06.2023 г.

Принята к публикации 18.08.2023 г.

В работе рассмотрено строение кратера диаметром 34 км, расположенного в материковой местности в краевой зоне южной полярной области Луны в пределах ударного бассейна Южный полюс – Эйткен. Этот кратер относится к морфологическому типу Дауэс, для которого характерна в целом уплощенная, а в деталях неровная, холмисто-грядовая поверхность дна. Изучаемый кратер обладает трещиноватым дном, что считается признаком внедрения магмы в подкратерное пространство. Трещины в материале дна представлены ложбинами от 2 до 10 км длиной, 0,3–1 км шириной и 50–150 м глубиной. На снимках LROC NAC видно, что на холмисто-грядовых участках дна поверхность реголита имеет “морщинистую” текстуру, а на субгоризонтальных – гладкую. На одном из участков дна находится 700-метровый кратер, вал которого касается одной из ложбин. Судя по морфологии этого кратера и отсутствию на его валу камней метрового размера, он образовался в интервале (200–300) млн – 1 млрд лет назад, тогда как возраст изучаемого 34-километрового кратера, оценен по плотности наложенных на его вал малых кратеров как 3.83(+0.025; –0.031) млрд лет. Возраст материала поверхности деформированного дна изучаемого кратера находится в пределах (200–300) млн – 1 млрд лет. Вероятно, трещиноватость дна (образование ложбин) была вызвана внедрением в подкратерное пространство интрузивного тела или тел в течение коперниковского или начале эратосфенского периодов геологической истории Луны. Рассматриваемый 34-километровый кратер, несомненно, заслуживает дальнейшего изучения.

Ключевые слова: кратер, трещиноватое дно, ложбины, текстура реголита, возраст кратера, возраст материала дна, магматическая активность

DOI: 10.31857/S0320930X24010036, **EDN:** OIBYJZ

ВВЕДЕНИЕ

Космические агентства ряда стран планируют на ближайшие годы исследования в южной полярной области, что связано с присутствием там в реголите замерзших летучих (что характерно и для северной полярной области) и с тем, что там проходит вал ударного бассейна Южный полюс – Эйткен, самого крупного и самого древнего из известных на Луне. 11 августа 2023 г. Роскосмос запустил КА Луна-25, который должен был совершить посадку в окрестностях Южного полюса и провести изучение реголита и окружающей среды (Дьячкова и др., 2021; Митрофанов и др., 2021). Но 19 августа Луна-25 перешла на нерасчетную орбиту и прекратила свое существование в результате столкновения с поверхностью Луны. Вероятно, это как-то изменит наши планы изучения Луны. А пока считается, что примерно через пять лет будет запуск КА Луна-27, ко-

торый тоже должен совершить посадку в районе Южного полюса и провести более детальные исследования. А затем аппарат Луна-28 должен доставить на Землю образцы полярного реголита (Ефанов, Долгополов, 2016). Изучение Южного полюса Луны также планирует Китай – миссии Chang'e-6, -7, -8 (Ху и др., 2020). На это же частично нацелена и американская программа Artemis (NASA, 2020. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/a_sustained_lunar_presence_nspc_report4220final.pdf). В частности, в конце 2024 г. планируется запуск лунохода VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover), который должен заниматься поисками льда, воды и других возможных ресурсов в южно-полярном районе Луны (<https://www.nasa.gov/viper/overview>). Европейское космическое агентство (ESA) тоже прорабатывает возможность исследований в полярных областях Луны (Carpenter, Fisackerly, 2017).

Южная полярная область — это материковая местность, где преобладающие формы рельефа — ударные кратеры. Среди них изредка встречаются кратеры с трещинами на днище. Такие же кратеры с трещинами встречаются и в других областях Луны и трещиноватость днища считается вызванной магматической активностью в недрах под данным кратером (см., например, Schultz, 1976; Jozwiak и др., 2012). Такое сочетание ударного и магматического процессов весьма интересно, и в данной работе мы изучаем один из таких кратеров, расположенных в южной полярной области. Координаты его центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш. и диаметр 34 км. Расположение этого кратера показано на рис. 1 и 2. Основа нашего исследования — фотогеологический анализ снимков, полученных с Wide Angle Camera (WAC) и Narrow Angle Camera (NAC) на аппарате Lunar Reconnaissance Orbiter (NASA).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Общее описание изучаемого кратера и его окрестностей

В ближайших окрестностях изучаемого кратера, кроме многочисленных кратеров диаметром до нескольких десятков километров, осложня-

ющих равнины материкового типа, по-видимому, родственные равнинам места посадки КК Apollo-16 (Geology of the Apollo 16 Area, 1981), видны цепочки вторичных ударных кратеров и на днищах двух кратеров (один из которых — изучаемый) — ложбины, очевидно, трещины растяжения (рис. 3). Важно отметить, что цепочки вторичных кратеров накладываются на северную и южную части вала изучаемого кратера, но на днище кратера они, как будто, не продолжают (см. также рис. 4 и 5).

На рис. 4 видно, что в плане кратер несколько вытянут с запада на восток. В этом направлении его поперечник 36 км, а в направлении север—юг 32 км. Средний диаметр кратера 34 км. Кратер асимметричен и по высоте вала. Возвышение западной части вала над днищем около 1 км, а восточной части — около 2 км. Поверхность днища кратера неровная с невысокими холмами и ложбинами. По данным лазерного высотомера LOLA его средняя высота примерно —4800 м от среднего радиуса Луны, равного 1737.4 км.

Ниже приведена мозаика NAC (Narrow Angle Camera) снимков на изучаемый кратер (рис. 5).

На рис. 4 и 5 видно, что основные элементы рельефа поверхности днища изучаемого кратера (а именно его морфология специфична для

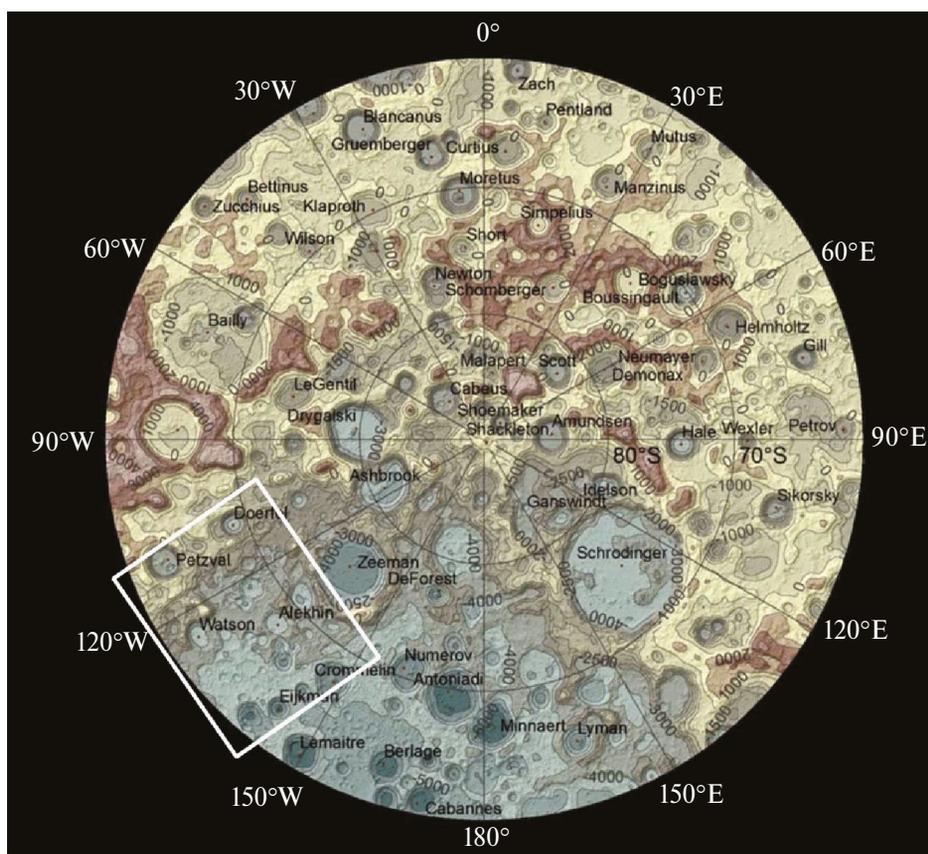


Рис. 1. Фрагмент гипсометрической карты Луны (Гришакина, 2014) — южная полярная область. Белый прямоугольник показывает расположение участка поверхности, представленного на рис. 2.

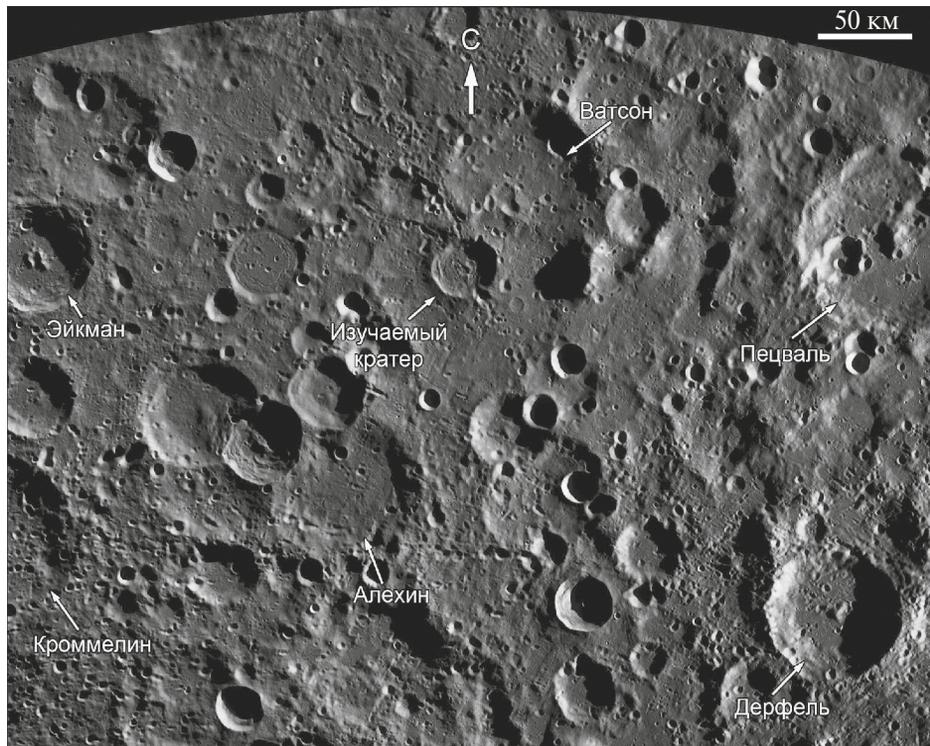


Рис. 2. Окрестности изучаемого кратера, местоположение см. на рис. 1. Фрагмент мозаики WAC_GLOBAL_P900S0000_100M. Источник: NASA.

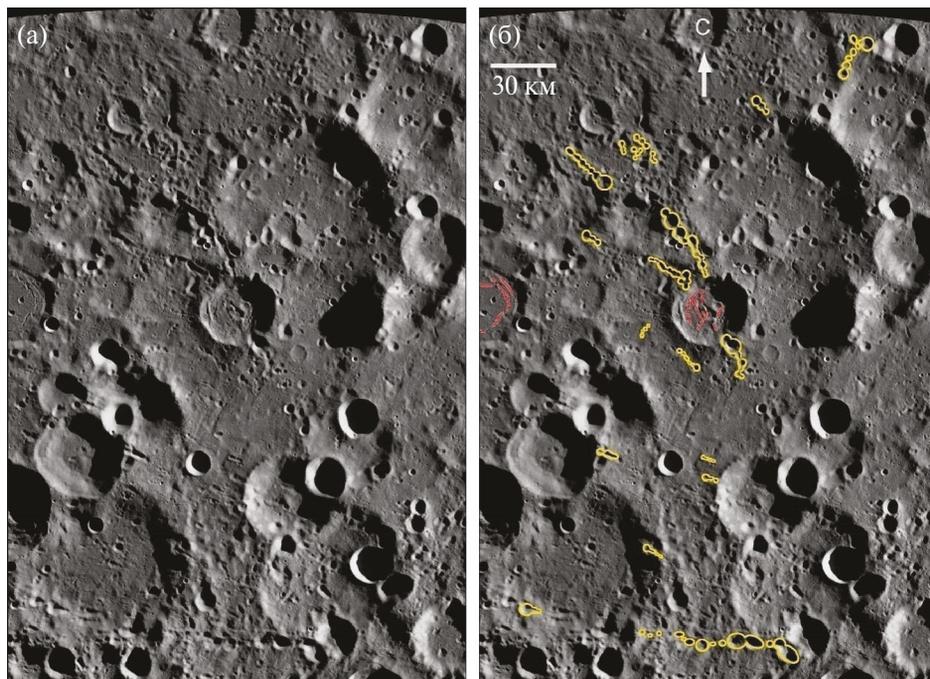


Рис. 3. Район исследуемого кратера: (а) – фрагмент мозаики WAC снимков (NASA); (б) – скопления вторичных кратеров (желтые) и ложбины, вероятно, трещины растяжения (красные) в окрестностях изучаемого кратера.

данной разновидности кратеров) – холмы и ложбины, иногда уступы. Выраженной центральной горки у этого кратера нет. Холмы, ложбины и уступы – пологосклонные с крутизной склонов не более 10° – 15° , в редких случаях до 20° , не да-

ющие тени на использованных для этой мозаики NAC снимках. Тени видны лишь в нескольких кратерах диаметром 300–500 м и меньше. В ряде мест внутренний склон изучаемого кратера переходит в дугообразные в плане (параллельные

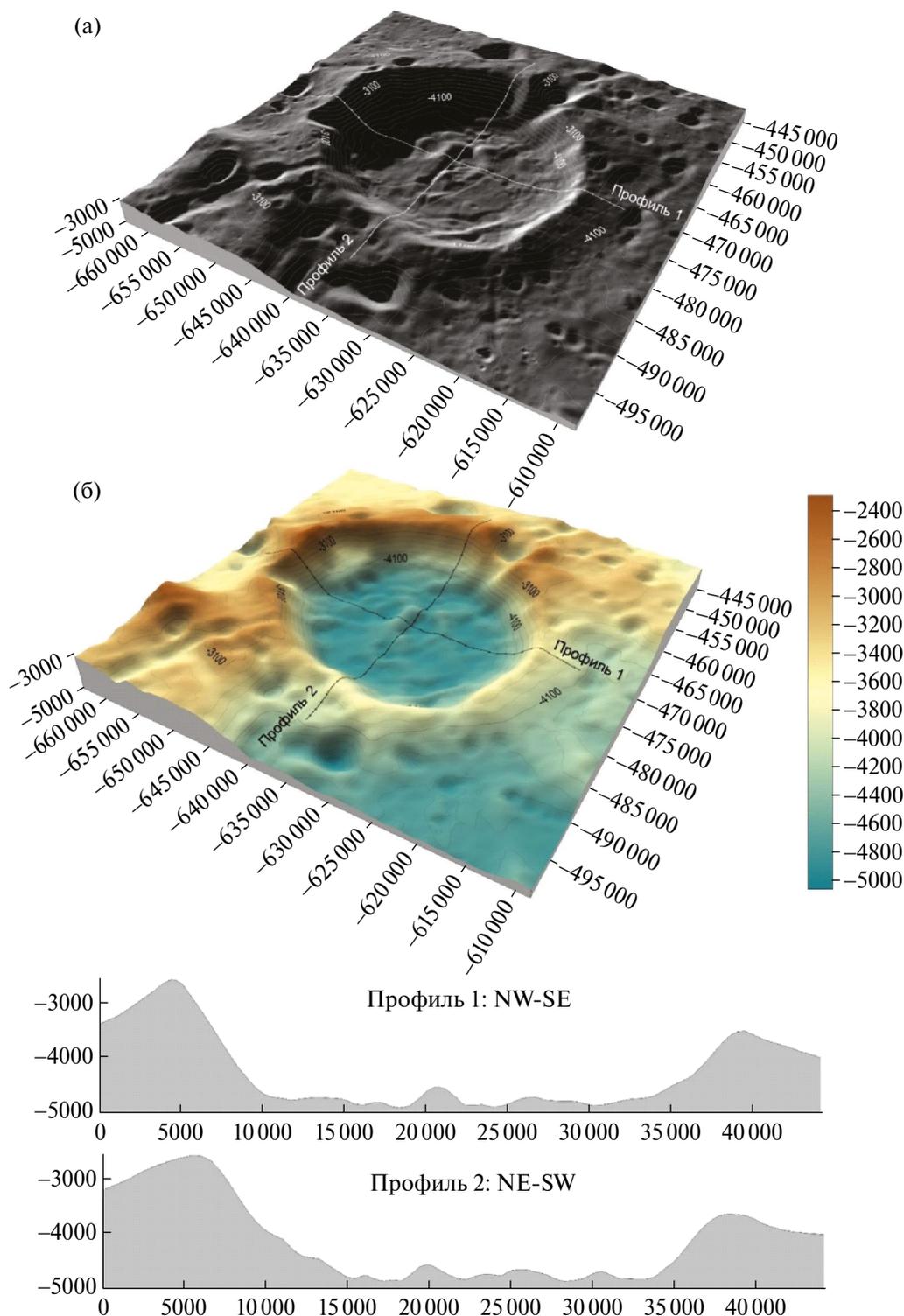


Рис. 4. Изображения изучаемого кратера: (а) – WAC снимок; (б) – гипсометрическая карта этого кратера, составленная по данным лазерного высотомера LOLA. Высоты и расстояния в метрах.

очертаниям вала кратера) ложбины глубиной 50–150 м от среднего уровня поверхности дна. Эта особенность части кратеров с трещиноватыми днищами отмечалась в упомянутых выше работах Schultz (1976) и Jozwiak и др. (2012) – V-shaped moat, кратеры их классов 4а, 4б и 4с.

Ложбин на днище кратера больше в его западной части, но они есть и в восточной. Они от 2 до 10 км в длину, 0,3–1 км в ширину и глубиной 50–150 м. Расположение ложбин в плане полигональное с элементами дугообразного. Уступы наблюдаются в околосклоновых частях дна

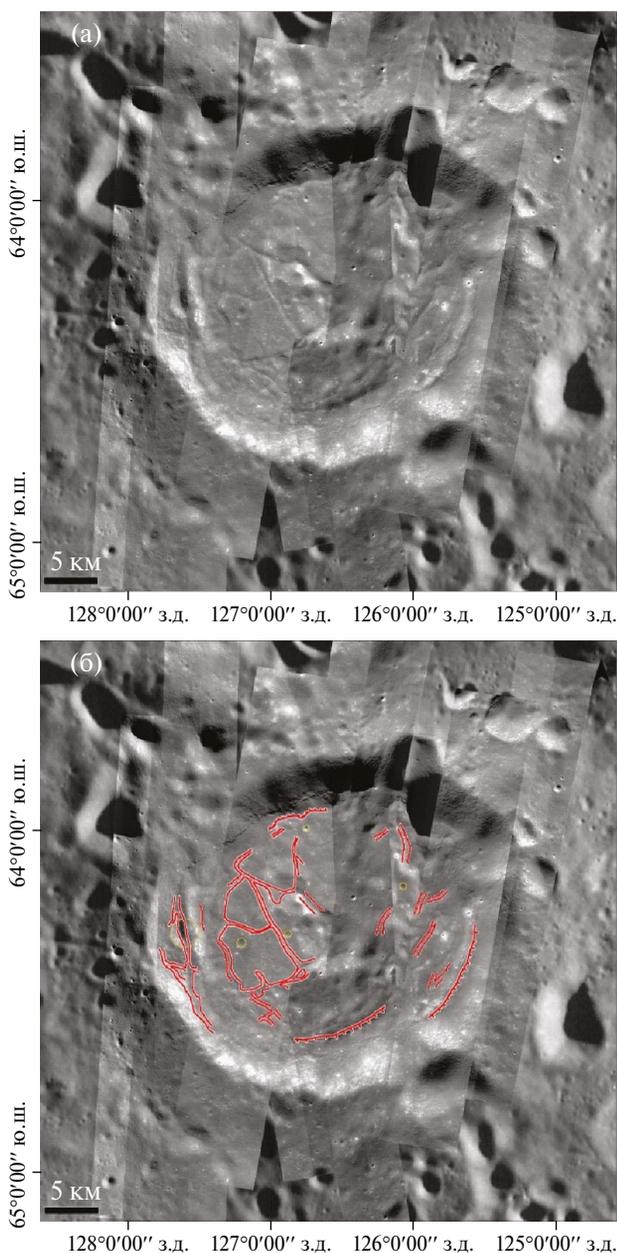


Рис. 5. Изображения изучаемого кратера: (а) — мозаика NAC снимков на изучаемый кратер; (б) — то же с показанными красными линиями ложбинами (трещинами).

на севере, юге и юго-востоке. Их длина 6–10 км и высота 50–150 м.

Морфология поверхности дна на снимках LROC NAC

Ниже будет рассмотрена морфология поверхности на двух участках дна изучаемого кратера (рис. 6а) с использованием NAC снимков с разрешением около 1 м, полученных при высотах Солнца над горизонтом 14.3° и 24.1° (рис. 6б и 6в). На первом участке находится разветвление

одной из упоминавшихся выше ложбин и, соответственно, прилегающая местность. На втором участке находится другая ложбина, а на прилегающей к ней с востока местности расположен кратер диаметром около 700 м.

На рис. 6б видно, что на краях ложбин нет резких уступов. Крутизна их внутренних склонов сверху вниз постепенно увеличивается, а потом уменьшается. В нижней части северного склона ложбины, около ее разветвления, видна россыпь каменных блоков поперечником несколько метров. Возможно, это результат экскавации из расположенных немного выше по склону кратеров диаметром 100–150 м. Текстура поверхности реголита “морщинистая”. Такая текстура характерна для наклонных поверхностей и образуется за счет движения реголита вниз по склону, провоцируемого близкими ударами метеоритов и эндогенными лунотрясениями (см., например, Basilevsky и др., 2019, а также снимки NAC M113934743LC на место посадки Apollo-15 и M131447374LC на место посадки Apollo-17). Также видны кратеры диаметром от нескольких метров до 100–150 м. Но их пространственная плотность невелика, что, очевидно, связано с их ускоренным разрушением при движении реголита вниз по склонам (см., например, Базилевский, Попович, 1976; Basilevsky, 1976).

На рис. 6в видна протягивающаяся с северо-запада на юго-восток ложбина. Как и на участке 1, на краях ложбины нет резких уступов. Крутизна их внутренних склонов сверху вниз постепенно увеличивается, а потом уменьшается. На бортах ложбины и на большей части местности к северо-востоку от нее текстура поверхности реголита “морщинистая”. К юго-западу от ложбины текстура поверхности сравнительно гладкая. И поверхность здесь субгоризонтальная. Повсеместно видны кратеры диаметром от нескольких метров до 150–250 м.

Около северо-восточного края ложбины этого участка находится сравнительно крупный кратер. Его диаметр около 700 м. На изображении, полученном при высоте Солнца 14.3°, восточная часть кратера затенена, т. е. крутизна верхней части его внутреннего склона больше 14.3°. Конец тени находится примерно на центре кратерной депрессии. Отсюда следует, что отношение глубины этого кратера к его диаметру примерно 0.25. Судя по крутизне внутреннего склона рассматриваемого кратера, он относится к морфологическому классу В, но с необычно большим отношением глубины к диаметру. Судя по этим характеристикам, абсолютный возраст этого кратера не более 1 млрд лет (Basilevsky, 1976; Базилевский, 2015). Такой большой кратер в момент образования должен был проникнуть на глубину 150–200 м через

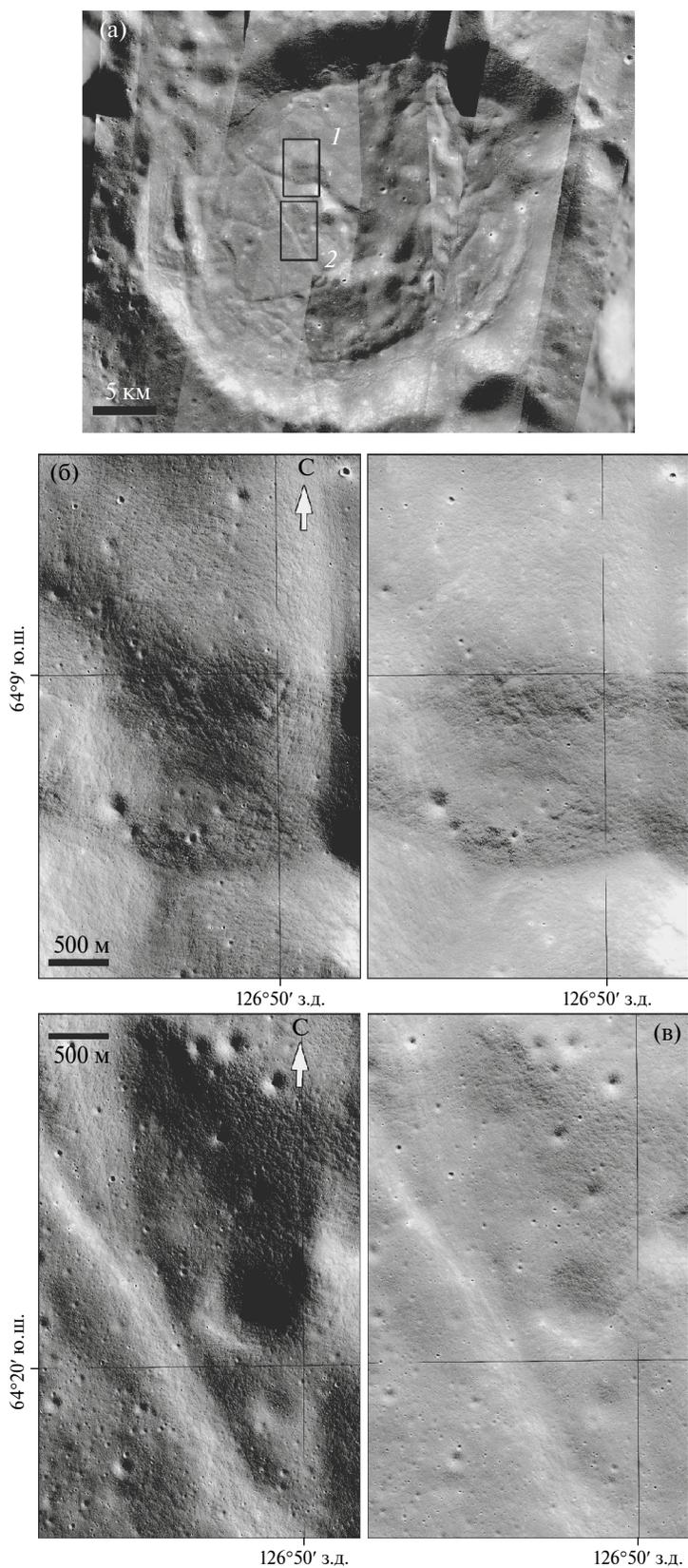


Рис. 6. Морфология поверхности дна изучаемого кратера на снимках LROC NAC: (а) – положение двух участков (1 и 2) на дне изучаемого кратера, координаты центра кратера 126.59° з. д., 64.32° ю. ш.; (б) – фрагменты снимков NAC M1122039053LE и RE (слева) и M135960042LE (справа) с разрешением 0.88 м и высотой Солнца над горизонтом 14.3° и 24.1° соответственно для участка 1; (в) – фрагменты снимков NAC M1122039053LE и RE (слева) и M1359600424LE (справа) с разрешением 0.88 м и высотой Солнца над горизонтом 14.3° и 24.1° соответственно для участка 2.

слой реголита в скальное основание. Но на его валу не видно камней. Очевидно, они разрушились, находясь на поверхности, под воздействием ударов метеоритов и микрометеоритов и суточных колебаний температуры поверхности. Судя по оценкам Basilevsky и др. (2013; 2015) и Li и др. (2018), время, необходимое для практически полного разрушения камней метрового диапазона размеров на поверхности Луны, составляет 200–300 млн лет. Таким образом, абсолютный возраст обсуждаемого 700-метрового кратера, вероятно, находится в пределах (200–300) млн – 1 млрд лет.

Западная часть вала этого кратера соприкасается с восточным краем расположенной здесь ложбины. Вал как бы “открывается” в ложбину. Это может быть как в случае, если кратер образовался раньше, чем ложбина, так и в случае, если кратер образовался позже нее. Но во втором случае материал “открытой” части вала должен был свалиться в ложбину. На представленных на рис. 6в изображениях на дне ложбины какого-то “избыточного” материала не видно. По-видимому, ложбина образовалась после образования обсуждаемого 700-метрового кратера. А отсюда следует, что она образовалась позже возрастного интервала (200–300) млн – 1 млрд лет.

Оценка абсолютного возраста изучаемого кратера и материала поверхности его днища

Для оценки возраста изучаемого кратера проведены идентификация и подсчет малых кратеров на внешнем склоне его вала. Участок подсчета и график пространственной плотности малых кратеров показаны на рис. 7.

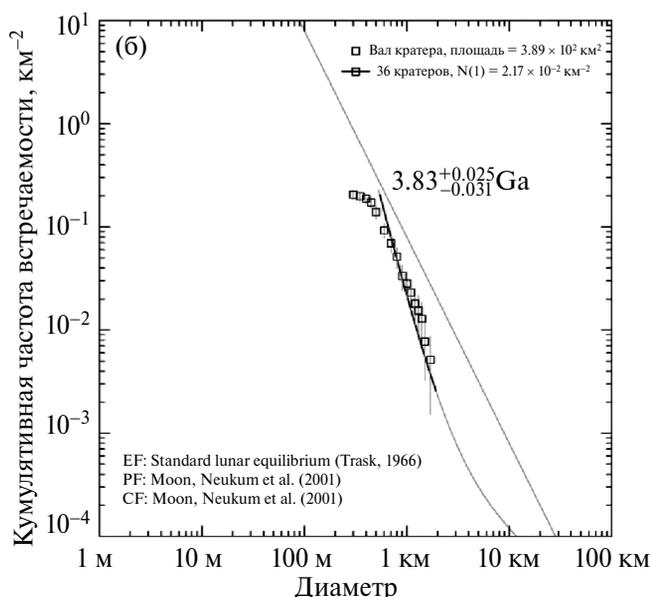
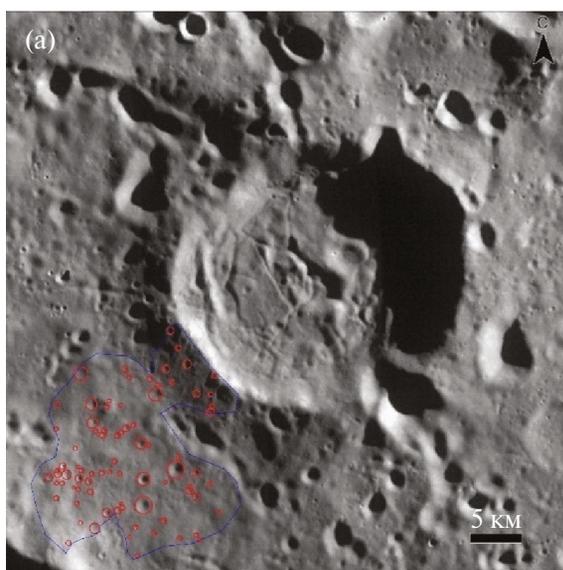


Рис. 7. Результаты подсчета малых кратеров на внешнем склоне изучаемого кратера: (а) — участок подсчета кратеров (красные точки и кружки); (б) — график пространственной плотности кратеров на этом участке.

Из информации, представленной на рис. 7, видно, что изучаемый кратер образовался ~3.85 млрд лет назад, что близко к началу имбрийского периода геологической истории Луны (Wilhelms, 1987). Следует однако отметить, что в окрестностях этого кратера и на его валу (см., рис 3 и 7а) много вторичных кратеров, и какая-то часть малых кратеров, использованных нами для оценки возраста, могут быть вторичными. А это значит, что наша оценка в какой-то степени может быть завышена.

Для оценки возраста материала днища изучаемого кратера с использованием топографической карты, приведенной на рис. 4б, на днище были выделены два участка с уклонами менее 5° (рис. 8а) и на них выполнены идентификация и подсчет кратеров с диаметром более 50 м. График пространственной плотности этих малых кратеров приведен на рис. 8б.

Как видно из рис. 8б, график пространственной плотности малых кратеров может соответствовать двум возрастам: ~1 млрд лет и ~3.5 млрд лет. Первый, возможно, соответствует возрасту переработки поверхности при внедрении под кратер магмы и, соответственно, образования трещин растяжения (ложбин, см. предыдущий раздел статьи). А второй — возрасту изучаемого кратера (см., также рис. 7б). Вероятно, внедрение магмы в подкратерное пространство произошло гораздо позже образования изучаемого кратера.

Информация о химическом и минералогическом составе

Изучаемый кратер расположен на днище бассейна Южный полюс — Эйткен, которое очер-

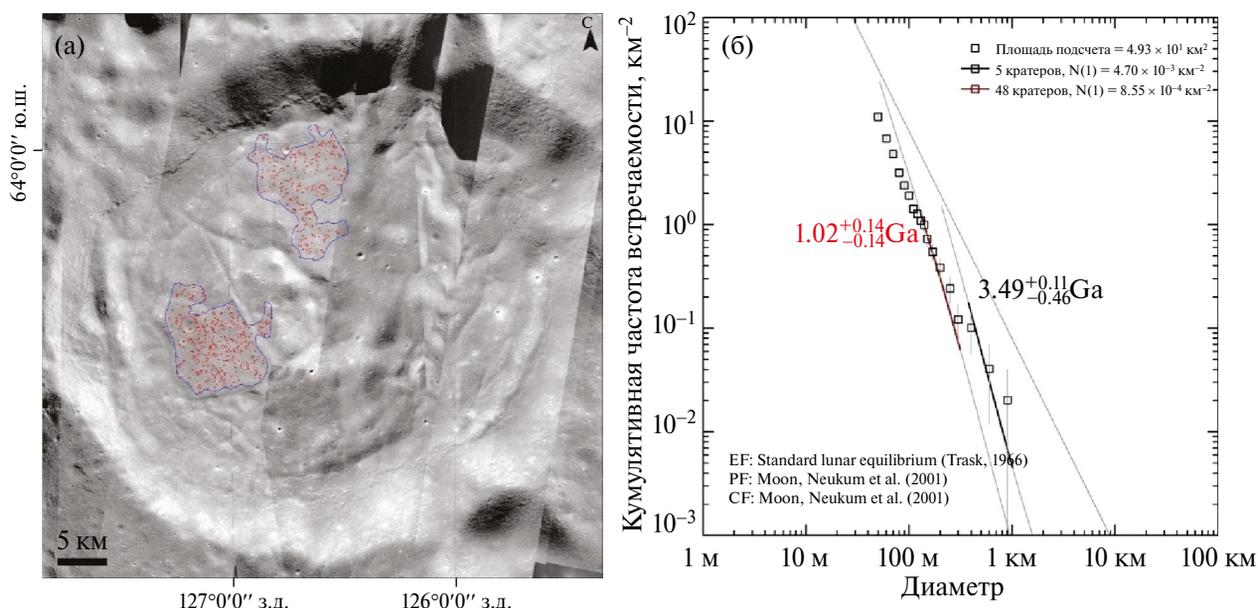


Рис. 8. Результаты подсчета малых кратеров на днище изучаемого кратера: (а) — участки подсчета кратеров (красные точки и кружки); (б) — график пространственной плотности кратеров.

чивается по топографическим данным (Garrick-Bethell, Zuber, 2009). Днище бассейна представляет собой крупную аномалию повышенных содержания железа в реголите, установленную по данным гамма-съемки в экспедиции Lunar Prospector (Lawrence и др., 2002). Природа этой аномалии до сих пор не установлена, хотя было высказано предположение, что она может отражать дифференцированность лунной коры в отношении железа до ударного события, образовавшего бассейн Южный полюс — Эйткен (Ivanov и др., 2018). Использование спектральных оптических методов, традиционно применяемых для выявления химических и минералогических вариаций реголита (Pieters и др., 1994; Lucey, 2004; Moriarty, Pieters, 2018), до последнего времени в высоких полярных широтах было существенно затруднено из-за неизбежно косо освещенности (большого фазового угла) и преимущественного влияния рельефа поверхности на величину альбедо. В опубликованной недавно работе был предложен метод совместной обработки оптических и топографических данных, позволяющий адекватно оценивать ряд оптических, химических и минералогических свойств поверхности, таких как индекс оптической зрелости реголита, содержания FeO, плагиоклаза, пироксенов (низко- и высококальциевого) и оливина (Lemelin и др., 2022).

Минералогические карты, опубликованные в работе (Lemelin и др., 2022), показывают, что практически все днище бассейна Южный полюс — Эйткен, которое в южной полярной области характеризуется повышенными содержаниями низкокальциевого пироксена (на уровне

более 35–40 мас.%) и относительно пониженными содержаниями высококальциевого пироксена (на уровне менее 15 мас.%). При этом повышенные содержания обоих пироксенов точно соответствуют кратерам, днище которых перекрыто вулканическим (базальтовым) материалом в областях за пределами вала бассейна SPA и в восточной части днища бассейна. Эти же кратеры характеризуются повышенными концентрациями FeO в реголите (на уровне 15–20 мас.%). Таким образом, повышенные значения содержания этих компонентов свидетельствуют о вулканической активности, связанной с извержением базальтовой магмы.

В западной части днища бассейна, где расположен изучаемый кратер, отсутствуют четкие морфологические признаки базальтового вулканизма, а содержания высококальциевого пироксена характеризуются значительно меньшей контрастностью. Повышенные содержания низкокальциевого пироксена и FeO связаны главным образом с двумя ударными кратерами, Dawson (135.08° з. д., 67.01° ю. ш., диаметр 45 км) и Eijkman D (136.94° з. д., 62.06° ю. ш., диаметр 25 км). Оба кратера имеют резко выраженный вал, но кратер Dawson лишен выбросов, что характерно для кратеров эратосфенского периода геологической истории Луны, а кратер Eijkman D окружен зоной сплошных выбросов, что характерно для кратеров коперниковского периода (Wilhelms, 1987). На днищах обоих кратеров нет признаков вулканической активности, что в сочетании с повышенными содержаниями пироксена и FeO означает, что эти кратеры выбросили базальтоподобное

вещество при своем формировании из-под поверхности с глубины, которая оценивается, как 1/10 диаметра кратера (Melosh, 1989).

Такое вещество могло бы представлять собой компонент криптоморя (обширной лавовой равнины, полностью перекрытой выбросами более поздних кратеров (Schultz, Spudis, 1979)), располагавшегося на значительной (более 1 км) глубине. Эта гипотеза, однако, может быть отвергнута на том основании, что близлежащие кратеры с диаметром 50 км и более не характеризуются аномальными значениями содержаний пироксенов и железа. Вероятно, материал, выброшенный кратерами Dawson и Eijkman D, представляет собой компонент ограниченного по площади интрузивного тела, а не протяженной базальтовой равнины. Трещиноватые днища изучаемого кратера, а также безымянного кратера (134.03° з. д., 64.03° ю. ш., диаметр 40 км), таким образом, могут представлять дополнительные свидетельства существования локализованных интрузивных тел (например, дайковых комплексов) под поверхностью в южной полярной области Луны.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из приведенных выше характеристик изучаемого кратера, он относится к морфологическому типу кратеров с трещиноватым дном (см., например, Schultz, 1976; Jozwiak и др., 2012). Среди кратеров этого типа, изученных в работе Jozwiak и др. (2012), его нет. Это, по-видимому, связано с тем, что во время работы над этой статьей съемка поверхности Луны камерой WAC Lu-

nar Reconnaissance Orbiter (Robinson и др., 2010) находилась еще на ранней стадии и он мог просто не попасть на имеющиеся изображения поверхности.

Если отвлечься от проблемы трещиноватости днища изучаемого кратера, то он относится к морфологическому типу Дауэс. У кратеров этого типа в целом уплощенная, а в деталях неровная, холмисто-грядовая поверхность, обладающая в плане характерным “вихревым” рисунком (Florengy и др., 1976; Базилевский и др., 1983). Этот тип характерен для кратеров диаметром от 15 до 30 км с небольшими выходами за эти пределы. Кратеры меньшего диаметра обычно чашеобразные. Кратеры большего диаметра – с центральной горкой.

Среди изученных Jozwiak и др. (2012) кратеров есть по крайней мере один, очень похожий на изучаемый нами. Это кратер Голибер (Gaudibert) – ударный кратер диаметром 33 км на северо-восточной границе Моря Нектара на видимой стороне Луны (рис. 9). Координаты центра кратера 10.93° ю. ш. 37.82° в. д.; Jozwiak и др. (2012) относят его к классу 4b.

Для кратеров этого класса характерна относительно небольшая глубина, измеряемая от гребня вала. При этом высота гребня вала над окружающей кратер поверхностью такая же, как у сравнительно молодых неизмененных кратеров соответствующего размера. Кроме того, между подножиями внутренних склонов этих кратеров на значительной части периметра днища присутствует V-образная ложбина. Эти особенности строения таких кратеров позволили Schultz (1976) и Jozwiak и др. (2012) заключить, что тре-

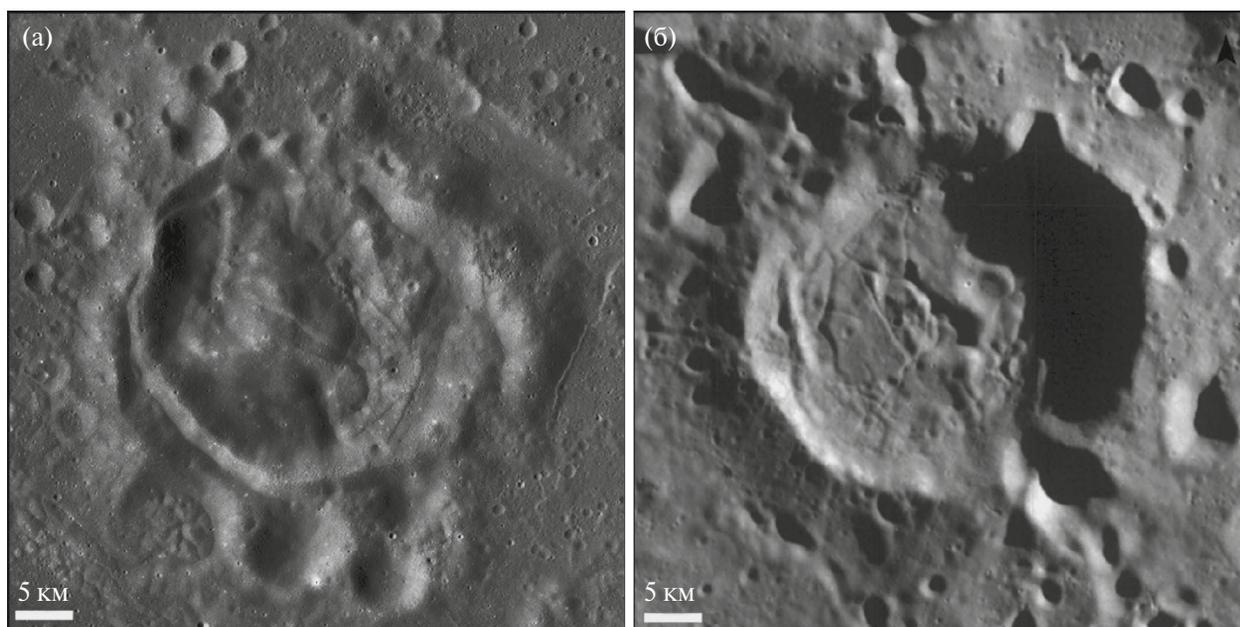


Рис. 9. Изображение кратеров Голибер и изучаемого кратера: (а) – кратер Голибер, координаты центра кратера 10.93° ю. ш., 37.82°; (б) – изучаемый кратер, координаты центра 126.59° з. д., 64.32° ю. ш., снимки LROC WAC.

щиноватость (ложбины) дна этих кратеров вызвана внедрением магматической интрузии. Ее направленное вверх давление вызвало “поршневидный” подъем материала под кратером, что привело к поднятию днища, его изгибанию и образованию трещин растяжения. Вероятно, трещиноватость днища изучаемого кратера (образование ложбин) могла быть тоже вызвана внедрением интрузивного тела в подкратерное пространство. Судя по приведенным выше оценкам времени образования одной из ложбин и оценкам возраста материала поверхности днища, это, вероятно, произошло в течение коперниковского или начале эратосфенского периодов геологической истории Луны. Такие молодые (по лунным меркам) проявления магматической активности до недавнего времени не были выявлены. Однако анализ современных снимков лунной поверхности, полученных с камерами LROC WAC и NAC, показал, что проявления магматической деятельности на Луне могут быть очень молодыми, почти современными (см., например, Braden и др., 2014).

Рассматриваемый 34-километровый кратер, несомненно, заслуживает дальнейшего изучения. В частности, интересно посмотреть, не оказалась ли как-то возможная молодая магматическая активность на деталях минерального состава и концентрации льда или химически связанной воды в реголите дна кратера. Мы планируем обратиться в Международный астрономический союз с предложением присвоить этому кратеру название “Галимов”, в честь покойного геохимика и планетолога академика Эрика Михайловича Галимова, длительное время бывшего директором Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Уверены, что по рассматриваемому кратеру будет много публикаций и имя Галимова будет в них упоминаться. 4 июня 2024 г. Международный Астрономический Союз присвоил описанному в данной статье кратеру название Галимов / Galimov: <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/16287>.

Авторы признательны В.В. Шевченко за помощь в этой работе.

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

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., Грановский Л.Б., Иванов Б.А., Фельдман В.И., Флоренский К.П., Яковлев О.И. Ударные кратеры на Луне и планетах. М.: Наука, 1983. 232 с.

Базилевский А.Т., Попович В.Д. Эволюция малых кратеров на склонах лунного рельефа. Изв. АН СССР. Сер. геол. № 6. 1976. 76–80.

Гришакина Е.А. Гипсометрическая карта Луны / Hypsometric map of the Moon. Государственный астрономический институт им. Штернберга, Московский государственный университет геодезии и картографии, 2014.

Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л., Третьяков В.И. Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25 // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 522–541. (*Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Litvak M.L., Tretyakov V.I.* Characterization of the Luna-25 landing sites // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. Iss. 6. P. 509–528).

Ефанов В.В., Долгополов В.П. Луна. От исследования к освоению (к 50-летию космических аппаратов “Луна-9” и “Луна-10”) // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. Т. 4. № 34. С. 3–8.

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. (*Mitrofanov I.G., Zelenyi L.M., Kalashnikov D.V.* Luna-25: The first polar mission to the Moon // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. Iss. 6. P. 485–495).

Basilevsky A.T. On the evolution rate of small lunar craters // Proc. 7th 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. 89. 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. 117. P. 312–328.

Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Ivanov M.A., Malenkov M.I., Michael G.G., Liu T., Head J.W., Scott D.R., Lark L. Potential lunar base on Mons Malapert: Topographic, geologic and trafficability considerations // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 5. P. 383–398.

Braden S.E., Stopar J.D., Robinson M.S., Lawrence S.J., van der Bogert C.H., Hiesinger H. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 787–791.

Carpenter J.D., Fisackerly R. PROSPECT: ESA’s package for resource observation and in situ prospecting for exploration, commercial exploitation and transportation // 48th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2017. V. XLVIII. id. 2514.

- Florensky C.P., Basilevsky A.T., Grebennik N.N.* The relationship between lunar crater morphology and crater size // *Moon*. 1976. V. 16. P. 59–760.
- Garrick-Bethell I., Zuber M.T.* Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 399–408.
- Central Geology of the Apollo 16 Area Lunar Highlands* // US Geolog. Surv. Prof. Paper 1048 / Eds: Ulrich G.E., Hodges C.A., Muehlberger W.R. 1981. 133 p.
- Ivanov M.A., Hiesinger H., van der Bogert C.H., Orgel C., Pasckert J.H., Head J.W.* Geologic history of the northern portion of the South Pole-Aitken basin on the Moon // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123. P. 2585–2612. <https://doi.org/10.1029/2018JE005590>
- 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.: Atmosphere*. 2012. V. 117. id. E11005. [doi:10.1029/2012JE004134](https://doi.org/10.1029/2012JE004134)
- Lawrence D.J., Feldman W.C., Elphic R.C., Little R.C., Prettyman T.H., Maurice S., Lucey P.G., Binder A.B.* Iron abundances on the lunar surface as measured by the gamma-ray and neutron spectrometers // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2002. V. 107. № 12. P. 13–1–13–26. [doi:10.1029/2001JE001530](https://doi.org/10.1029/2001JE001530)
- 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. 63.
- 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.* Mineral maps of the Moon // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. id. L08701. [doi:10.1029/2003GL019406](https://doi.org/10.1029/2003GL019406)
- Melosh H.J.* *Impact Cratering: A Geologic Process*. New York: Oxford Univ. Press, 1989. 253 p.
- Moriarty D.P., Pieters C.M.* The character of South Pole-Aitken Basin: Patterns of surface and subsurface composition // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123. P. 729–747. <https://doi.org/10.1002/2017JE005364>
- NASA's Plan for Sustained Lunar Exploration and Development*. 2020 https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/a_sustained_lunar_presence_nspc_report4220final.pdf
- Pieters C.M., Staid M.I., Fischer E.M., Tompkins S., He G.* A sharper view of impact craters from Clementine data // *Science*. 1994. V. 266. № 5192. P. 1844–1848.
- Robinson M.S., Brylow S.M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S.J., Thomas P.C., Denevi B.W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M.A., Caplinger M.A., and 12 co-authors.* Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 81–124.
- Schultz P.H.* Floor-fractured lunar craters // *Moon*. 1976. V. 15. 241–273.
- Schultz P.H., Spudis P.D.* Evidence for ancient mare volcanism // *Proc. 10th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 1979. V. 3. P. 2899–2918.
- Wilhelms D.E.* The geologic history of the Moon // *US Geolog. Surv. Special Paper* 1348. 1987. 302 p.
- Xu Lin, Pei Zhaoyu, Zou Yongliao, Wang Chi.* China's lunar and deep space exploration program for the next decade (2020–2030) // *Chinese J. Space Sci.* 2020. V. 40. Iss. 5. P. 615–617.