

УДК 523-83

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МАЛЫХ КРАТЕРОВ ЛУНЫ

© 2020 г. А. Т. Базилевский^{a, *, **}, Г. Г. Майкл^b, С. С. Красильников^a, Н. А. Козлова^{a, c}

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

^bPlanetary Sciences and Remote Sensing, Institute of Geological Sciences, Freie Universitaet Berlin, Berlin, Germany

^cМосковский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАуК), Москва, Россия

*e-mail: atbas@geokhi.ru

**e-mail: Alexander_Basilevsky@Brown.edu

Поступила в редакцию 25.11.2019 г.

После доработки 16.01.2020 г.

Принята к публикации 20.01.2020 г.

В работе обсуждаются три типа процессов разрушения малых кратеров Луны: 1) разрушение наложенными кратерами; 2) разрушение за счет заполнения их выбросами из соседних и удаленных кратеров и 3) разрушение за счет перемещения вещества поверхности различными склоновыми процессами. Они действуют совместно, но роль каждого из них в конкретной ситуации и на разных этапах эволюции кратера может изменяться. Их интенсивность в течение последних трех миллиардов лет истории Луны была заметно ниже, чем в предшествующие эпохи. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценках времени потенциального существования кратеров в разные периоды истории Луны.

Ключевые слова: кратер, выбросы из кратеров, склоновые процессы, борозда, грабен, реголит

DOI: 10.31857/S0320930X20040039

ВВЕДЕНИЕ

Малые ($D < 1-2$ км) кратеры являются наиболее распространенными формами рельефа на Луне. Они активно изучались в 1960–1970 гг. по снимкам, полученным различными космическими аппаратами, как часть фундаментальных исследований этого небесного тела, и как источник уклонов поверхности опасных для посадки на это тело космических аппаратов (см., например, Trask, 1966; Morris, Shoemaker, 1968; Shoemaker и др., 1970; Флоренский и др., 1972; Базилевский, 1973; Basilevsky, 1976; Högз и др., 1991). После получения многочисленных и, что важно, доступных любому пользователю снимков лунной поверхности с разрешением 1–2 м, иногда до 0.25 м, сделанных камерой высокого разрешения LROC NAC на КА Lunar Reconnaissance Orbiter (Robinson и др., 2010; <http://wms.lroc.asu.edu/lroc/search>), интерес к изучению малых лунных кратеров снова возродился. Они, как и раньше, исследуются для изучения процессов, происходящих на лунной поверхности (например, Basilevsky и др., 2015; 2018; Kachevtseva и др., 2017; van der Bogert и др., 2018; Watters и др., 2010; 2015; Xiao и др., 2017) и для оценки степени опасности посадки на нее космических аппаратов (например, Ivanov и др., 2018; Красильников и др., 2018; Zhao и др., 2014).

В данной работе рассматриваются процессы разрушения малых лунных кратеров. Эти процессы в значительной мере уже были описаны в процитированных выше работах 1960–1970 гг. Но на-

копившиеся в последние годы данные делают целесообразным обсудить их снова. Это три вида процессов: 1) разрушение наложенными кратерами; 2) разрушение за счет заполнения их выбросами из соседних и удаленных кратеров и 3) разрушение за счет перемещения вещества поверхности различными склоновыми процессами.

РАЗРУШЕНИЕ НАЛОЖЕННЫМИ КРАТЕРАМИ

На рис. 1 показан пример такого рода, можно сказать, эрозионного разрушения. На кратер диаметром около 300 м наложены несколько кратеров диаметром от 20–30 до 100–120 м и множество кратеров более мелкого размера.

Этот пример демонстрирует суть такого разрушающего наложения. Следует, однако, отметить, что показанная в этом примере хорошая морфологическая выраженность большинства из наложенных на разрушаемый кратер кратеров декаметрового и более крупного размера не типична. Гораздо чаще морфологическая выраженность многих наложенных кратеров зрелая и более, чем зрелая, что, очевидно, вызвано влиянием двух других описываемых в данной статье процессов разрушения. Выбросы из наложенных кратеров участвуют в разрушении других кратеров по описываемому ниже второму типу разрушения.

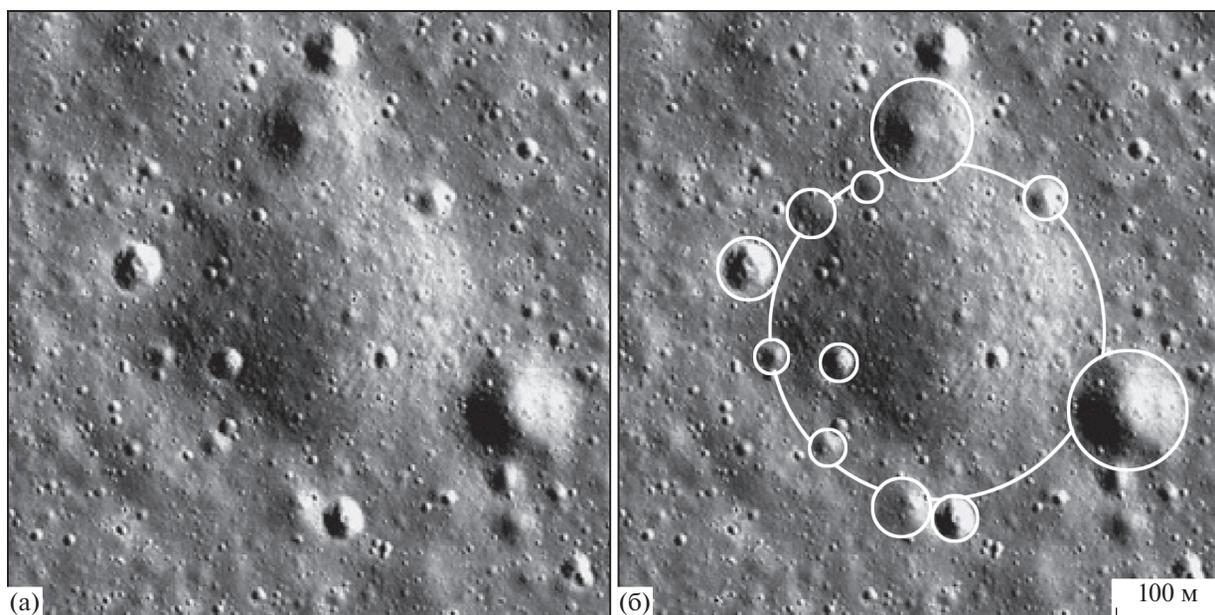


Рис. 1. Пример разрушения кратера диаметром около 300 м наложенными на него кратерами меньшего размера. Фрагмент созданной в МИИГАиК LRO NAC ортомозаики M150749234/M150756018 на район работы Лунохода-1.

РАЗРУШЕНИЕ ЗА СЧЕТ ЗАПОЛНЕНИЯ ВЫБРОСАМИ ИЗ СОСЕДНИХ И УДАЛЕННЫХ КРАТЕРОВ

Это очевидный тип процесса эрозионно-аккумулятивного разрушения кратеров — ясно, что выбросы из кратеров (эрозионная компонента процесса) в той или иной мере должны заполнять уже существующие кратеры (аккумулятивная компонента). На рис. 2 представлена схема горизонтальной переброски выбросов из малых кратеров, которая на субгоризонтальных площадях приводит к примерно нейтральному балансу: сколько материала было выброшено за пределы того или иного участка поверхности, примерно столько же привносится выбросами из кратеров с окружающей местности (рис. 2а). На рис. 2б показано, что относительно глубокие депрессии удерживают в своих пределах часть выбросов из образующихся в их пределах кратеров и получают выбросы из кратеров с окружающей местности. Это зоны положительного баланса. А по краям таких депрессий находятся зоны отрицательного баланса. Кратерные выбросы из них улетают во все стороны, но из соседствующей депрессии часть выбросов в эту зону не поступает, или почти не поступает, что приводит к отрицательному балансу перемещения вещества поверхности.

Интенсивность и масштабы горизонтальной переброски вещества лунной поверхности стали понятны в результате анализа наблюдений астронавтов Apollo-15 в районе Борозды Хэдли (Swann и др., 1972) и, независимо, данных, полученных Луноходом-2 на краю Борозды Прямой (Флоренский и др., 1975; 1976; Basilevsky и др., 1977).

Борозда Хэдли это вулканическое образование: русло, прорезанное текущей базальтовой лавой в толще ранее накопившихся лав Моря Дождей. Ее возраст, очевидно, близок к 3.3 млрд лет, что соответствует абсолютному возрасту базальтов района посадки Apollo-15 (Wasserburg, Papanastassiou, 1971). Приводимое ниже описание интересующего нас участка морской поверхности, примыкающего с востока к Борозде Хэдли, дается по Swann и др. (1972). Здесь Борозда Хэдли имеет ширину 1500 м, глубину около 400 м и протягивается не менее, чем на 100 км. Крутизна внутренних склонов борозды — от 20° до 30°. В верхней части внутреннего склона борозды и на его кромке наблюдаются обнажения коренных пород — базальтовых лав (рис. 3).

Наблюдения астронавтов говорят о том, что по мере приближения к борозде морская поверхность полого понижается, толщина реголита уменьшается, и он становится более грубозернистым. Вблизи края борозды камни встречаются чаще, чем на “нормальной” морской поверхности к востоку. Это увеличение каменности становится заметным примерно в 200–300 м от края борозды. По направлению к борозде увеличиваются размеры наблюдаемых камней. А на краю борозды, как уже сказано выше, наблюдается обнажение коренных пород. Вблизи борозды камни наблюдаются в выбросах из кратеров диаметром более 0.5 м, а далее к востоку через реголит проникают лишь кратеры диаметром более 20–25 м, что дает возможность оценить его “нормальную” толщину как примерно равную 5 м.

Swann и др. (1972) делают вывод, что наблюдаемое уменьшение толщины реголита и погребение его размерного состава, очевидно, вызвано тем, что в зоне около края борозды метеоритные

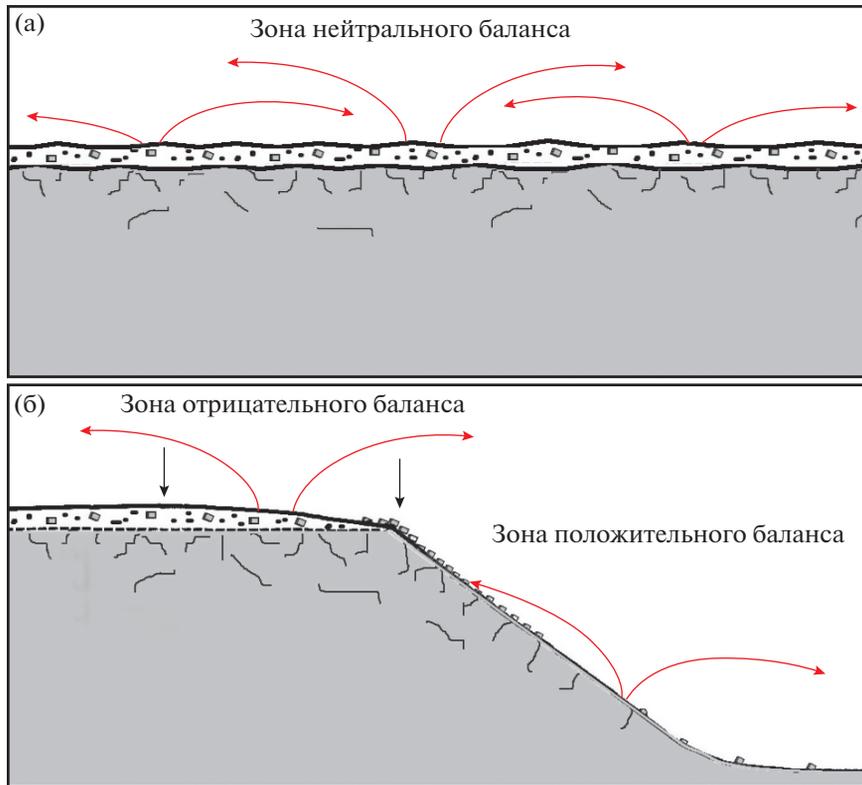


Рис. 2. Схематическое представление зон нейтрального (а), отрицательного и положительного (б) баланса за счет горизонтального разброса выбросов из кратеров.

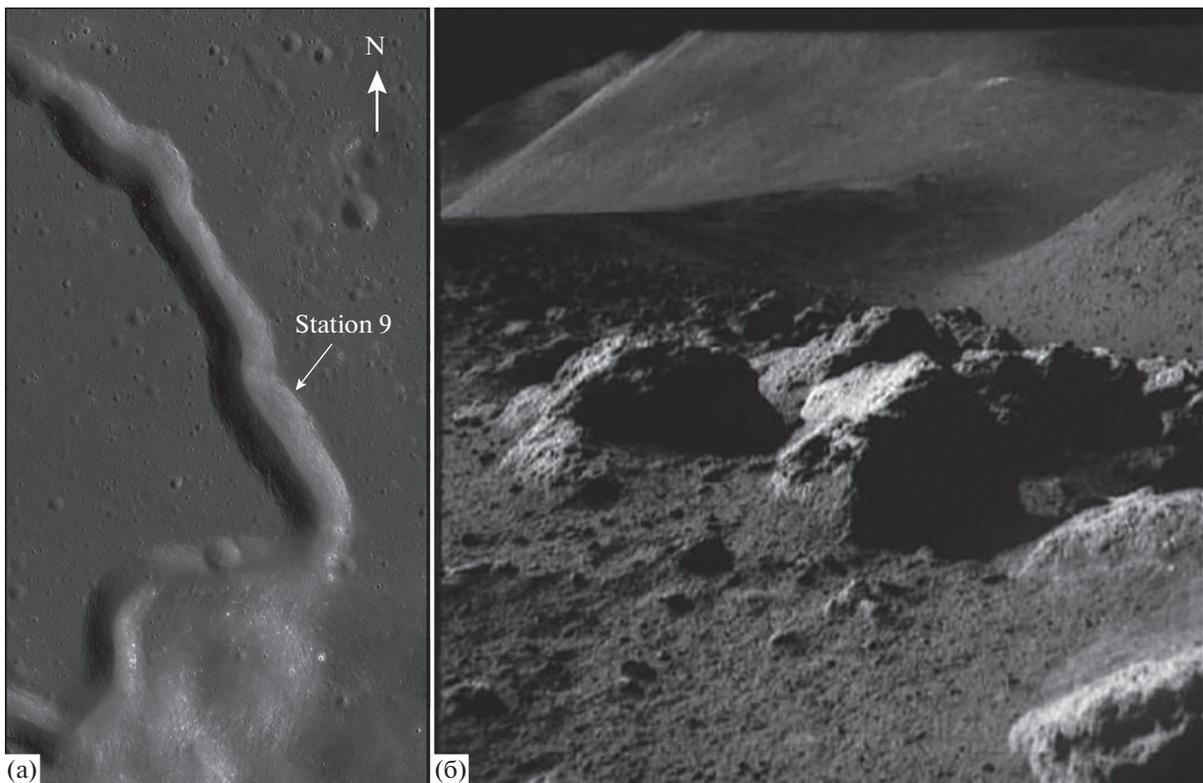


Рис. 3. Слева – Борозда Хэдли, фрагмент LROC NAC снимка M102128467LC. Справа – скопления камней дециметрового и метрового размера на восточной кромке Борозды Хэдли, снимок AS15-82-1147, сделанный астронавтами Apollo-15 на станции 9. Камера смотрит на юг.

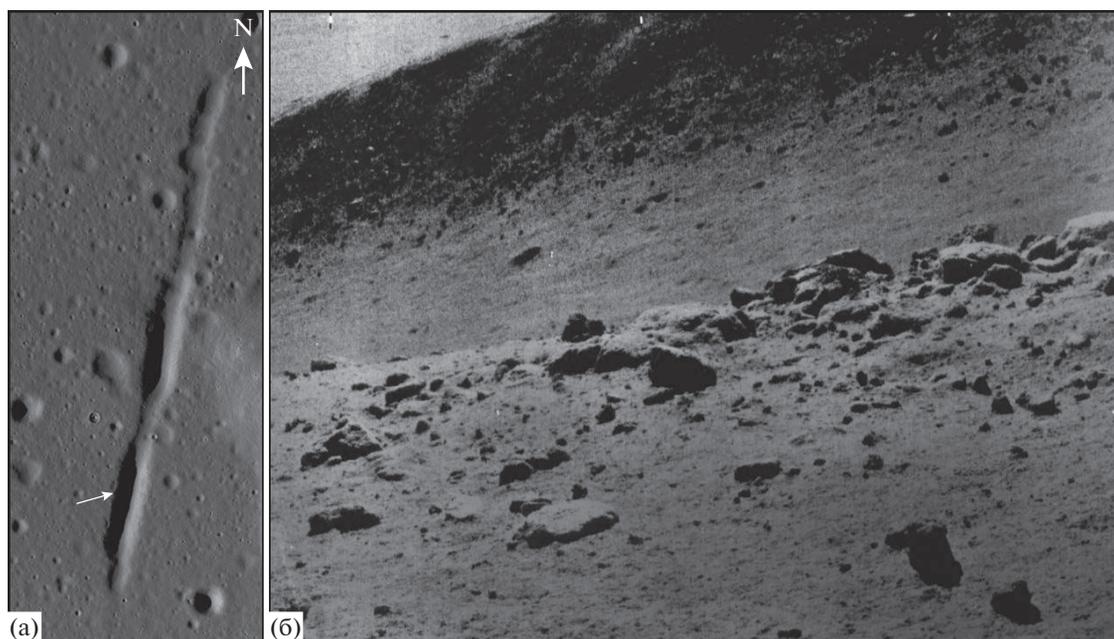


Рис. 4. Слева — Борозда Прямая на равнине базальтового заполнения кратера Лемонье; фрагмент LROC NAC снимка M1126921794LC. Справа — россыпь камней у западной кромки Борозды Прямой, далее видны днище борозды, ее крутой покрытый камнями восточный склон и участок прилегающей морской поверхности; фрагмент панорамы 12_d04_s11_p09m_18000_horiz_15.00, сделанной Луноходом-2 в месте, обозначенном стрелкой в левой части рисунка.

удары разбрасывают материал во все стороны, в том числе внутрь борозды. А приносится в эту зону только материал с востока, потому что удары в пределах борозды, то есть западнее, на рассматриваемый край борозды не забрасываются (правильнее сказать “почти не забрасываются”), и это есть зона отрицательного баланса горизонтальной переброски вещества.

Другая изученная форма рельефа, с которой связана зона отрицательного баланса, — это Борозда Прямая в морском заполнении кратера Лемонье. Это тектоническая депрессия — грабен. Его ширина 400–500 м, глубина 50–60 м и протяженность 6 км. Крутизна внутренних склонов борозды — от 20° до 30°. Луноход-2 подошел к южной части Борозды Прямой с востока (рис. 4).

Приводимое ниже описание интересующего нас участка поверхности около Борозды Прямой взято из публикаций Флоренский и др. (1974, 1976) и Basilevsky и др. (1977), а они основаны на результатах анализа снимков малокадрового телевидения и панорамных ТВ изображений поверхности, полученных Луноходом-2.

В этих публикациях отмечается, что при приближении Лунохода-2 к борозде было замечено, что поверхность наклонена в сторону борозды. На расстояниях в десятки метров от борозды это уклон порядка первых градусов. Он постепенно возрастает до 10°–15° и затем, на кромке борозды, наблюдаются многочисленные камни, представляющие выходы коренных пород. Количество малых кратеров здесь меньше, чем вдали от борозды. По размерам кратеров ($D > 10$ м), в выбросах из ко-

торых наблюдаются камни, толщина реголита вдали от Борозды Прямой оценивалась величиной от 3 до 5 м, а на описываемом склоне камни наблюдаются в выбросах из кратеров диаметром 4–5 м, что указывает на заметное уменьшение толщины реголита. Очевидно, это зона отрицательного баланса вещества, такая же, как описанная в работе Swann и др. (1972) в районе посадки Apollo-15.

Описанные размеры зоны отрицательного баланса на краю Борозды Прямой меньше, чем размеры такой зоны на краю Борозды Хэдли. Это может быть результатом более ограниченных возможностей наблюдения экипажем Лунохода-2 по сравнению с возможностями астронавтов Apollo-15. А может быть, возраст грабена Борозды Прямой существенно меньше, чем возраст Борозды Хэдли, и потому за время существования Борозды Прямой успела сформироваться только более узкая зона отрицательного баланса. Анализ снимков LROC NAC показал, что на Луне имели место молодые и очень молодые тектонические деформации (например, Watters и др., 2010; 2015) и не исключено, что грабен Борозды Прямой тоже молодой.

Для выяснения этой возможности был выполнен подсчет пространственной плотности малых кратеров, наложенных на Борозду Прямую. Эту структуру трудно датировать по подсчету кратеров потому, что, как было сказано выше, ее депрессия — это зона положительного баланса и накапливающийся там реголит быстрее, чем в других местах, перекрывает образующиеся в ее пределах кратеры. Тем не менее мы видим там наложенные кратеры,

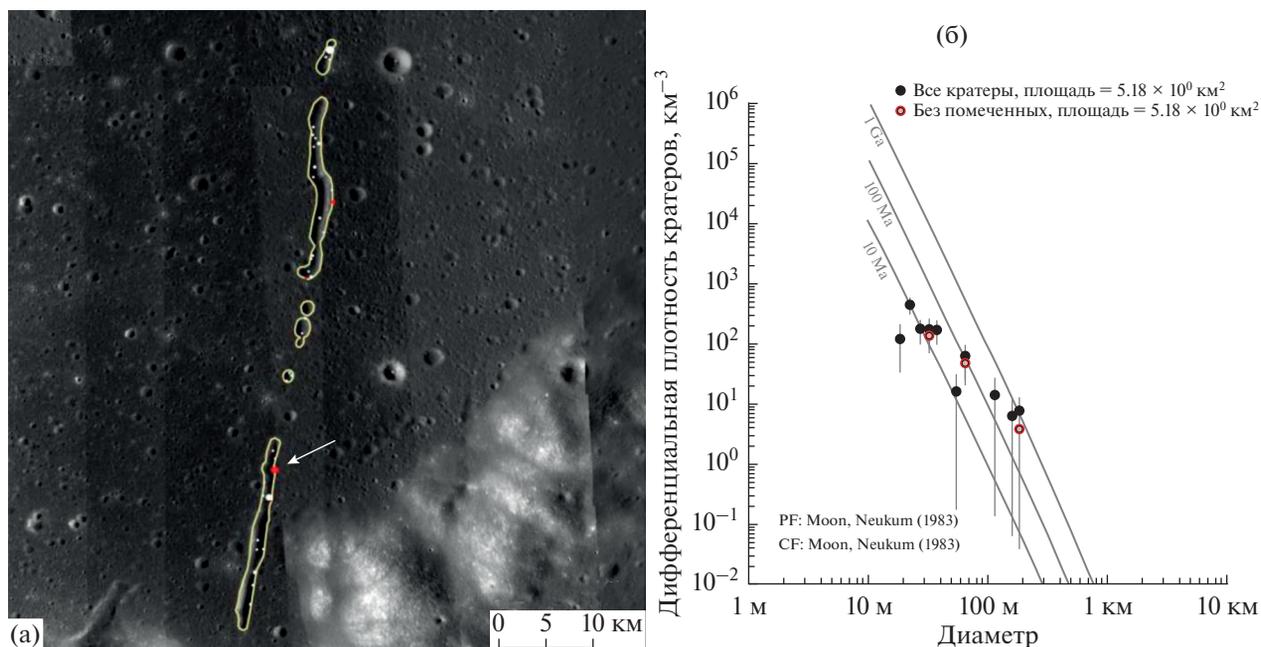


Рис. 5. (а) – Мозаика снимков LROC NAC с малым углом Солнца над горизонтом (LROC QuickMap) Борозды Прямой с показанными наложенными на нее кратерами (отмечены белым) и вероятно наложенными на нее кратерами (отмечены красным); стрелка указывает на кратер, который также показан на рис. 6. (б) – Данные буферированного подсчета кратеров, наложенные на изохроны Neukum (1983) для всех рассматриваемых кратеров (черные), и то же для данных с исключением вероятно наложенных кратеров (красные).

что дает возможность получить некоторые сведения о возрасте этой структуры. Для того, чтобы получить максимум информации, опираясь на наблюдения кратеров, которые перекрывают границы этой протяженной формы рельефа, мы использовали метод буферированного подсчета кратеров (Tanaka, 1982; Fassett, Head, 2008; Kneissl и др., 2015).

На рис. 5а показаны границы частей Борозды Прямой с наложенными кратерами, отмеченными белым. Для некоторых кратеров их наложенный характер не ясен. Они отмечены красным. На рис. 5б показаны данные буферированного подсчета на фоне дифференциальных изохрон (Michael, 2013) по хронологической системе Neukum (1983). Для кратеров диаметром 30–60 м кажется разумным предположить, что кажущаяся продолжительность существования кратеров этих размеров, наложенных на реголит днища борозды составляет ~ 10 млн лет. Там также присутствуют более крупные кратеры. Если они наложены на борозду, то это указывает, что ее возраст, по крайней мере, несколько сотен миллионов лет. Мы заметили, что удаление кратеров с менее четкими признаками наложения существенно не изменяет этот вывод.

Дополнительное свидетельство относительно молодого возраста Борозды Прямой показано на рис. 6.

На рис. 6б белым обведены границы участка Борозды Прямой и двух кратеров. Один из кратеров, диаметром ~ 200 м, отмеченный стрелкой, почти определенно сечется бороздой, в то время как другой, диаметром ~ 160 м, наложен на бороз-

ду (см. рис. 6а). Судя по нашим измерениям, основанным на стереоскопическом анализе снимков LROC NAC, глубина 200-м кратера < 15 м, а максимальная крутизна внутренних склонов 8° – 12° , что в соответствии с оценками по Basilevsky (1976) предполагает возраст этого кратера от 350 до 700 млн лет. Образование грабена Борозды Прямой, вероятно, сопровождалось сейсмическими сотрясениями (см., например, Ружич, 1997; Chogowicz, 2005), что должно было ускорять морфологическую эволюцию рассматриваемого кратера и потому оценку возраста 350–700 млн лет, по-видимому, следует считать завышенной. Упомянутый 160-м кратер находится на внутреннем склоне Борозды Прямой и после поправок на это его местоположение его глубину, вероятно, можно оценить, как 20–25 м, а крутизну внутренних склонов, как 15° – 20° , что позволяет оценить его возраст, как ~ 100 млн лет и эта оценка может считаться как нижний предел возраста борозды.

Таким образом, подсчеты плотности кратеров и анализ морфометрии двух рассмотренных кратеров позволяет считать, что Борозда Прямая существенно моложе Борозды Хэдли и меньшие размеры зоны отрицательного баланса на краю Борозды Прямой – это не наблюдательный эффект, а реальность.

Вообще выбросы из малых кратеров разлетаются и на более далекие расстояния: километры и десятки километров, но толщина этих удаленных выбросов мала. Их роль в обсуждаемом механизме разрушения кратеров незначительна, но их

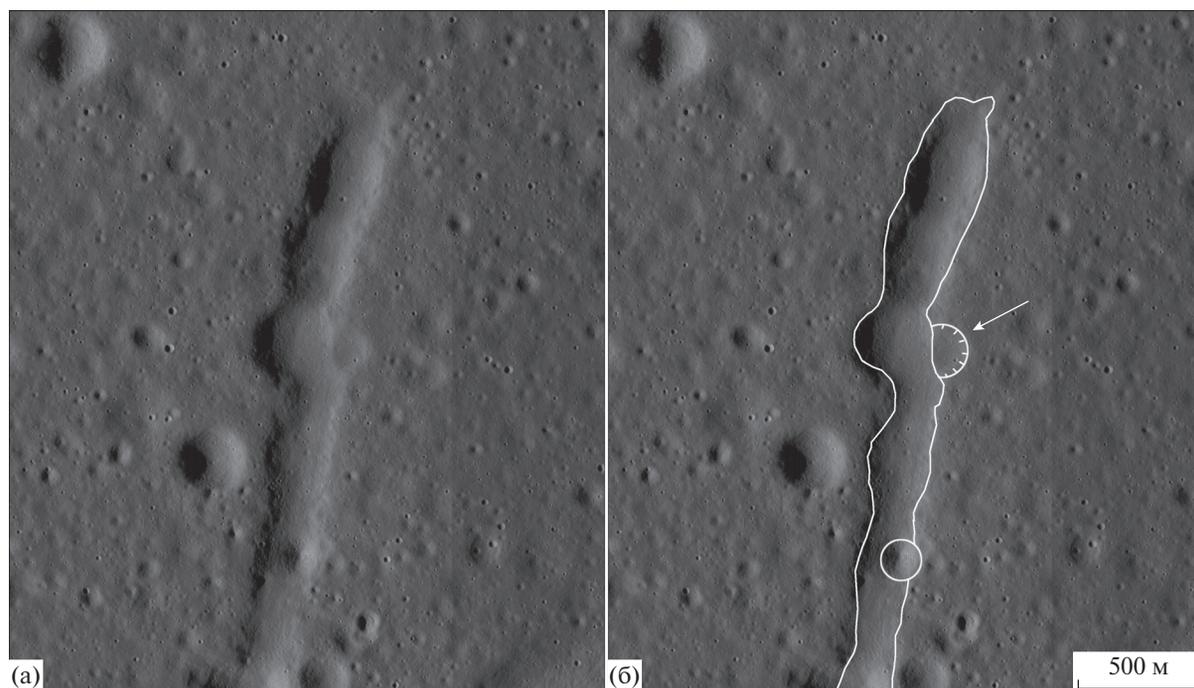


Рис. 6. Фрагмент снимка LROC NAC M1126921794LC на часть Борозды Прямой с двумя ассоциирующими с ней кратерами. Один из них, отмеченный стрелкой, был также показан на рис. 5.

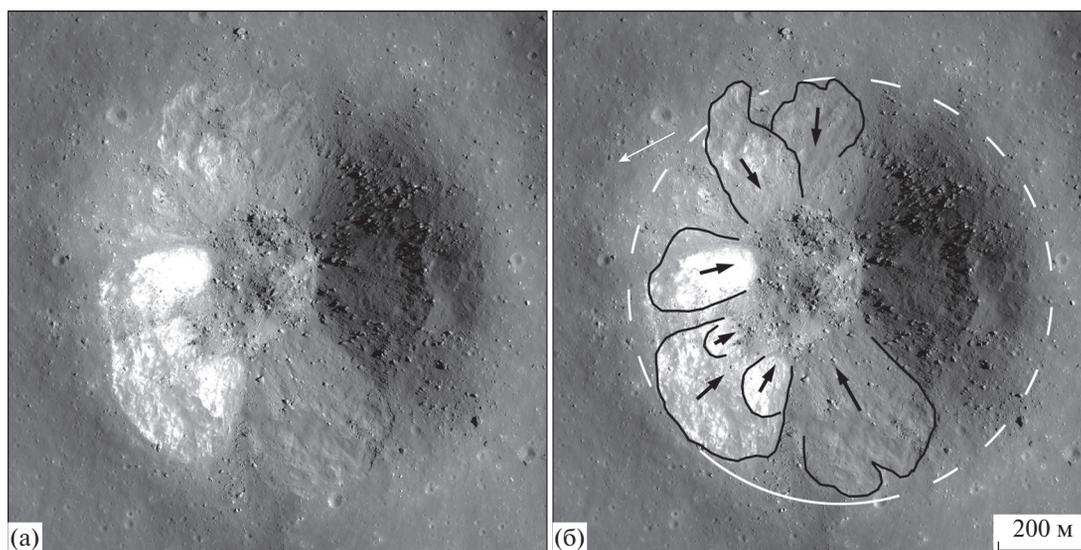


Рис. 7. Склоновые процессы типа оползней и осыпей в кратере Северный Лучевой в районе посадки Apollo-16. Фрагмент LROC NAC снимка M144524996LC.

присутствие проявляется в развитии зон смешения наиболее заметных в местах с контрастными составами материала поверхности, например, на границе море-материк. В районе работы Лунохода-2 это явление было обнаружено по материалам анализа материала поверхности по данным рентгено-флюоресцентного спектрометра “Рифма” (Кочаров и Виктор, 1974, см. также рис. 9 в Флоренский и др., 1975). Такое же явление обеспечило открытие существенно анортозитовой природы лунных материков еще до посадки Apollo на материк по примеси анортозитовых зерен в об-

разцах реголита, собранного астронавтами Apollo-11 на морской поверхности в 50 км от границы море-материк (Wood и др., 1970).

РАЗРУШЕНИЕ СКЛОНОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Движущей силой этого эрозионно-аккумулятивного процесса является гравитация. Можно выделить два подтипа этого процесса: 1) разрушение за счет перемещения вещества на внутренних склонах кратеров и 2) разрушение за счет переме-

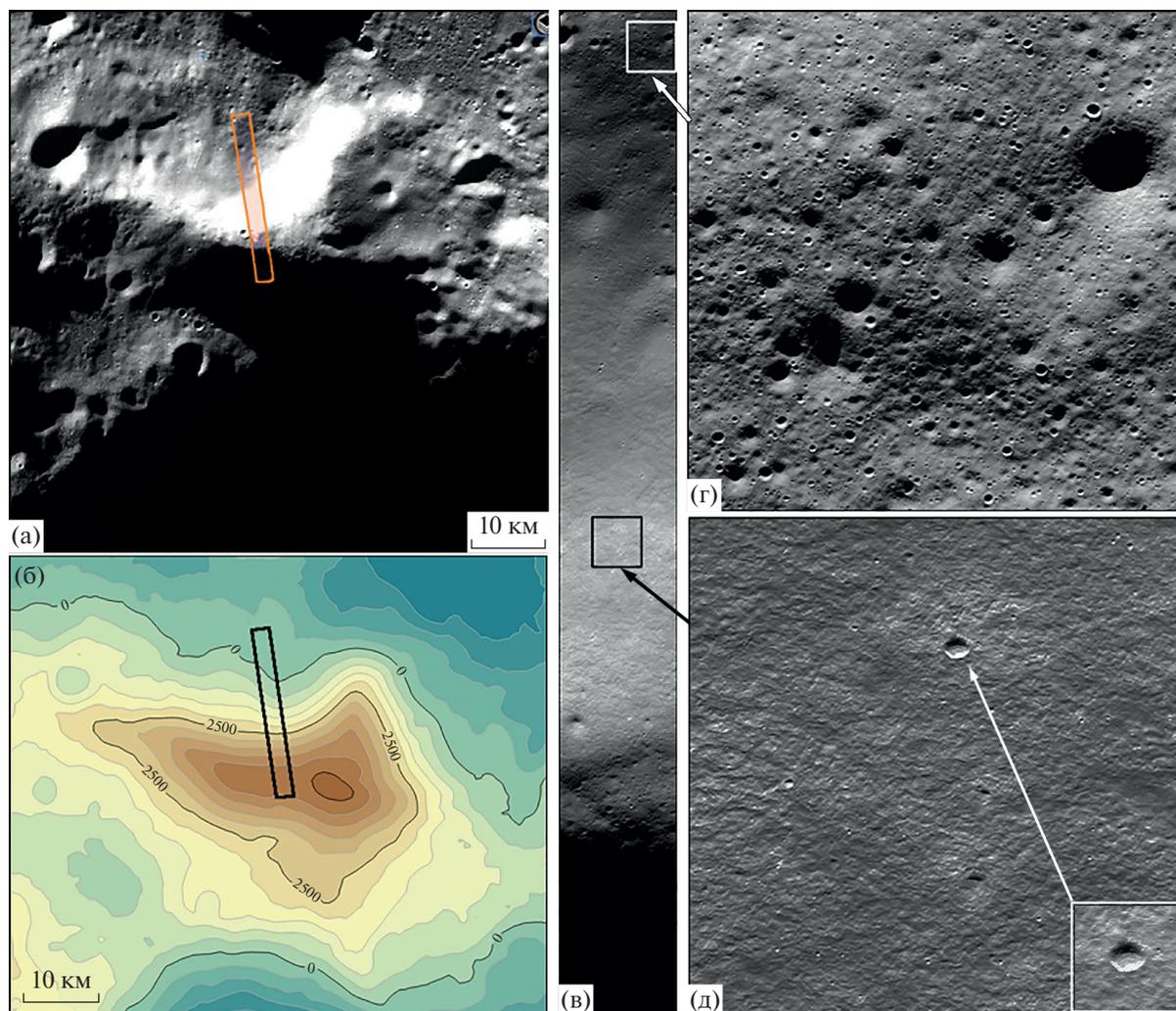


Рис. 8. Пример второго подтипа разрушения малых кратеров склоновыми процессами. (а) – LROC WAC снимок горы Малаперт. (б) – Топографическая карта этого места, составленная по данным лазерного альтиметра LOLA. (в) – Уменьшенная копия LROC NAC снимка M170615049LC, его положение показано на частях (а) и (б) этого рисунка. (г) – Фрагмент снимка LROC NAC M170615049LC, на котором видна поверхность у подножия северного склона горы Малаперт. (д) – Фрагмент этого же снимка, на котором видна поверхность крутого северного склона горы Малаперт.

щения вещества поверхности на склонах внешних по отношению к данному кратеру или данным кратерам. На рис. 7 показан пример первого подтипа этого процесса.

Это кратер Северный Лучевой в районе работы Apollo-16. Его диаметр 950 м, глубина 240 м, крутизна внутренних склонов до 27° – 34° (Ulrich, 1981). Судя по времени экспозиции камней на валу кратера, его возраст 50 млн лет (Drozd и др., 1974). На фото видны оползневые тела (черные контуры в правой части рис. 7). Многочисленные камни поперечником от первых метров до 10–15 м на днище кратера есть очевидный результат осыпания материала склонов. В ряде работ (см., например, Флоренский и др., 1975; Basilevsky и др., 2014) показано, что обально-осыпные и оползневые явления характерны на начальных стадиях эволюции кратера, пока крутизна его внутренних склонов более 20° – 30° , а на более поздних стади-

ях, когда крутизна склонов менее 15° – 20° , материал поверхности на склоне движется по механизму десерпции или крипа. Важно отметить, что склоновые процессы приводят к увеличению диаметра кратера, и что одновременно с развитием склоновых явлений кратер получает материал извне за счет описанной выше горизонтальной переброски материала. По мере старения кратера роль горизонтальной переброски в его разрушении увеличивается.

Второй подтип разрушение малых лунных кратеров склоновыми процессами иллюстрируется рис. 8.

На этом рисунке показаны LROC WAC снимок и топографическая карта горы Малаперт в южной полярной области Луны, а также фрагменты LROC NAC снимка M170615049LC, который покрывает северный склон и подножие горы

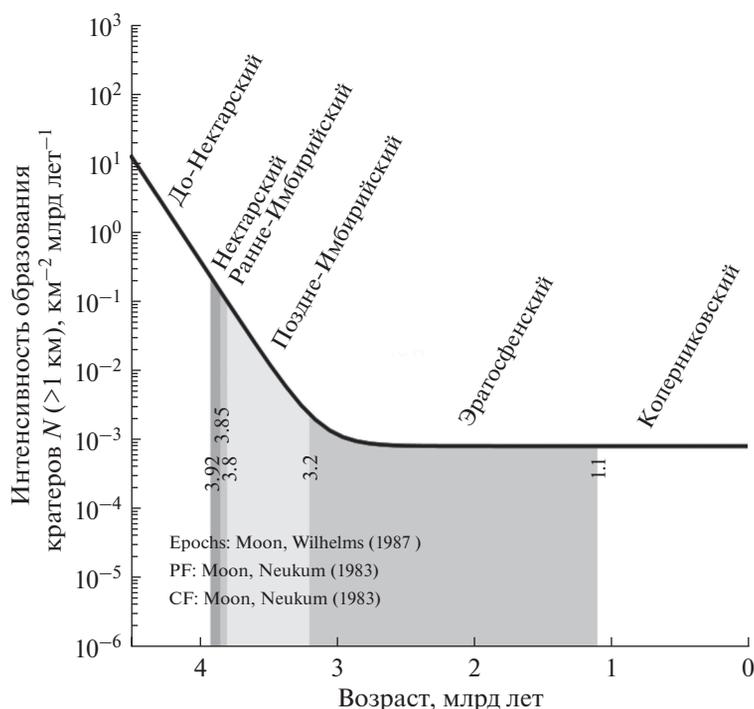


Рис. 9. Интенсивность образования ударных кратеров на Луне как функция времени в соответствии с хронологической системой Neukum (1983). Границы геологических эпох по Wilhelms (1987); численные значения взяты из главы 14 этой работы.

Малаперт. Эта гора сложена материковыми породами донектарского возраста, возвышается над своим тоже донектарским подножием на 5 км и крутизна средней части ее склонов, в том числе северного склона, составляет 25° – 30° (Basilevsky и др., 2019). На рис. 6г показана поверхность 1×1 км участка подножия, а на рис. 6д поверхность участка такого же размера средней части северного склона горы. Видно, что поверхность подножия горы испещрена множеством кратеров диаметром в десятки до 150–200 м, перекрытых кратерами метровых размеров, что ожидаемо для поверхности такого древнего возраста.

А на поверхности склона горы, возраст которой не меньше, чем возраст подножия, виден лишь один кратер диаметром 50 м и небольшое количество кратеров меньшего размера. Поверхность склона здесь осложнена извилистыми грядами примерно перпендикулярными направлению уклона этого склона. По-видимому, здесь активны движения материала реголита вниз по склону. Возможно, временами этому способствуют сотрясения от близких метеоритных ударов и лунотрясения. Проявления последних в районе южного полюса Луны обсуждались Watters и др. (2010; 2015; 2017) и Kumar и др. (2016). Движение материала реголита вниз по склону, очевидно, и есть причина дефицита малых кратеров на обсуждаемом склоне.

Это явление ранее обсуждалось еще в 1970-е годы (Swann и др., 1971; Базилевский, Попович, 1976; Basilevsky, 1976), а с появлением снимков LROC NAC и в более близкое к настоящему вре-

мя (например, Xiao и др., 2013; Туе и др., 2015). По уменьшению диаметра перехода неравновесной части популяции малых кратеров в равновесную было найдено, что по сравнению с субгоризонтальными поверхностями на склонах крутизной $\sim 5^{\circ}$ малые кратеры разрушаются быстрее примерно в 2 раза. На склонах крутизной $\sim 10^{\circ}$ в 3 раза, крутизной $\sim 15^{\circ}$ – в 5 раз, и крутизной 20° – 25° – на порядок быстрее (Базилевский и Попович, 1976; Bazilevskiy, Popovich, 1979; Basilevsky, 1976), что согласуется с дефицитом кратеров, наблюдаемым на рассматриваемом склоне горы Малаперт. Это оценки интенсивности процесса, в основном, для кратеров диаметром менее 100 м. Для кратеров диаметром в сотни метров этот процесс становится эффективным, когда за счет склоновых процессов внутри кратеров и нивелирования их кратерными выбросами извне, валы этих более крупных кратеров перестают быть препятствием для движущегося сверху вниз по склону материала реголита.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше рассмотрены три типа процессов разрушения/деградации малых кратеров Луны: 1) разрушение наложенными кратерами; 2) разрушение за счет заполнения их выбросами из соседних и удаленных кратеров и 3) разрушение за счет заполнения их веществом поверхности, перемещаемым различными склоновыми процессами. Процессы этих трех типов действуют совместно, но роль каждого из них в конкретной ситуации и

на разных этапах эволюции кратера может изменяться. Результативность каждого из этих типов разрушения, очевидно, определяется интенсивностью разрушающего фактора и временем его воздействия.

Для первых двух типов интенсивность разрушающего фактора – это интенсивность кратерообразующего метеоритного потока (рис. 9).

На рис. 9 видно, что интенсивность образования ударных кратеров на Луне в Коперниковский и Эратосфенский периоды геологической истории Луны (моложе 3.2 млрд лет) была на один–два порядка ниже, чем в Имбрийский период (3.2–3.85 млрд лет) (Neukum, 1983; Neukum и др., 2001). Это, в частности, означает, что оценки времени существования малых лунных кратеров по их морфологической выраженности и диаметру (Basilevsky, 1976), опирающиеся на калибровку доставленных Apollo лунных образцов с возрастными экспозиции на поверхности менее нескольких сотен миллионов лет, применимы лишь в пределах Коперниковского и Эратосфенского периодов. В предшествующие периоды геологической истории Луны времена существования малых кратеров должны были быть соответственно короче.

Для третьего типа разрушения малых кратеров интенсивность разрушающего фактора – это интенсивность перемещения материала склоновыми процессами. А она есть очевидная функция крутизны склона. На склонах крутизной 20°–30° и более крутых развиваются быстрые обвалы, каменные лавины и осыпи. На более пологих – десерпция или крип. При этом ускоренное разрушение малых кратеров наблюдается даже на склонах крутизной в несколько градусов (Базилевский, Попович, 1976; Bazilevskiy, Popovich, 1979; Basilevsky, 1976). Выше отмечалось, что сотрясения от метеоритных ударов и лунотрясений должны провоцировать и активизировать склоновые процессы. Поскольку в более ранние, чем Эратосфенский, периоды истории Луны интенсивность метеоритного потока была заметно выше, а еще неостывшие недра (имбрийский вулканизм, см., например, Taylor и др., 1991; Hiesinger и др., 2011), вероятно, должны были быть более сейсмоактивны, можно думать, что склоновые процессы в эти ранние времена были более активны, чем в более близкие к нам эпохи.

Итак, из изложенного выше следует, что три типа процессов разрушения малых лунных кратеров: 1) разрушение наложенными кратерами; 2) разрушение за счет заполнения их выбросами из соседних и удаленных кратеров, и 3) разрушение за счет заполнения их веществом поверхности, перемещаемым различными склоновыми процессами, действуют совместно, активно влияя друг на друга. Их интенсивность в течение последних трех миллиардов лет истории Луны была заметно ниже, чем в предшествующие эпохи. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценках времени потенциального существования кратеров в разные периоды истории Луны.

Авторы признательны Б.А. Иванову и Н. Hiesinger за полезные обсуждения и помощь в выполнении этой работы.

Работа А.Т. Базилевского, С.С. Красильникова и Н.А. Козловой поддержана грантом РФФ № 17-17-01149.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А.Т.* Плотность распределения малых лунных кратеров. Модели и фактическое распределение // Космич. исслед. 1973. Т. XI. Вып. 4. С. 612–621.
- Базилевский А.Т., Попович В.Д.* Эволюция малых кратеров на склонах лунного рельефа // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1976. № 6. С. 76–80.
- Кочаров Г.Е., Викторов С.В.* Химический состав лунной поверхности в районе работы “Лунохода-2” // Докл. АН СССР. 1974. Т. 214. № 1. С. 71–74.
- Красильников С.С., Базилевский А.Т., Иванов М.А., Абдрахимов А.М., Коханов А.А.* Оценка крутизны склонов в местах посадки КА Луна-Глоб по доле тени на снимках LROC NAC // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 2. С. 99–109. (*Krasilnikov S.S., Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Abdрахимов A.M., Kokhanov A.A.* // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 2. P. 87–97).
- Ружич В.В.* Сейсмоструктурная деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бобина Н.Н., Бурба Г.А., Гребенник Н.Н., Кузьмин Р.О., Полосухин В.П., Попович В.Д., Пронин А.А.* Процессы преобразования поверхности Луны в районе Лемонье по результатам детального изучения на “Луноходе-2” // Тектоника и Структурная Геология. Планетология. М.: Наука, 1976. С. 205–234.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Гуриштейн А.А., Засецкий В.В., Пронин А.А., Полосухин В.П.* Геолого-морфологический анализ района работы “Лунохода-2” // Докл. АН СССР. 1974. Т. 214. № 1. С. 75–78.
- 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., Гуриштейн А.А., Зеэлин Р.Б., Пронин А.А., Полосухин В.П., Попова З.В., Таборко И.М.* К проблеме строения поверхности лунных морей. В кн.: Современные представления о Луне. М.: Наука, 1972. С. 21–45.
- Basilevsky A.T.* On the evolution rate of small lunar craters // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. Pergamon Press, 1976. P. 1005–1020.
- Basilevsky A.T., Florensky C.P., Ronca L.B.* A possible lunar outcrop: A study of Lunokhod-2 data // Moon. 1977. V. 17. P. 19–28.
- Basilevsky A.T., Head J.W., Horz F., Ramsley 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., Kozlova N.A., Zavyalov I.Yu., Karachevtseva I.P., Kreslavsky M.A.* Morphometric studies of the Copernicus and Tycho secondary craters on the Moon: Dependence of crater degradation rate on crater size // Planet. and Space Sci. 2018. V. 62. P. 31–40.
- 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.
- Basilevsky A.T., Kreslavsky M.A., Karachevtseva I.P., Guskova E.N.* Morphometry of small impact craters in the Lunokhod-1 and Lunokhod-2 study areas // *Planet. and Space Sci.* 2014. V. 92. P. 77–87.
- Bazilevskiy A.T., Popovich V.D.* Evolution of small craters on lunar relief slopes // *Int. Geology Review.* 1979. V. 21. Iss. 3. P. 277–280.
- Chorowicz J.* The East African rift system // *J. African Earth Sci.* 2005. V. 43. P. 379–410.
- Drozd R.J., Hohenberg C.M., Morgan C.J., Ralston C.E.* Cosmic-ray exposure history at the Apollo 16 and other lunar sites: lunar surface dynamics // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1974. V. 38. P. 1625–1642.
- Fassett C.I., Head J.W.* The timing of martian valley network activity: Constraints from buffered crater counting // *Icarus.* 2008. V. 195(1). P. 61–89.
- Hiesinger H., Head J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G.* Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis // *The Geological Soc. America Spec. Paper* 477. 2011. 51 p.
- Hörz F., Grieve R., Heiken G., Spudis P., Binder A.* Lunar surface processes // *Lunar Source Book. A User Guide to the Moon / Eds Heken G.H., Vaniman D.T., French B.M.* Cambridge Univ. Press, 1991. P. 61–120.
- Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Demidov N.E., Guseva E.N., Head J.W., Hiesinger H., Kohanov A.A., Krasilnikov S.S.* Geological characterization of the three high-priority landing sites for the Luna-Glob mission // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 190–206.
- Karachevtseva I.P., Kozlova N.A., Kokhanov A.A., Zubarev A.E., Nadezhdina I.E., Patratiy V.D., Konopikhin A.A., Basilevsky A.T., Abdrakhimov A.M., Oberst J., Haase I., Jolliffe B.L., Plescia J.B., Robinson M.S.* Cartography of the Luna-21 landing site and Lunokhod-2 traverse area based on Lunar Reconnaissance Orbiter Camera images and surface archive TV-panoramas // *Icarus.* 2017. V. 283. P. 104–121.
- Kneissl T., Michael G.G., Platz T., Walter S.H.G.* Age determination of linear surface features using the buffered crater counting approach – case studies of the Sirenum and Fortuna Fossae graben systems on Mars // *Icarus.* 2015. V. 250. P. 384–394.
- Kumar P.S., Sruthi U., Krishna N. and 8 coauthors.* Recent shallow moonquake and impact-triggered boulder falls on the Moon: new insights from Schrodinger basin // *J. Geophys. Res. Planets.* 2016. V. 121. P. 147–179.
- Michael G.G.* Planetary surface dating from crater size–frequency distribution measurements: multiple resurfacing episodes and differential isochron fitting // *Icarus.* 2013. V. 226. P. 885–890.
- Morris E.C., Shoemaker E.M.* Craters // Surveyor project final report. Pt. II. Science results. TR 32-1265, GPL, Pasadena. 1968. P. 69–86.
- Neukum G.* Meteoriten bombardement und Datierung planetarer Oberflächen. Habilitation Thesis for Faculty Membership. Univ. of Munich. 1983. 186 p. (English translation, 1984: Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces).
- Neukum G., Ivanov B., Hartmann W.K.* Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 96. P. 55–86.
- Robinson M.S., Brylow S.M., Tschimmel M. and 20 coauthors.* Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 81–124.
- Shoemaker E.M., Batson R.M., Bean A.L. and 10 coauthors.* Geology of the “Apollo-12” landing site. Size-frequency distribution of craters // *Apollo-12 Preliminary Science report.* NASA SP-235. 1970. P. 133–134.
- Swann G.A., Bailey N.G., Batson R.M. and 14 coauthors.* 3. Preliminary Geologic Investigations of the Apollo 14 Landing Site // *Apollo 14 Preliminary Science Report.* NASA SP-272. 1971. 39–85.
- Swann G.A., Bailey N.G., Batson R.M. and 17 coauthors.* 5. Preliminary Geologic Investigation of the Apollo 15 Landing Site // *Apollo 15 Preliminary Science Report.* NASA SP-289. 1972. 5–23–5–24.
- Tanaka K.L.* A New Time-Saving Crater-Count Technique, with Application to Narrow Features // *NASA Technical Memo, NASA TM-85127,* 1982. P. 123–125.
- Taylor G.J., Warren P., Ryder G., Delano J., Pieters C., Lofgren G.* Lunar rocks // *Lunar Source Book. A User Guide to the Moon / Eds Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M.* Cambridge Univ. Press, 1991. P. 183–284.
- Trask N.J.* Size and Spatial Distribution of Craters Estimated from Ranger Photographs, Jet Propulsion Laboratory Technical Report 32-800. 1966, Pasadena, Calif. P. 252–263.
- Tye A.R., Fassett C.I., Head J.W., Mazarico E., Basilevsky A.T., Neumann G.A., Smith D.E., Zuber M.T.* The age of lunar south circumpolar craters Haworth, Shoemaker, Faustini, and Shackleton: Implications for regional geology, surface processes, and volatile sequestration // *Icarus.* 2015. V. 255. P. 70–77.
- Ulrich G.E.* Geology of North Ray crater // *Geology of the Apollo 16 area, Central Lunar Highlands // Geological Survey Professional Paper* 1048. 1981. P. 45–81.
- van der Bogert C.H., Clark J.D., Hiesinger H., Banks M.E., Watters T.R., Robinson M.S.* How old are lunar lobate scarps? 1. Seismic resetting of crater size–frequency distributions // *Icarus.* 2018. V. 306. P. 225–242.
- Wasserburg G.J., Papanastassiou D.A.* Age of an Apollo 15 mare basalt – Lunar crust and mantle evolution // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1971. V. 13. № 1. P. 97–104.
- Watters T.R., Robinson M.S., Beyer R.A. and 8 coauthors.* Evidence of recent thrust faulting on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera // *Science.* 2010. V. 329. P. 936–940.
- Watters T.R., Robinson M.S., Collins G.C., Banks M.E., Daud K., Williams N.R., Selvens M.M.* Global thrust faulting on the Moon and the influence of tidal stresses // *Geology.* 2015. V. 43. P. 851–854.
- Watters T.R., Weber R.C., Collins G.C., Johnson C.L.* Shallow lunar seismic activity and the current stress state of the Moon // *The 48th Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston, TX: Lunar Planet. Inst.* 2017. abs. 2569.
- Wilhelms D.E.* The geologic history of the Moon // *US Geological Survey Special Paper* 1348. 1987. 302 p.
- Wood J.A., Dickey J.S., Marvin U.B., Powell B.N.* Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon // *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 1970. V. 1. P. 965–988.
- Xiao Z., Huang Q., Zeng Z., Xiao L.* Small graben in the southeastern ejecta blanket of the lunar Copernicus crater: Implications for recent shallow igneous intrusion on the Moon // *Icarus.* 2017. V. 298. P. 89–97.
- Xiao Z., Zeng Z., Ding N., Molaro J.* Mass wasting features on the Moon - How active is the lunar surface? // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 376. P. 1–11.
- Zhao J.N., Huang J., Qiao L., Xiao Z.Y., Huang Q., Wang J., He Q., Xiao L.* Geologic characteristics of the Chang'E-3 exploration region // *Sci. China Physics. Mechanics and Astronomy.* 2014. V. 57. P. 569–576.