

УДК 523.4

ОТНОШЕНИЯ ВЫСОТЫ ЛУННЫХ КАМНЕЙ К ИХ ПОПЕРЕЧНИКУ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПАНОРАМ ЛУНОХОДА-1, -2, APOLLO-11–17 И СНИМКОВ КАМЕРЫ LROC NAC

© 2014 г. Н. Э. Демидов^{1,2}, А. Т. Базилевский²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, РАН, Пущино, Россия

²Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, РАН, Москва, Россия

E-mail: nikdemidov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2013 г.

В результате анализа 91 панорамы Лунохода-1 и -2, а также 17 панорам, составленных из фотографий, сделанных космонавтами Apollo-11–15, и 6 снимков камеры LROC NAC измерены отношения высоты к видимому поперечнику h/d и к максимальному поперечнику h/D лунных камней на трех материковых и трех морских участках Луны. Средние значения h/d и h/D для изученных шести районов оказались не различимы на уровне значимости 95%. Поэтому для поверхности Луны применимы полученные в данной работе средние по всем 445 изученным камням оценки среднего $h/d = 0.6 \pm 0.03$ и $h/D = 0.54 \pm 0.03$. Несколько округляя, для инженерных моделей поверхности Луны рекомендуется брать $h/D \approx 0.5$. Соотношения длинной, средней и короткой осей лунных камней оказались близкими таковым, полученным в экспериментах по дроблению различных материалов высокоскоростными ударами. На этом основании сделан вывод, что степень заглупления изученных лунных камней в реголит незначительна, а микрометеоритная абразия и другие факторы не являются доминирующими в эволюции формы лунных камней.

DOI: 10.7868/S0320930X14050016

ВВЕДЕНИЕ

Камни и ударные кратеры являются преобладающими формами микрорельефа поверхности Луны. Камни, в большинстве своем, появляются на поверхности Луны как выбросы из ударных кратеров и происходят из слоя реголита и из подстилающего реголит скальное основание. В лунных морях скальное основание это разнообразные базальты. На материках это ударные брекчии, существенным компонентом которых часто является застывший ударный расплав (см., например, Флоренский и др., 1981; Lunar Source Book, 1991). Соответственно, лунные камни – это обломки базальтов или ударных брекчий.

Настоящая работа посвящена определению отношения высоты лунных камней (h) к их поперечнику (d). В то время как распределению камней по поверхности Луны, включая зависимость частоты встречаемости камней от их поперечника в разных геологических ситуациях, посвящено много работ (см., например, Флоренский и др., 1971; 1972; 1978; Shoemaker и др., 1969a; 1969b; 1970; Shoemaker, 1971; Swann и др., 1971; 1972; Muehlberger и др., 1972; 1973; Florensky и др., 1978), величина отношения h/d у лунных камней описывалась очень редко. Нам удалось найти некоторые сведения об этом параметре лишь в ста-

ром отчете НАСА Lunar Surface Models (1969) и в работе Флоренский и др. (1971). В первой из этих работ лаконично сообщается, что высота камня примерно равна половине его поперечника, а во второй для района работы Лунохода-1 приведен разброс параметра h/d (от 0.2 до 0.9) без оценки величины среднего и стандартного отклонения. В то же время величина отношения h/d , это важная характеристика лунных камней. Она важна для разработки инженерных моделей лунной поверхности и, как будет показано ниже, может давать информацию и о некоторых других характеристиках лунных камней.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Источником информации для определения отношения высоты лунных камней к их поперечнику (h/d) были панорамы поверхности, полученные КА Луноход-1 (58 панорам) и Луноход-2 (33 панорамы), а также экспедициями Apollo-11–17 (17 панорам). Кроме того, для определения соотношения горизонтальных осей лунных камней использовались 6 снимков орбитальной камеры LROC NAC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Narrow Angle Camera).

Луноход-1 проводил исследования на типично морском участке лунной поверхности – на севе-

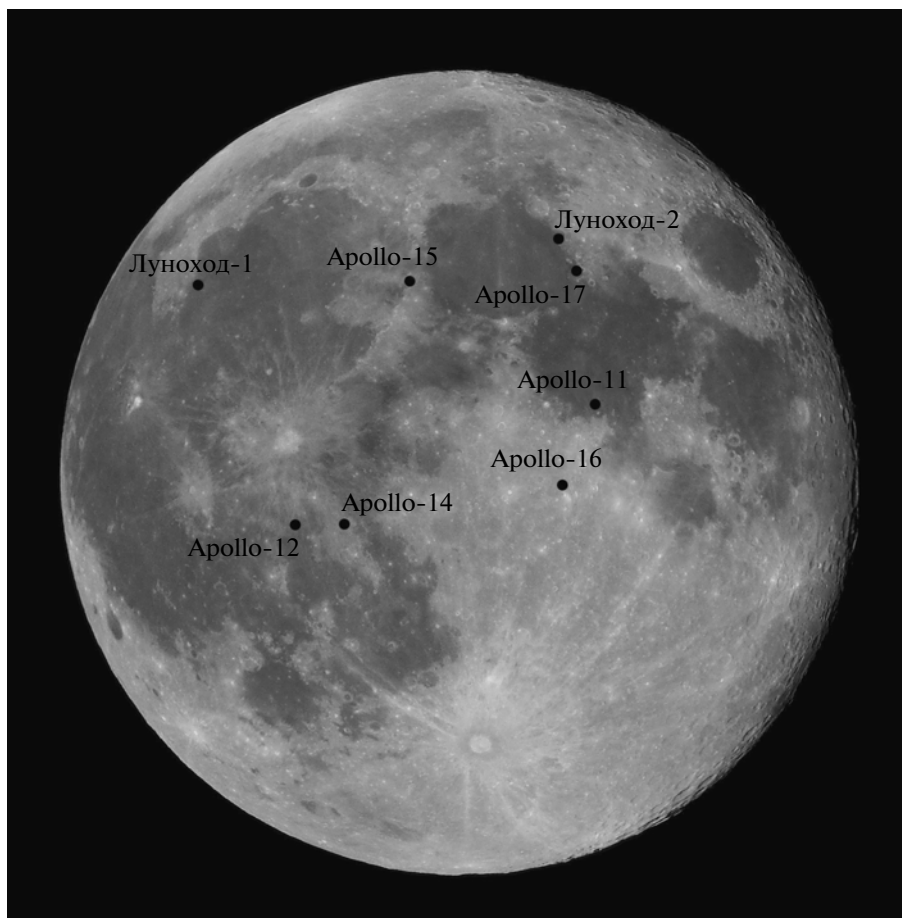


Рис. 1. Видимая сторона Луны с указанием мест посадок КА Луноход-1, -2 и Apollo-11–17. Фото обсерватории Lick.

ро-западной окраине Моря дождей (рис. 1). Луноход-2 исследовал восточную окраину Моря Ясности — 60-км кратер Лемонье с морским заполнением дна. Источником использованных в данной работе панорам Лунохода-1 и -2 — сканов с фотографических отпечатков панорамных изображений, — является интернет-архив лаборатории сравнительной планетологии ГЕОХИ РАН (<http://www.planetology.ru/resources.php?language=english>). Размер типичной панорамы составляет 16000 пикселей по горизонтали и 2700 пикселей по вертикали.

Американские пилотируемые миссии Apollo-11 и -12 исследовали участки морской поверхности, Apollo-14 и -16 работали на местностях материкового типа, а Apollo-15 и -17 исследовали и морскую, и материковую поверхность. Источником аполлоновских панорам является интернет-ресурс Лунно-планетного института США (<http://www.lpi.usra.edu/resources/apollopanoramas/>). Размер типичной панорамы составляет от 16000 до 5000 пикселей по горизонтали и 2800 пикселей по вертикали.

Упомянутые шесть снимков, сделанные камерой LROC NAC, установленной на борту косми-

ческого аппарата Lunar Reconnaissance Orbiter с разрешением 0.5 м характеризуют места работы американских миссий Apollo (Robinson и др., 2010). Источником снимков LROC NAC является интернет-ресурс Университета штата Аризона (<http://wms.lroc.asu.edu/lroc/search>). Три снимка показывают участки материковой поверхности: вал 500-метрового кратера South Ray и вал 1000-метрового кратера North Ray в районе работы Apollo-16 (Muehlberger и др., 1972), а также вал 340-метрового кратера Cone в районе работы Apollo-14 (Swann и др., 1971). Три другие снимка характеризуют морскую поверхность: вал 180-метрового кратера West в районе работы Apollo-11 (Shoemaker и др., 1969b), вал безымянного 1500-метрового кратера в 10 км к северу от места посадки Apollo-12 и вал 500-метрового кратера Sherlock в районе работы Apollo-17 (Muehlberger и др., 1973).

МЕТОДИКА РАБОТЫ

Для определения отношения высоты лунных камней к их наблюдаемому поперечнику (h/d) анализировались панорамные изображения поверхности Луны, полученные ТВ камерами КА

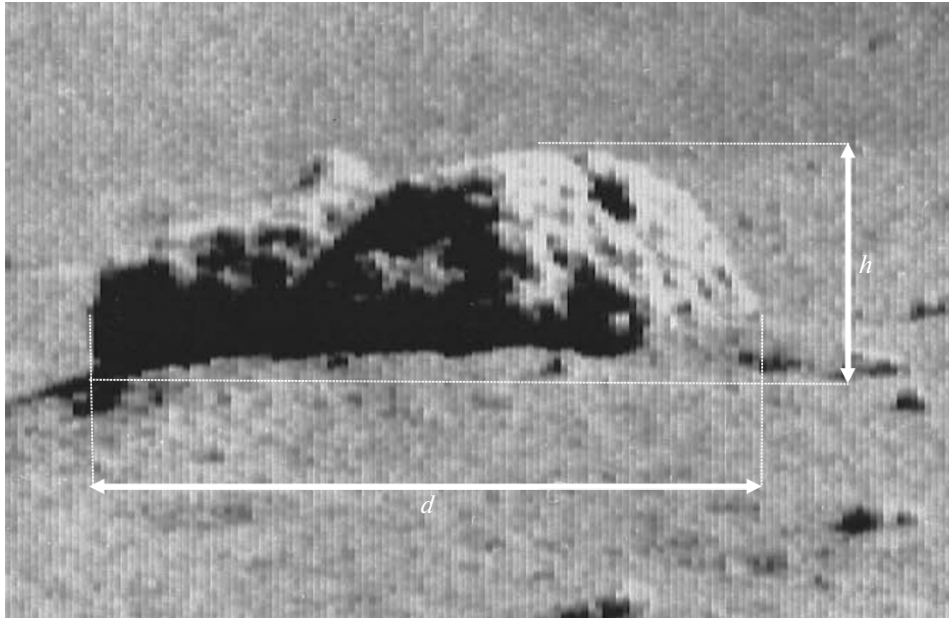


Рис. 2. Камень на панораме поверхности Луны в районе работы Лунохода-2 с указанием h и d .

Луноход-1 и -2 и составленные из сделанных астронавтами фотографий. В ходе анализа измерялись угловые размеры наблюдаемых камней — в элементах изображения — пикселях (рис. 2). Размеры камней в единицах длины не измерялись, но из описаний районов исследований Луноходов и экспедиций Apollo (Флоренский и др., 1971; 1978; Shoemaker и др., 1969a; 1969b; 1970; Shoemaker, 1971; Swann и др., 1971; 1972; Muehlberger и др., 1972; 1973; Florensky и др., 1978), понятно, что поперечник исследуемых нами камней составляет от 10 см до первых метров. В анализ не включались камни из нижней части панорамы, так как их мы видим не “в профиль”, а в существенной мере сверху, что исключает корректное измерение высоты. Также из анализа исключались камни размером менее 10 пикселей и камни, имеющие нечеткие границы. Таким образом, для каждого места посадки были измерены h и d наблюдаемых на панорамах камней, рассчитан параметр h/d и его среднее значение и стандартное отклонение.

Наблюдаемые камни в общем случае можно представить как объекты, имеющие три взаимно перпендикулярные оси: большую длиной a , среднюю длиной b и малую длиной c . Можно ожидать, что в большинстве случаев выброшенный на поверхность камень ляжет малой осью вверх, так что измеряемая нами высота камня h будет соответствовать оси c , а наблюдаемый поперечник камня d — это, в зависимости от ориентировки камня по отношению к наблюдателю, соответствует либо a , либо b , либо, что чаще, некоему промежуточному между ними значению. Для

оценки наиболее вероятной величины этого промежуточного значения необходимо знать соотношение осей b и a . Оно было измерено для 40 относительно крупных (поперечником несколько метров) обломков на шести каменистых участках лунной поверхности на снимках, полученных камерой LROC NAC (рис. 3) и оказалось равным 0.78 для камней на материковой поверхности при стандартном отклонении 0.16 и равным 0.83 для камней на морских участках при стандартном отклонении 0.18. Тест Уэлча показал, что распределения параметра b/a для камней на материковых и на морских поверхностях близки ($P = 0.25$), а следовательно, две данные выборки можно рассматривать как одну со средним значением b/a , равным 0.8, и стандартным отклонением, равным 0.16. Далее был построен эллипс с соотношением осей 0.8, длинная ось которого (соответствует оси a камня) была ориентирована горизонтально. Этот эллипс разворачивали с угловым шагом 10° , определяя величину горизонтальной проекции длины разворачиваемого эллипса, пока он не был развернут на 90° и горизонтальной стала его малая ось (соответствует оси b камня). Средняя по этим разворотам величина искомого промежуточного значения оказалась близка к 0.9. Таким образом, если мы определили среднюю величину отношения высоты камня к его видимому поперечнику (h/d) и хотим узнать среднюю величину отношения высоты камня к его максимальному поперечнику h/D , где D соответствует оси a , то h/d следует умножить на 0.9.

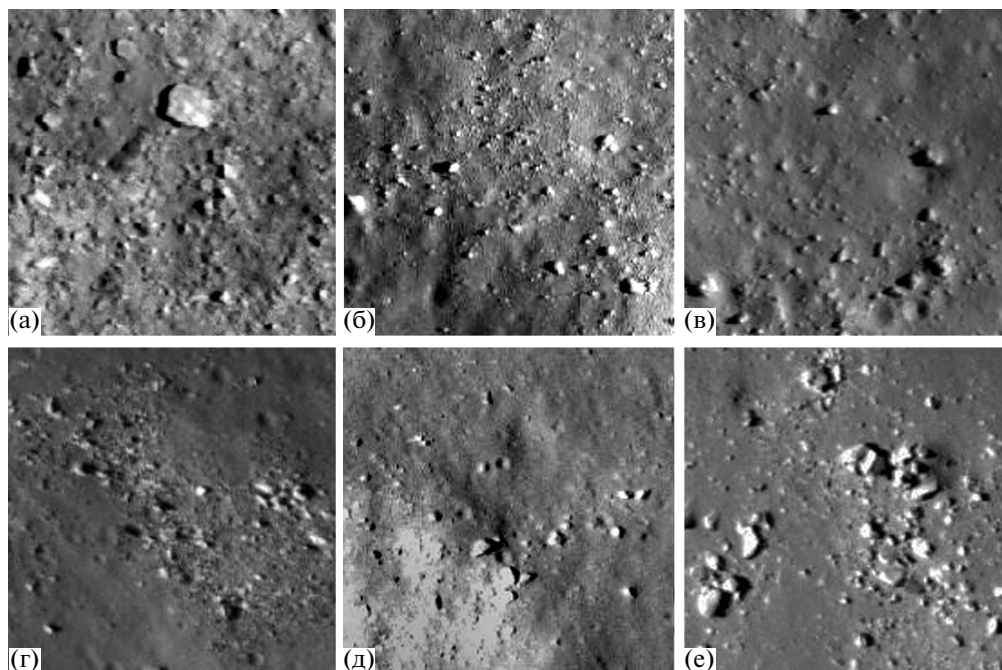


Рис. 3. Снимки камеры LROC NAC, характеризующие места работы американских миссий Apollo: (а) – вал 500-метрового кратера South Ray в районе посадки Apollo-16, (б) – вал 340-метрового кратера Cone в районе посадки Apollo-14, (в) – вал 1000-метрового кратера North Ray в районе посадки Apollo-16, (г) – вал 500-метрового кратера Sherlock в районе посадки Apollo-17, (д) – вал 180-метрового кратера West в районе посадки Apollo-11, (е) – вал безымянного 1500-метрового кратера в 10 км к северу от места посадки Apollo-12. Источник: http://apollo.memtek.com/LRO_NAC_Apollo_Images.html.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На панорамах Лунохода-1 и -2 были обнаружены соответственно 108 и 116 камней, удовлетворяющих указанным выше условиям анализа. На панорамах Apollo-11–17 были измерены от 34 до 45 камней в каждом из районов посадки. Всего были измерены 445 камней. Результаты определения средних значений h/d и h/D , а также соответствующие стандартные отклонения и доверительные интервалы на уровне значимости 95% для каждого места посадки показаны в таблице. Значительных вариаций в полученных значениях параметра h/d и h/D от места к месту не обнаружено. Доверительные интервалы для среднего этих параметров на уровне значимости 95% перекрываются для всех исследованных районов. Среднее значение h/d по всем 445 камням составило 0.6 при среднеквадратичном отклонении 0.28. Среднее значение h/D по всем районам 0.54, доверительный интервал среднего при уровне значимости 95% 0.54 ± 0.03 .

ОБСУЖДЕНИЕ

Из результатов, приведенных в таблице, следует, что отношения высоты камней к их видимому поперечнику h/d и к максимальному поперечнику h/D в изученных трех морских районах и трех

материковых районах не различимы на уровне значимости 95% и, по-видимому, средние значения для шести изученных районов $h/d = 0.6 \pm 0.03$ и $h/D = 0.54 \pm 0.03$ применимы и к другим районам Луны. Несколько округляя, для инженерных моделей поверхности Луны, вероятно, можно рекомендовать $h/D \approx 0.5$. Это согласуется с ранними рекомендациями Lunar Surface Models (1969) и попадает в диапазон значений h/d 0.2–0.9, который приводится в работе Флоренский и др. (1971).

Очевидно, что изученные камни – это результат ударного дробления пород скального основания. Поэтому наши результаты интересно сравнить с результатами экспериментов по ударному дроблению различных материалов. Так, например, в работе Fujiwara и др. (1978) в базальтовый блок размером около 5 см стреляли поликарбонатными цилиндрами диаметром 0.8 см и массой 0.37 г со скоростью 1–4 км/с и в результате статистической обработки геометрии обломков получили среднее $b/a = 0.73$ и $c/a = 0.5$. В работе Carrasconi и др. (1984) стреляли алюминиевой пулей весом 1 г со скоростью ~10 км/с в трехосные эллипсоиды $30 \times 21 \times 15$ см, сложенные специфическим бетоном, состоящим из цемента из плавленной двуокиси алюминия и наполнителя из мраморного порошка, и получили сходные значения $b/a = 0.72$ и $c/a = 0.49$. Полученные нами значе-

Значения параметра h/d и h/D для мест посадок Луноход 1-2 и Аполло-1-7

	Луноход-1	Луноход-2	Аполло-11	Аполло-12	Аполло-14	Аполло-15	Аполло-16	Аполло-17	Всего
Число измерений	108	116	45	34	38	34	35	35	445
Среднее значение h/d	0.64	0.60	0.59	0.57	0.54	0.58	0.63	0.52	0.60
Стандартное отклонение	0.26	0.22	0.20	0.17	0.22	0.28	0.28	0.28	0.28
Доверительный интервал среднего h/d на уровне значимости 95%	0.64 ± 0.05	0.60 ± 0.04	0.59 ± 0.06	0.57 ± 0.06	0.54 ± 0.07	0.58 ± 0.09	0.63 ± 0.09	0.52 ± 0.09	0.6 ± 0.03
Среднее значение h/D	0.58	0.54	0.53	0.51	0.49	0.52	0.57	0.47	0.54
Доверительный интервал среднего h/D на уровне значимости 95%	0.58 ± 0.05	0.54 ± 0.04	0.53 ± 0.05	0.51 ± 0.05	0.49 ± 0.06	0.52 ± 0.08	0.57 ± 0.08	0.47 ± 0.08	0.54 ± 0.03

ния $b/a = 0.8 \pm 0.05$ и $c/a = 0.54 \pm 0.03$ близки к значениям этих параметров, полученных в упомянутых экспериментах.

Из того, что геометрия лунных камней примерно совпадает с геометрией экспериментальных обломков, можно сделать два вывода. Первый вывод – степень заглупления изученных лунных камней в реголит незначительна. Следует отметить, что этот вывод относится только к камням размером от 10 см до первых метров. В отношении более крупных камней есть основания ожидать, что по крайней мере некоторые из них существенно заглуплены в реголит. Второй вывод – микрометеоритная абразия и другие факторы (например, термическое шелушение при резкой смене температур при переходах день–ночь) не являются доминирующими в эволюции формы лунных камней. Это согласуется с результатами Horz и др. (1975), McDonnell и др. (1977) и Horz (1977) для камней поперечником порядка 20 см, указывающими, что микрометеоритная абразия не успевает существенно изменить форму камня до того, как он будет разрушен ударом более крупного, чем микрометеорит, ударника. Следует отметить, что и этот вывод относится только к камням размером от 10 см до первых метров.

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа панорам Лунохода-1 и -2 и панорам, составленных из фотографий, сделанных космонавтами Аполло во время их работы на поверхности, измерены отношения высоты к видимому поперечнику h/d для 445 камней и оценены средние отношения высоты к максимальному поперечнику h/D в трех морских районах и трех материковых районах Луны.

2. Средние значения h/d и h/D для изученных шести районов оказались примерно одинаковыми – не различимы на уровне значимости 95%. Доверительный интервал среднего на уровне значимости 95% отношения высоты камня к максимальному поперечнику (h/D) для всех изученных районов вместе взятых найден равным 0.54 ± 0.03 .

3. Для инженерных моделей поверхности Луны рекомендуется использовать значение $h/D \approx 0.5$.

4. Соотношения длинной, средней и короткой осей лунных камней оказались близкими таковым, полученным в экспериментах по дроблению различных материалов высокоскоростными ударами. На этом основании сделан вывод, что степень заглупления изученных лунных камней в реголит незначительна, а микрометеоритная абразия и другие факторы (например термическое шелушение при резкой смене температур при переходах день–ночь) не являются доминирующими в эволюции формы лунных камней. Эти выводы применимы к камням размером от 10 см до 1–2 м

и могут быть неприменимы к более крупным камням.

Авторы признательны А.М. Абдрахимову, Е.В. Забалуевой, И.А. Кожевниковой, М.А. Креславскому и J.V. Plescia за помощь в работе и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Гуриштейн А.А., Зезин Р.Б., Пронин А.А., Полосухин В.П., Попова З.В., Таборко И.М. К проблеме строения поверхности лунных морей // Современные представления о Луне. М.: Наука, 1972. С. 21–45.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Пронин А.А., Попова З.В. Предварительные результаты геоморфологического изучения панорам // Передвижная лаборатория на Луне – Луноход-1. М.: Наука, 1971. С. 96–115.
- Флоренский Л.П., Базилевский А.Т., Зезин Р.Б., Полосухин В.П., Попова З.В. Геолого-морфологические исследования лунной поверхности // Передвижная лаборатория на Луне – Луноход-1. М.: Наука, 1978. С. 102–135.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бурба Г.А. и др. Очерки сравнительной планетологии. М.: Наука, 1981. 326 с.
- Capaccioni F., Ceroni P., Coradini M., Farinella P., Flamini E., Martelli G., Paolicchi P., Smith P.N., Zappalà V. Shapes of asteroids compared with fragments from hypervelocity impact experiments // Nature. 1984. V. 308. P. 832–834.
- Florensky C.P., Basilevsky A.T., Bobina N.N., Burba G.A., Grebennik N.N., Kuzmin R.O., Polosukhin B.P., Popovich V.D., Pronin A.A., Ronca L.B. The floor of crater Le Monier: a study of Lunokhod 2 data // Proc. 9th Lunar Planet. Sci. Conf. Pergamon Press, 1978. P. 1449–1458.
- Fujiwara A., Kamimoto G., Tsukamoto A. Expected shape distribution of asteroids obtained from laboratory impact experiments // Nature. 1978. V. 272. P. 602–603.
- Horz F. Impact cratering and regolith dynamics // Physics and Chemistry of the Earth. V. 10. 1977. P. 3–15.
- Horz F., Schneider E., Gault D.E., Hartung J.B., Brownlee D.E. Catastrophic rupture of lunar rocks: a Monte-Carlo simulation // Moon. 1975. V. 13. P. 235–238.
- Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon / Eds. Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. Cambridge Univ. Press, 1991. 736 p.
- Lunar Surface Models // NASA SP-8023. Washington, D.C. 1969. 55 p.
- McDonnell J.A.M., Ashworth D.G., Flavill R.P., Carey W.C., Bateman D.C., Jennison R.C. The characterization of lunar surface impact erosion and solar wind sputter processes on the lunar surface, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A // Mathemat. and Phys. Sci. 1977. V. 285. № 1327. P. 303–308.
- Muehlberger W.R., Batson R.M., Boudette E.L., Duke C.M., Eggleton R.E., Elston D.P., England A.W., Freeman V.L., Hait M.H., Hall T.A., Head J.W., Hodges C.A., Holt H.E., Jackson E.D., Jordan J.A., Larson K.B., Milton D.J., Reed V.S., Rennilson J.J., Schaber G.G., Schafer J.P., Silver L.T., Stuart-Alexander D., Sutton R.L., Swann G.A.,

- Tyner R.L., Ulrich G.E., Wilshire H.G., Wolfe E.W., Young J.W.* Preliminary geologic investigation of the Apollo 16 landing site // Apollo 16 Preliminary Science Report. NASA SP-315. 1972. Washington, D.C. P. 41–84.
- Muehlberger W.R., Batson R.M., Cernan E.A., Freeman V.L., Hait M.H., Holt H.E., Howard K.A., Jackson E.D., Larson K.B., Reed V.S., Rennilson J.J., Schmitt H.H., Scott D.H., Sutton R.L., Stuart-Alexander D., Swann G.A., Trask N.J., Ulrich G.E., Wilshire H.G., Wolfe E.W.* Preliminary geologic investigation of the Apollo 17 landing site // Apollo 17 Preliminary Science Report. NASA SP-330. 1973. Washington, D.C. P. 6-1–6-91.
- 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., Ghaemi F.T., Schaffner J.A., Malin M.C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T.N., Eliason E.M., McEwen A.S., Turtle E., Jolliff B.L., Hiesinger H.* Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. Iss. 1–4. P. 81–124.
- Shoemaker E.* Origin of fragmental debris on the lunar surface and the history of bombardment of the moon // Instituto de Investigaciones Geológicas de la Deputacion Provincial. 1971. V. XXV, Universidad de Barcelona.
- Shoemaker E.M., Morris E.C., Batson R.M., Holt H.E., Larson K.B., Montgomery D.R., Rennilson J.J., Whitaker E.A.* Television observations from Surveyor // Surveyor Program Results. NASA-SP184. 1969a. P. 19–128.
- Shoemaker E.M., Bailey N.G., Batson R.M., Dahlem D.H., Foss T.H., Grolier M.J., Goddard E.M., Hait M.H., Holt H.E., Larson K.B., Rennilson J.J., Schaber G.G., Schleicher D.L., Schmitt H.H., Sutton R.L., Swann G.A., Waters A.C., West M.N.* Geologic setting of the lunar samples returned by the Apollo 11 mission // Apollo 11 Preliminary Science Report. NASA SP-214. 1969b. Washington, D.C. P. 41–84.
- Shoemaker E.M., Batson R.M., Bean A.L., Conrad C., Jr., Dahlem D., Goddard E.N., Hait M. T., Larson K.B., Schaber G.G., Schleicher D.L., Sutton R.L., Swann G.A., Waters A.C.* Preliminary geologic investigation of the Apollo 12 landing site. Part A. Geology of the Apollo 12 landing site // Apollo 12 Preliminary Science Report. NASA SP-235. 1970. Washington, D.C. P. 113–182.
- Swann G.A., Bailey N.G., Batson R.M., Eggleton R.G., Hait M.H., Holt H.E., Larson K.B., McEwen M.C., Mitchel E.D., Schaber G.G., Schafer J.P., Shepard A.B., Sutton R.L., Trask N.J., Ulrich G.E., Wilshire H.G., Wolfe E.W.* Preliminary geologic investigation of the Apollo 14 landing site // Apollo 14 Preliminary Science Report. NASA SP-272. 1971. Washington, D.C. P. 39–85.
- Swann G.A., Bailey N.G., Batson R.M., Freeman V.L., Hait M.H., Head J.W., Holt H.E., Howard K.A., Irwin J.B., Larson K.B., Muehlberger W.R., Reed V.S., Rennilson J.J., Schaber G.G., Scott D.R., Silver L.T., Sutton R.L., Ulrich G.E., Wilshire H.G., Wolfe E.W.* Preliminary geologic investigation of the Apollo 15 landing site // Apollo 15 Preliminary Science Report. NASA SP-289. 1972. Washington, D.C.. P. 5-1–5-112.