

МЕТЕОРИТНОЕ ВЕЩЕСТВО В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ЛУНЫ

А.В.Иванов, К.П.Флоренский, Ю.И.Стахеев

Институт космических исследований АН СССР;

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского АН СССР

Поверхность Луны — естественный датчик метеоритного потока, при изучении которого можно представить себе не только полный спектр метеоритов по энергиям удара, но и колебания в интенсивности и составе потока в течение многих миллионов лет. В то же время необходимо учитывать существенную разницу в механизме падения метеоритов на Землю и на Луну.

Мощная атмосфера Земли тормозит космические скорости метеоритов, в результате чего преобладающая масса их подвергается абляции с поверхности и выпадает с небольшой скоростью, сохраняясь в кусках значительного размера. Лишь небольшая часть крупных метеоритов способна дать ударный взрыв с кратерообразующим эффектом. Продукты поверхностной абляции метеорита в атмосфере в виде застывших капель, так называемых космических шариков, свободно оседают на поверхность Земли. В большинстве случаев морфология застывших капель, несущих следы высоких температур, не наблюдающихся при вулканических извержениях, сама по себе свидетельствует об их космогенности при исключении техногенных образований.

На поверхность Луны все метеориты, начиная с мельчайших, выпадают без торможения со скоростью не менее $2,4 \text{ км/сек}$, вызывая ударный взрыв. Во время взрыва разрушается не только падающий метеорит, но и во много раз его превосходящая масса мишени, т. е. горных пород Луны. При таком ударе сохранение компактных метеоритных масс почти невероятно. Среди расплавленных брызг резко преобладает вещество мишени и застывшие шарики, типичные для Луны, непредставительны для метеоритного вещества. Диспергированное ударным взрывом метеоритное вещество в виде пара, капель или осколков, так же как и прилегающая часть вещества мишени, способно частично приобретать скорости более $2,4 \text{ км/сек}$, направленные вверх, и выбрасываться за пределы поля тяготения Луны. Общий баланс вещества при таком процессе еще не ясен, но не

исключено, что для Луны в целом он имеет отрицательный характер, т. е. в результате метеоритной бомбардировки доля вещества, теряемого Луной, больше ее прироста за счет массы метеоритов.

Следы ударно-взрывного кратерообразования покрывают всю поверхность Луны в виде популяции кратеров, имеющих диаметр от десятых долей миллиметра до десятков километров. Лишь среди крупных образований диаметром более нескольких километров можно говорить о заметной доле кратеров, в которых отмечаются следы эндогенности, заставляющие спорить об их происхождении.

Естественно, что одной из важных задач при лабораторных исследованиях лунных образцов были поиски внелунного, метеоритного вещества в них. При этом следует отметить, что рассеянное вещество метеоритов на Луне практически не включается в миграционные геохимические циклы и остается на поверхности, перемещаясь вдоль нее главным образом в результате последующих метеоритных ударов.

Вещество малых космических тел, достигших поверхности Луны, может находиться в слое реголита в рассеянном виде как в форме отдельных кусочков, в той или иной степени сохранивших свои первоначальные фазово-морфологические характеристики, так и в виде примесей к местному лунному веществу в молекулярной или атомарной форме. Поиски такого рода геохимических примесей были предприняты группой исследователей в составе Лаула, Ганапати, Андерса и др. (Ganapathy et al., 1970; Laul et al., 1971, 1972). При анализе нейтронным активационным методом образцов «Аполлона-11» из Моря Спокойствия (Ganapathy et al., 1970) ими было обнаружено значительное (в 3–100 раз) обогащение брекчий и мелкозернистого материала по сравнению с кристаллическими породами рядом микроэлементов: Ir, Au, Zn, Cd, Ag, Br, Bi, Te и Tl. Меньшее обогащение наблюдается также для Co, Cu, Ga, Pd, Rb и Cs. Расчеты показали, что только на 2% такое обогащение может быть результатом воздействия солнечного ветра при современной его интенсивности. Большая часть должна быть объяснена примесью метеоритного вещества.

На этом основании содержание метеоритного материала типа углистых хондритов в лунном реголите оценивается примерно в 1,9%.

Примерно такое же содержание метеоритного материала найдено в образцах реголита Океана Бурь из сборов «Аполлона-12» (Laul et al., 1971) — в образце 12070 из межкратерного пространства и в четырех из пяти образцов из буровых колонок. Интересно отметить, что грубозернистый слой из колонки, резко отличающийся от соседних и по минералогическому составу, и по гранулометрическим характеристикам, не содержит метеоритных компонентов. По содержанию редких элементов в мелкой фракции реголита Моря Изобилия в образце «Луны-16» примесь метеоритного материала типа углистых

хондритов CI оценивается в 1,5–2%, что соответствует образцам «Аполлона-11» и «Аполлона-12».

На основании содержания метеоритного вещества в породах Моря Спокойствия была сделана оценка притока метеоритного и кометного материала на Луну за последние 3,65 млрд. лет. Мощность реголита при этом принята 4,6 м. Полученная величина составляет $3,8 \cdot 10^{-9} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (Ganapathy et al., 1970).

Однако такая оценка притока метеоритного материала должна рассматриваться как предварительная, ибо слишком неопределенны в настоящее время наши знания о спектрах масс и скоростей осколков, образующихся при сверхскоростных соударениях. По-видимому, полученную оценку следует рассматривать не как величину притока внелунного материала, а как величину обогащения реголита таким материалом за рассматриваемый отрезок времени.

Весьма интересно оценить, какую часть от истинной величины поступления на Луну космического материала составляет полученная величина накопления внелунного вещества в реголите. Как уже отмечалось, прямыми методами получить такую оценку пока невозможно. Однако если принять, что в первом приближении интенсивность поступления космического вещества на Луну и на Землю одинакова и последняя постоянна и равна $(4-10) \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (Иванов, Флоренский, 1970), можно предположить, что в реголит поступает только около процента общего количества метеоритного материала, достигающего поверхности Луны. Даже если считать оценку современного выпадения космического вещества несколько завышенной, то следует учитывать вероятное повышение метеоритного потока 3–4 млрд. лет назад, т. е. такое отношение нам представляется достаточно вероятным. Остальная часть вещества падающих на Луну тел в результате взрыва, по-видимому, приобретает скорость выше второй космической (2,37 км/сек) и вновь уходит в космическое пространство.

Как известно, «земные» метеориты подразделяются на «падения» и «находки». Среди последних резко преобладают железные метеориты, которые заметно отличаются от обычных силикатных пород, хотя и составляют незначительную долю от общего количества поступающих на Землю метеоритов.

Все осколки «лунных» метеоритов, естественно, находки. При этом поиски частиц нежелезных метеоритов в лунных образцах представляют еще большие, чем на Земле, трудности, учитывая очень сильное изменение метеоритного вещества при взрывах. Обнаружение фрагментов таких метеоритов связано с работами группы Дж. Вуда.

В реголите Моря Спокойствия из сборов «Аполлона-11» был найден миллиметровый каменно-железный осколок (Wood et al., 1970), состоящий на 70% из металлической (камасит + тэнит) и на 30% из силикатной (пижонит, основной плагиоклаз, оливин, авгит +

ильменит, хромит, троилит) фаз. Состав силикатной фазы указывает на большое сходство этого обломка с мезосидеритами.

В образцах «Аполлона-11» найден также фрагмент оливинового порфира со следами оплавления, состоящий из зерен оливина, часто скелетного, в тонкозернистой массе. На метеоритную природу этого фрагмента указывает большое его сходство с частично расплавленным хондритом.

Наконец, в материале «Аполлона-12» был обнаружен (Wood et al., 1971) кусочек размером 3 мм, который может быть идентифицирован как углистый хондрит II типа. Интересно отметить, что хондры в этом образце несут более сильный шоковый эффект по сравнению с хондритами земных сборов.

Нужно указать, что эти фрагменты были обнаружены при изучении более чем 1,5 тыс. частиц размером 1–10 мм материала «Аполлона-11» и около 500 таких частиц материала «Аполлона-12».

Значительно более результативными были поиски железных частиц, которые могли иметь метеоритную природу.

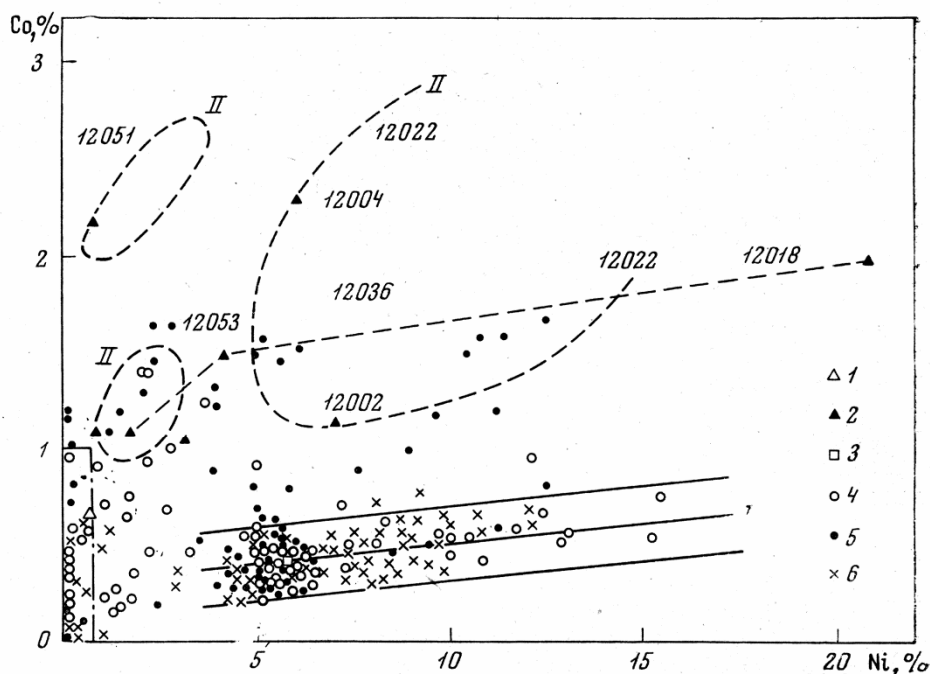
Действительно, уже в первых работах, посвященных исследованию лунных образцов, содержался целый ряд сведений об обнаружении металлических частиц, по структуре и составу весьма сходных с метеоритами. В то же время при этих исследованиях были найдены частицы железа, образовавшиеся, по-видимому, непосредственно на Луне.

Исследования показывают, что образцы горных пород в поверхностном слое Луны могут быть разделены на две основные категории — первичные магматические породы и вторичные породы, в значительной степени измененные в результате поверхностных процессов.

Во многих образцах лунных магматических пород типа габбро-базальтов из морских районов в качестве акцессорного минерала присутствует металлическое железо. Наблюдавшийся размер его зерен в образцах «Аполлона-11» и «Аполлона-12» не превышает 100 мк и обычно значительно меньше (Cameron, 1970; Reid et al., 1970; Ware, Lovering, 1970, и др.). Породы базальтового типа из Моря Изобилия («Луна-16») характеризуются наименьшим по сравнению с другими морскими районами содержанием металлической фазы, причем размер этих включений обычно менее 5 мк. Как правило, зерна железа в лунных базальтах встречаются в ассоциации с троилитом (Wood et al., 1970, 1971), а в породах из Океана Бурь — также с хромитом и ульвошпинелью (Reid et al., 1970, Wood et al., 1971).

Состав металла в образцах магматических пород из различных районов Луны существенно различен (рисунок).

Для базальтов из Моря Спокойствия характерно очень низкое содержание в зернах железа никеля и заметное — кобальта. Так, по данным различных исследователей, содержание Ni колеблется от <0,04 до <1% и Co от <0,4 до 0,8%, что резко отличает этот металл от метеоритного железа (Cameron, 1970; Haggerty et al., 1970; Goldstein et al., 1970; Wood et al., 1970). Металлическая фаза базальтовых пород из Океана Бурь значительно богаче никелем и кобальтом. Содержание Ni здесь колеблется от 0 до 38%, Co — от 0 до 8% (Reid et al., 1970; El Goresy et al., 1971; Cameron, 1971; Keil et al., 1971). Характерно, что металл в пределах даже одного образца из этих сборов часто имеет весьма различный состав, причем металлические зерна, приуроченные к минералам ранних стадий кристаллизации (оливин, хромит), значительно более обогащены Ni и Co по сравнению с металлом минералов поздних стадий (Reid et al., 1970).



Содержание никеля и кобальта в металлической фазе образцов лунных пород
 I — содержание никеля и кобальта в металле метеоритов (с 95%-ным доверительным интервалом), по Муру и др. (Moog et al., 1969). Кристаллические горные породы: 1 — «Аполлон-11», 2 — «Аполлон-12», 3 — «Аполлон-14»; брекчии и мелкозернистый материал: 4 — «Аполлон-11», 5 — «Аполлон-12», 6 — «Аполлон-14»
 II — границы зон, в которые попадают образцы кристаллических пород «Аполлона-14» по составу металла (номера образцов указаны пятизначными цифрами)

Данных о составе металла из кристаллических пород района Фра-Мауро еще недостаточно, однако имеющиеся свидетельствуют, что в этом отношении образцы, видимо, сходны с образцами из Океана Бурь: содержание Ni в металле одного и того же образца часто меняется более чем на порядок (пределы колебания: от 1,5 до 37% и от 0,2 до 6,1%) (El Goresy et al., 1972).

Характер металлических включений во вторичных лунных породах — микробрекчиях — существенно иной. Прежде всего, размер зерен металла здесь в общем

значительно, по крайней мере на порядок, крупнее по сравнению с включениями металла в кристаллических породах (Wood et al., 1970, 1971, и др.). Содержание металлического железа примерно на порядок выше содержания его в кристаллических породах, что для образцов из Моря Спокойствия, например, следует также и из результатов магнитных измерений (Nagata, Carleton, 1970).

Во многих исследованиях отмечается, что для железа брекчий типично содержание Ni 5% и более при содержании Co 0,3–0,5% (Goldstein, Yakowitz, 1971; Wänke et al., 1970, 1971; Agrell et al., 1972). В то же время в частицах этого типа отмечаются включения металла, состав которого характерен для местных кристаллических пород.

Индивидуальные металлические частицы, встреченные в мелкозернистом материале реголита, практически идентичны по составу и структуре металлическим включениям в брекчиях, что вполне естественно, если учитывать, что брекчии образуются, видимо, в результате консолидации мелкозернистого материала. Размер таких зерен достигает 2–3 мм, сходен с составом металла брекчий. Эти зерна сложены либо камаситом, либо сосуществующими камаситом и тэнитом с включениями шрейберзита, троилита, карбидов (Goldstein et al., 1970). В ряде фрагментов наблюдаются неймановы линии.

Содержание металлического железа в мелкой фракции образцов реголита «Аполлона-11» и «Аполлона-12» рядом исследователей оценивается около 0,1 вес. %. Интересно, что для образца мелкозернистого материала из района Фра-Мауро («Аполлон-14») содержание металла значительно выше — около 0,5% (Goldstein et al., 1972), что хорошо коррелирует с большей переработанностью реголита этого района, в том числе с широким развитием брекчий.

Высокое по сравнению с местными кристаллическими породами содержание и большие размеры частиц металла в мелкозернистом материале и брекчиях, их характерный состав в целом достаточно четко указывают на метеоритную природу многих таких частиц.

Особое положение среди лунных образцов занимают породы анортозитового типа, достаточно экзотические и непонятные — в отношении генезиса — и для Земли. На Луне их присутствие впервые было обнаружено по сборам «Аполлона-11». Тогда же Дж.Вудом (Wood et al., 1970) была высказана гипотеза об анортозитовом составе лунных материков. В последующем эта точка зрения получила веские подтверждения. В частности, поставленный Адлером и другими на окологрунтовой орбите на космическом корабле «Аполлон-15» эксперимент показал, что отношение Al/Si на материках примерно в 2 раза выше, чем на морях (Adler et al., 1972).

Наконец, материковый реголит, доставленный станцией «Луна-20», в большой степени состоит из частиц пород анортозитового типа. Причем многие из этих частиц имеют

эффузивный, лавообразный облик. Нередки также частицы с брекчированной, перекристаллизованной структурой.

В анортозитовых частицах «Аполлона-11» были обнаружены мелкие (первые десятки микронов) включения металлического железа с содержанием Ni 5–29% и Co до 0,5%, причем было отмечено сосуществование камасита и тэнита (Dickey, 1970).

Частицы анортозитового типа из реголита «Луны-20» также содержат металлическую фазу, причем размеры таких включений колеблются от десятков до сотен микрон. Судя по данным предварительных исследований (Виноградов, 1972), состав этого железа попадает в типичную метеоритную, камаситовую область — 5–7% Ni, ~0,5% Co.

Происхождение железа в анортозитах может быть различным.

С одной стороны, по аналогии с лунными базальтами можно предположить, что это лунный, магматогенный металл. Однако возникают некоторые трудности при объяснении, каким образом металл в заметных количествах мог аккумулироваться в легкой анортозитовой коре.

С другой стороны, состав металла прямо указывает на вероятную его метеоритную природу. Более того, можно предположить, что внедрение металла в породы анортозитового типа и эффузивный облик этих пород — результат одного процесса. Дело в том, что образование плагиоклазовой коры, например по модели Вуда, должно было привести к возникновению весьма крупнозернистых пород. Приобретение этими породами эффузивного облика, так же как и брекчированной структуры, могло произойти в результате мощных взрывных явлений при падении крупных тел на древние анортозитовые материки на раннем этапе лунной истории.

Таким образом, можно считать, что поиски дисперсного метеоритного вещества в образцах лунных пород весьма важны как для метеоритики, так и для селенологии.

Первые полученные результаты показывают, что поверхностный слой Луны обогащается метеоритным веществом по сравнению с глубинными породами. Металлическое железо, встреченное в лунных породах, может иметь как лунное, магматогенное, так и внелунное, метеоритное происхождение, что требует внимательного рассмотрения в каждом конкретном случае. Примесь метеоритного вещества в поверхностных слоях Луны оценивается примерно в 1–2%.

Поступила в Комитет по метеоритам АН СССР
в июне 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Виноградов А.П.* Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-20». — *Геохимия*, №7, 1972.
- Иванов А.В., Флоренский К.П.* Интенсивность выпадения мелкодисперсного космического вещества на Землю. — *Геохимия*, №11, 1970.
- Adler J., Trombka J., Gerard J., Lowman P., Schmadebeck R., Blodget H., Eller E., Yin L., Lamothe R., Gorenstein P., Bjorkholm P.* Apollo 15 geochemical X-ray fluorescence experiment: preliminary report. — *Science*, 175, N 4020, 1972.
- Agrell S.O., Scoon J.H., Long J.V.P., Coles J.N.* The occurrence of goethite in a microbreccia from the Fra Mauro formation. — *Abstracts 3rd Lunar Sci. Conf.*, 1972.
- Cameron E.N.* Opaque minerals in certain lunar rocks from Apollo 11. — *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, 1, 1970.
- Cameron E.N.* Opaque minerals in certain lunar rocks from Apollo 12. — *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 1, 1971.
- Dickey J.S., Jr.* Nickel-iron in lunar anorthosites. — *Earth and Planet. Sci. Letters*, 8, N 6, 1970.
- El Goresy A., Ramdohr P., Taylor L.A.* The opaque minerals in the lunar rocks from Oceanus Procellarum. — *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 1, 1971.
- El Goresy A., Ramdohr P., Taylor L.A.* Petrology and geochemistry of the opaque minerals in the crystalline rocks of the Fra Mauro region. — *Abstracts 3rd Lunar Sci. Conf.* 1972.
- Ganapathy R., Keays R.R., Laul J.C., Anders E.* Trace elements in Apollo 11 lunar rocks: implications for meteorite influx and origin of Moon. — *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, 2, 1970.
- Goldstein J.I., Henderson E.P., Yakowitz H.* Investigation of lunar metal particles. — *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, 1, 1970.
- Goldstein J.I., Yakowitz H.* Metallic inclusions and metal particles in the Apollo 12 lunar soil. — *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 1, 1971.
- Goldstein J.I., Yen F., Axon H.J.* Metallic particles in the Apollo 14 Lunar soil. — *Abstracts 3rd Lunar Sci. Conf.* 1972.
- Haggerty S.E., Boyd F.R., Bell P.M., Finger L.W., Bryan W.B.* Opaque minerals and olivine in lavas and breccias from Mare Tranquillitatis. — *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, 1, 1970.
- Keil K., Prinz M., Bunch T.E.* Mineralogy, petrology and chemistry of some Apollo 12 samples. — *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 1, 1971.
- Laul J.C., Morgan J.W., Ganapathy R., Anders E.* Meteoritic material in lunar samples: characterization from trace elements. — *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, 2, 1971.

- Laul J.C., Ganapathy R., Morgan J.W., Anders E.* Meteoritic and non-meteoritic trace elements in Luna-16 samples. — *Earth and Planet. Sci. Letters*, 13, N 2, 1972.
- Moore C.B., Lewis C.F., Nava D.* Superior analyses of iron meteorites. — In «*Meteorite Research*», Dordrecht, Reidel Publ. Co., 1969.
- Nagata T., Carleton B.J.* Natural remanent magnetization and viscous magnetization of Apollo 11 lunar material. — *J. Geomagn. and Geoelectr.*, 22, N 4, 1970.
- Reid A.M., Meyer C., Jr., Harmon R.S., Brett R.* Metal grains in Apollo 12 igneous rocks. — *Earth and Planet. Sci. Letters*, 9, N 1, 1970.
- Wänke H., Wlotzka F., Jagoutz E., Begemann F.* Composition and structure of metallic iron particles in lunar «fines». — *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, 1, 1970.
- Wänke H., Wlotzka F., Baddenhausen H., Balacescu A., Spettel B., Teschke F., Jagoutz E., Kruse H., Quijano-Rico M., Rieder R.* Apollo 12 samples: chemical composition and its relation to sample locations and exposure ages, the two component origin of the various soil samples and studies on lunar metallic particles. — *Proc. Second. Lunar Sci. Conf.*, 2, 1971.
- Ware N.G., Lovering J.F.* Electron-microprobe analyses of phases in lunar samples. — *Science*, 167, N 3918, 1970.
- Wood J.A., Dickey J.S., Jr., Marvin U.B., Powell B.N.* Lunar anorthosites. — *Science*, 167, N 3918, 1970.
- Wood J.A., Marvin U.B., Powell B.N., Dickey J.S., Jr.* Mineralogy and petrology of the Apollo 11 lunar sample. — *SAO Spec. Rep.*, N 307, 1970.
- Wood J.A., Marvin U.B., Reid J.B., Jr., Taylor G.J., Bower J.F., Powell B.N., Dickey J.S., Jr.* Mineralogy and petrology of the Apollo 12 lunar samples. — *SAO Spec. Rep.*, N 333, 1971.