

ЛУННЫЙ ГРУНТ ИЗ МОРЯ ИЗОБИЛИЯ

МОРФОЛОГИЯ И ТИПЫ ЧАСТИЦ ОБРАЗЦА РЕГОЛИТА ИЗ МОРЯ ИЗОБИЛИЯ

К.П.Флоренский, А.В.Иванов, Л.С.Тарасов, Ю.И.Стахеев, О.Д.Родэ

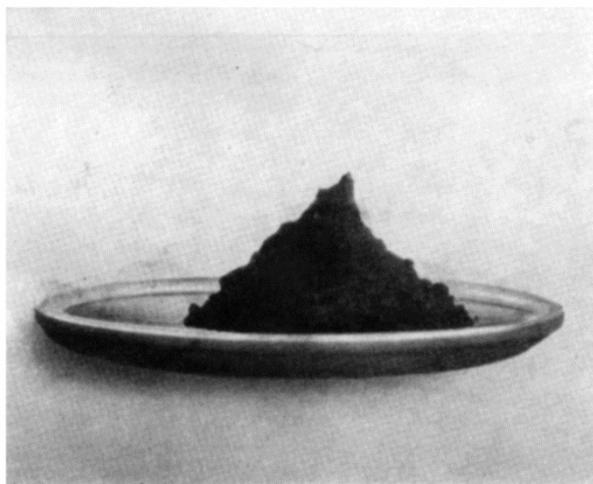
Приводится морфологическая характеристика образца как в целом, так и слагающих его компонентов. Средний объемный вес образца грунта определен около $1,2 \text{ г/см}^3$, что соответствует средней пористости грунта на глубину 35 см около 60%. Отмечается высокая слипаемость грунта и способность его к электризации. Выделяются две основные генетические группы частиц реголита: первичные, представленные главным образом обломками магматических пород типа базальта и габбро, а также мономинеральными зернами слагающих их минералов, и вторичные, подвергшиеся заметному экзогенному преобразованию на поверхности Луны. Ко второй группе, составляющей более 70% материала в крупных фракциях, относятся частицы брекчий, спекшиеся агрегаты сложной ветвистой формы и стеклянные и остеклованные частицы различного состава. Количество стекла возрастает с уменьшением размера частиц и во фракциях менее 5 мкм составляет более 80–90% массы вещества. Формирование реголита происходит под влиянием двух основных факторов — измельчения коренных магматических пород в процессе интенсивной метеоритной бомбардировки поверхности и изменения и агломерации образовавшихся при дроблении фрагментов пород. С ударными взрывами связан также перенос частиц лунного вещества на большие расстояния, что приводит к осреднению состава реголита на значительных площадях.

Краткое описание морфологии лунного грунта, доставленного АЛС «Луна-16», представлено в первых сводных работах, посвященных его исследованию. В настоящей

статье приводится более подробная морфологическая характеристика образца лунного грунта как в целом, так и слагающих его компонентов.

Колонка реголита при отборе целиком заполнила буровую трубку, и при транспортировке заметного перемешивания материала в трубке не происходило. Перенесенный в атмосфере гелия на приемный лоток грунт не имел видимой слоистости и казался однородным на всю глубину. Общий вес образца реголита составил несколько более 100 г.

Реголит в целом представляет собой рыхлый разнозернистый темно-серый (черноватый) материал. Внешне он кажется тонкозернистым порошком, на поверхности которого кое-где заметны более крупные зерна, обладающие сильным зеркальным эффектом. Порошок легко формуется и слипается в отдельные рыхлые комки. На его поверхности четко отпечатываются следы внешних воздействий — прикосновений инструментов. Грунт легко держит вертикальную стенку, но при свободном насыпании имеет угол естественного откоса около 45° (рис. 1).



Р и с. 1. Горка лунного грунта при свободном насыпании

Следует отметить, что несмотря на заметную слипаемость грунт обладает неустойчивостью к вибрационным воздействиям. Он легко просеивается через сита, следы разрушения структуры грунта появляются в гелиевой камере через несколько дней, а образец грунта, насыпанный в сухом азоте горкой с углом откоса около 30° и установленный в зоне очень слабого, но постоянного вибрационного действия, через несколько месяцев полностью растекся на подставке, приняв угол откоса не более 5° .

Интересным свойством лунного грунта является его высокая электризация, что проявляется в прилипании частиц к поверхностям из стекла и пластмассы и к препарировочным инструментам.

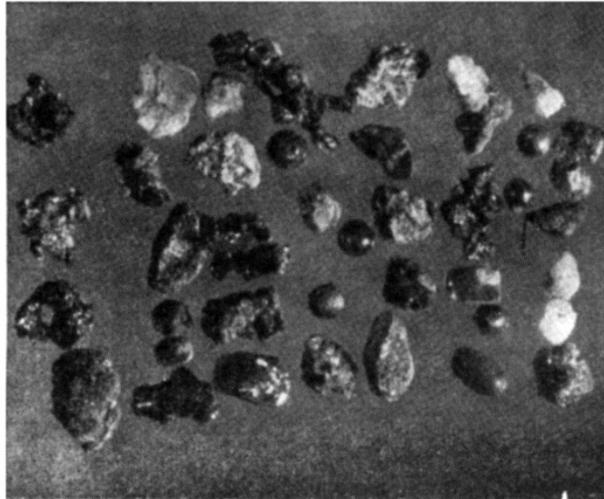
При хранении образца лунного грунта в обычных лабораторных условиях в течение нескольких месяцев повышенная слипаемость и способность вещества к электризации сохраняются.

Средний объемный вес грунта в естественном залегании на глубину погружения бура по его заполнению определен около $1,2 \text{ г/см}^3$. Это почти соответствует насыпному весу грунта при свободном насыпании в мерную посуду, который колеблется от 1,1 до $1,2 \text{ г/см}^3$. Учитывая, что реголит легко уплотняется при утряске до объемного веса около $1,8\text{--}1,9 \text{ г/см}^3$, а прочность лунного грунта заметно повышается с глубиной, что установлено аппаратами серии «Сервейор» и «Аполлон» и подтверждено всей работой «Лунохода-1», можно полагать, что плотность самого верхнего слоя грунта из Моря Изобилия приближается к плотности поверхностного слоя из Океана Бурь, которая была определена «Луной-13» в $0,8 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, при среднем удельном весе частиц грунта около 3 г/см^3 средняя пористость лунного грунта в Море Изобилия на глубину в 35 см оценивается около 60%, с вероятным изменением от 70 до 40% по мере углубления.

Для дальнейшего изучения расположенный на лотке образец был разделен на зоны, по которым производилось опробование. Пробы отбирались с глубины 1–8, 8–15, 15–28 и 28–33 см, соответственно, из зон А, Б, В, Г.

Микроскопическое изучение доставленного образца позволяет выделить две основные группы частиц лунного грунта: первичные и вторичные (рис. 2). Группа первичных частиц представлена обломками магматических пород типа базальтов, заполнивших макродепрессии Луны на ранних этапах ее геологической истории, и составляющими эти породы отдельными минеральными зернами. К группе вторичных частиц относится материал, подвергшийся заметному экзогенному преобразованию на поверхности Луны: вторично литифицированные, уплотненные зерна, состоящие из мелких частиц реголита, и зерна, в различной степени расплавленные и оплавленные с поверхности.

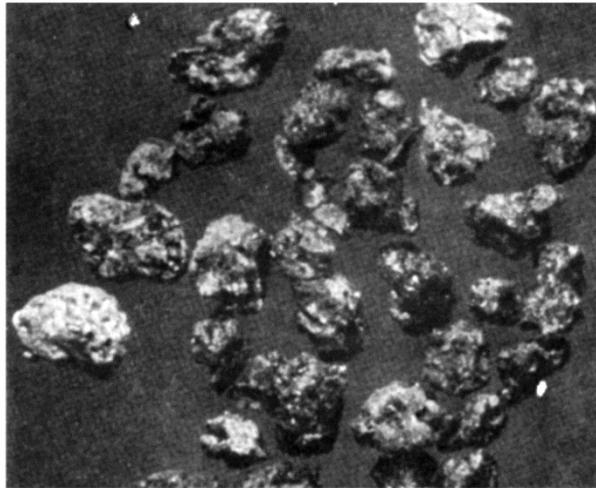


Р и с. 2. Основные типы частиц крупной фракции реголита

Среди первичных частиц лунного реголита можно выделить две группы, отражающие различные условия застывания базальтовой магмы, — мелкозернистые базальты и более крупнозернистые породы типа габбро.

Мелкозернистые базальты представляют собой очень свежие плотные обломки пород темно-серого цвета с точечными включениями светлых минералов. Эти частицы характеризуются угловатой формой и обычно не несут видимых следов окатанности. В ряде частиц этих пород наблюдаются поры и пустоты различной формы. Иногда на поверхности частиц можно наблюдать мелкие, выстланные стеклом лунки, как правило, округлой формы, которым, по-видимому, можно приписать ударное происхождение. Основными породообразующими минералами мелкозернистых базальтов являются плагиоклазы, пироксены, ильменит и оливин. В заметном количестве порой присутствует стекло.

Частицы крупнозернистых базальтов, подобно вышеописанным, характеризуются свежими поверхностями излома и в общем остроугольной формой и не обнаруживают следов выветривания и окатанности (рис. 3). Породообразующие минералы этих пород те же, что и у более мелкозернистых разновидностей, характерный размер зерен — от 0,3 до 0,5 мм. Количественные соотношения минералов заметно варьируют в различных фрагментах, что, в частности, сказывается на окраске частиц. В общем для частиц этих пород характерны желтовато-розовые тона. Среди частиц пород типа микрогаббро были обнаружены разновидности, содержащие пустоты, стенки которых устланы кристаллами силикатных минералов, заметно превышающими размер кристаллов в основной массе породы.



Р и с. 3. Частицы изверженной породы типа микрогаббро

К первичному материалу лунного грунта следует отнести также мономинеральные агрегаты, состоящие почти нацело из мелкозернистого плагиоклаза основного состава и представляющие собой неправильной формы образования чисто-белого или сероватого цвета. Иногда такие частицы содержат включения кристаллов ильменита и зерен металлического железа. Значительная часть первичного материала лунного грунта, особенно в более мелких фракциях, представлена мономинеральными зернами: оливином, пироксеном и плагиоклазом.

Оливин присутствует в лунном реголите в виде хорошо сохранившихся зерен неправильной формы. Цвет зерен варьирует от светло-желтого до коричневатого-желтого. Встречаются очень свежие частицы насыщенного желтого цвета с чистой поверхностью, острыми ребрами и свежими сколами и частицы оплавленные, характеризующиеся, как правило, более темными, коричневатого-желтыми тонами. Некоторая часть зерен оливина отличается хорошей сохранностью с одной стороны и оплавлена с другой. Иногда зерна оливина содержат включения темноцветных минералов. Интересно отметить, что в исследованных пробах довольно часто встречаются крупные монозерна оливина, достигающие в поперечнике 0,5–0,7 мм, что заметно превышает размер кристаллов оливина в исследованных фрагментах магматических пород.

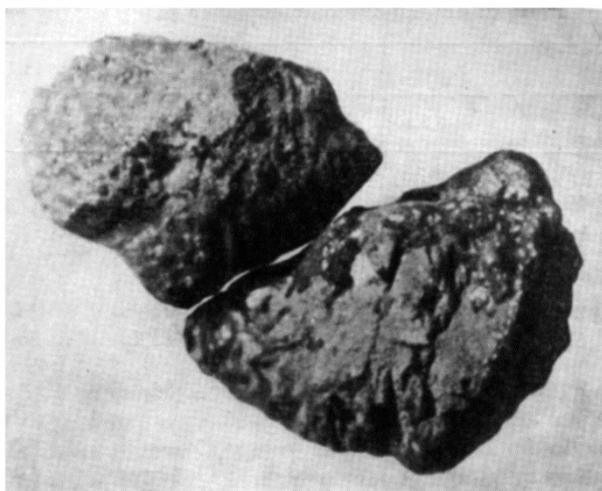
Пироксены в изученных пробах присутствуют в виде довольно мелких зерен желтовато-розового и красновато-розового цвета, неправильной формы. Нужно отметить, что в крупных фракциях монозерна пироксена практически отсутствуют. Резкое их увеличение отмечается во фракциях менее 0,127 мм и особенно менее 0,083 мм.

Монозерна плагиоклаза найдены в виде прозрачных или матовых пластинок с резкими или слегка оплавленными краями. Нередко зерна плагиоклаза обнаруживают эффект двойникования. Подобно монозернам пироксена, количество монозерен плагиоклаза

увеличивается в мелких фракциях. Во фракциях крупнее 0,127 мм плагиоклаз встречается, как правило, в виде описанных выше агрегатов.

Вторичные частицы являются генетически важной составляющей лунного реголита. Очевидно, их исследование поможет пролить свет на природу экзогенных процессов, протекающих на поверхности Луны, и на возможные пути формирования реголита.

Одним из основных компонентов лунного грунта являются брекчии (рис. 4). Брекчии представляют собой литифицированные породы, образовавшиеся в результате уплотнения мелкораздробленного материала реголита. Они имеют серый или темно-серый цвет и часто содержат светлые включения плагиоклаза. В большинстве своем брекчии характеризуются сглаженной окатанной формой, хотя встречаются частицы с резко угловатыми очертаниями. Мягкая форма присуща, как правило, тем частицам брекчий, которые отличаются более рыхлым сложением и слабым уплотнением. Такие частицы легко подвергаются разрушению при довольно незначительных механических воздействиях. Изучение брекчий показало, что они представляют собой конгломерат минеральных зерен и обломков пород различного размера. Значительная часть входящих в состав брекчий зерен оплавлена.



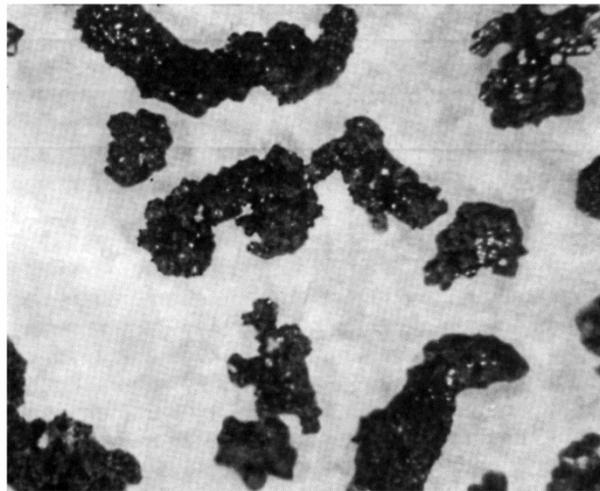
Р и с. 4. Частицы брекчий с характерными следами оплавления

Оплавлению подвергнуто довольно большое количество самих брекчиевых частиц. Очень темные, стекловатые корочки покрывают обычно часть частицы, другая часть сохраняет при этом свежий облик. Поверхность брекчий, особенно крупных, часто бывает осложнена многочисленными кратерками, выстланными стеклянными корочками, придающими поверхности частицы ячеистый характер. Толщина этих корочек зависит от размера частицы и степени проявления процесса плавления.

Не менее интересной и важной составляющей реголита являются вторично консолидированные образования — спеки, очень темные, почти черные агрегаты сложной ветвистой формы, состоящие из спекшихся зерен лунного реголита (рис. 5). В большинстве

случаев спеки не имеют резких угловатых форм; периферические части таких дендритообразных агрегатов обычно сильно оплавлены и характеризуются округлыми очертаниями. Нередко наблюдается одностороннее оплавление спеков. Эти частицы обладают различной механической прочностью, что, по-видимому, связано с температурными условиями, в которых происходил процесс спекания, и с природой спекшихся частиц. Однако в целом можно отметить, что крупные спекшиеся частицы обычно более прочные, чем мелкие. В отличие от брекчий морфология этих частиц указывает на близкое к автохтонному их образование непосредственно на поверхности.

Вероятно, сложная форма спеков влияет на механические свойства лунного грунта и, в частности, в какой-то степени обуславливает его низкую плотность и значительную уплотняемость при вибрации.



Р и с. 5. Спекшиеся частицы сложной неправильной формы

Характерным вторичным образованием реголита является вторичное стекло. Выделяется несколько форм стекла, характеризующих степень интенсивности процесса проплавления: 1) стеклянные пленки, покрывающие частицы и выстилающие отрицательные микроформы на их поверхности, 2) обломки стекол, представляющие собой фрагменты нацело переплавленных пород, 3) разнообразные сферические образования.

Ряд частиц покрыт с одной стороны тонкой, толщиной в несколько микрон или десятков микрон, поверхностной пленкой стеклянной глазури. Цвет этой пленки зависит от состава частиц, подвергшихся такому оплавлению — для брекчий обычны темно-бурые и черные тона, для спеков — черные, габброидные породы имеют пленки бурого, желтоватого и зеленоватого цвета. Такое локальное оглазирование частиц при сохранении свежего облика остальной части зерна возможно лишь при условии очень энергичного, но кратковременного одностороннего прогрева его.

Обычны частицы проплавленные, ошлакованные на значительную толщину, имеющие темную окраску и содержащие в заметных количествах поры и пустоты.

Нацело переплавленные частицы, представляющие собой обломки стекол различной формы, часто с раковистым изломом, характеризуются широким спектром окраски, что отражает состав расплавленных зерен. Среди стекол нередко пузыристые разности. В этом отношении интересен один тип буроватых крупно-пузырчатых, насквозь проплавленных стекол, которые могли образоваться при дроблении сравнительно больших масс проплавленной породы и внешне напоминают земные стекла вулканического происхождения.

Крайним типом стеклянных частиц являются многочисленные сферические образования различного цвета и формы. Встречаются как частицы с гладкой поверхностью, обладающие сильным стеклянным блеском, так и частицы с приплавленными к ним с поверхности мелкими зернами грунта. Изредка они содержат пузырьки, размер которых может составлять до половины диаметра шарика.

Вероятно, именно стеклянные и остеклованные частицы с гладкой поверхностью на темной основе, присутствующие в грунте в значительном количестве, ответственны за обнаруженный зеркалящий эффект образца.

Среди прочих типов частиц в небольшом количестве встречаются кусочки металлического железа, наблюдавшиеся как в виде неправильных осколков, так и в форме шариков. Нередко кусочки металла включены в брекчии.

Вероятно, этим железным частицам можно приписать метеоритное происхождение.

Очевидно, присутствие в частицах лунного грунта металлического железа обуславливает их магнитность. Наиболее сильной магнитностью обладают брекчии, спеки и ошлакованные частицы, энергично прилипающие к намагниченной стальной игле. Магнитностью обладают также многие стеклянные сферические образования и осколки стекла (чаще всего темноокрашенные), некоторые агрегаты плагиоклаза, некоторые зерна оливина. Обломки кристаллических пород немагнитны.

Весьма интересен характер распределения основных типов частиц разного размера по зонам колонки. Полученные для фракций размером более 0,127 мм данные представлены в табл. 1. Здесь в одной графе объединены мономинеральные зерна и кусочки стекол, так как морфологически эти частицы весьма сходны между собой. Во фракции +0,127–0,200 мм не подсчитано количество обломков мелкокристаллических базальтов ввиду ненадежности идентификации их в большой массе частиц.

**Распространенность типов частиц в крупных фракциях
по зонам колонки (в %)**

Тип частиц	<i>A + B</i>			<i>B + Г</i>		
	+0,9 мм	+0,45– 0,9 мм	+0,127– 0,200 мм	+0,9 мм	+0,45– 0,9 мм	+0,127– 0,200 мм
Габбро	13	14	10	18	12,5	13
Базальт	8	7,5	—	9,5	7	—
Анортит поликристаллический	0	2	0,5	1	3,5	1,5
Брекчии	50	35	20	39	32	21
Спеки и ошлакован- ные частицы	20,5	34	55,5	26	34	41,5
Стекла и мономине- ральные зерна	5	2,5	13	2,5	5,5	21
Шарики	0	1	1	1	1,5	1
Прочее	3	3	—	2,5	3	—

Анализ таблицы показывает, что в составе реголита резко преобладают вторичные частицы, обязанные своим происхождением экзогенным воздействиям. В крупных фракциях весьма значительно содержание брекчий, в то время как с уменьшением размера частиц несколько возрастает относительное содержание спеков и ошлакованных частиц. Следует отметить также снижение содержания спекшихся агрегатов сложной формы от поверхности в глубину на фоне общего числа шлаков и спеков (объединенных в таблице в одну графу).

Количество стекла плавно возрастает с уменьшением размера частиц и в самых мелких фракциях (4 мкм и менее) составляет их основную часть (табл. 2).

Таблица 2.

**Содержание стекла в мелких фракциях реголита
(в % от общего числа частиц)**

Зона	Размер фракции, мкм			
	80–70	50–40	20–10	4–2
<i>A</i>	24	27	63	88
<i>B</i>	17	26	51	94
<i>B</i>	32	29	52	92
<i>Г</i>	14	29	43	92

При определении среднего веса частиц крупных фракций по глубине колонки (табл. 3) наблюдается четкое увеличение среднего веса частицы с глубиной не только для фракции +

0,9 мм (что можно было бы связать с увеличением размера наиболее крупных частиц в глубинных зонах), но и для фракции +0,45–0,9 мм. Мы связываем это с уменьшением содержания по глубине частиц спеков неправильной формы. Для фракции +0,9 мм хорошо заметна тенденция к группировке двух глубинных и двух поверхностных проб, что коррелирует с гранулометрическими данными.

Следует особо подчеркнуть, что поверхность многих частиц различных типов несет следы интенсивной экзогенной эрозии. Здесь можно выделить мелкие кратерки со следами расплавления вещества при ударе, а также сколы неправильной формы, особенно хорошо заметные на частицах стекла и шариках. Плотность таких поверхностных дефектов сильно различна для разных частиц и для разных поверхностей одной частицы.

Таблица 3.

Средний вес частиц (в мг) по зонам колонки и классам крупности

Класс крупности	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Г</i>
+0,9 мм	2,00	1,87	3,12	3,22
–0,9+0,45 мм	0,274	0,294	0,302	0,344

Интересно отметить, что в ряде случаев на поверхности стеклянных частиц — на шариках, осколках стекол неправильной формы и ошлакованных зернах — наблюдаются тонкие металлические пленки. Характер таких пленок может быть различен: для шариков и стекол это в общем равномерный полупрозрачный слой, на шлаках пленка несколько большей толщины и расположена неравномерными мазками.

В результате общего морфологического изучения образца реголита из Моря Изобилия можно сделать некоторые генетические выводы.

Формирование лунного реголита происходит под влиянием двух основных факторов — измельчения коренных магматических пород в процессе энергичной метеоритной бомбардировки лунной поверхности (образование группы первичных частиц) и агломерации образовавшихся при дроблении мелких фрагментов пород в более крупные вторичные частицы. Последний процесс сопровождается мощными, но кратковременными термическими воздействиями, вызывающими спекание и оплавление частиц реголита. В целом реголит представляет собой совокупность продуктов как экзогенного, так и эндогенного происхождения.

Активная метеоритная бомбардировка лунной поверхности на сверхзвуковых скоростях приводит к достаточно эффективному перемешиванию слоя реголита. Об этом свидетельствует, в частности, отсутствие строго выраженной закономерности в изменении содержания частиц по зонам колонки. Однако в целом можно отметить резкое преобладание

в составе реголита частиц вторичного происхождения и повышенное содержание последних в верхней части колонки, что свидетельствует об интенсивности воздействия экзогенных факторов.

На энергичное проявление экзогенных процессов указывают также односторонняя оплавленность частиц, микрократеры на их поверхности, большое разнообразие частиц, характер спекания их в агрегаты.

Одностороннее оплавление поверхности частиц и спекание многих зерен свидетельствуют о мощном, но очень кратковременном нагреве частиц, не наблюдаемом в процессах вулканических эксплозий, но типичном для сверхскоростных ударов. Многообразие сферических силикатных частиц (шариков) также говорит об их происхождении скорее за счет точечного расплавления отдельных минеральных зерен и участков пород, чем за счет разбрызгивания проплавленной в целом породы.

К следам возможного вулканизма можно отнести не более процента хорошо проплавленных стекол, образовавшихся при застывании сравнительно больших масс расплава, возникновение которого, однако, возможно и при ударе более крупных метеоритных тел.

Одновременное присутствие осколков первичных магматических пород, образовавшихся в разных условиях кристаллизации и различающихся по составу, указывает на заметную примесь привнесенного издалека материала, осредняющего состав реголита на больших площадях. Транспортировка частиц лунного реголита также, очевидно, связана с ударными взрывами, первоисточником которых является метеоритный поток.

Общий характер образца реголита Моря Изобилия близок доставленным ранее образцам из Моря Спокойствия и Океана Бурь.