

М. Д. НУСИНОВ, К. П. ФЛОРЕНСКИЙ, А. В. КУЗНЕЦОВ, А. И. КОСОЛАПОВ,  
Ю. Б. ЧЕРНЯК, Л. И. ИВАНОВ, В. А. ЯНУШЕВИЧ, Л. В. ОБУХОВ  
В. В. ВЫСОЧКИН

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗМОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ СТЕКЛЯННЫХ ЧАСТИЦ РЕГОЛИТА ЛУНЫ

(Представлено академиком Г. И. Петровым 7 VII 1971)

Тонкая (пылевая) фракция вещества лунного реголита (частицы размером от единиц до сотен микронов), доставленного на Землю космическими аппаратами «Луна-16», «Аполлон-11 и -12» (<sup>1</sup>, <sup>2</sup>), содержит большое количество стеклянных сферических оплавленных частиц различных форм (шарики, колбочки, гантели и др.), состава и цвета. Выдвинуты гипотезы о механизмах образования этих частиц при протекании как экзогенных, так и эндогенных процессов, рассматриваемых различными авторами как антагонистические (<sup>3-15</sup>).

Ряд авторов рассматривают в качестве основной причины соударение с поверхностью Луны метеоритных частиц, испарение поверхностного вещества и последующую его конденсацию, а также разбрызгивание из жидкой фазы (Толанский, Зельдович, Райзер, Буэттнер и др.) (<sup>3-5</sup>). Эта же гипотеза выдвинута для объяснения «космических» шариков (<sup>6</sup>), образующихся при ударах метеоритов в земных условиях.

Следуя противоположной точке зрения, Миллс (<sup>11</sup>) сделал предположение о возможности образования стеклянных капелек и нитей в результате эндогенного процесса — прорыва газов через поверхностные слои Луны, которые, по его утверждению, имели в начальный период ее эволюции температуры, близкие к температурам плавления. На важность рассмотрения эндогенных процессов, как возможной причины образования стеклянных частиц лунного реголита, указывает также А. П. Виноградов (<sup>1</sup>).

Нами проведена работа, позволяющая сделать предварительный вывод о том, что метеоритный удар является главной причиной образования подобных частиц.

Рассмотрим различные процессы, происходящие при метеоритном ударе: испарение с последующей конденсацией и разбрызгивание расплавленного вещества лунного грунта. При механическом дроблении стеклянные частицы не образуются из-за низкой удельной энергии процесса; поэтому мы его в дальнейшем не будем рассматривать. Каждый из полезных процессов может приводить к образованию частиц с характерным размером  $r$ , пропорциональным в первом приближении размеру исходной частицы:  $R = kr$ . Используя для оценок результаты расчета кинетики конденсации Зельдовича и Райзера (<sup>3</sup>), легко получить, что  $k \simeq 10^2$  для конденсационного механизма. Описанные ниже эксперименты позволяют оценить величину  $k$  при разбрызгивании вследствие удара микрометеоритов,  $k \simeq 10 \div 50$ . Указанное линейное соотношение будет сохраняться по мере возрастания  $r$  до некоторого значения  $r_c$ , после чего  $r$  будет оставаться постоянным. Величина  $r_c$  является характерным размером устойчивости капель расплава, обусловленным равновесием между силами поверхностного натяжения и инерциальными силами.

Если теперь взять за основу современное распределение метеорного вещества по размерам (<sup>14</sup>), с максимумом, соответствующим  $0,5 \mu$  (масса  $\sim 10^{-12}$  г), то в силу соотношения  $R = kr$  каждый из механизмов при-

водит к аналогичному (с точностью до нормировки) одномодальному распределению, причем основная часть частиц будет лежать в следующих диапазонах:  $r < 3 \cdot 10^{-2} \mu$  при конденсационном механизме, и  $0,1 \leq r \leq 1 \mu$  — при разбрызгивании. Однако в случае разбрызгивания при метеорном ударе, кроме меньшего характерного размера  $r_1$ , должен наблюдаться также другой характерный размер  $r_2 \gg r_1$ , определяемый условием устойчивости капель. Следовательно, возможно наличие двухмодального распределения стеклянных сферических частиц в лунном веществе, обусловленное целиком метеоритным соударением с поверхностью Луны. Кроме того, капли могут образовываться также при различных эндогенных процессах (вулканические извержения, прорывы накопившихся газов через слои реголита, бурное кипение с каплеобразованием при разбрызгивании и т. п.), но характерный размер капель, как показало наше исследование, будет сохраняться порядка  $r_2$ . В работах (8, 16, 19) приведены данные о распределении частиц по размерам, подтверждающие сделанные предположения. Образованием частиц за счет вторичных метеоров ( $v < 3$  км/сек) можно пренебречь (17, 18).

Нами экспериментально исследовалась возможность получения стеклянных частиц, сходных с частицами реголита Луны. Ограниченное моделирование процесса метеоритного соударения осуществлялось воздействием лазерного импульса на твердое вещество и порошок в вакууме (базальт, диопсид).

При метеоритном ударе как испарение — конденсация, так и плавление, сопровождающиеся разбрызгиванием, происходят в волне разгрузки, бегущей по сжатому ударной волной веществу. Изэнтропичность волны разгрузки позволяет сформулировать простой критерий моделирования указанных процессов при ударе метеорита с помощью лазерного импульса. Действительно, зная уравнения состояния метеорита и мишени, легко подсчитать по известным соотношениям начальную энтропию (12). Поскольку плотность вещества под действием короткого лазерного импульса практически не меняется, а волна сжатия отсутствует, то энтропия полностью определяет плотность энергии в момент после удара, в который произошла разгрузка до исходной плотности. Кроме энтропии для моделирования важна также плотность энергии, определяемая пятном сфокусированного излучения.

Соответствующие расчеты показали, что при моделировании необходимо воссоздавать плотность энергии в  $4 \div 6$  раз меньшую, чем начальная в зоне удара (энергия в импульсе равна энергии частицы). По-видимому, такое моделирование соответствует воссозданию условий, складывающихся в области удара через некоторое время после его начала, но оно не отражает динамики распространения ударной волны.

Было использовано излучение импульсного квантового генератора на рубине с длиной волны  $\lambda \simeq 0,6943 \mu$  в режимах: 1) с модулированной добротностью ( $E \simeq 0,1$  дж,  $\tau \simeq 10^{-7}$  сек,  $d_{\text{пятна}} \simeq 0,2$  мм), что моделирует удар метеорита с массой  $\sim 0,5 \cdot 10^{-6}$  г с  $v \simeq 20$  км/сек; 2) свободной генерации ( $E \simeq 10$  дж,  $\tau \simeq 10^{-3}$  сек\*,  $d_{\text{пятна}} \simeq 0,8$  мм), что моделирует удар метеорита массой  $\sim 0,5 \cdot 10^{-4}$  г с  $v \simeq 20$  км/сек в вакууме  $\sim 10^{-4} \div 10^{-5}$  торр. Мишень и подложка помещались внутри вакуумной камеры, а луч лазера вводился внутрь через оптический люк. В результате экспериментов были получены микрократеры в твердой породе — диопсиде (рис. 1), подобные микрократерам, обнаруженным на лунных образцах (13, 17, 18), и, кроме того, большое количество стеклянных сферических капель на подложках, расположенных на расстоянии  $\sim 10$  см над мишенью, и в плоскости мишени. Микрократер имеет дно правильной формы, почти круглое, склоны пологие, остеклованные; на склонах, валу и за валом много стеклянных капель различной формы.

\* Фактическое время взаимодействия излучения с веществом из-за «пичкового» режима работы лазера будет значительно меньшим ( $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$  сек).



Рис. 3. Фото стеклянных частиц, полученных при продувке расплава базальта гелием в вакууме

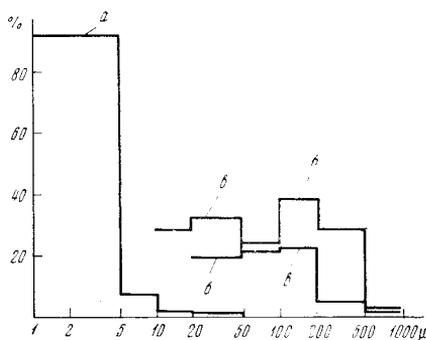


Рис. 4. Типовые гистограммы распределения по размерам стеклянных частиц, полученных при лазерном испарении (а) и продувках гелием расплава базальта с толщиной слоя 10 мм (б) и 1 мм (в)

При продувке образовывался также слой пыли с характерным размером  $r \ll 1 \mu$ . Расход гелия не влияет на размер частиц, который увеличивается с возрастанием высоты слоя расплавленного базальта в лодочке ( $h = 1 \text{ мм}$  и  $h = 10 \text{ мм}$ ).

Распределение полученных при продувке частиц по размерам приведены на рис. 4.

Предварительные оценки показывают, что процесс продувки газа через расплав может моделировать разбрызгивание его частиц как при метеоритных соударениях, так и при различных эндогенных процессах. Однако для установления критериев моделирования необходимы дополнительные исследования.

В заключение отметим: 1) стеклянные сферические частицы образуются при метеоритном ударе путем разбрызгивания жидких частиц и их последующего застывания; 2) конденсационный механизм не дает заметного числа шариков в интересующей нас области размеров частиц и может быть исключен из рассмотрения; 3) микрометеориты дают острый пик в области размеров частиц  $0,1 \geq r \geq 1 \mu$ ; 4) метеориты, а также эндогенные процессы дают при разбрызгивании частицы с размерами  $100 \div 500 \mu$ .

Выражаем благодарность за полезные дискуссии и ценные советы Г. А. Лейкину, А. В. Иванову и Л. В. Леонтьеву.

Поступило  
23 VI 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. П. Виноградов, Геохимия, № 3 (1971). <sup>2</sup> Science, 165, № 3899 (1969); 167, № 3923 (1970). <sup>3</sup> Я. Б. Зельдович, Ю. И. Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, «Наука», 1966. <sup>4</sup> K. J. K. Buettner, Margaret Le Mone, Die Naturwissenschaften, 2, 1970. <sup>5</sup> S. Tolansky, Endeavour, 29, № 108, 135 (1970). <sup>6</sup> К. П. Флоренский, А. В. Иванов, Метеоритика, в. 30 (1970). <sup>7</sup> T. Gold, Science, 165, № 3900 (1969). <sup>8</sup> D. Muller, G. Hinch, Nature, 228, № 5268, 254 (1970). <sup>9</sup> Fox, Science, 167, 767 (1970). <sup>10</sup> M. Brander, K. Keil, L. Nelson, Science, 170, № 3956 (1970). <sup>11</sup> A. Mills, Nature, 224, № 5229 (1969). <sup>12</sup> К. П. Станюкович, Неуставившиеся движения сплошной среды, М., 1954. <sup>13</sup> E. Chao, J. Voreman et al., J. Geophys. Res., 75, № 35 (1970). <sup>14</sup> J. McDonnell, Report Submitted to the XIII Plenary Meeting of COSPAR, Leningrad, May, 1970. <sup>15</sup> И. А. Юдин, Метеоритика, в. 29 (1969). <sup>16</sup> Т. Е. Швидковская, Г. А. Лейкин, В. А. Краснополюский, Report Submitted to the XIII Plenary Meeting of COSPAR, Leningrad, May, 1970. <sup>17</sup> F. Herz, D. Harting, D. Gault, Earth and Planetary Science Letters, 10 (1971). <sup>18</sup> G. Neukum, A. Mehl et al., Earth and Planetary Science Letters, 8, (1970). <sup>19</sup> P. Cloud, S. Margolis et al., Science, 167, № 3918 (1970).