

УДК 523.34-3/8

МИКРОМЕТЕОРОИДЫ: ПОТОК НА ЛУНУ И ИСТОЧНИК ПОСТУПЛЕНИЯ ЛЕТУЧИХ

© 2020 г. Д. Д. Бадюков*

Институт геохимии и аналитической химии РАН (ГЕОХИ), Москва, Россия

**e-mail: badyukov@geokhi.ru*

Поступила в редакцию 06.11.2019 г.

После доработки 26.12.2019 г.

Принята к публикации 02.03.2020 г.

Одним из возможных источников воды и других летучих, образующих отложения льда в затененных полярных областях Луны, является космическое вещество, поступающее как в виде комет и астероидов, так и космической пыли. В связи с этим нами был оценен вклад в поступление летучих компонентов в результате микрометеороидной бомбардировки. На основании оценок современного потока микрометеороидов на Землю и Луну был определен возможный диапазон скорости аккреции космической пыли на Луну, составляющий 6.19×10^{-13} – 14.74×10^{-13} г м⁻² с⁻¹. При среднем значении этой скорости масса выпадающих микрометеороидов равна общей массе космического вещества, поставляемого на Луну телами с размерами от 3-х метров до 4-х километров. Принимая во внимание, что основная масса (~90%) микрометеороидов представлена веществом, близким по составу классам CM или CI углистых хондритов, оценены количества выделяющейся воды и других компонентов и летучих элементов. Полученные значения близки к количеству воды, привносимому кометами.

Ключевые слова: Луна, микрометеороиды, летучие, поток микрометеороидов, дегазация, состав микрометеороидов

DOI: 10.31857/S0320930X20040027

ВВЕДЕНИЕ

За последние 20 лет был получен ряд данных, неопровержимо свидетельствующих об обогащении некоторых районов поверхности Луны летучими компонентами, в основном H₂O и OH группой. Такие данные были получены в ходе радарных исследований (Stacy и др., 1997), измерений потока эпитептермальных нейтронов (Feldman и др., 2001) и спектроскопическими наблюдениями (Pieters и др., 2009; Clark, 2009; Hayne и др., 2015; Li и др., 2017). Присутствие воды и других летучих было установлено в искусственно созданном ударно-генерированном облаке выбросов из затененной области полярного кратера Кабео (Colaprete и др., 2010; Gladstone и др., 2010). В качестве источников воды на поверхности Луны полагаются реакции солнечных протонов и водорода с кислородом в силикатах и окислах поверхностных пород (Crider, Vondrak, 2002; Pieters и др., 2009; Zhu и др., 2019), эндогенные процессы (Saal и др., 2008; Needham, Kring, 2017) и космические тела (Шевченко, 1999; Ong и др., 2010; Svetsov, Shvalov, 2015). Обзор проблем присутствия и источников воды на Луне дан Базилевским и др. (2012).

Бомбардировка космическим веществом Луны формирует морфологию и геологическое строение внешней оболочки и обуславливает

контаминацию лунных пород привнесенным материалом. Состав падающих тел варьирует в широких пределах от чисто “каменных” — силикаты, металл, окислы и т.д. до кометных — смеси льдов летучих с тугоплавкими соединениями (Fulle и др., 2019). Присутствие этого космогенного вещества в лунных импактных брекчиях и реголите обуславливает в них высокое содержание сидерофильных элементов (Re, Os, Ir, Pt, Ni, Au и др.) по сравнению с пристинными породами — анортозитами и базальтами (Morgan и др., 2001). Так, содержание Ir в пристинных породах составляет <0.1 нг/г, тогда как в зрелом реголите, как правило, оно находится в диапазоне ~4–~45 нг/г (т.н. Lunar Sourcebook, 1991). Учитывая, что содержание Ir в углистых хондритах CI составляет 460 нг/г, можно оценить содержание космического вещества для реголита в пересчете на массовую долю CI примерно в 1–10%. Однако помимо трудно и умеренно летучих элементов, с этим космическим веществом поступают и летучие компоненты. Их высвобождение происходит в результате высоких температур, возникающих при высокоскоростном соударении. Мигрируя по поверхности Луны, летучие элементы и соединения, например H₂O, попадая в области с низкими температурами, могут конденсироваться в твердые фазы в холодных ловушках с температурой ниже 110 К, на-

пример, в участках постоянной тени полярных областей (Watson и др., 1961; Crider, Vondrak, 2002).

Среди источников поставщиков космогенных летучих на Луну астероиды и кометы рассматриваются как основные (Ong и др., 2010; Базилевский и др., 2012). Однако вышеупомянутое содержание космогенного вещества в верхних слоях реголита связано также и с выпадением космической пыли, содержащей летучие компоненты в достаточно значительных количествах. Космическая пыль рассматривается в качестве источника предполагаемых полярных льдов на Меркурии (Moses и др., 1999). Измерения, выполненные с использованием Neutral Mass Spectrometer на борту космического аппарата (КА) Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, показали периодические увеличения концентрации H_2O в лунной экзосфере, совпадающие по времени с пересечением Лунной метеорных потоков (Benna и др., 2019). Авторы трактуют эти всплески как результат дегазации поверхностного слоя реголита, обогащенного водой в результате бомбардировки относительно крупными ударниками массами от 0.15 г до 1 т, а поступление воды с более мелкими частицами предполагается ничтожным. Однако установлено, что масса, доставляемая на Землю такими крупными телами, составляет менее 1% от массы выпадающей космической пыли (см., например, Taylor и др., 2012). В связи с этим представляется важным сравнить поступление массы выпадающих микрометеороидов и более крупных тел. Учитывая вышеизложенное, в данной работе нами была проведена оценка скоростей аккреции микрометеороидов и накопления космогенных летучих компонентов, которые поступают на Луну в результате такой бомбардировки.

ПОТОК МИКРОМЕТЕОРОИДОВ НА ЗЕМЛЮ И ЛУНУ

Оценка скорости аккреции космической пыли на Луну может быть выполнена с помощью двух подходов. Первый подход является косвенным и заключается в определении потока частиц на поверхность Земли и пересчете этой величины на поверхность Луны с учетом ее меньшей гравитирующей массы. Второй подход является более прямым и основан на: а) подсчете микрократеров на поверхности лунных пород с известным временем экспозиции и пересчет размеров микрократеров на массы создавших их ударников и б) определении скорости бомбардировки космических аппаратов, находящихся вблизи Луны, с использованием как активных датчиков, так и пассивных регистраторов — например, иллюминаторов КА Apollo (Grun и др., 1985). Рассмотрим последовательно эти два подхода.

Космическая пыль поступает на Землю в виде частиц размером от ~1 мкм до 1–2 мм и, соответственно, весом примерно от 10^{-12} до 10^{-4} кг

(Genge и др., 2008). Оценки потока космической пыли на Землю колеблются в широких пределах, различаясь в зависимости от используемых методов (измерения в космическом пространстве, радиарные измерения, определение содержания космогенных элементов во льдах и океанических осадках) примерно в 50 раз (Plane, 2012). Прямые и достаточно надежные измерения потока космической пыли вблизи Земли были получены в результате спутникового эксперимента LDEF (Love, Brownlee, 1993). Для этого определялось число микрократеров, приходящихся на единицу площади, и их размеры на пластинах, экспонированных на околоземном спутнике в течение 5.77 лет. Размеры кратеров пересчитывались на массы ударников с использованием полуэмпирического уравнения, что дало значение потока равное $2.50 \times 10^{-12} \pm 1.25 \times 10^{-12}$ г на m^2 за s^{-1} . Дифференцирование кумулятивной кривой потока масс как

$$-mdN/dl_{gm}$$

позволяет получить кривую распределения потока по массам (Fig. 4, Love, Brownlee, 1993), которая дает несколько отличающееся значение от вышеприведенного 1.96×10^{-12} г m^{-2} s^{-1} . Проведенная калибровка зависимости размер кратера — диаметр ударника, основанная на данных Love и Brownlee (1993) с использованием численного моделирования процессов кратерообразования (Cremonese и др., 2012), показала, что скорость аккреции составляет 6.34×10^{-13} г m^{-2} s^{-1} для частиц из пояса астероидов, что в ~4 раза меньше предыдущей оценки (Love, Brownlee, 1993). Следует отметить, что в данной работе в расчетах использовались ударники с пористостью 25% для астероидных частиц. Однако непереплавленные микрометеориты, как крупно, так и мелкозернистые, обладают значительно более низкой пористостью, колеблющейся от 0 до 12% (Kohout и др., 2014). Последнее значение характерно для гидроксилсодержащих микрометеоритов и может быть связано с частичным разложением водосодержащих силикатов при нагреве в ходе пролета через атмосферу и образованием пор и трещин усыхания (Suttle и др., 2019). Нами предполагается, что используемая высокая пористость частиц в расчетах (Cremonese и др., 2012) может приводить к заниженным величинам масс ударников и, соответственно, к более низким значениям потока.

Космическое вещество по сравнению с земными породами резко обогащено элементами платиновой группы и отличным от земного отношения $^{187}Os/^{186}Os$, что дает возможность определять содержание тонкодисперсной космогенной компоненты в осадочных породах. По данным для глубоководных океанических осадков, накапливавшихся в течение последних 80 млн лет, было получено, что скорость аккреции за это время составила $1.82 \times 10^{-12} \pm 9.08 \times 10^{-13}$ г m^{-2} s^{-1} (Peucker-Ehrenbrink, 1996; Peucker-Ehrenbrink, Ravizza,

Таблица 1. Полученные значения потоков микрометеороидов (10^{-13} г м $^{-2}$ с $^{-1}$) на Землю и Луну

Использованные данные	Земля	Луна
Love, Brownlee, 1993	24.8 ± 12.4	16.8 ± 8.41
Peucker-Ehrenbrink, 1996	19.3 ± 9.64	13.1 ± 6.31
Cremonese и др., 2012	6.34 ± 0.09	4.29 ± 0.06
Taylor и др., 1998*	9.76 ± 1.84	6.60 ± 1.24
Yada и др., 2004*	27.4 ± 16.1	18.6 ± 10.9
Grun и др., 1985	—	5.65 ± 2.82
Адаптированная кривая (см. текст)	—	8.21 ± 4.11

Примечание. * — учет потерь на испарение проводился по данным Carrillo-Sánchez и др. (2016).

2000). Это значение прекрасно согласуется с результатами эксперимента LDEF (Love, Brownlee, 1993).

Для определения потока космической пыли также может быть использована скорость накопления переплавленных микрометеоритов или, что то же самое, космических сферул. При пролете через атмосферу часть микрометеороидов преобразуется в космические сферулы вследствие сильного нагрева, приводящего к дегазации, плавлению и частичному или полному испарению вещества. Очевидно, что в результате испарения масса поступающих космических сферул меньше исходной массы микрометеороидов. Численное моделирование показывает, что такая потеря массы составляет около 90% (Carrillo-Sánchez и др., 2016), что хорошо согласуется с экспериментальными данными по испарению частиц углистого СМ-хондрита (Gómez Martín и др., 2017). Скорость аккреции космических сферул по разным измерениям варьирует от $(9.95 \pm 1.87) \times 10^{-14}$ г м $^{-2}$ с $^{-1}$ (Taylor и др., 1998) до $(2.80 \pm 1.64) \times 10^{-13}$ г м $^{-2}$ с $^{-1}$ (Yada и др., 2004). Учет потери исходной массы микрометеороидов дает скорости их аккреции $(9.76 \pm 1.84) \times 10^{-13}$ и $(2.74 \pm 1.61) \times 10^{-12}$ г м $^{-2}$ с $^{-1}$, что соответствует вышеприведенным оценкам. Для безатмосферных тел скорость накопления космической пыли в реголите равна ее потоку.

Показано, что отношение потока космических тел на Луну F_M к их потоку на Землю F_E лежит в диапазоне 0.055–0.045 (Stuart, Binzel, 2004). При пересчете на единицу площади $F_M = (0.61–0.75)F_E$. Далее, принимая во внимание меньший гравитационный фокусирующий фактор для Луны по сравнению с Землей, поток на Луну F_M выражается как (Cremonese и др., 2013)

$$F_M = F_E v_M^2 / v_E^2,$$

где F_E — поток космических тел на Землю, а v_M и v_E — их средние скорости выпадения на Луну и Землю, равные соответственно 17.2 и 19.1 км/с (Werner, Ivanov, 2015). Тогда, согласно вышеприведенному выражению, отношение F_M/F_E составляет 0.81. Таким образом, оценки отношения

F_M/F_E находятся в диапазоне 0.6–0.8 при среднем значении 0.7, которое мы и будем использовать в дальнейшем. При этом полагается, что эффект экранирования Землей выпадающей пыли пренебрежимо мал (Cremonese и др., 2013), а сам поток изотропен (т.е. не зависит от широты).

Пересчитывая на Луну вышеприведенные оценки скоростей аккреции космической пыли на Землю, можно получить, что диапазон значений F_M простирается (табл. 1) от 1.86×10^{-12} (максимальная оценка с использованием данных работы Yada и др., 2004) до 4.29×10^{-13} г м $^{-2}$ с $^{-1}$ (минимальная оценка с использованием данных работы Cremonese и др., (2012)), различаясь таким образом примерно в 4 раза.

Более прямой подход заключается в использовании кумулятивных кривых потока (рис. 1), полученных в ходе различных экспериментов с датчиками — регистраторами микрометеороидной бомбардировки на КА и подсчета микрометеороидных повреждений на поверхностях КА серии Apollo (Grun и др., 1985).

Также для определения потока использовалось количество микрократеров, образованных на поверхностях обломков лунных пород, и их распределение по размерам (Fechtig и др., 1974). Возраст экспозиции поверхности обломков в данном случае определялся трековым методом. Сравнение потоков по данным КА и по кратерной статистике показало меньшие значения для последнего случая. Это может быть объяснено как запыленностью поверхности обломков, так и повышенным возрастом экспозиции вследствие интенсивных солнечных вспышек. Использование кумулятивной кривой потока частиц, полученной для КА (Grun и др., 1985) дает значение потока частиц 5.65×10^{-13} г м $^{-2}$ с $^{-1}$. Однако приведенная кумулятивная кривая (Grun и др., 1985) имеет “седло” в диапазоне масс частиц от 10^{-6} до 10^{-12} г, тогда как кумулятивные кривые распределения масс частиц в окрестностях Земли (Love, Brownlee, 1993) и распределение диаметров кратеров по поверхностям обломков лунных пород (Neukum, 1973) и, соответственно, массы микрометеороидов, характеризуются гладкой выпуклой

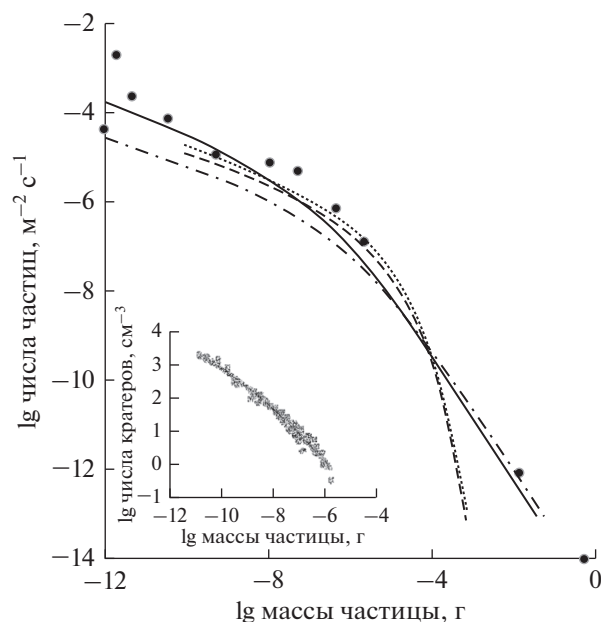


Рис. 1. Кумулятивные кривые для различных оценок скоростей аккреции микрометеороидов на Землю и Луну. Точечная линия — Земля (Love, Brownlee, 1998); штриховая линия — Луна с использованием кривой Love, Brownlee (1998); штрих-пунктирная линия — Луна (Lunar Sourcebook, 1991); сплошная линия — кривая для данных, полученных с использованием микрократеров на лунных породах и КА (Grün и др., 1985). На врезке показана кумулятивная кривая для поверхностей лунных пород (Neukum, 1973).

кривой. Поэтому мы адаптировали эту форму кривой с учетом кривой скорости аккреции частиц, полученной в результате экспериментов на КА (рис. 1).

Распределения потока по логарифмам интервалов масс аккрецирующих частиц, полученных численным дифференцированием кумулятивных кривых (рис. 1), приведены на рис. 2. Они характеризуются хорошо выраженным максимумом в диапазоне 10^{-6} – 10^{-5} г, что соответствует размерам частиц примерно от 0.1 до 0.2 мм (рис. 2). Следует отметить, что скорость выпадения частиц с массами $<10^{-9}$ г или размером <10 мкм ничтожно мала и составляет 0.2% от общей выпадающей массы микрометеороидов. Резкое уменьшение потока также происходит для частиц массой >1 мг или >1 мм в диаметре.

Вышеприведенные оценки потоков космической пыли на Луну, полученные различными методами, различаются примерно в 4 раза. Сопоставляя их (рис. 3, табл. 1), можно выделить две группы — относительно высокие и низкие, рубежом между которыми служит значение потока $F_M = 10^{-12}$ г м $^{-2}$ с $^{-1}$. Соответственно этому, усредняя значения потоков в этих двух группах, мы принимаем, что реальный поток ММ на Луну будет лежать в

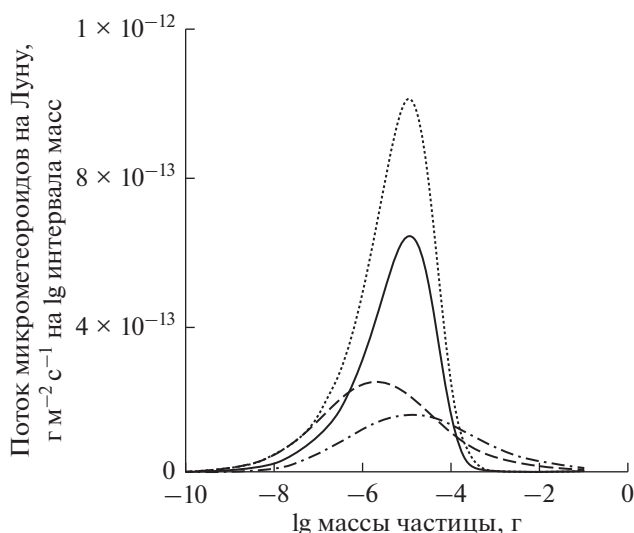


Рис. 2. Кривые распределения различных оценок микрометеоритных потоков на Луну в зависимости от массы частиц. Сплошная линия получена пересчетом данных Love, Brownlee (1998); штриховая линия — адаптированная кумулятивная кривая по Grün и др. (1985); штрих-пунктирная линия — по Lunar Sourcebook (1991); для сравнения показана кривая распределения для Земли (Love, Brownlee, 1998, точечная линия).

диапазоне 6.19×10^{-13} – 14.74×10^{-13} г м $^{-2}$ с $^{-1}$ со средним значением 9.86×10^{-13} г м $^{-2}$ с $^{-1}$.

СРАВНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ АККРЕЦИИ КРАТЕРООБРАЗУЮЩИХ ТЕЛ И МИКРОМЕТЕОРИТОВ

Представляется интересным сопоставить скорость притока космического материала на лунную поверхность, поставляемого крупными кратерообразующими телами и космической пылью. Поток тел метеороидного размера, т.е. тел размером не более первых десятков метров, как это было показано (Genge и др., 2008), составляет менее 1% от потока микрометеоритов, и, соответственно, его вклад в космогенную фракцию лунного грунта практически незаметен. С другой стороны, принято считать, что основная масса космогенного материала на Луну поступает с крупными телами и именно они являются ответственными за основную массу экзогенных летучих, накапливающихся в затененных участках кратеров на полярных областях (Базилевский и др., 2012; Ong и др., 2010). Используя данные по кумулятивному потоку крупных тел на Луну (Werner и др., 2002; Melosh, 1989), можно рассчитать дифференциальный поток кратерообразующих тел (рис. 4), из которого следует, что основная масса космогенного вещества приносится телами примерно 10 км диаметра, образующих кратеры диаметром 120 км. При расчетах принималась, что плотность тел равна 2.7 г/см 3 . Скорость аккреции более мелких тел

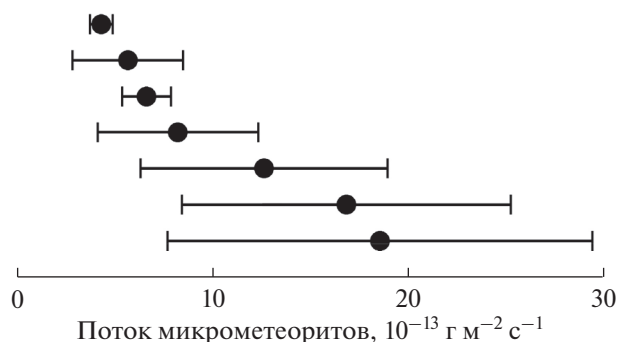


Рис. 3. Сравнение полученных оценок потоков микрометеоритов на Луну по данным табл. 1. Горизонтальные линии — приведенные в таблице ошибки.

резко падает от этого значения. Интегрируя кривую распределения крупных кратерообразующих тел (рис. 4), получим, что масса привносимого вещества телами в диапазоне диаметров от 3 м до 3.8 км, соответствует массе вещества, поступающего в виде микрометеороидов, при значении их потока $10^{-12} \text{ г м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Следовательно, при подсчете общего баланса поступающего космического вещества на Луну, равно как и на Землю, необходим учет микрометеороидного потока космогенного вещества.

КОМПОНЕНТЫ МИКРОМЕТЕОРОИДНОГО ПОТОКА

В настоящее время, насколько известно автору, в лунном грунте не найдено ни одного сохранившегося микрометеорита, что, очевидно, связано с отсутствием атмосферы и, соответственно высокими скоростями соударения частиц. Высокоскоростная бомбардировка реголита микрочастицами приводит к деструкции, дегазации, плавлению и испарению как их самих, так и вещества мишени. В результате такой бомбардировки в реголите накапливаются как стеклянные сферулы, образующиеся при разбрызгивании расплава ударника и мишени, так и агглютинаты. Последние состоят из гетерогенного стекла, фрагментов минералов и пород и, иногда, железных глобул. В отличие от Луны атмосферный щит Земли тормозит микрометеороиды, что приводит к образованию различных типов частиц внеземного вещества — непереплавленных и шлаковидных микрометеоритов и космических сферул (рис. 5). Первые два типа полностью или отчасти сохраняют структурную и химическую специфику исходного материала, что позволяет выделить две разности — тонкозернистую и грубозернистую. По своему составу тонкозернистые ММ (рис. 5а; 5б) близки к таким классам углистых хондритов как СМ, С1 и СR, хотя и отличаются от них в деталях. Помимо этого, в антарктических коллекциях присутствуют ультрауглистые микрометеориты, обогащенные органическим веще-

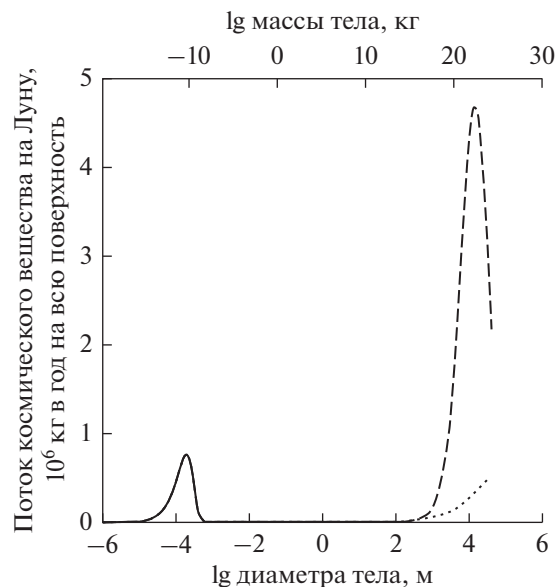


Рис. 4. Сопоставление скорости аккреции на Луну микрометеороидов (сплошная линия, рассчитанная по данным Love и Brownlee (1998)) и кратерообразующих тел (штриховая линия — по Werner и др. (2002)), точечная линия — по Melosh (1989).

ством, при этом общее содержание элементарного углерода в них составляет 22–58 мас. % (Dobrica и др., 2012). Тонкозернистые ММ преобладают в потоке микрометеороидов и относительно грубозернистых ММ, их содержание в несмещенной коллекции составляет 85% (Taylor и др., 2012). Поскольку по составу они близки к углистым хондритам, именно они содержат значительные количества летучих по сравнению с грубозернистыми разностями, состоящими из высокотемпературных фаз — оливина, пироксена, стекла и т.д. Было показано, что наиболее распространенные разности космических сферул, такие как с полосчатой и порфировой структурами (рис. 5в; 5г), имеют своими предшественниками тонкозернистые ММ (Бадюков и др., 2018). Анализ антарктической коллекции ММ, собранной в скважине станции Южный Полюс (Taylor и др., 2012), показал, что 90% всех ММ имеют предшественников, отвечающих по составу углистым хондритам. Учитывая достаточно широкий диапазон оценок потока ММ (табл. 1, рис. 3), в дальнейшем мы полагаем, что он нацело представлен веществом углистых хондритов (С1 и СМ).

Таким образом, исходя из этого, можно оценить в ММ содержание H_2O , CO_2 , органического вещества и других компонентов, в частности летучих второстепенных и рассеянных элементов (табл. 2). Содержание связанной воды в различных С1 и СМ хондритах колеблется от 6 до 20 мас. % в среднем составляя 10 мас. %. Распространенность карбонатного углерода колеблется между 0.1 и 0.6 мас. %, тогда как содержание углерода, входящего в органические соединения, достигает первых мас. %.

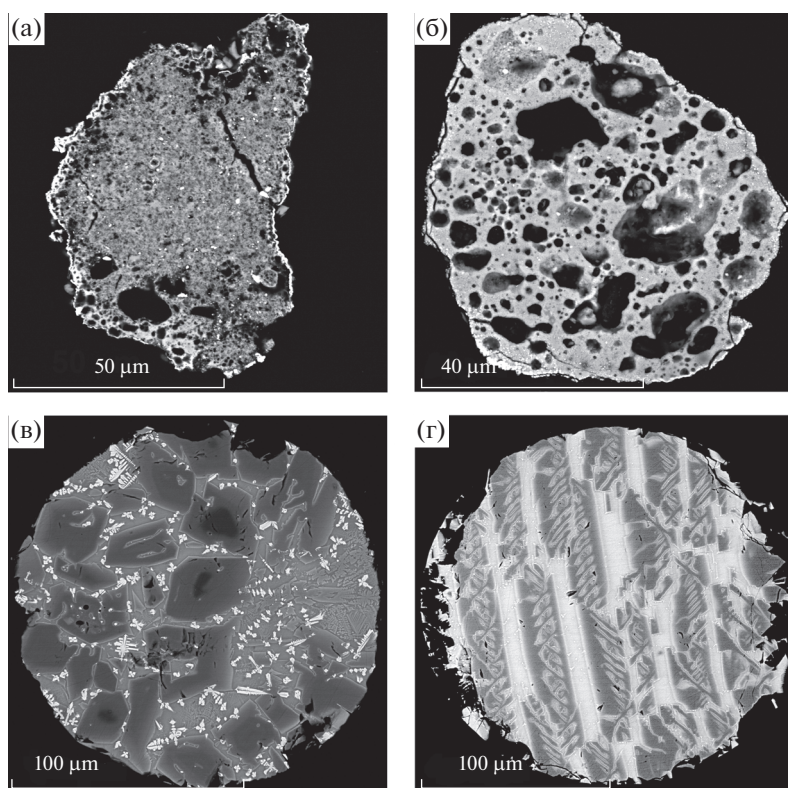


Рис. 5. Изображения в обратно-рассеянных электронах полированных срезов типичных представителей тонкозернистых непереплавленных (а) и шлаковидных (б) и переплавленных микрометеоритов с порфировой и балочной структурами из Новоземельской коллекции автора (а) — частица NZ3-1-42; (б) — частица NZ3-1-154; (в) — частица NZ4-6-2; (г) — частица NZ4-6-1. Матрица непереплавленных микрометеоритов состоит из тонкозернистого вещества, близкого к веществу матрицы углистых хондритов. Степень нагрева при пролете в атмосфере возрастает от частицы (а) к частице (г).

Учитывая, что скорость аккреции микрометеороидов сравнима со скоростью аккреции более крупных тел, при выяснении источников экзогенных летучих на Луне необходимо принимать во внимание и выпадение космической пыли.

ДЕГАЗАЦИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ

При высокоскоростном соударении частицы с мишенью возникает ударная волна, распространяющаяся как по веществу частицы, так и по веществу мишени. При сжатии в ударной волне вещество нагревается. После прохождения ударной волны (разгрузки) вещество остается нагретым до постударных температур, зависящих от пикового давления в ударной волне. На рис. 6 приведены рассчитанные пост-ударные температуры в зависимости от амплитуды ударной волны в плоско-волновом приближении с использованием ударных адиабат сплошного (Turbucz и др., 1991) серпентина и серпентина с пористостью 15% и CM2 хондрита (Murchison) с пористостью 17% (Anderson, Ahrens, 1998) и без пористости.

Расчет ударных адиабат (Turbucz и др., 1990) для пористого серпентина и сплошного CM хондрита проводился при коэффициенте Грюнайзе-на $\gamma = 1.0$. Принималось, что: а) изэнтропы разгруз-

ки совпадают с ударными адиабатами; б) теплоемкость серпентина соответствует теплоемкости железистого бертьерина (минерала подгруппы серпентина) и изменяется от 792 Дж/кг град при температуре 25°C до 1175 Дж/кг град при 500°C и выше (Bertoldi и др., 2005); в) теплоемкость CM хондритов соответствует теплоемкости бертьерина; г) дегидратация серпентина начинается при 300°C; д) энтальпия дегидратации равна 443.5 кДж/кг (Хитаров и др., 1967); содержание безводных минералов в метеорите Murchison составляет ~15 об. %, а матрица состоит из серпентина (Howard и др., 2011). Рассчитанные степени дегидратации пористого серпентина (рис. 7) достаточно хорошо соответствуют результатам ударно-волновых экспериментов (Turbucz и др., 1990), в которых дегидратация начинается в районе 7 ГПа (здесь и далее приводится давление в первой входящей волне) и достигает 100% при 17 ГПа, тогда как для сплошного серпентина в экспериментах начало дегидратации начинается при 11 ГПа и заканчивается при 31 ГПа, что меньше, чем результаты наших расчетов — 33 и 50 ГПа для начала и конца соответственно.

В ударно-волновых опытах по сохранению метеорита Murchison (Tomioka и др., 2007), проведенных также по схеме реверберации, полное разложение серпентина наблюдалось при давле-

Таблица 2. Содержание летучих компонентов и элементов в углистых CI и CM хондритах (Lodders, Fegley, 1998; Alexander и др., 2013) и рассчитанные выделившиеся их минимальные и максимальные количества в результате микрометеороидной бомбардировки Луны

Соединение, элемент	Содержание в		Выделившееся количество, кг/год	
	CI	CM	минимальное	максимальное
H ₂ O	10.8	9.5	70 300	190 000
CO ₂	0.66	0.64	4700	11 600
“C _x H _y O _z ”	0.37	0.1	740	6500
S	5.41	2.7	10 000	4800
Na	5000	3900	1440	4400
B	0.87	0.48	0.18	0,77
F	60	38	14	53
Cl	700	430	160	610
Ag	200	160	0.06	0.18
Zn	315	180	66	280
Cd	690	420	0.15	0.61
In	80	50	0.02	0.07
Ga	9.8	7.6	2.8	8.6
Ge	33	26	9.6	29.0
As	1.85	1.8	0.70	1.63
Se	21	12	4.4	18.5
Br	3.5	3.0	1.1	3.1
Sn	1.70	0.79	0.29	1.50
Sb	135	130	0.05	0.12
Te	2.3	1.3	0.48	2.0
I	0.43	0.27	0.10	0.38
Cs	0.19	0.11	0.04	0.17
Hg	310		0.11	0.27
Tl	142	92	0.03	0.13
Pb	2.50	1.6	0.60	2.20
Bi	110	71	0.02	0.10

Примечание: а) минимальные и максимальные количества выделившихся летучих рассчитывались при минимальной оценке потока микрометеороидов $6.19 \times 10^{-13} \text{ г м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для CM хондритов и максимальной оценки потока микрометеороидов $14.74 \times 10^{-13} \text{ г м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для CI хондритов; б) “C_xH_yO_z” — летучее органическое вещество, в) H₂O, CO₂, “C_xH_yO_z” и S в мас. %; Ag, Cd, In, Sb, Hg, Tl и Bi в нг/г, остальные в мкг/г.

нии первой входящей волны 16 ГПа, что близко к нашим расчетам (15 ГПа). Приведенные на рис. 8 давления, возникающие при соударении частиц углистого хондрита, обладающих разными скоростями, с базальтовой и анортозитовой мишенями, показывают, что для полной дегидратации этих частиц углистого хондрита и серпентина (рис. 7) вполне достаточно скорости соударения 5 км/с. Используя распределение скоростей соударения космических тел с Луной (Ivanov, 2008), получим, что доля таких частиц составляет чуть менее 1%, что пренебрежимо мало по сравнению с ошибками потока. Таким образом, мы принимаем, что все гидроксилсодержащие частицы, выпадающие на Луну, испытывают дегазацию.

Пористость реголита также будет весьма способствовать развитию высоких температур в области соударения и, соответственно, дегазации

микрометеороидов, включающей в себя разложение карбонатов, в том числе и путем реакции с силикатным расплавом и выделение углеводородов. Достаточно сложно оценить полноту выделения таких летучих компонентов, как S, Hg и других летучих и умеренно летучих компонентов (табл. 2). Хотя температуры их выделения в чистом виде не слишком велики — десятки—первые сотни °С, однако они, как правило, входят в состав фаз, как, например, S в FeS, и, соответственно, для их улутучивания нужны более высокие температуры. Кроме того, области развития необходимых температур при соударении микрометеоритов весьма малы. Вследствие этого они должны быстро охлаждаться в результате излучения. Это накладывает определенные кинетические ограничения на полноту их улутучивания, оценить которую нам представляется весьма затруднительно. В связи с этим достаточно произ-

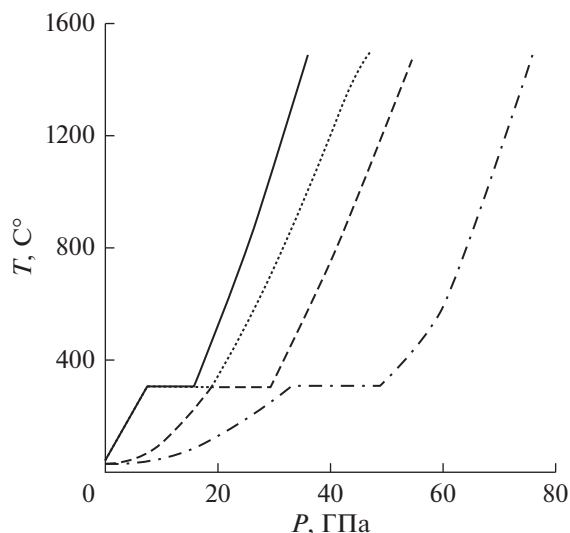


Рис. 6. Остаточные (постударные) температуры в зависимости от давления в ударной волне для метеорита Murchison (сплошная линия — для пористости 17%, штриховая линия — для сплошного вещества) и серпентина (точечная линия — для пористости 15%, штрих-пунктирная линия — для сплошного вещества). Горизонтальные участки обусловлены реакцией дегидратации серпентина.

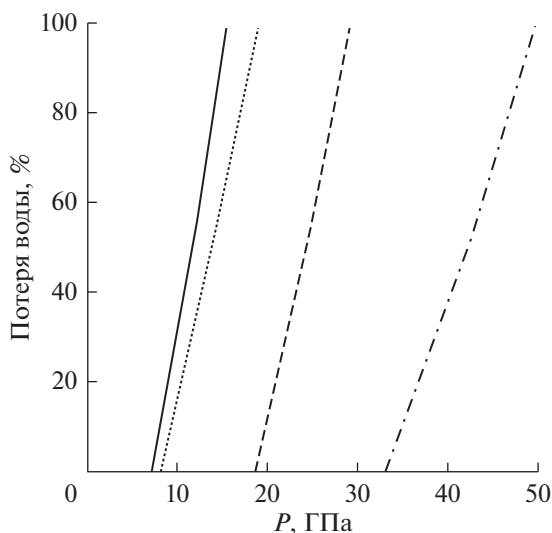


Рис. 7. Потеря воды в зависимости от ударной нагрузки метеорита Murchison (сплошная линия — для пористости 17%, штриховая — для сплошного вещества) и серпентина (точечная линия — для пористости 15%, штрих-пунктирная линия — для сплошного вещества).

вольно мы принимаем степень потери таких элементов в результате удара микрометеорита в 50%.

КОЛИЧЕСТВО ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ЛЕТАЧИХ ПРИ МИКРОМЕТЕОРОИДНОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

В табл. 2 приведены рассчитанные количества выделяющихся летучих при бомбардировке лун-

ной поверхности микрометеороидами. Естественно, что в образующемся при ударе паровом облаке будут происходить высокотемпературные реакции в его веществе, такие как диссоциация воды на водород и кислород, CO_2 на CO и O_2 , разложение органических соединений, образование соединений серы и т.д. Однако при этом следует учитывать и обратные реакции в расширяющемся облаке при его охлаждении, а также полноту протекания реакций, ограниченную малым временем его существования. При известной скорости истечения газа в вакуум (Зельдович, Райзер, 1966) можно посчитать, что облако пара, образующегося при соударении частицы углистого хондрита с содержанием H_2O 10% и размером 0.2 мм со скоростью 15 км/с, расширится до 10 см — т.е. до давления в нем 0.001 Торр — за 25 мкс. В связи с этим полагается, что в данном случае ролью высокотемпературных реакций среди летучих компонентов можно пренебречь, в отличие от крупных импактных событий, вызванных телами километровых размеров.

При истечении в лунную атмосферу внешняя оболочка газового плюма приобретает скорость, достаточную для улетучивания в космическое пространство. Численное моделирование соударений ледяных сфер с базальтовой мишенью показывает уменьшение количества остающегося водяного пара с ростом скорости ударников (Ong и др., 2010). Пользуясь этой зависимостью и рассчитывая распределение доли выпадающих на Луну частиц космической пыли по их скоростям (Cintala, 1992), можно получить, что количество удержанной на Луне воды составляет 60% от общей выделившейся воды. Таким образом, оценка общей массы остающейся микрометеороидной воды лежит в диапазоне 40–110 тонн на всю поверхность Луны в год. Расчеты поставляемого количества воды кометами дают относительно близкие значения нижней и верхней оценок удерживаемой воды, равных 12–390 т за год, тогда как количество воды, поставляемой астероидами, значительно больше и равно 2500 т за год (Ong и др., 2010) при среднем содержании воды в астероидах 2.2%. Однако оценка поступающей массы астероидной воды представляются нам несколько завышенными в связи с верхним пределом размера падающих тел, которые дают основной вклад в выпадающую массу. Так, для ометного потока принят максимальный размер тела, выпадающего в течении 10^9 лет, в 34 км, а для астероидного потока — в 99 км. В последнем случае вероятность такого события, согласно распределению Пуассона, равна ~ 0.2 , что, впрочем, является хотя и малой, но ощутимой вероятностью. Однако падение крупных тел размером порядка 100 км должно сопровождаться образованием многокольцевых бассейнов возрастом моложе 1–2 млрд лет, которые, очевидно, отсутствуют. Кроме этого, не ясен состав потока астероидов. В метеоритном потоке углистые хондриты составляют 3.8% от общего

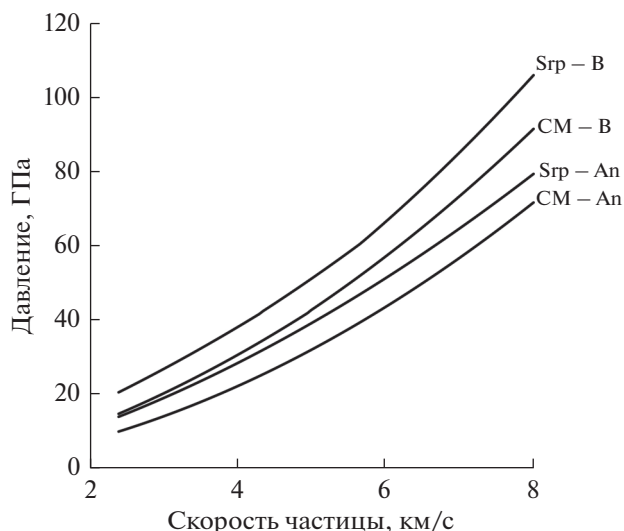


Рис. 8. Давления, возникающие при высокоскоростном соударении вещества метеорита Murchison (CM) и сплошного серпентина (Srp) с анортзитовой (An) и базальтовой (B) мишенями.

числа падений (Grady, 2000), тогда как остальные метеориты практически не содержат воды. С другой стороны, распространённость различных типов вещества в астероидном потоке могут отличаться от таковой для метеоритов, как это наблюдается для микрометеоритов.

Ловушками выделяющихся летучих служат участки кратеров в полярных областях, характеризующиеся постоянным затемнением, где температура поверхности не превышает 110 К и соответствует верхнему пределу стабильности льда (Базилевский и др., 2012 и ссылки там). В этих областях дистанционными методами надёжно показано присутствие воды или ОН группы. Наблюдаемые аномалии потока эпитермальных нейтронов в полярных областях Луны могут быть объяснены накоплением летучих компонентов, где содержание воды в реголите составляет первые проценты и может достигать порядка 10% (Feldman и др., 2001; Mitrofanov и др., 2010; Litvak и др., 2012; Sanin и др., 2017). Тогда количество накопившейся за 1 млрд лет воды, поступающей с микрометеороидами, непосредственно выпадающих в эти затененные области, лежит в пределах 1–3 кг на м².

Помимо воды, эти экзогенные льды будут содержать также значительные количества других летучих, например S в форме H₂S и/или SO₂, CO, CO₂, органические соединения и другие соединения и элементы. Спектроскопические данные, полученные в ходе эксперимента по соударению топливной ступени аппарата LCROSS с отложениями кратера Кабео (Colaprete и др., 2010; Gladstone и др., 2010) показали, что в плюме выбросов присутствовало по меньшей мере 155 кг H₂O, 26 кг H₂S, 5 кг SO₂, 70 кг CO, а также ощутимые

количества CO₂, NH₃, углеводородов, метанола и других компонентов. Примечательной является высокая концентрация в реголите Hg, составляющая 1.2%. Это свидетельствует о том, что в данном случае такой состав реголита связан с его обогащением летучими космогенными компонентами. Можно предположить, что эти отложения также должны содержать определенные количества других элементов, таких, например, как As, Se, Br, Sn, Tl, Pb, Bi, Sb, Te, I, Cs и т.д. (табл. 2). Исходя из вышеизложенного, ощутимый вклад в состав ледяных отложений будет вносить космическая пыль наряду с астероидами и кометами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные оценки потока микрометеороидов на Луну различаются примерно в 4 раза и лежат в пределах $(4.29 \pm 0.06 - 18.6 \pm 10.9) \times 10^{-13} \text{ г м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Нам представляется, что как нижняя, так и верхняя границы либо недооценивают, либо переоценивают этот поток вследствие ряда факторов — таких, как ошибки в заложенных исходных данных или ошибок, возникающих в результате косвенных определений значения потока. В связи с этим усредняя данные группы как для низких значений потока, так и данные группы для высоких значений, мы принимаем, что микрометеороидный поток на Луну должен лежать в диапазоне $(6.19 - 14.74) \times 10^{-13} \text{ г м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Несмотря на разброс оценок, поток частиц достаточно велик и сравним с потоком кратерообразующих тел диаметром менее 4 км, что, в общем-то, ранее недостаточно принималось во внимание при подсчете поступления космогенного вещества на планеты и спутники. Данные по составу земных микрометеоритов указывают на то, что они преимущественно сложены веществом углистых хондритов и соответственно вносят свой вклад в обогащение поверхности Луны и др. “сухих” тел летучими компонентами, сравнимым по масштабам с таким источником, как астероиды и кометы. Кроме H₂O, CO, CO₂ и органических веществ, возможно отлагающихся во льдах затененных участков полярных кратеров, космогенное вещество должно привносить в них и другие компоненты, в том числе различные формы серы и летучие металлы. В настоящее время разрабатываются проекты лунных баз, предполагающие использовать эту воду для жизнеобеспечения. Однако при этом необходимо учитывать то, что льды должны проходить очистку. С другой стороны, эти льды могут служить источником ряда элементов, пригодных для использования в различных целях. Все это делает актуальным изучение этих отложений как непосредственно на месте, так и возврат их на Землю для лабораторных исследований.

Автор выражает признательность А.Т. Базилевскому и Б.А. Иванову, чьи замечания позволили существенно улучшить качество статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадюков Д.Д., Брандштеттер Ф., Тона Д. Тонкозернистые шлаковидные и непереплавленные микрометеориты: их источники и связь с космическими сферами // Геохимия. 2018. № 11. С. 1026–1039.
- Базилевский А.Т., Абрахимов А.М., Дорофеева В.А. Вода и другие летучие на Луне (обзор) // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 99–118. (Basilevsky A.T., Abdrakhimov A.M., Dorofeeva V.A. Water and other volatiles on the moon: a review // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 89–107.)
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
- Хитаров Н.И., Леонидов В.Я., Пугин В.А. Процесс серпентинизации и связанные с ним вопросы // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. Л.: Наука, 1967. С. 194–210.
- Шевченко В.В. О кометном происхождении лунного льда // Астрон. вестн. 1999. Т. 33. № 5. С. 400–408. (Shevchenko V.V. On the Cometary Origin of the Lunar Ice // Sol. Syst. Res. 1999. V. 33. № 5. P. 400–408.)
- Alexander C.M.O'D., Howard K.T., Bowden R., Fogel M.L. The classification of CM and CR chondrites using bulk H, C and N abundances and isotopic compositions // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2013. V. 123. P. 244–260.
- Anderson W.W., Ahrens T.J. Shock wave equations of state of chondritic meteorites // AIP Conf. Proc. 1998. V. 429. P. 115–118.
<https://doi.org/10.1063/1.55475>
- Benna M., Hurley D., Stubbis T., Mahaffy P., Elphic R. Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts // Nat. Geosci. 2019. V. 12. P. 333–338.
- Bertoldi C., Dachs E., Cemic L., Theye T., Wirth R., Groger W. The heat capacity of the serpentine subgroup mineral berthierine ($\text{Fe}_{2.5}\text{Al}_{0.5}$)[$\text{Si}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_5$](OH)₄ // Clays and Clay Minerals. 2005. V. 53. № 4. P. 380–388.
- Carrillo-Sánchez J.D., Nesvorný D., Pokorný P., Janches D., Plane J.M.C. Sources of cosmic dust in the Earth's atmosphere // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 11.979–11.986.
- Cintala M.J. Impact-induced thermal effects in the lunar and mercurian regoliths // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. (E1). P. 947–973.
- Clark R.N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon // Science. 2009. V. 326. P. 562–564.
- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermelyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R.C., Goldstein D., Summy D., Bart G.D., Asphaug E., Korycansky D., Landis D., Sollitt L. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. P. 463–468.
- Cremonese G., Borin P., Martellato E., Marzari F., Bruno M. New calibration of the micrometeoroid flux on Earth // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 749. Iss. 2. article id. L40, 4 p.
- Cremonese G., Borin P., Lucchetti A., Marzari F., Bruno M. Micrometeoroids flux on the Moon // Astron. and Astrophys. 2013. V. 551. A27. 4 p.
- Crider D.H., Vondrak R.R. Hydrogen migration to the lunar poles by solar wind bombardment of the Moon // Adv. Space Res. 2002. V. 30. P. 1869–1874.
- Dobrić E., Engrand C., Leroux H., Rouzaud J.-N., Duprat J. Transmission electron microscopy of CONCORDIA ultracarbonaceous antarctic micrometeorites (UCAMMs): Mineralogical properties // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2012. V. 76. P. 68–82.
- Fechtig H., Hartung J.B., Nagel K., Neukum G., Storzer D. Lunar microcrater studies, derived meteoroid fluxes, and comparison with satellite-borne experiments // Proc. Fifth Lunar Conf. Suppl. 5. Geochim. et Cosmochim. Acta. 1974. V. 3. P. 2463–2474.
- Feldman W.C., Maurice S., Lawrence D.J., Little R.C., Lawson S.L., Gasnault O., Wiens R.C., Barraclough B.L., Elphic R.C., Prettyman T.H., Steinberg J.T., Binder A.B. Evidence for water ice near the lunar poles // J. Geophys. Res. 2001. V. 106 (E10). P. 23231–23251.
- Fulle M., Blum J., Green S.F., Gundlach B., Herique A., Moreno F., Mottola S., Rotundi A., Snodgrass C. The refractory-to-ice mass ratio in comets // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 482. P. 3326–3340.
- Genge M.J., Engrand C., Gounelle M., Taylor S. The classification of micrometeorites // Meteorit. and Planet. Sci. 2008. V. 43. P. 497–515.
- Gladstone G.R., Hurley D.M., Retherford K.D., Feldman P.D., Pryor W.R., Chaufray J., Versteeg M., Greathouse T.K., Steffl A.J., Throop H., Parker J.Wm., Kaufmann D.E., Egan A.F., Davis M.W., Slater D.C., Mukherjee J., Miles P.F., Hendrix A.R., Colaprete A., Stern S.A. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume // Science. 2010. V. 330. P. 472–476.
- Gómez Martín J.C., Bones D.L., Carrillo-Sánchez J.D., James A.D., Trigo-Rodríguez J.M., Fegley Jr.B., Plane J.M.C. Novel experimental simulations of the atmospheric injection of meteoric metals // Astrophys. J. 2017. V. 836. article id. 212, 26 p.
- Grady M.M. Catalogue of meteorites // 5th ed. Cambridge: Univ. Press, 2000. 689 p.
- Grun E., Zook H.A., Fechtig H., Giese R.H. Collisional balance of the meteoritic complex // Icarus. 1985. V. 62. P. 244–272.
- Hayne P.O., Hendrix A., Sefon-Nash E., Siegler M.A., Lucey P.G., Retherford K.D., Williams J.-P., Greenhagen B.T., Paige D.A. Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements // Icarus. 2015. V. 255. P. 58–69.
- Howard K.T., Benedix G.K., Bland P.A., Cressey G. CM chondrites by X-ray diffraction (PSD-XRD): Part 2. Degree, nature and settings of aqueous alteration // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 2735–2751.
- Ivanov B. Size-Frequency Distribution of Asteroids and Impact Craters: Estimates of Impact Rate // Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects / Eds Adushkin V.V., Nemchinov I.V. Berlin: Springer, 2008. P. 91–116.
- Kohout T., Kallonen A., Suuronen J.-P., Rochette P., Hutzler A., Gattaceca J., Badjukov D.D., Skála R., Böhmová V., Čuda J. Density, porosity, mineralogy, and internal structure of cosmic dust and alteration of its properties during high-velocity atmospheric entry // Meteorit. and Planet. Sci. 2014. V. 49. P. 1157–1170.
- Li S., Milliken R.E., Lucey P.G., Fisher E. Possible detection of surface water ice in the Lunar polar regions using data from the Moon Mineralogy Mapper (M3) // 48th Lunar and Planetary Sci. Conf. 2017. The Woodlands. Texas. LPI Contribution No. 1964, id. 2505.
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A., Malakhov A., Boynton W.V., Chin G., Droege G., Evans L.G., Garvin J., Golovin D.V., Harshman K., McClanahan T.P., Mokrousov M.I., Mazarico E., Milikh G., Neumann G.,

- Sagdeev R., Smith D.E., Starr R., Zuber M.T.* Global maps of lunar neutron fluxes from the LEND instrument // *JGR: Planets*. 2012. V. 117(E12). P. E00H22
- Lodders K., Fegley B.* The planetary scientist's companion. New York: Oxford Univ. Press, 1998. QB601. L84. 392 p.
- Love S.G., Brownlee D.E.* A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust // *Science*. 1993. V. 262. P. 550–553.
- 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.
- Melosh H.J.* Impact cratering: a geologic process. New York, Oxford: Oxford Univ. Press, 1989. 254 p.
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazarico E., McClanahan T., Mikhlik G., Mokrousov M., Nandikotkur G., Neumann G.A., Nuzhdin I., Sagdeev R., Shevchenko V.* Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // *Science*. 2010. V. 330(6003). P. 483–486.
- Morgan J.W., Walker R.J., Brandon A.D., Horan M.F.* Siderophile elements in Earth's upper mantle and lunar breccias: Data synthesis suggests manifestations of the same late influx // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2001. V. 36. P. 1257–1276.
- Moses J.I., Rawlins K., Zahnle K., Dones L.* External sources of water for Mercury's putative ice deposits // *Icarus*. 1999. V. 137. P. 197–221.
- Needham D.H., Kring D.A.* Lunar volcanism produced a transient atmosphere around the ancient Moon // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 478. P. 175–178.
- Neukum G.* Micrometeoroid flux, microcrater population development and erosion rates on lunar rocks and exposure ages of Apollo 16 rocks derived from crater statistics // *Lunar and Planet. Sci. Conf. (Abstract)*. 1973. Houston. Texas. V. 4. P. 558–559.
- Ong L., Asphaug E.I., Korycansky D., Coker R.F.* Volatile retention from cometary impacts on the Moon // *Icarus*. 2010. V. 207. P. 578–589.
- Peucker-Ehrenbrink B.* Accretion of extraterrestrial matter during the last 80 million years and its effect on the marine osmium isotope record // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1996. V. 60. P. 3187–3196.
- Peucker-Ehrenbrink B., Ravizza G.* The effects of sampling artifacts on cosmic dust flux estimates: A reevaluation of nonvolatile tracers (Os, Ir) // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2000. V. 64. P. 1965–1970.
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N., Annadurai M., Boardman J., Buratti B., Combe J.-P., Dyar M.D., Green R., Head J.W., Hibbitts C., Hicks M., Isaacson P., Klima R., Kramer G., Kumar S., Livo E., Lundeen S., Malaret E., McCord T.* Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan1 // *Science*. 2009. V. 326. P. 568–572.
- Plane J.M.C.* Cosmic dust in the Earth's atmosphere // *Chem. Soc. Rev.* 2012. V. 41. P. 6507–6518.
- Saal A.E., Hauri E.H., Cascio M.L., van Orman J.A., Rutherford M.C., Cooper R.F.* Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior // *Nature*. 2008. V. 454. P. 192–195.
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D.V., Kozyrev A.S., Livengood T.A., Malakhov A.V., McClanahan T.P., Mokrousov M.I., Starr R.D., Sagdeev R.Z., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.A.* Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. 2017. V. 283 P. 20–30.
- Stacy N.J.S., Campbell D.B., Ford P.G.* Arecibo radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits // *Science*. 1997. V. 276. P. 1527–1530.
- Stuart J.S., Binzel R.P.* Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects // *Icarus*. 2004. V. 170. P. 295–311.
- Suttle M.D., Genge M.J., Folco L., van Ginneken M., Lin Q., Russell S.S., Najorka J.* The atmospheric entry of fine-grained micrometeorites: The role of volatile gases in heating and fragmentation // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2019. V. 54. P. 503–520.
- Svetsov V.V., Shuvalov V.V.* Water delivery to the Moon by asteroidal and cometary impacts // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 117. P. 444–452.
- Taylor S., Lever J.H., Harvey R.P.* Accretion rate of cosmic spherules measured at the South Pole // *Nature*. 1998. V. 392. P. 899–903.
- Taylor S., Matrajt G., Guan Y.* Fine – grained precursors dominate the micrometeorite flux // *Meteorit. Planet. Sci.* 2012. V. 47. P. 550–564.
- Tomioka N., Tomeoka K., Nakamura-Messenger K., Sekine T.* Heating effects of the matrix of experimentally shocked Murchison CM chondrite: Comparison with micrometeorites // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2007. V. 42. P. 19–30.
- Tyburczy J.A., Krishnamurthy R.V., Epstein S., Ahrens T.J.* Impact-induced devolatilization and hydrogen isotopic fractionation of serpentine: Implications for planetary accretion // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1990. V. 98. P. 245–26.
- Tyburczy J.A., Duffy T.S., Ahrens T.J., Lange M.A.* Shock wave equation of state of serpentine to 150 GPa: Implications for the occurrence of water in the Earth's lower mantle // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. Bll. P. 18.011–18.027.
- Watson K., Murray B.C., Brown H.* The behavior of volatiles on the lunar surface // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. P. 3033–3045.
- Werner S.C., Harris A.W., Neukum G., Ivanov B.A.* NOTE: The near-Earth asteroid size-frequency distribution: A snapshot of the lunar impactor size-frequency distribution // *Icarus*. 2002. V. 156. P. 287–290.
- Werner S.C., Ivanov B.A.* Exogenic Dynamics, Cratering, and Surface Ages // *Treatise on Geophysics (Second Edition)* / Ed. Schubert G. Oxford: Elsevier, 2015. Chapter 10.10. P. 327–365.
- Yada T., Nakamura T., Takaoka N., Noguchi T., Terada K., Yano H., Nakazawa T., Kojima H.* The global accretion rate of extraterrestrial materials in the last glacial period estimated from the abundance of micrometeorites in Antarctic glacier ice // *Earth, Planets and Space*. 2004. V. 56. P. 67–79.
- Zhu C., Crandall P.B., Gillis-Davis J.J., Ishii H.A., Bradley J.P., Corley L.M., Kaiser R.I.* Untangling the formation and liberation of water in the lunar regolith // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2019. V. 116(23). P. 11165–11170.