Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 7, с. 452 – 459

О пылевых структурах и цепных реакциях, возникающих над реголитом при воздействии излучения гиротрона

Н. Н. Скворцова[a,b,c1)], С. А. Майоров[a,f,g], Д. В. Малахов[a,b,d], В. Д. Степахин[a,d], Е. А. Образцова[e], А. И. Кенжебекова[g], О. Н. Шишилов[b]

[a] *Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

[b] *Российский технологический университет "МИРЭА", 119454 Москва, Россия*

[c] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

[d] *Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, 117997 Москва, Россия*

[e] *Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, 117997 Москва, Россия*

[f] *Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия*

[g] *Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, 050040 Алматы, Казахстан*

Поступила в редакцию 1 ноября 2018 г.
После переработки 9 января 2019 г.
Принята к публикации 7 февраля 2019 г.

Приведены результаты исследования пылевых структур, возникающих при развитии цепных экзотермических плазмохимических процессов, инициируемых импульсным излучением гиротрона в смесях порошков металла и диэлектрика. Состав смеси порошков соответствует составу реголита на Луне. В экспериментах при энергии микроволнового импульса гиротрона 1–3 кДж и длительности импульса 1.5–4 мс регистрируется взрывной процесс, вызванный кулоновским расталкиванием заряженных частиц с поверхности реголита в объем реактора. После взрыва порошка развиваются цепные реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Они длятся десятки секунд, в течение которых взвесь пылевых частиц поднимается на десятки сантиметров над поверхностью порошка. Выделяющаяся при этом энергия в сотни раз превышает энергию инициации цепной реакции. На боковые поверхности реактора над порошком осаждаются сфероиды из реголита с диаметрами от 1 до 1000 мкм. Рассматривается аналогия возможного вклада кулоновского расталкивания заряженных частиц и плазменных экзотермических процессов в разлет пыли реголита при бомбардировке микрометеоритами поверхности Луны.

DOI: 10.1134/S0370274X1907004X

1. Введение. Возникновение плазменно-пылевых ансамблей заряженных микрочастиц было обнаружено ранее над поверхностью смесей порошков металла и диэлектрика в разрядах, инициируемых излучением мощного гиротрона [1]. В этих экспериментах на смесь порошков, размещенной на пластине в плазмохимическом реакторе с открытой верхней границей, подавалось импульсное микроволновое излучение. При превышении пороговых условий по энергии гиротрона наблюдался выброс частиц порошка с поверхности, вызванный кулоновскими силами расталкивания между отдельными заряженными частицами [1, 2]. После этого над поверхностью порошка развиваются экзотермические цепные реакции, в которых происходит синтез частиц нано- и микро-размеров [3, 4]. При этом длительность протекания вторичных процессов на много порядков превышала миллисекундные импульсы СВЧ – микроволновые импульсы, и достигала нескольких минут. В цикле проведенных работ наблюдались цепные процессы с генерацией ансамблей пылевых частиц в десятках смесей порошков различных металлов (молибден, вольфрам, алюминий, титан и др.) и диэлектриков (бор, нитрид бора, окись алюминия, и др.) в воздухе и азоте, при атмосферном давлении и пониженном давлении (в форвакууме)[2)]. В этих экспериментах наблюдался

[1)]e-mails: nina@fpl.gpi.ru; mukudori@mail.ru

[2)]Энергия, необходимая для инициации цепной реакции, невелика (порядка от долей до нескольких кДж/см^2), из-за короткой длительности СВЧ импульса. Это на несколько порядков меньше энергии, которая затем выделяется при протекании инициированных экзотермических реакций.

синтез веществ с контролируемым химическим составом, которые осаждались на диэлектрические и металлические пластины, введенные в реактор. При этом взвесь пылевых частиц в качестве очагов кристаллизации является важным компонентом синтеза композитов нано- и микро-размеров [5, 6].

Одним из многих интересных явлений, обнаруженных при посадке космических аппаратов на Луне, оказалось существование плазменно-пылевых облаков, левитирующих над ее поверхностью. Они состоят из заряженных микрочастиц и поднимаются на высоту в десятки километров [7, 8]. Основным источником взвешенной заряженной пыли на Луне является реголит[3)], покрывающий ее поверхность слоем толщиной от нескольких сантиметров, до нескольких метров в районах лунных морей. Химический состав образцов реголита из разных областей Луны, доставленных на Землю, подробно исследован и описан [9]. Плотность материала реголита, состоящего из различных окислов (алюминия, кремния, железа и др.), находится в диапазоне от 1.3 до 3.1 г/см^3, средний размер частиц реголита был 70–100 мкм.

Как известно, посадка и взлет космического аппарата вызывают образование пылевого облака большего размера. Заряженные частицы в условиях Луны обладают повышенными адгезионными способностями, что вносит ограничения в использование космических систем на ее поверхности [10]. Поэтому в настоящее время уделяется большое внимание методам получения потоков заряженной пыли в лабораторных условиях для испытания узлов будущей лунной техники [11].

Экспериментальных данных о распределении пылинок над лунной поверхностью немного, поскольку проведено весьма ограниченное число наблюдений. Поэтому распределения частиц по высотам, размерам, скоростям оцениваются по разным физико-математическим плазменным моделям. В статье "Влияние солнечного ветра на формирование фотоиндуцированного плазменно-пылевого слоя вблизи поверхности Луны" [12] была предложена модель, использующая известные параметры потоков электронов и ионов солнечного ветра и распределения фотоэлектронов в приповерхностном слое. Эта модель позволила описать подъем только самых малых частиц размером (около 1 мкм) на высоту до нескольких метров.

В статьях [13, 14] была представлена модель появления микронных пылевых частиц в плазменно-пылевой системе Луны, основанная на учете ударов метеоритов о ее поверхность. Удары метеоритов о поверхность Луны происходят достаточно часто и при наблюдении через телескоп видны в виде ярких вспышек [15]. Вокруг эпицентра падения микрометеорита в поверхностном слое лунного реголита должно происходить развитие каскада процессов: испарение, плавление, разрушение частиц, необратимые деформации частиц и упругие деформации. Удельная энергия при соударении высокоскоростного метеорита с лунной поверхностью по приведенному в статье [13] расчету может значительно превосходить энергию связи атомов и молекул в окислах, которые составляют лунный реголит. Разрушение частиц в лунном реголите приводит к выделению из окислов (магния, алюминия, железа и др.) атомов или ионов соответствующих металлов и кислорода. Отметим, что ранее рассматривалось несколько способов получения кислорода на Луне путем разрушения различных окислов в реголите (см., например, [16]) при нагреве до температур 2000–3000 K, что также достижимо при удельной энергии, выделяемой при ударе метеоритов.

Появление металла и кислорода в порошке реголита со свободной поверхностью может инициировать развитие плазмохимического цепного процесса, аналогичного наблюдаемым в экспериментах при мощном импульсном воздействии микроволнового излучения. Энергетический порог разрушения молекул в реголите по оценке, приведенный в [13], превышает пороговую энергию, которая необходима для перехода в режим цепных процессов. Она составляет 0.1–10 кДж/см^2, что соответствует энергии небольшого миллиграммового метеорита. Также легко достижима и может быть превышена и температура, необходимая для разрушения окислов в реголите с дальнейшим развитием вторичных процессов синтеза.

Цель настоящих экспериментов состояла в создании левитирующего облака микрочастиц реголита в воздухе путем воздействия на порошок с составом, аналогичным лунному реголиту, импульса СВЧ излучения большой мощности.

2. Описание эксперимента и методик. Эксперименты по исследованию пылевых структур, возникающих над порошком реголита при воздействии мощного микроволнового излучения, были проведены на плазмохимическом гиротронном стенде в отделе физики плазмы ИОФ РАН. Схема эксперимента и основные диагностики параметров разряда представлены на рис. 1а. Стенд для плазмохимических экспериментов создан с использованием одного из гиротронов комплекса МИГ-3 электронно-циклотронного

[3)] На Земле реголит также широко распространен.

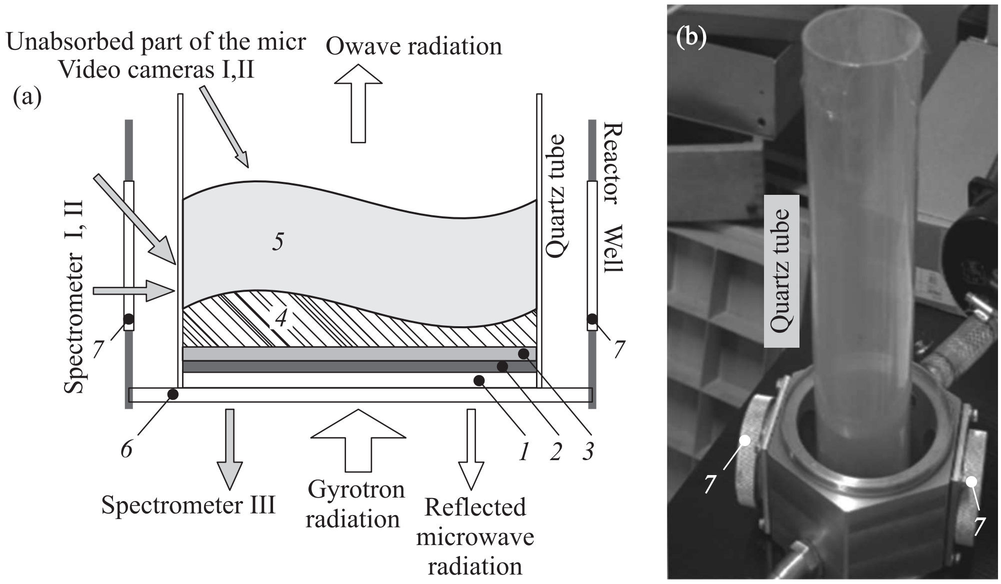

Рис. 1. (a) – Схема эксперимента. *1*, *2*, *6*, *7* – кварцевые пластины; *3* – слой реголита; *4*, *5* – плазменный и газовые слои с частицами. Стрелками схематически показаны области приема излучения видеокамерами (I, II) и спектрометрами (I, II, III). (b) – Кварцевая трубка с переопыленным реголитом после воздействия импульса гиротрона. *7* – Диагностические патрубки с кварцевыми пластинами. Реголит (смесь # 2). Атмосфера. Энергия СВЧ импульса 0.07 кДж · см$^{-2}$. Длительность СВЧ 1.5 мс

нагрева плазмы стелларатора Л-2М [17] (мощностью до 500 кВт, частотой 75 ГГц, длиной волны 4 мм, длительностью импульса СВЧ до 10 мс).

Между двумя зеркалами квазиоптического тракта этого комплекса был расположен реактор, в который вставлялся кварцевый цилиндр длиной 35 см, верхний конец цилиндра был открыт. На подложку реактора насыпался слой порошка реголита толщиной 0.5–0.7 мм, верхняя поверхность которого оставалась свободной. Излучение гиротрона подавалось снизу через согласованное кварцевое окно на порошок. Облучение образцов выполнялось одиночными импульсами с периодами следования не менее 20 с. Мощность микроволнового излучения гиротрона составляла 150–300 кВт, диаметр СВЧ пучка в зоне взаимодействия с порошком составлял 8 см.

В таблице 1 приведены составы смесей порошков двух типов, повторяющие состав разных типов материкового лунного реголита. В первом образце вместо окисла магния введен порошок магния, во втором составе вместо окисла алюминия введен порошок алюминия в соответствующей лунному реголиту пропорции. Затем были проведены эксперименты в смесях порошков, в которых только часть окислов (половина или десятая часть) были заменены на соответствующий металл. Мы предполагаем, что в малых дозах в реголите при ударе метеорита может происходить выделение из окислов металла и кислорода, (отметим, что около 1 % микро-сфероидов железа было обнаружено уже в первых привезенных пробах реголита [9]). Эксперименты проводились в режиме однократных СВЧ импульсов, при атмосферном давлении в воздухе, что позволяло использовать имеющийся в атмосфере кислород.

Таблица 1. Составы смесей порошков реголита

Смесь # 1		Смесь # 2	
Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %
SiO_2	49.45	SiO_2	45.91
Al	13.50	Al_2O_3	23.68
TiO_2	0.63	TiO_2	0.58
FeO	8.70	FeO	8.07
MgO	10.80	Mg	6.05
CaO	16.92	CaO	15.71

На рисунке 2a приведена микрофотография исходного порошка реголита (смесь # 2), на рис. 2b – распределение частиц по размерам. Видно,что частицы порошков имеют острые края, их размеры изменяются от микрометра до миллиметра. Средний размер частиц в разных пробах лежит в диапазоне 100–200 мкм. Таким образом, искусственная смесь соответствует лунному реголиту, как по химическому составу, так и по размерам микрочастиц.

Для наблюдения эволюции свечения разряда и частиц во времени производилась съемка камерами

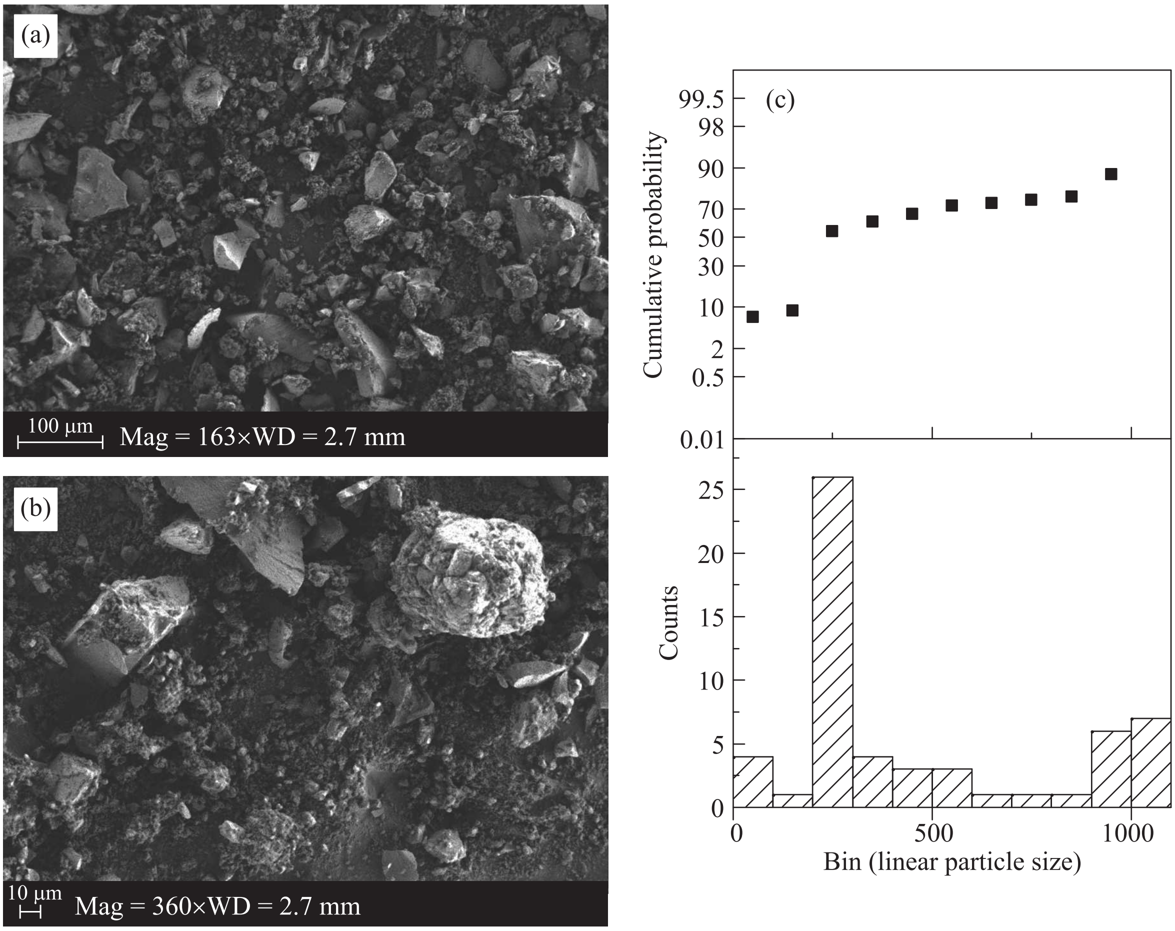

Рис. 2. (a), (b) – Микрофотографии исходного порошка реголита (смесь # 2) в двух масштабах: 100 и 10 мкм. (c) – Для фотографии с масштабом 100 мкм представлены распределения частиц по размерам

"Activecam AC-D1020" и "FastecImaging IN250M512". Вторая видеокамера (с интервалом между кадрами 4 мс) была синхронизирована с тремя спектрометрами, по спектрам которых оценивалась температура нижней поверхности порошка, газа и плазмы над порошком [2]. Изображения исходного и осажденного на стенки реактора порошков были получены с помощью растрового электронного микроскопа ZeissMerlin (см. [1, 5]).

3. Эволюция плазменно-пылевого образования над порошком реголита при воздействии излучения гиротрона. Используемого количества алюминия/магния (процент металла в диэлектрической смеси) в реголите оказался достаточным для инициации различных процессов в плазмохимическом реакторе:

• возникновения плазменного слоя между частицами порошка и вблизи его поверхности;

• развития вторичных плазмохимических реакций над поверхностью реголита (по механизму автоколебательного цепного процесса);

• разлета заряженных частиц из поверхностного слоя порошка за счет кулоновского расталкивания одноименно заряженных пылинок.

Инициирования цепных процессов в порошке реголита произошло при стандартных режимах гиротрона: мощности 150–300 кВт и длительности импульса 1.5–8 мс. Для развития цепных реакций в реголите, в котором только часть окислов (половина или десятая часть) были заменены на соответствующий металл, необходимо было увеличивать энергию импульса гиротрона (мощность СВЧ и/или длительность импульса).

Во время работы гиротрона для обеих смесей с задержкой 0.5–1 мс от начала СВЧ импульса наблюдается яркая вспышка (взрыв) на верхней поверхности порошка (с засветкой спектрометров и видеокамер), которая длится менее миллисекунды. В это же время порошок реголита нагревался до 3000 К, в спектрах появлялись атомные и ионные линии, молекулярные полосы. В плазме, возникающей внутри порошка и в приповерхностном слое над ним, происходит почти полное (80–90 %) поглощение микроволн. После выключения гиротрона нижняя часть порошка реголита, прижатая к кварцевой пластине, остывает за несколько миллисекунд, и все, перечисленные выше процессы, протекающие между частицами порошка, прекращаются (по сигналам III спектрометра, рис. 1).

Однако после окончания импульса процессы разлета порошка и протекания цепных плазмохимических реакций над верхней свободной поверхностью реголита в реакторе продолжаются. Наблюдается свечение всего объема смеси в реакторе (по сигналам I и II спектрометров, рис. 1), появление в нем пыли, осаждение пыли на его стенки.

На рисунке 3 видна динамика спектров, измеренных над поверхностью порошка спектрометром # 2, после выключения гиротрона, по которым могут быть оценены температурные зависимости в реакторе. Температура верхней поверхности порошка и газово-плазменной смеси над реголитом порядка 3000–4000 K, такие значения являются обычными для ранее исследованных смесей порошков (см., например, [18]). Отчетливо виден молекулярный спектр газообразного окисла AlO, возникающий при 2533 K. Во взвеси над порошком реголита возникает градиент температуры от поверхности порошка до верхней части кварцевой трубки (рис. 1). Свечение и пыль над поверхностью порошка наблюдается в течение нескольких секунд после выключения гиротрона. Уменьшение интенсивности свечения на рис. 3 вызвано, в первую очередь, осаждением синтезируемых вторичных структур на стенки трубки. На рисунке 1b представлена фотография запыленной кварцевой трубки после одного импульса гиротрона (до импульса трубка прозрачна).

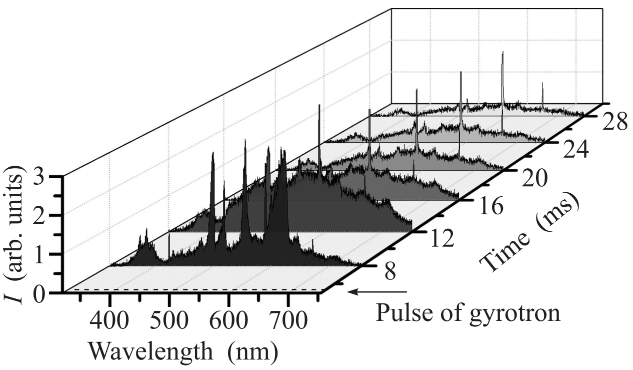

Рис. 3. Динамика спектров, измеренных над поверхностью порошка реголита (смесь # 2), спектрометром # 2. Интервал между спектрами 4 мс. Импульсное воздействие гиротрона длительностью 2 мс

Анализ показывает,что после выключения гиротрона над порошком реголита начинается развитие химических и плазмохимических цепных реакций по типу самораспространяющегося синтеза с выделением тепла и образованием вторичных веществ. Для обеих изученных смесей, моделирующих состав реголита, в протекающих процессах могут быть выделены стадии инициирования, развития и затухания. Инициированный плазмохимический цепной процесс в реголите длится обычно несколько секунд. При этом наблюдался автоколебательный режим, при котором происходит повторный многократный разогрев поверхности с повторением выброса с нее заряженного порошка в реактор и развитием дополнительных вторичных плазмохимических процессов.

На последней стадии цепной процесс затухает из-за постепенного рассеивания как первичного, так и выделяющегося в ходе реакций тепла в окружающем пространстве. Синтезированные вторичные вещества в виде структур осаждаются на кварцевый цилиндр. В показателях смесей, представленных в табл. 1, матовая пленка,синтезированная из реголита, покрывает весь кварцевый цилиндр реактора до высоты 35 см. В экспериментах с уменьшением процента металла в реголите наблюдается более тонкая пленка. Химический состав порошков, осажденных на поверхности кварцевых цилиндров соответствует составу смесей порошков исходного реголита.

Появление частиц реголита в объеме реактора происходит на фоне горячей поверхности исходного порошка реголита, как и для всех смесей порошков в ранее проведенных экспериментах [1]. На рисунке 4 показана динамика возникновения и левитации облака заряженных частиц над реголитом после выключения гиротрона. Начальный взрыв порошка в течение микроволнового импульса приводит к кратковременной засветке изображений спектрометров и видеокамер. Покадровый анализ видеосъемки показывает, как облако из большого числа частиц поднимается в объем реактора над поверхностью реголита, и затем наблюдается в объеме реактора в течении несколько сотен миллисекунд. Частицы от поверхности порошка разлетаются со скоростями порядка нескольких м/с, а максимальное их количество наблюдается через 100–200 мс после выключения СВЧ импульса. Уменьшение наблюдаемого числа частиц в течение этого времени так же, как и в спектральных измерениях, частично связано с запылением кварцевой поверхности цилиндра реактора.

Для анализа факторов, приводящих к образованию пылевых частиц и формированию пылевой плазмы, был проведен расчет параметров СВЧ раз-

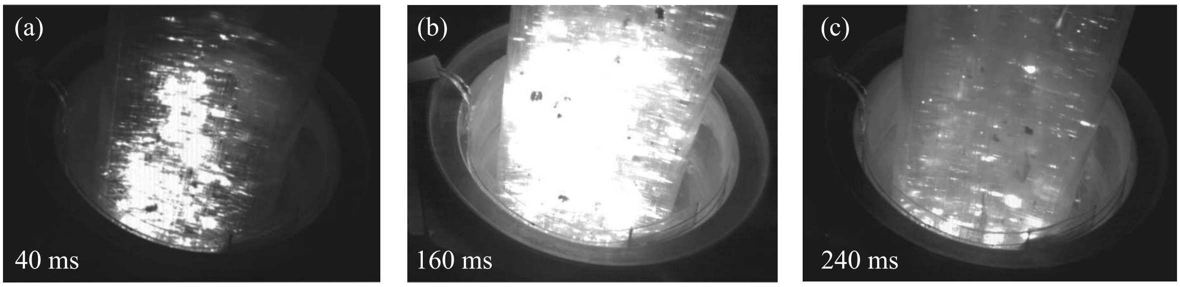

Рис. 4. Видеокадры эволюции во времени ансамбля частиц реголита (смесь # 2) в реакторе. Импульсное воздействие гиротрона длительностью 2 мс. На фотографиях указано время после окончания СВЧ импульса гиротрона. Выдержка 0.2 мс

ряда, скоростей дрейфа и нагрева электронов [1]. При плотности потока энергии $I = 10^4$ [В/см] при атмосферном давлении с числовой плотностью атомов $N_a = 2.69 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$ приведенная напряженность электрического поля равна: $E/N = 7$ Тд, а при максимальной напряженности поля в экспериментах $3 \cdot 10^4$ В/см^2 она равна $E/N = 21$ Тд. Такой напряженности поля достаточно для развития лавины электронов и формирования плазменной области. За время импульса излучения гиротрона электроны за счет хаотизации направленного движения в упругих столкновениях (обратно тормозной нагрев) успевают набрать энергию, которая затрачивается на возбуждение, ионизацию, нагрев газа и приводит к образованию лавин электронов и появлению плазмы.

Взаимодействие плазмы с зернами реголита на границе раздела порошок-газ приводит к накоплению на них отрицательного электрического заряда. Для частиц диаметром 10 мкм и при значениях температур электронов $T_e = 1$ эВ и ионов $T_i = 0.026$ эВ величина заряда имеет порядок $Q = -10^4 e$, e – элементарный заряд [19]. Заряд, накопленный пылевыми частицами, приводит, в свою очередь, из-за их взаимного отталкивания к разлету с поверхности в объем – "кулоновский взрыв", причем не одной частицы, а их ансамбля. Проведенные эксперименты по отклонению пылевых частиц в магнитном поле подтвердили, что заряд на их поверхности отрицательный, что указывает на то, что термоэмиссия не приводит к изменению знака заряда на положительный, и, соответственно, не является определяющим процессом, при зарядке пылевых частиц [20].

Дополнительным фактором, вызывающим разлет пылинок вверх – в газ, является появление плавающего потенциала между плазмой и заряженной поверхностью [21]. Кулоновский взрыв и инициация цепного процесса для смеси # 1 в эксперименте произошла при превышении порога по удельной микроволновой мощности 100 Дж/см^2, для смеси # 2 – 70 Дж/см^2. Таким образом, из-за кулоновского расталкивания между отдельными заряженными гранулами в поверхностном слое порошка реголита происходит их выброс в объем реактора.

Итак, эти два процесса приводят к появлению пылинок в реакторе: разлет после кулоновского взрыва и начало плазмохимических цепных реакций. Разогрев газа вблизи поверхности порошка приводит к появлению градиента температуры газа по высоте в реакторе, что способствует дополнительному подъему частиц из-за термофореза. Также частицы могут возникать дополнительно в объеме реактора при вторичном синтезе в цепных реакциях. Цепной автоколебательный процесс повторяется несколько раз, что также приводит к дополнительному появлению новых частиц в реакторе уже после выключения гиротрона. Разлет порошка с появлением частиц происходит из поверхностного слоя реголита, подобно тому, как происходит выброс частиц с поверхности при столкновении метеорита со слоем реголита на Луне.

В эксперименте облако частиц, показанных на рис. 4, оседает в процессе охлаждения газа на все внутренние поверхности реактора. На рисунке 5а показаны микрофотографии частиц, осажденные на высоте 10–20 см от поверхности порошка. Видно, что на стенки реактора перенесены частицы со средним размером порядка 100 мкм, в распределении частиц присутствует фракция микрочастиц около 1 мм величиной. Частицы превратились в сфероиды (оплавились), исчезли острые углы, однако химический состав реголита (смесь окислов из табл. 1) не изменился.

4. Сравнение процессов образования плазменно-пылевого ансамблей частиц при воздействии излучения гиротрона и при падении на Луну метеоритного ударника. При ударе о поверхность Луны тела с достаточной энергией (а также и при нашем разряде) температура достигает нескольких тысяч градусов. Вокруг

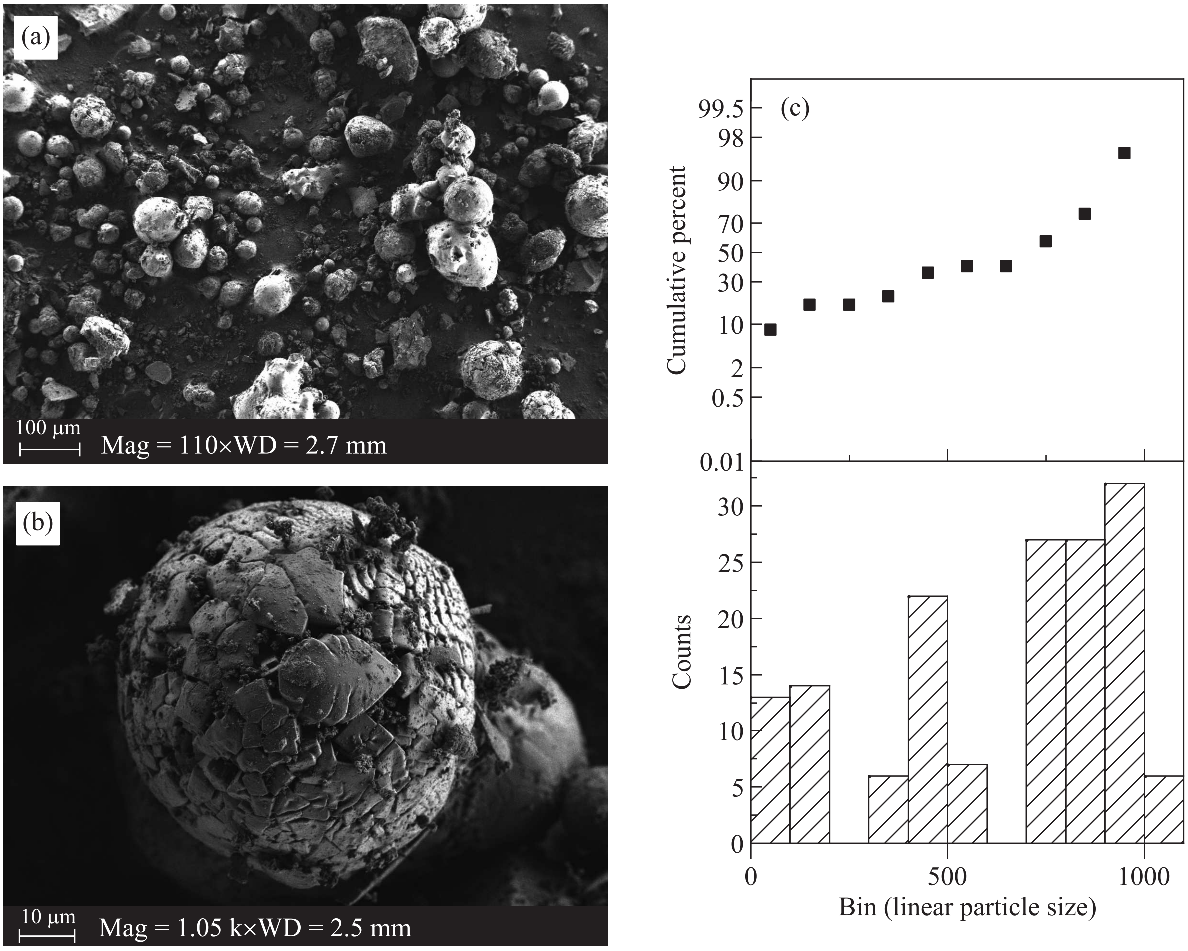

Рис. 5. (a), (b) – Микрофотографии осажденного на стенки реактора порошка реголита (смесь # 2) в двух масштабах: 100 и 10 мкм. (c) – Для фотографии с масштабом 100 мкм представлены распределения частиц по размерам

эпицентра падения микрометеорита предполагается развитие каскада процессов в поверхностном слое лунного реголита [15]: испарение (I), плавление (II), разрушение частиц (III), необратимые деформации частиц (IV) и упругие деформации (V).

При протекании трех начальных процессов (I-III) при падении метеорита возможно испарение всех составляющих (оксидов), а затем их диссоциация в газовой фазе на атомы, т.е. кислород и металлы и неметаллы (можно привести гипотетические примеры таких реакций, например, $(Mg,Fe)_2[SiO_4] \to 2(Mg,Fe) + Si + 4O$), может происходить и испарение металла (в малых количествах присутствует в реголите Луны [9]). Испарение всегда идет с поверхности. Для сравнения в порошке реголита под воздействием излучением гиротрона также идет при высокой температуре разложение окислов на составляющие (например, $SiO_2 \to Si + 2O$, $Al_2O_3 \to 2Al + 3O$, дополнительно в смесях порошков может происходить испарение и плавление металла). Кулоновский взрыв жидких капель может приводить к тому, что частицы разлетаются на значительно более мелкие осколки, что дополнительно ускоряет эти процессы.

Далее, по мере снижения температуры, должна начаться обратная ассоциация атомов в молекулы – при этом газовая фаза состоит в основном из кислорода (в случае Луны) либо из кислорода и азота (в нашем случае, когда разряд происходит в воздухе, как при атмосферном давлении, так и в форвакууме). Обратное соединение металлов и диэлектриков с кислородом – это, фактически, горение, и оно сопровождается существенным выделением тепла, что может приводить к увеличению длительности процесса, за счет его развития в автотермическом режиме.

По аналогии с процессами,которые развиваются при формировании плазменно-пылевых ансамблей частиц при воздействии на реголит импульсного излучения гиротрона, можно рассмотреть цепные реакции высокотемпературного синтеза и разлет частиц по кулоновскому механизму в качестве возможных процессов в формировании пылевых лунных облаков при падении на Луну метеоритов. Отметим, лунные условия (пониженная гравитация, разлет частиц в вакууме) улучшают условия для разлета частиц по кулоновскому механизму и слабо влияют на развитие вторичных химических процессов.

Заключение. В экспериментах по обработке смесей порошков оксидов и металлов, моделирующих состав реголита, микроволновыми импульсами гиротрона при превышении порога мощности, плотности потока энергии гиротрона 0.07–0.2 кДж/см^2 (при длительности импульса 1.5–8 мс) регистрируется взрывной процесс, вызванный кулоновским расталкиванием заряженных частиц с поверхности порошка в объем реактора.

После взрыва порошка в объеме реактора развиваются цепные реакции высокотемпературного синтеза. Они длятся десятки секунд, в течение которых взвесь пылевых частиц поднимается на десятки сантиметров над поверхностью порошка, образуя облако, заполняющее объем реактора. Выделяющаяся при этом процессе энергия в сотни раз превышает энергию инициации. На боковые поверхности реактора над порошком осаждаются пылинки сферической формы из реголита с диаметрами от 1 до 1000 мкм.

На Луне при падении метеоритов в области столкновения происходит распад молекул в реголите и разлета частиц пыли с поверхности (по механизму кулоновского взрыва), что может инициировать цепные плазмохимические процессы, которые сопровождаются выделением большого количества энергии и продолжаются значительное время. Поэтому физико-химические процессы, наблюдавшиеся в описанных экспериментах, могут рассматриваться в качестве возможных механизмов подъема плазменно-пылевых облаков над лунной поверхностью.

Работа выполнена при поддержке президентского гранта МК-1995.2019.2.

1. Н. Н. Скворцова, Д. В. Малахов, В. Д. Степахин и др. (Collaboration), Письма в ЖЭТФ **106**, 240 (2017).
2. G. M. Batanov, N. K. Berezhetskaya, V. D. Borzosekov et al. (Collaboration), J. Nanoelectron. Optoelectron **8**, 58 (2013).
3. *Comprehensive Chemical Kinetics. Kinetics of Multistep Reactions*, 2-nd ed, ed. by F. G. Helfferich, Elsevier, Amsterdam (2004), v. 40, ch. 10, p. 309.
4. N. N. Skvortsova, N. S. Akhmadullina, G. M. Batanov, V. D. Borzosekov, L. V. Kolik, E. M. Konchekov, N. K. Kharchev, A. A. Letunov, D. V. Malakhov, E. A. Obraztsova, A. E. Petrov, K. A. Sarksian, V. D. Stepakhin, and O. N. Shishilov, EPJ Web of Conferences **149**, 02016 (2017).
5. N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, D. V. Malakhov et al. (Collaboration), Radiophys. Quantum Electron. **58**, 701 (2016).
6. N. S. Akhmadullina, N. N. Skvortsova, E. A. Obraztsova, V. D. Stepakhin, E. M. Konchekov, Yu. F. Kargin, and O. N. Shishilov, J. Phys.: Conf. Ser. **941**, 012034 (2017).
7. J. J. Rennilson and D. R. Criswell, Moon **10**, 121 (1974).
8. O. E. Berg, H. Wolf, and J. Rhee, Lect. Notes Phys. **48**, 233 (1976).
9. К. П. Флоренский, А. Т. Базилевский, О. В. Николаева, *Лунный грунт: свойства и аналоги*, Академия наук СССР, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, М. (1975).
10. O. R. Walton, *Adhesion of Lunar Dust*, Scientific report of NASA CR-2007-214685 (2007), 48 p.
11. Н. Д. Семкин, А. С. Видманов, Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета **40**(2), 164 (2013).
12. Е. А. Лисин, В. П. Тараканов, О. Ф. Петров, С. И. Попель, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **98**, 755 (2013).
13. С. И. Попель, А. П. Голубь, Е. А. Лисин, Ю. Н. Извекова, Б. Атаманюк, Г. Г. Дольников, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, Письма в ЖЭТФ **103**, 641 (2016).
14. С. И. Попель, А. П. Голубь, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, А. А. Бережной, Е. С. Зубко, М. Итен, Р. Лена, С. Спозетти, Ю. И. Великодский, А. А. Терещенко, Б. Атаманюк, Письма в ЖЭТФ **108**, 379 (2018).
15. https://www.youtube.com/watch?v=EDDT84JlFrg.
16. E. H. Cardiff, B. R. Pomeroy, I. S. Banks, and A. Benz, AIP Conference Proceedings **880**, 846 (2007).
17. N. K. Kharchev, G. M. Batanov, L. V. Kolik, D. V. Malakhov, A. Y. Petrov, K. A. Sarksyan, N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, V. I. Belousov, S. A. Malygin, and Y. M. Tai, Rev. Sci. Instrum. **84**, 013507 (2013).
18. N. S. Akhmadullina, N. N. Skvortsova, E. A. Obraztsova, V. D. Stepakhin, E. M. Konchekov, A. A. Letunov, A. A. Konovalov, Yu. F. Kargin, and O. N. Shishilov, Chemical Physics **516**, 63 (2019).
19. T. Antonova, C.-R. Du, A. V. Ivlev, B. M. Annaratone, L.-J. Hou, R. Kompaneets, H. M. Thomas, and G. E. Morfill, Phys. Plasmas **19**, 093709-1 (2012).
20. А. С. Соколов, Д. В. Малахов, Н. Н. Скворцова, Инженерная физика **12**, 03 (2018).
21. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, Наука, М. (1977).