

МИКРОВОЛНОВЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОСАЖДЕНИЮ ЛУННОЙ ПЫЛИ НА ПЛАСТИНЫ МЕТАЛЛОВ

© 2023 г. Н. Н. Скворцова^{a,*}, В. Д. Степахин^a, В. Д. Борзосеков^a, А. А. Сорокин^b,
Д. В. Малахов^a, В. В. Качмар^a, Л. В. Колик^a, Е. М. Конечков^a, Н. Г. Гусейн-заде^a,
Н. С. Ахмадуллина^{a,c}, Е. В. Воронова^a, О. Н. Шишилов^{a,d}

^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^b Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

^c Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

^d МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

*e-mail: mukudori@mail.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 08.11.2022 г.

Принята к публикации 08.11.2022 г.

Представлены экспериментальные результаты по осаждению заряженных частиц, имитирующих левитирующую пыль реголита (пылевую плазму) на Луне, на металлические пластины. Эксперимент основан на аналогии физико-химических процессов, развивающихся в реголите при микроволновом разряде, возбуждаемом излучением мощного гиротрона, в лабораторном эксперименте в порошке реголита (лунной пыли) с процессами, которые происходят на Луне при бомбардировке ее поверхности микрометеоритами. Исследуется воздействие левитирующего облака пыли на пластины из молибдена и тантала. Результаты сравниваются с экспериментом по воздействию пыли на пластины из нержавеющей стали. Показано, что на пластины металлов (размер которых составляет 10 мм × 40 мм) осаждаются частицы пыли в виде сфероидов различной величины. Распределение этих частиц по размерам и химический состав покрытия соответствовал лунному реголиту. Установлено, что на равномерность осаждения пыли возможно повлиять, произведя предварительную обработку пластин металлов с помощью низкотемпературной плазмы прямого пьезоразряда. продемонстрировано, что полученная в лабораторных условиях левитирующая пыль (ансамбли заряженных частиц реголита) может быть использована для имитационных экспериментов для изучения модификации поверхности разных материалов и разработки способов очистки космической техники в условиях лунных экспедиций.

Ключевые слова: лунная пыль, лунный реголит, низкотемпературная плазма, микроволновый (СВЧ) разряд, гиротрон, пьезоразряд, цепные плазмохимические процессы, поверхность, тантал, молибден, модификация поверхности

DOI: 10.31857/S0367292122601394, EDN: BNXXKM

1. ВВЕДЕНИЕ

Более полувека назад автоматическая станция “Луна-9” успешно прилунилась на твердый лунный грунт, покрытый слоем пыли толщиной несколько сантиметров. Тогда же американские астронавты, побывавшие на Луне с миссиями посещения, и наблюдения с автоматических станций обнаружили, что вся ее поверхность покрыта слоем пыли толщиной от сантиметров до метров, а плазменно-пылевые облака распространяются до высоты 260 км [1–4]. Посадка космических ап-

паратов приводила к подъему пыли вверх на десятки метров, а движение астронавтов, луноходов и роверов сопровождали шлейфы заряженных частиц [1, 5]. К настоящему времени, с одной стороны, нет полного объяснения и описания механизмов левитации облаков заряженных частиц над поверхностью Луны, а, с другой стороны, существует необходимость в разработке способов защиты и очистки скафандров и механизмов от осаждаемой пыли. Заряженные микрочастицы облаков повышенными адгезионными свойствами, поэтому могут портить конструкционные мате-

риалы спускаемых космических аппаратов¹ [6–9]. При проектировании оборудования для будущих лунных посадочных модулей необходимо будет вносить поправки в использование космических систем на ее поверхности, учитывая эффекты воздействия на них лунной пыли – от загрязнения поверхности солнечных батарей до уменьшения ресурсов работы деталей трущихся механизмов. В левитирующих пылевых облаках наблюдается уменьшение среднего размера частиц по высоте: от 50–100 мкм вблизи поверхности до 50–100 нм на больших высотах (десятки км). Образцы грунта с поверхности Луны (включающие пыль) привезены на Землю и тщательно изучены. Все образцы систематизированы, каждому присвоен индивидуальный номер, описан их химический состав и размеры частиц, что представлено в виде каталогов [10–13]. Привезенная пыль с поверхности состоит из лунного реголита с негауссовым распределением по размерам. Распределение по размерам и химический состав частиц плазменно-пылевых облаков на больших высотах исследовано не столь подробно.

Очевидно, что облака заряженных частиц влияют по-разному на космическую технику аппарата на разных высотах от поверхности Луны. В настоящей работе приведены плазменные эксперименты для моделирования воздействия пыли на пластины тантала и молибдена вблизи ее поверхности. Микрометеориты непрерывно бомбардируют Луну (соударений с поверхностью метеоритов размером 10^{-5} см и более – порядка 100 м^{-2} в сутки) [14]. Удельная энергия при соударении (импакте) превосходит энергию связи атомов в окислах, которые составляют лунный реголит, приводя к их распаду с выделением кислорода и металла (при высокоэнергетичном импакте в газозово-плазменном облаке температура изменяется от 10 эВ до 0.2 эВ за характерное время 7×10^{-2} с [15]). Разрушение частиц в лунном реголите приводит к выделению из окислов металлов (магния, алюминия, железа и др.) атомов или ионов соответствующих металлов и кислорода, развитию вторичных процессов синтеза. В месте импактов возможно развитие многих физико-химических процессов, приводящих к подъему заряженной пыли: оплавление частиц, полное разрушение, вторичный синтез частиц, разлет заряженных ча-

стиц с поверхности (по кулоновскому механизму) [14, 16, 17]. Рядом с будущим жилым модулем на поверхности Луны может происходить подъем пыли как из-за непрерывной бомбардировки микрометеоритами, так и от деятельности человека.

Для проведения модельных экспериментов по воздействию на материалы лунной космической техники необходимо создание искусственной лунной пыли двух типов: моделирующих пыль на поверхности и больших высотах. Существующие инжекторы заряженных пылевых частиц для испытаний космических материалов, как правило, создаются на базе ускорительной техники. Полученные лабораторные потоки заряженных частиц имеют узкие распределения по размерам (со средними размерами до мкм), и такие потоки микрочастиц не повторяют сложный химический состав лунного реголита [18–21].

Ранее нами был предложен метод создания левитирующих ансамблей заряженных частиц, базирующийся на микроволновом пробое и развитии цепных плазмохимических процессов при разлете поверхностного слоя смеси порошков, повторяющей лунный реголит², под воздействием СВЧ-излучения мощного импульсного гиротрона [22, 23]. Метод основан на аналогии физических (кулоновское расталкивание заряженных частиц) и химических (экзотермические цепные реакции) процессов, развивающихся при бомбардировке микрометеоритами поверхности Луны и при воздействии на реголит микроволнового излучения. Полученное в плазмохимическом реакторе облако заряженной пыли левитирует на высоте до 50 см, осаждаемые частицы повторяют лунный реголит по химическому составу и распределению по размерам. Было предложено использовать левитирующее облако частиц для проведения имитационных экспериментов по воздействию на материалы лунной космической техники, по осаждению частиц на пластины металлов, которые в ней используются [24]. В работе [25] была показана модификация поверхности нержавеющей стали в таком облаке заряженных частиц. Настоящая статья посвящена осаждению частиц реголита на пластины тугоплавких металлов – молибдена и тантала для имитационных экспериментов. Отметим, что полученные пластины с покрытием из частиц реголита могут быть использованы в земных условиях для разработки способов очистки материалов от пыли на Луне.

¹ “.... солнечная панель была откинута. И получилось так, что крышкой солнечной панели он въехал в стенку этого невидимого, ведь камеры смотрели только вперед, кратера. Он черпнул лунный грунт на солнечную панель. А после того, как выбрались, решили эту панель закрыть. Но лунная пыль такая противная, что ее так просто не стряхнешь. За счет запыления солнечной батареи упал зарядный ток, а из-за того, что пыль стряслась на радиатор, нарушился тепловой режим.” О.Г. Ивановский (главный конструктор по лунной тематике НПО им. С.А. Лавочкина, 1965–1976 гг.) [6]

² Искусственно созданная в лаборатории смесь порошков, повторяющая лунный реголит, далее в статье будет называться “реголит”.

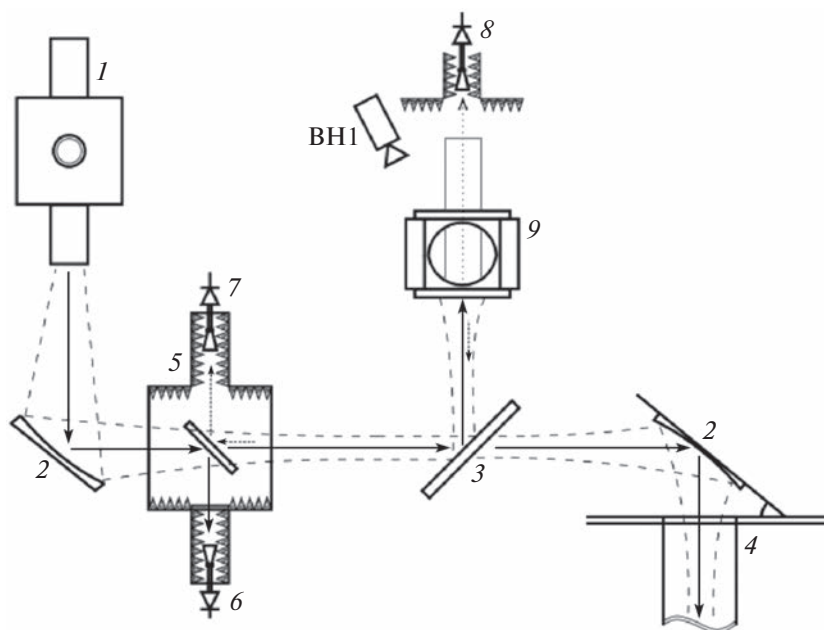


Рис. 1. Плазмохимический стенд: 1 – гиротрон, 2 – фокусирующее зеркало квазиоптического тракта, 3 – плоское зеркало, 4 – СВЧ-калориметр, 5 – квазиоптический СВЧ-ответвитель, 6–8 – детекторы падающего, отраженного и прошедшего излучения СВЧ-диагностики, 9 – плазмохимический реактор, ВН1 – видеокамера.

2. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Имитационные эксперименты по осаждению реголита на пластины металлов проводились на плазмохимическом стенде с использованием микроволнового (СВЧ) излучения гиротрона в отделе физики плазмы ИОФ РАН. Предварительную обработку пластин металлов проводили с помощью низкотемпературной плазмы прямого пьезоразряда.

2.1. Эксперименты с разрядом, инициируемым микроволновым излучением гиротрона в порошке реголита

На рис. 1 представлена схема плазмохимического стенда. Для инициирования плазмохимических процессов в смесях порошков использовался гиротрон с мощностью излучения до 400 кВт, с частотой излучения 75 ГГц. Плазмохимический реактор, микроволновая, спектральные и видеодиагностики подробно описаны в [23, 26].

На рис. 2 приведена схема эксперимента: на подложку реактора 3 насыпался слой порошка реголита 4 толщиной 0.5–0.7 мм, верхняя поверхность которого оставалась свободной (слой не утрамбовывался). Над порошком устанавливались (на высоте 2–4 см) пластины тантала и молибдена 7 в кварцевом держателе 8. Реголит состоял из смеси порошков диэлектриков (% масс): SiO_2 (45.91%) + Al_2O_3 (23.68%) + TiO_2 (0.58%) + FeO (8.06%) + MgO (6.05%) + CaO (15.71%).

Часть окиси магния заменялась на магний (полностью, наполовину или на десятую часть), как было описано при создании ансамблей левитиру-

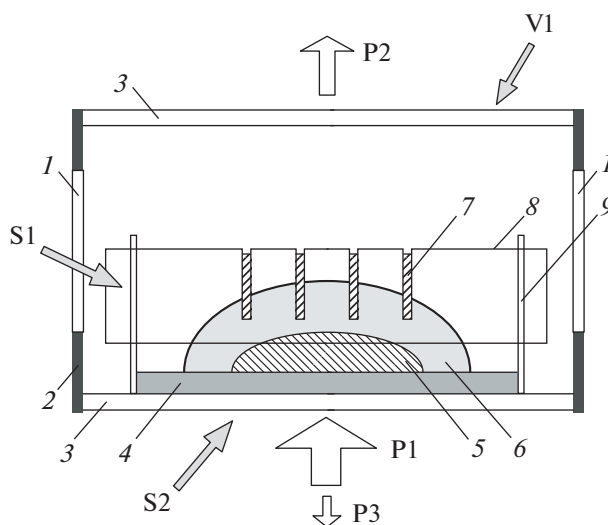


Рис. 2. Схема плазмохимического реактора (9 на рис. 1): 1 – боковое смотровое кварцевое окно, 2 – стенка реактора, 3 – СВЧ-согласованное кварцевое окно, 4 – порошок реголита, 5 – плазменная фаза разряда, 6 – газовая фаза разряда, 7 – пластины металлических образцов (до 4-х штук одновременно), 8 – кварцевый фиксатор образцов, 9 – кварцевая труба $D = 70$ мм, V1 – высокоскоростная камера Fastec Imaging IN250M512, S1/S2 – световоды спектрометров Avantes, P1, P2, P3 – падающее, непоглощенное, отраженное СВЧ-излучение гиротрона (детекторы 6–8 на рис. 1).

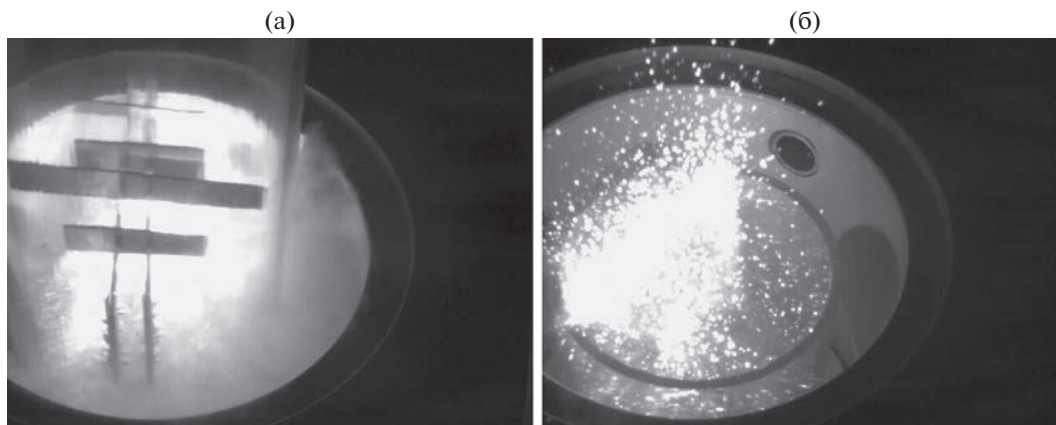


Рис. 3. а) Пластины металла на фоне свечения поверхности реголита при инициации цепного плазмохимического процесса в реакторе. б) Левитирующее облако частиц над реголитом в реакторе (кадр сделан через 28 мс после выключения СВЧ-излучения гиротрона).

ющих частиц в патенте [22]. Распределение частиц исходной смеси порошков по размерам соответствует лунному реголиту, частицы смеси имели неправильную форму с острыми углами [23]. СВЧ-излучение гиротрона подавалось снизу через кварцевое окно на порошок в виде одиночных импульсов с интервалами между импульсами не менее 20 с. Мощность микроволнового излучения гиротрона составляла 150–400 кВт, длительность импульсов до 10 мс.

Энергия микроволнового излучения, необходимая для развития цепных плазмохимических процессов в реакторе и создания левитирующих ансамблей частиц, составляла 1.5–4.5 кДж. На рис. 3а показаны пластины металла при инициации цепного плазмохимического процесса в реакторе. Инициация процесса видна по яркому свечению поверхности порошка. После окончания импульса гиротрона над порошком реголита в объем реактора поднимается облако частиц до высоты 10 см (в нашем случае) и до высоты 50 см в экспериментах с более длинной кварцевой трубкой. Ансамбль левитирующих заряженных частиц фиксируется в реакторе с точностью до долей секунды при помощи быстрой видеокамеры “FastecImaging IN250M512” (длина записи 250 кадров, интервал между кадрами 4 мс, экспозиция 0.2 мс) [27]. На рис. 3б приведен кадр со светящимися частицами в реакторе, зарегистрированный через 28 мс после окончания СВЧ-импульса гиротрона.

В результате протекания процессов в реакторе на пластины металлов, кварцевые держатели пластин и стенки кварцевых цилиндров осаждались вторичные материалы. Микрофотографии и анализ образцов металлов, исходного и осажденного порошка производились на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6390LA с EDS-

детектором (дисперсионно-энергетическим спектрометром) EX-54175JMX. Осажденные частицы повторяют лунный реголит по химическому составу и распределению по размерам, большая часть частиц имеет оплавленную форму (сфероиды).

2.2. Техника подготовки образцов низкотемпературной плазмой прямого пьезоразряда

В реактор устанавливались одновременно 2–4 пластины металла. В экспериментах были использованы прямоугольные пластины с размерами 10 мм × 40 мм и толщиной 0.4 мм. Часть пластин предварительно обрабатывались в течение 1 мин прямым пьезоразрядом. Описание прямого пьезоразряда и параметров низкотемпературной плазмы приведены в патенте и статьях [28, 29]. В результате обработки были получены образцы с модифицированной поверхностью, которую далее можно было использовать для сравнительного анализа. На рис. 4 приведены образцы поверхности тантала и молибдена с элементным составом до и после обработки прямым пьезоразрядом. Для сравнения представлены образцы нержавеющей стали марки 309L (EN ISO 3581) до и после такой обработки [30]. После обработки прямым пьезоразрядом поверхность пластин становится более гладкой, количество шероховатостей и микротрещин уменьшается, становятся видны следы от прокатки и остаются небольшие царапины. Очистка тугоплавких металлов явно происходит хуже, чем очистка нержавеющей стали. Например, на молибдене сохранилась частица углерода. Приведенный элементный состав показывает, что обработка поверхности низкотемпературной плазмой не привела к появлению или исчезновению дополнительных компонент в эле-

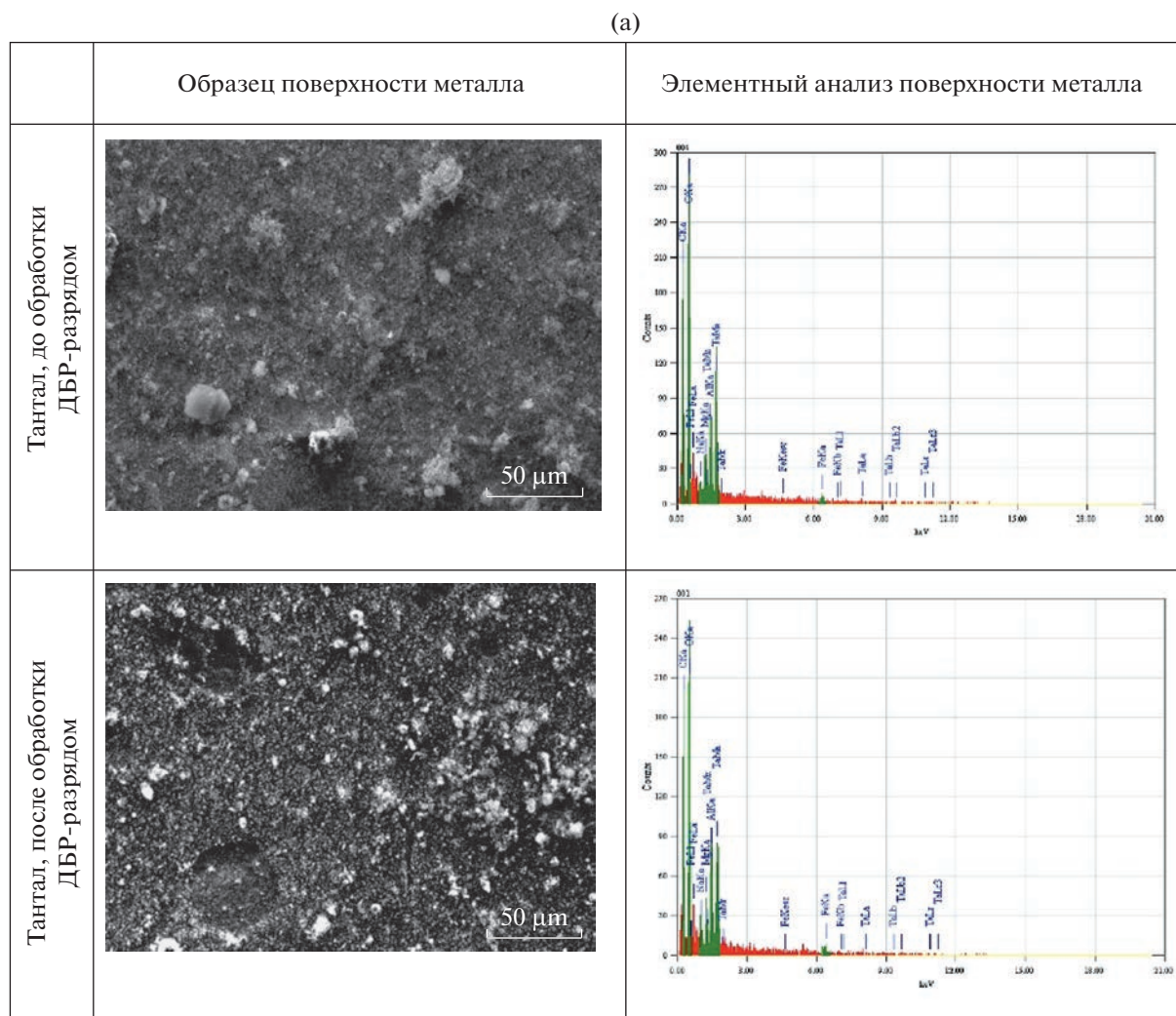


Рис. 4. Образцы поверхности пластин тантала (а), молибдена (б) и нержавеющей стали (в) с элементарным составом до и после обработки прямым пьезоразрядом.

ментном составе пластин нержавеющей стали, молибдена и тантала.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В проведенном эксперименте в реактор устанавливались над реголитом по две пластинки тантала и молибдена: одна обработанная прямым пьезоразрядом, вторая необработанная. В реголите половина окиси магния заменялась на магний, т.е. реголит состоял из смеси порошков диэлектриков (% масс): $\text{SiO}_2(45.91\%) + \text{Al}_2\text{O}_3(23.68\%) + \text{TiO}_2(0.58\%) + \text{FeO}(8.06\%) + \text{MgO}(3.05\%) + \text{CaO}(15.71\%) + \text{Mg}(3\%)$. Эксперименты проводились в воздухе. Энергия СВЧ-излучения гиротрона, необходимая для развития цепных плазмохимических процессов в реакторе и создания левитирующих ансамблей частиц, в данном эксперименте составляла 4 кДж (длитель-

ность импульса гиротрона 10 мс, мощность СВЧ-излучения 400 кВт). Пластины извлекались из реактора после серии из 10 импульсов гиротрона с интервалом между импульсами 20 с. Инициация процессов в реакторе над порошком реголита происходила на 4–6 мс после переднего фронта СВЧ-импульса гиротрона (регистрировалась по появлению свечения на спектрометре S1). Длительность свечения поверхности порошка и плазменно-газовой смеси над порошком достигала 40–80 мс (регистрировалась по сигналу спектрометра S2). Разлет частиц наблюдался видеокамерой V1 в течение 300–500 мс.

В результате протекания в реакторе физико-химических процессов на пластины металлов, кварцевые держатели пластин и стенки кварцевых цилиндров осаждались частицы реголита. Рассмотрим осаждение частиц на пластины тантала и молибдена.

(б)

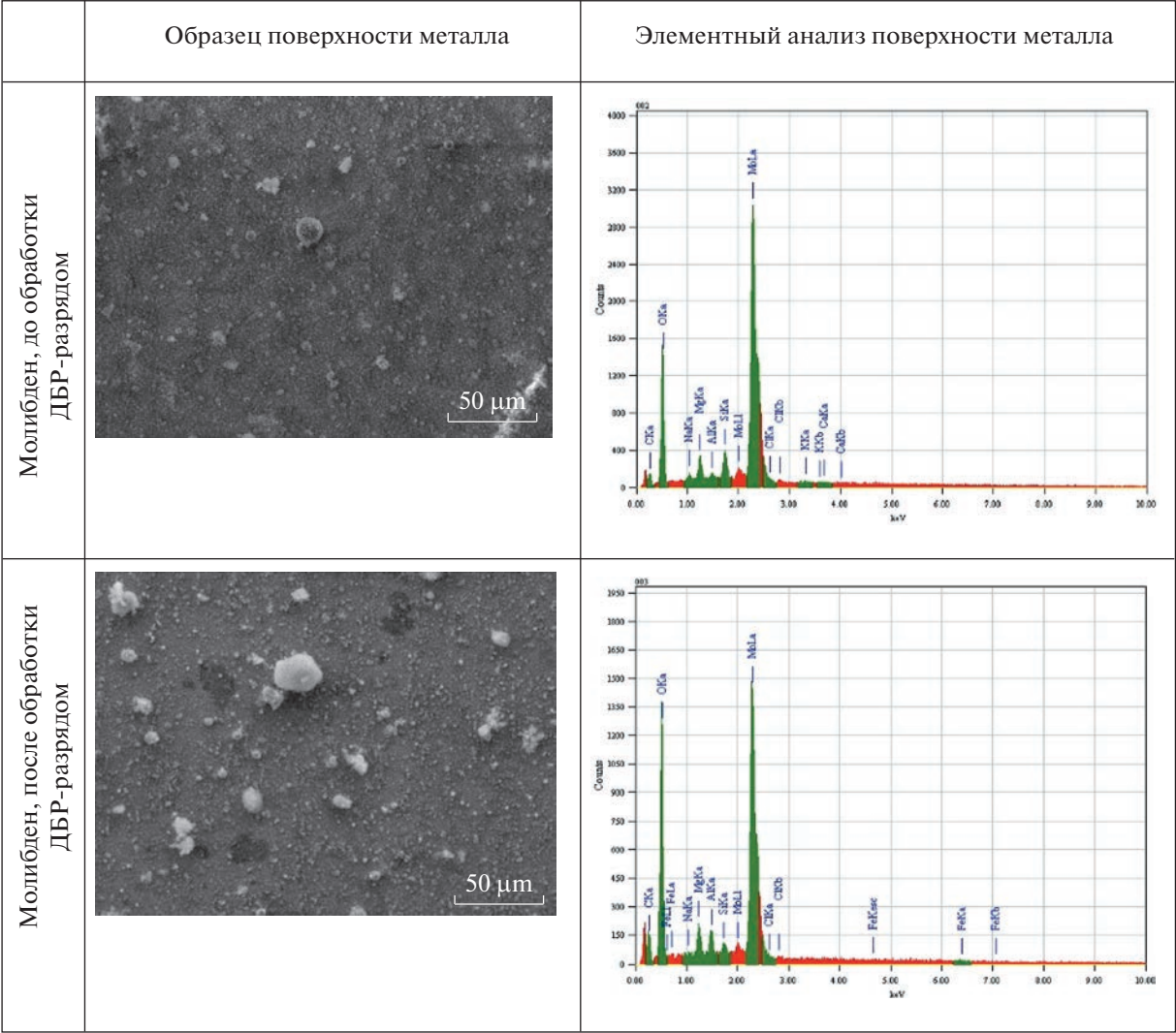


Рис. 4. Продолжение

На рис. 5 приведены фотографии модификации поверхности образцов тантала в трех масштабах: 500 мкм, 100 мкм и 10 (20) мкм. Верхний ряд фотографий представляет образцы с напылением реголитом без предварительной обработки, нижний ряд фотографий – образцы с предварительной обработкой прямым пьезоразрядом. На всех образцах тантала происходит осаждение частиц реголита сферической формы, видно, что плотность (количество) осаждения частиц на необработанные пластины больше, чем на обработанные. Отметим, что вид и размер сфероидов похож на подобные оплавленные частицы, неоднократно обнаруженные в привезенной лунной пыли (см., например, фотографию частицы из лунного образца из Моря Изобилия, приведенную в работе [13], или стеклянный силикатный шарик с

включениями самородного железа из работы [14]).

На рис. 6 приведены фотографии модификации поверхности образцов молибдена в трех масштабах: 500 мкм, 100 мкм и 20 (10) мкм. Верхний ряд фотографий представляет образцы с напылением реголитом без предварительной обработки, нижний ряд фотографий – образцы с предварительной обработкой прямым пьезоразрядом. На всех образцах молибдена происходит осаждение частиц реголита сферической формы, плотность осаждения частиц на необработанные пластины больше, чем на обработанные. На необработанных пластинах молибдена осаждаются частицы большего диаметра [31], кроме сферических частиц присутствуют частицы неправильной формы, которые осаждаются как на пластины, так и на сферические частицы (пример такой частицы,

(В)

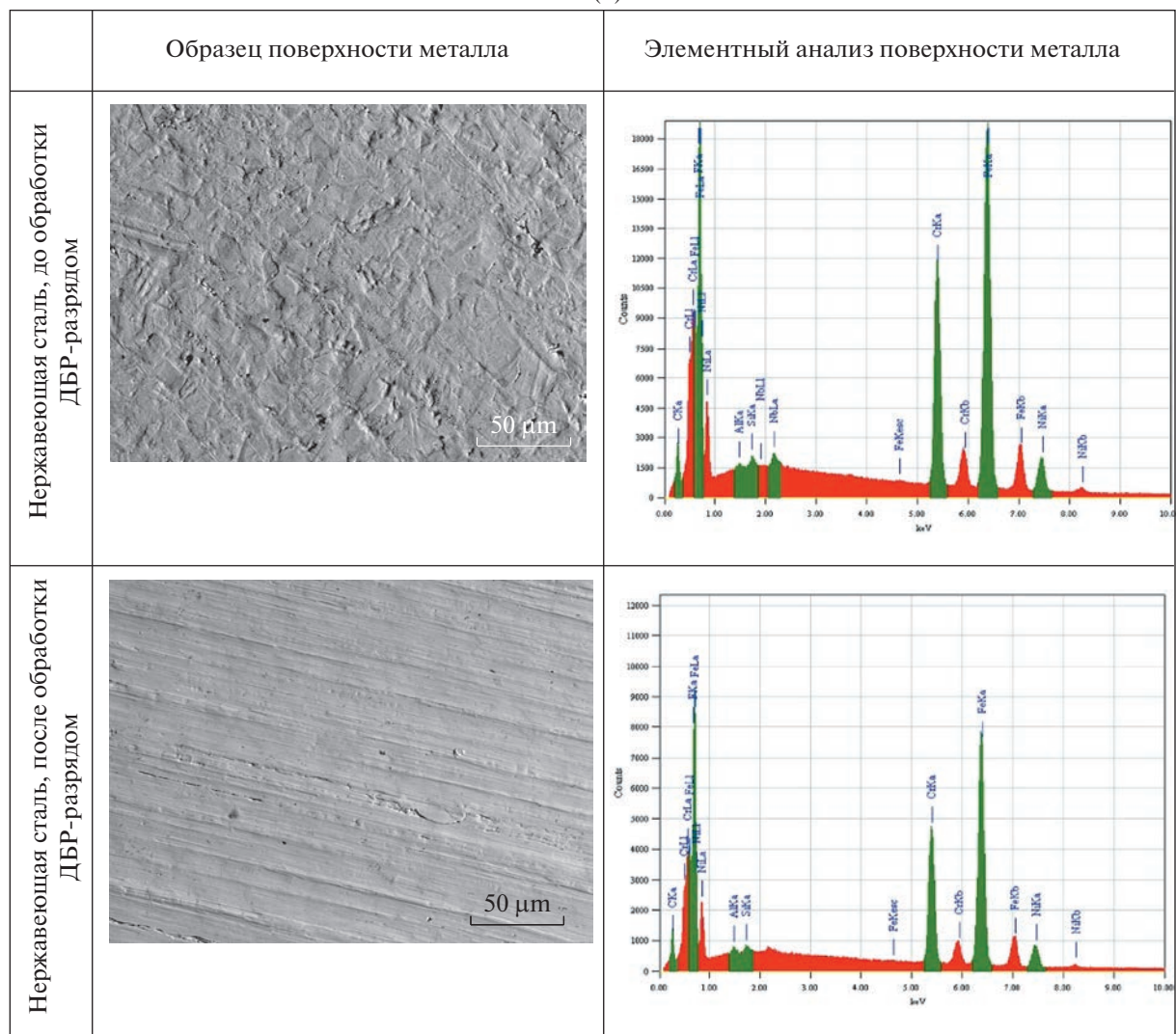


Рис. 4. Окончание

покрытой более мелкими частицами, приведен на правой верхней фотографии).

На всех образцах поверхностей видно преимущественное осаждение на дефектах поверхности пластин. Ранее проведенные эксперименты с пластинами нержавеющей стали показали также роль дефектов при осаждении пыли на поверхность [25]. Чем более гладкая пластина, без шероховатостей и дефектов, тем меньше осаждался реголита и тем меньше размер наиболее крупных сфероидов. Распределения осажденных частиц по размерам на все металлические пластины отличаются от гауссовых, в них присутствует избыточно фракция частиц большого размера [31]. Ранее было показано [32], что в наблюдаемых нестационарных плазмохимических процессах распределения по размерам осажденных частиц реголита на кварцевую трубку также описываются

различными негауссовыми распределениями с “тяжелыми хвостами”, лог-нормальными распределениями (например, модельными распределениями Рида–Йоргенсена, Соренсена и Барндорфа–Нильсена [33]). Такие же лог-распределения по размерам характерны для пыли, покрывающей Луну [34]. Отметим, что эксперименты по осаждению реголита на пластины металлов проводились в ИОФ РАН в Москве, а анализ поверхности образцов осуществлялся в ИПФ РАН в Нижнем Новгороде. Перевозка образцов не влияла на модифицированную поверхность, что говорит о хорошей адгезии реголита на пластины как нержавеющей стали, так и тугоплавких металлов. Пластины с осажденными частицами реголита могут быть использованы для разработки методов очистки поверхностей в земных лабораторных условиях для использования в будущих

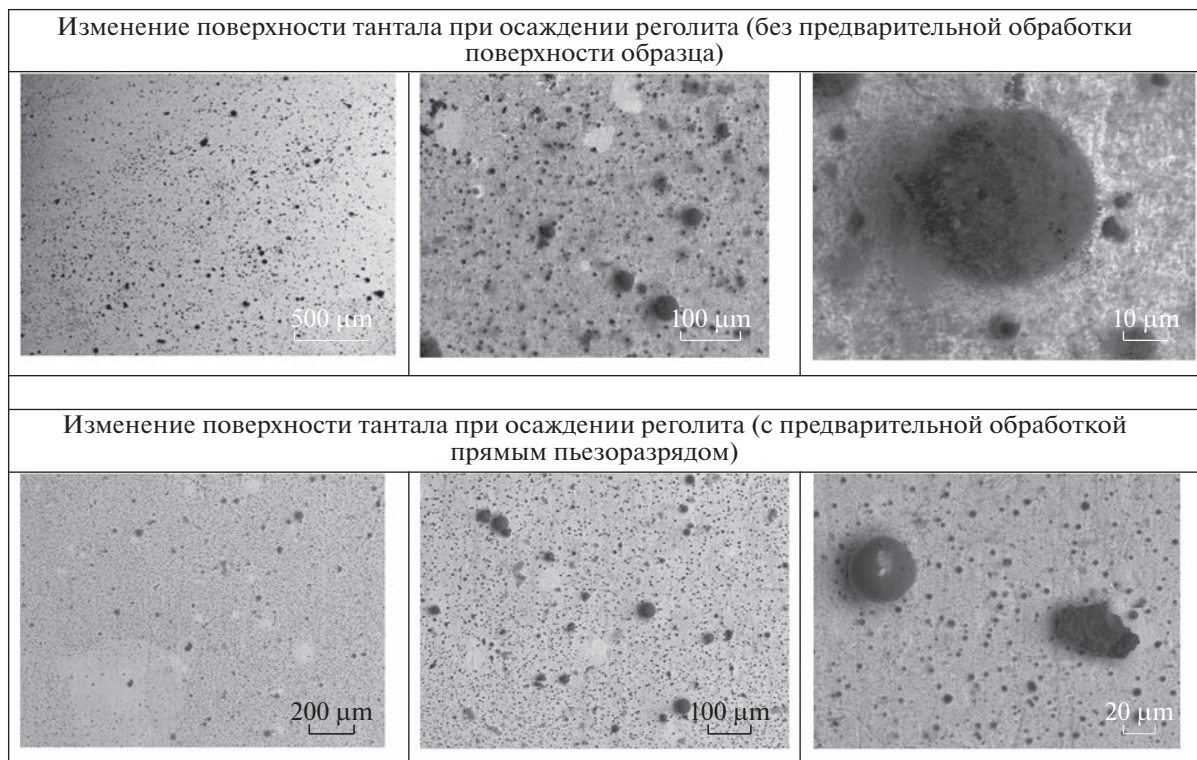


Рис. 5. Фотографии модификации поверхности образцов тантала в трех масштабах: 500 мкм, 100 мкм и 10 (20) мкм. Верхний ряд фотографий представляет образцы с напылением реголитом без предварительной обработки, нижний ряд фотографий – образцы с предварительной обработкой прямым пьезоразрядом.

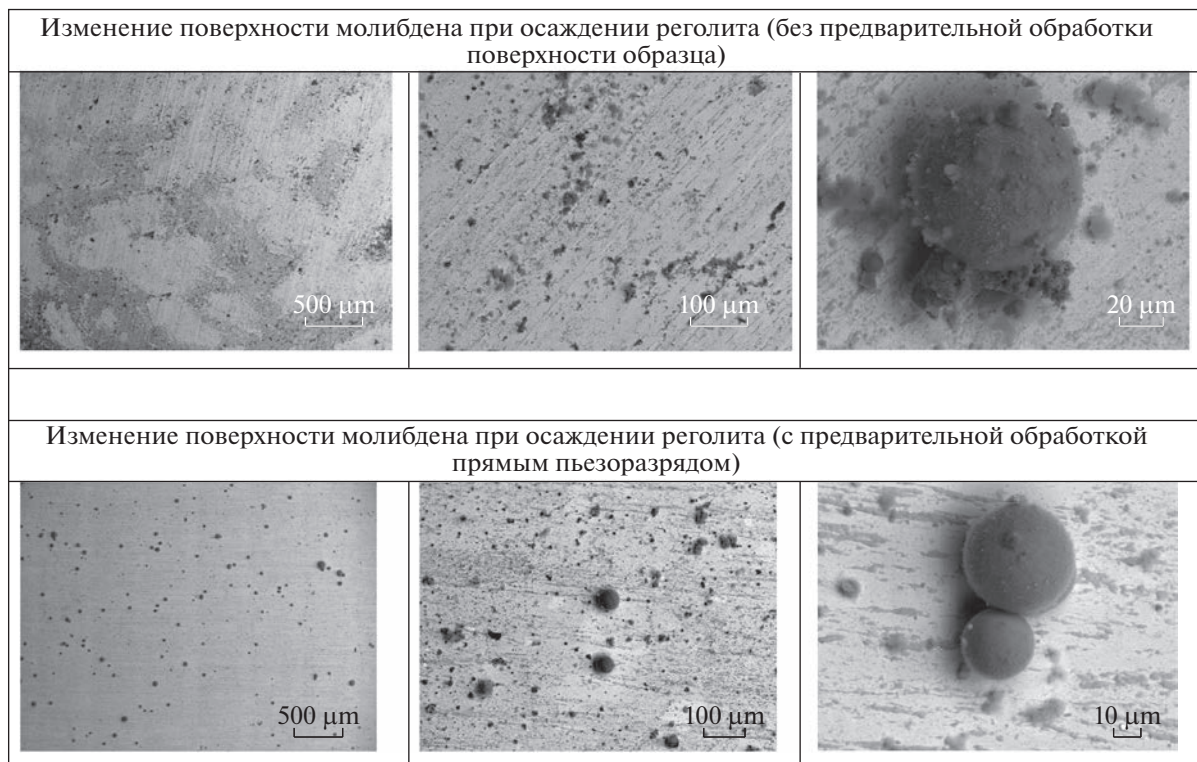


Рис. 6. Фотографии модификации поверхности образцов молибдена в трех масштабах: 500 мкм, 100 мкм и 20 (10) мкм. Верхний ряд фотографий представляет образцы с напылением реголитом без предварительной обработки, нижний ряд фотографий – образцы с предварительной обработкой ДБР-разрядом.

лунных посещениях (задача состоит не столько в исследовании модификации поверхностей, сколько в разработке методик их очистки и восстановления).

Представлены экспериментальные результаты по осаждению заряженных частиц, имитирующих левитирующую пыль (пылевую плазму) на Луне, на пластины тантала и молибдена. Показано, что на пластины осаждаются частицы в виде сфероидов различных размеров, с хорошей адгезией. Распределение частиц по размерам и химический состав покрытия соответствовали лунному реголиту. Размер покрытий поверхности металлов частицами достигал 10 мм × 40 мм. Равномерность (однородность) осаждения частиц реголита на поверхность металлов зависит от предварительной обработки образцов низкотемпературной плазмой прямого пьезоразряда. Полученная в лабораторных условиях левитирующая пыль (ансамбли заряженных частиц реголита) может быть использована для имитационных экспериментов для создания образцов металлов с модифицированной поверхностью для разработки способов ее очистки (в условиях лунных экспедиций) для космической техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1973 год. “Луноход-2” начал работу на Луне [Электронный ресурс] / Роскосмос. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/24543/> (дата обращения 06.06.2022)
- Rennilson J.J., Criswell D.R. Surveyor Observations of Lunar Horizon-Glow. *Moon* 1974, 10, 121.
- Berg O.E., Wolf H., Rhee J. Lunar Soil Movement Registered by the Apollo 17 Cosmic Dust Experiment. In *Interplanetary Dust and Zodiacal Light*; Elsässer H., Fechting H. / Eds. Lecture Notes in Physics; Springer: Berlin. Heidelberg, Germany, 1976. V. 48. P. 233.
- Зеленый Л.М., Попель С.И., Захарова А.В. // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. № 5. С. 441.
- https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/videos (<https://www.youtube.com/watch?v=NRqHubCt-KmE&t=25s>) (дата обращения 09.09.2022).
- Довгань В.Д. Лунная одиссея отечественной космонавтики. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2015. 307 с. <https://ours-nature.ru/lib/b/book/807583493/14> (дата обращения 06.06.2022)
- Lee L.-H. // *J. Adhes. Sci. Technol.* 1995. V. 9. P. 1103.
- Walton O.R. Adhesion of Lunar Dust; Scientific Report of NASA CR-2007-214685; Glenn Research Center: Cleveland, OH, USA, 2007. 48 p. Available online: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070020448/downloads/20070020448.pdf> (accessed on 1 September 2021).
- Захаров А.В., Зеленый Л.М., Попель С.И. Лунная пыль: свойства, потенциальная опасность // *Астрономический вестник*. 2020. Т. 54. № 6. С. 483.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги / Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского. 1975. 50 с.
- Graf J.C. Lunar Soils Grain Size Catalog, Reference Publication 1265, NASA, 1993. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930012474/downloads/19930012474.pdf> (дата обращения 06.06.2022)
- Morris R.V., Score R., Dardano C., Heiken G. Handbook of lunar soils 1983 https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/catalogs/other/lunar_soils_catalog.pdf (дата обращения 06.06.2022)
- Слюта Е.Н. // *Астрономический вестник*. 2014. Т. 48. № 5. С. 358.
- Попель С.И., Голубь А.П., Лусин Е.А. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 103. Вып. 9. С. 641.
- Мохов В., Горностаева Т.А., Карташов П.М., Рыбчук А.П., Богатилов О.А. // *Доклады академии наук*. 2019. Т. 487. № 2. С. 198. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524872198-202>
- Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хорань М. // *Письма в ЖЭТФ*. 2017. Т. 105. Вып. 10. С. 594.
- Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М. // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. № 3. С. 219.
- Семкин Н.Д., Видманов А.С. // *Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та*. 2013. № 2(40). С. 164.
- Сёмкин Н.Д., Калаев М.П., Телегин А.М. // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2011. № 7(31). С. 9–16.
- Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., Пияков И.В. // *Приборы и техника эксперимента*. 2009. № 4. С. 159. <http://naukarus.com/imitatsiya-mikrometeoritov-s-pomoschyu-elektrodinamicheskogo-uskoritelya>
- Пияков А.В. (RU), Воронов К.Е. (RU), Сухачев К.И. (RU), Видманов А.С. (RU), Семкин Н.Д. (RU) Патент RU 2532688 “Инжектор заряженных пылевых частиц” подача заявки: 2013-05-07, публикация патента: 10.11.2014. <https://findpatent.ru/patent/253/2532688.html>
- Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Малахов Д.В., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Образцова Е.А., Соколов А.С., Сорокин А.А., Харчев Н.К., Шишилов О.Н. Патент РФ № 2727958. “Способ получения облака заряженных частиц”. Дата подачи заявки 10 июля 2019 г. Дата публикации 28 июля 2020 г. <https://findpatent.ru/patent/272/2727958.html>
- Skvortsova N.N., Maiorov S.A., Malakhov D.V., Stepakhin V.D., Obraztsova E.A., Kenzhebekova A.I., Shishilov O.N. // *JETP Letters*. 2019. V. 109. № 7. P. 441. <https://doi.org/10.1134/S0021364019070130>
- Mouritz M.A. Introduction to Aerospace Materials. Cambridge: Woodhead Publ., 2012. 621 p.
- Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Sorokin A.A., Malakhov D.V., Gusein-zade N.G., Akhmadullina N.S., Borzosekov V.D., Voronova E.V., Shishilov O.N. // *Materials* 2021. V. 14. 6472. <https://doi.org/10.3390/ma14216472>

26. *Batanov G.M., Borzosekov V.D., Golberg D., Iskhakova L.D., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kharchev N.K., Letunov A.A., Malakhov D.V., Milovich F.O., Obraztsova E.A., Petrov A.E., Ryabikina I.G., Sargsian K.A., Stepankhin V.D., Skvortsova N.N.* // J. Nanophoton. 2016. V. 10. 012520.
27. *Соколов А.С., Малахов Д.В., Скворцова Н.Н.* // Инженерная физика. 2018. № 11. С. 3.
28. *Колік Л.В., Харчев Н.К., Борзосеків В.Д., Малахов Д.В., Кончєков Е.М., Степанін В.Д., Гусєїн-заде Н.Г., Богачев Н.Н.* Патент RU 181459 U1 Генератор низкотемпературної плазми. Дата публікації: 16.07.2018.
29. *Artem'ev K.V., Bogachev N.N., Gusein-zade N.G., Dolmatov T.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Andreev S.E.* // Russian Physics Journal. 2020. V. 62. № 11. P. 2073.
30. *Качмар В.В., Мошкіна К.Г., Борзосеків В.Д., Скворцова Н.Н., Сорокін А.А.* // Прикладная физика и математика. 2021. № 3. С. 11.
<https://doi.org/10.25791/pfim.03.2021.1198>
31. *Kachmar V.V., Moshkina K.G., Borzosekov V.D., Sorokin A.A., Skvortsova N.N.* // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2036. 012030
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2036/1/012030>
32. *Korolev V.Yu., Skvortsova N.N.* // 17th International Workshop "Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation" 2019. P. 32.
33. *Gorshenin A.K., Korolev V.Yu., Zeifman A.I.* // Mathematics 2020. V. 8. 1409.
<https://doi.org/10.3390/math8091409>
34. *Zakharov A.V., Popel S.I., Zelenyi L.M.* // 9th Intern. Conf. Physics Dusty Plasmas (ICPDP 2022). P. 127.