

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА ЧАСТИЦ РЕГОЛИТА В ПЫЛЕВОМ ОБЛАКЕ В РАЗРЯДЕ, ИНИЦИИРОВАННОМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА

© 2024 г. А. С. Соколов*, Т. Э. Гаянова, А. К. Козак, Д. В. Малахов,
И. Р. Нугаев, Д. Е. Харлачев, В. Д. Степахин

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: dmc63@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.11.2023 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята в печать 11.03.2024 г.

В статье предложен новый метод оценки количества частиц в экспериментах по моделированию взаимодействия космической и лунной пыли с поверхностью космических аппаратов. Эксперименты основаны на создании пылевого плазменного облака при воздействии излучения мощного импульсного гиротрона на вещество, имитирующее космическую или лунную пыль. Этот подход был опробован с использованием имитатора лунного реголита. Анализ динамики частиц в пылевых облаках, полученных в результате микроволнового разряда, производится с помощью программы ImageJ.

Ключевые слова: плазма, микроволновый разряд, гиротрон, реголит, ImageJ

DOI: 10.31857/S0004629924040053 **EDN:** KFPXTF

1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевая, или сложная, плазма состоит из нейтральной/ионно-электронной плазмы, содержащей «пыль» — взвешенные заряженные частицы. Пылевая плазма образуется в космосе, а также при различных наземных разрядах, начиная от промышленных применений [1, 2] и заканчивая получением пылевой плазмы в лабораторных условиях для решения разного спектра задач, например, о взаимодействии материалов космических аппаратов с частицами космической пыли и, в частности, лунным реголитом.

Реголит — рыхлая порода, химически состоящая из набора оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , FeO , MgO и TiO_2), покрывающая поверхность Луны слоем 4–15 м [3]. Она состоит из фрагментов горных пород и частиц, средний размер которых составляет 40–100 мкм, сформировавшихся при соударении различных космических объектов с поверхностью Луны. Такое соударение больше всего подходит под определение взрыва, следовательно вызывает разрушение материала упавшего тела. Реакция сопровождается сильным нагревом и сжатием как метеороида, так и породы в месте соударения. В эпицентре взрыва образуется газ высокого давления и появляется кратер, из которого выбрасывается реголит, масса которого может сильно превышать массу упавшего объекта

[4, 5]. Эти частицы реголита приобретают заряд в результате столкновений с ионами и электронами в плазме, заставляя их взаимодействовать друг с другом. Такие заряженные частицы левитируют над поверхностью Луны на высоте до 100 км и имеют крайне высокие адгезионные свойства, что при взаимодействии с космическими аппаратами приводит к снижению их характеристик (от уменьшения ресурсов работы деталей трущихся механизмов до загрязнения поверхности солнечных батарей) вплоть до полного выхода их из строя. При проектировании оборудования для будущих космических аппаратов необходимо будет вносить поправки в конструкцию и используемые для создания космических систем материалы, учитывая эффекты воздействия на них лунной пыли, а значит, существует необходимость исследовать влияние лунной пыли на Земле, перед использованием созданных аппаратов в космическом пространстве.

Существует несколько методов анализа динамики частиц (PIV, PTV, LDV, MTV) [6, 7], которые, в зависимости от поставленной задачи, дают положительный результат, но все они являются весьма дорогостоящими и трудозатратными. Предлагаемый в данной статье метод, при меньших временных и экономических затратах, обеспечивает необходимый для наших исследований уровень.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Используемая технология создания облака заряженных частиц, разработанная отделом физики плазмы ИОФ РАН [8], основана на сходстве между процессами, которые развиваются в лабораторных экспериментах с реголитом, и процессами, которые происходят на Луне во время ее бомбардировки микрометеоритами. Эксперименты проводятся на плазмохимическом стенде с использованием микроволнового излучения мощного импульсного гиротрона. Выходящий гауссов пучок имеет следующие характеристики: частота 75 ГГц, мощность микроволнового излучения до 500 кВт, длительность импульсов до 10 мс. Диаметр СВЧ-пучка в области нахождения смеси порошков составляет 4–5 см. Элементы стенда представлены на рис. 1.

Создание облака заряженных частиц проходит внутри плазмохимического реактора, конструкция которого представляет собой алюминиевый цилиндр с вертикальными и горизонтальными отверстиями [9]. Через нижнее отверстие подается СВЧ-излучение гиротрона. Реактор может работать как при атмосферном давлении (на воздухе), так и в форвакууме, для чего предусмотрено два штуцера — для откачки и впрыска необходимого газа. Внутри реактора устанавливается кварцевый стакан с нужным по составу порошком, в данном случае имитатором лунного реголита. Также в стакан могут

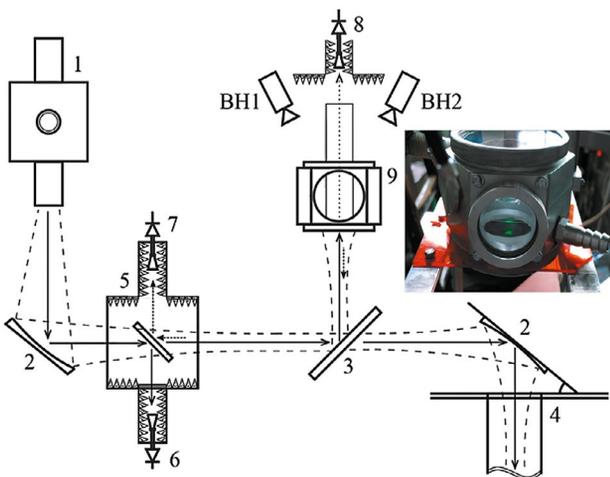


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — гиротрон, 2 — фокусирующие зеркала квазиоптического тракта, 3 — плоское зеркало, 4 — СВЧ-калориметр, 5 — квазиоптический СВЧ-ответвитель, 6/7/8 — СВЧ-детекторы падающего, отраженного и прошедшего излучения, 9 — плазмохимический реактор, ВН1 — промышленная камера, ВН2 — высокоскоростная видеокамера.

устанавливаться держатели для пластин металлов или пластин солнечных батарей.

Для наших экспериментов использовались 2 системы измерений:

1. Высокоскоростная видеосъемка для определения различных стадий разряда: СВЧ-пробоя, развития экзотермических реакций, появления левитирующего облака заряженных частиц в реакторе [10]. При таких измерениях возможна оценка эволюции числа светящихся частиц во времени и расстояний между ними [11].
2. Система спектрометрических измерений [12]. Для наших экспериментов использовался имитатор лунного реголита Exolith LMS-1D (Lunar Mare Simulant — Dust) на минеральной основе, состоящий из SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , FeO , K_2O , MgO , MnO , P_2O_5 , TiO_2 , а размеры частиц лежат в диапазоне 0.04–32 мкм.

3. СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ДИАГНОСТИКИ

В ходе эксперимента регистрировались эмиссионные оптические спектры. Большая часть измерений проводилась спектрометрами Avantes с волоконным входом. На рис. 2, 3 представлены спектры, зарегистрированные на спектрометр Avantes Avaspec-3648-U80 со спектральным диапазоном 371 нм — 920 нм, разрешением 0.36 нм и спектральным размером пикселей 0.15 нм.

В наших условиях мы имеем дело с дипольным излучением связанных в атомах, молекулах и конденсированных телах электронов, чем обусловлена засветка на камере во время действия СВЧ-излучения.

На спектрах, зарегистрированных во время действия СВЧ, распознаются:

- атомарные линии Fe, Ti, Li, Na и K,
- ионы Fe и Ti,
- молекулы AlO, MgO, CaO и MnO.

После окончания действия СВЧ видны лишь немногочисленные линии Fe, Ti, Na, Li и K. Это обусловлено тем, что титан и железо обладают очень частыми линейчатыми спектрами, в которых очень много ярких (интенсивных) линий. А интенсивные самообращенные резонансные дублеты щелочных металлов — натрия, калия и, реже, лития — сопровождают свечение начиная с первичного пробоя в течение нескольких десятков (но не многих десятков) миллисекунд на уровне, до-

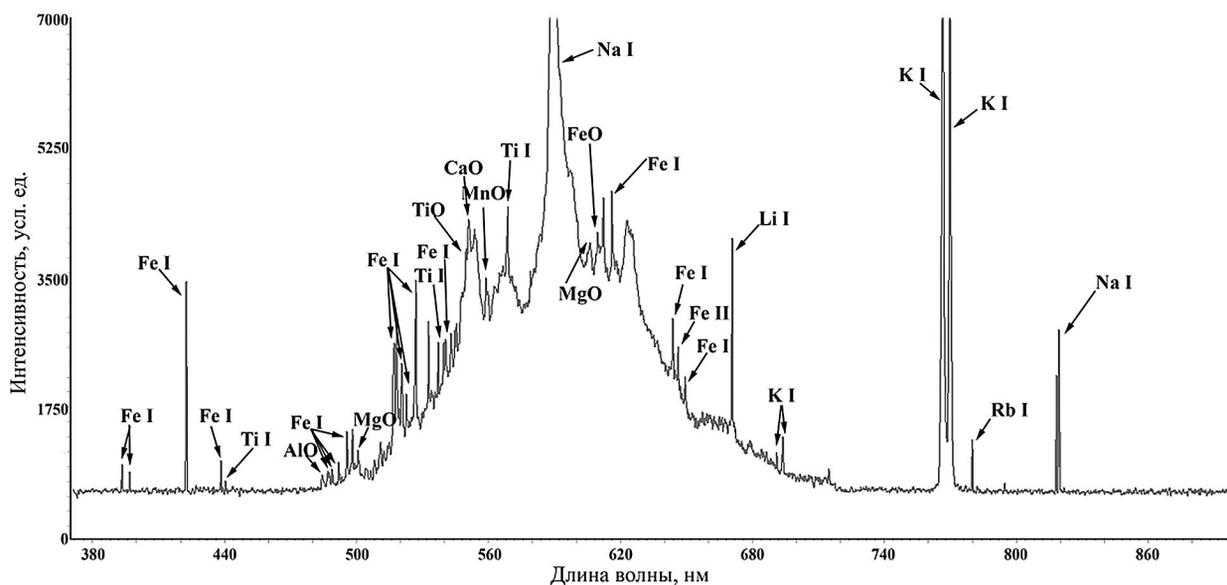


Рис. 2. Полученные спектры для смеси LMS-1D + 10% Fe в атмосфере аргона (мощность импульса — 400 кВт, длительность импульса — 6 мс).

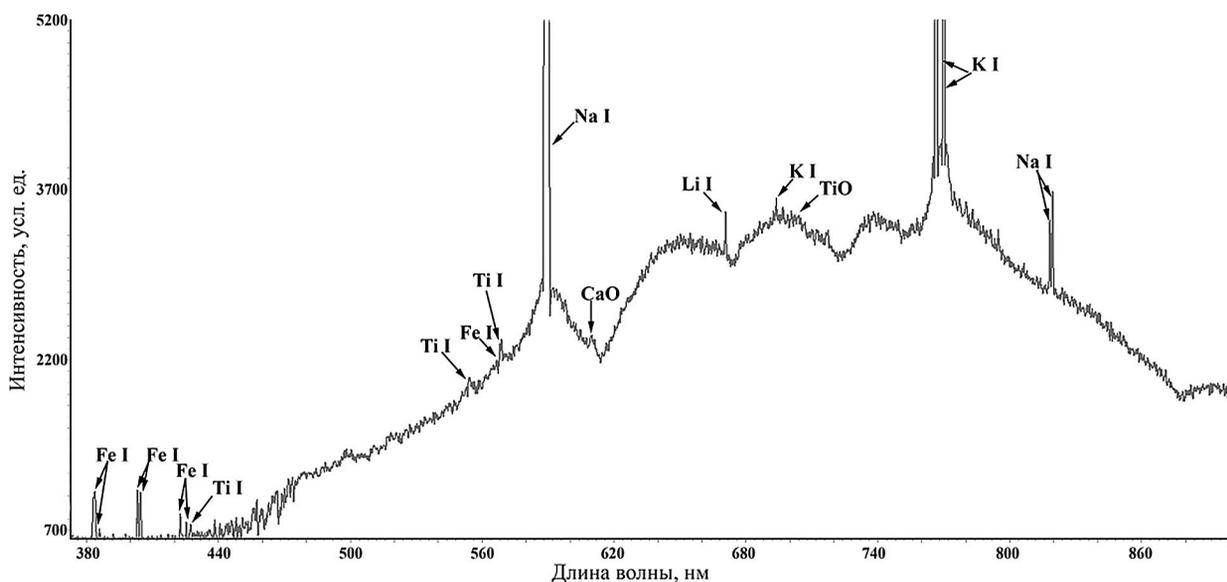


Рис. 3. Полученные спектры для смеси LMS-1D + 10% Mg в атмосфере аргона (мощность импульса — 400 кВт, длительность импульса — 6 мс).

статочном для регистрации нашими спектральными приборами. Соответственно, можно сказать, что практически все время своего «активного» существования наши «объекты» погружены в облако легко возбуждаемых щелочных атомов малой плотности.

Но в то же время именно в эти моменты отчетливо виден континуум, который необходим для определения температуры поверхности реголита. И с помощью методики, описанной выше, возможно определить момент времени, когда свечение

пылевого облака заканчивается, и рассчитать температуру поверхности порошка непосредственно сразу после того, как исчезнут «помехи». Это необходимо для корректного выставления задержки работы спектрометра, связанного с тем, что экспозиция и «мертвое время» у наших аппаратов порядка 1–2 мс, которые не позволяют точно попасть в нужный момент времени.

Температуры поверхности порошка, рассчитанные по уже известной методике [13], достигали 2500 К после окончания действия СВЧ-излучения.

Почти во всех импульсах было идентифицировано несколько наборов линий, пригодных для определения электронной температуры, учитывая характеристики наших приборов. Расчеты проведены исходя из соотношения:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right),$$

где I_1, I_2 — интенсивности линий, A_1, A_2 — вероятности переходов, g_1, g_2 — степени вырождения верхних уровней, λ_1, λ_2 — длины волн линий, E_1, E_2 — энергии верхних уровней, k — постоянная Больцмана, T — электронная температура.

В большинстве разрядов с реголитом LMS-1D электронные температуры достигали 5000 К. При этом на стадии распада плазмы температура была порядка 3500 К.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗЛЕТА И КОЛИЧЕСТВА ЧАСТИЦ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

На рис. 4 приведена раскадровка видео с камеры PHANTOM VEO 710L. На серии кадров хорошо видно облако светящихся частиц, которое наблюдается в реакторе значительно дольше длительности импульса гиротрона. Свечение частиц обусловлено высокой температурой их поверхности из-за протекающих на них экзотермических реакций.

При окончании экзотермических процессов происходит остывание газовой-плазменной фракции в реакторе, и частицы перестают светиться, а значит, и регистрироваться.

Обработка кадров, полученных с помощью скоростной камеры PHANTOM VEO 710L, осуществляется с помощью программы ImageJ [14].

В момент СВЧ-пробоя смеси порошков происходит засветка кадра, которая не позволяет определить местоположение и количество частиц. Поэтому время начала отсчета динамики движения частиц и их количества начинается после нескольких засвеченных кадров.

Для определения количества частиц и построения их треков необходимо качественно отделить фон от объектов. В данном случае выделение контуров на изображении является традиционным средством для качественной сегментации изображения. Сегментация разделяет изображение на составляющие части и отделяет объект от фона, чтобы можно было легко обрабатывать изображение и идентифицировать его содержимое. Алгоритмы сегментации изображений чаще всего базируются на разрыве и подобии значений на изображении.

Подход разрывов яркости для определения границ отдельных объектов основан на резких изменениях значений интенсивности. Разрывы яркости — это резкие изменения в группе пикселей,

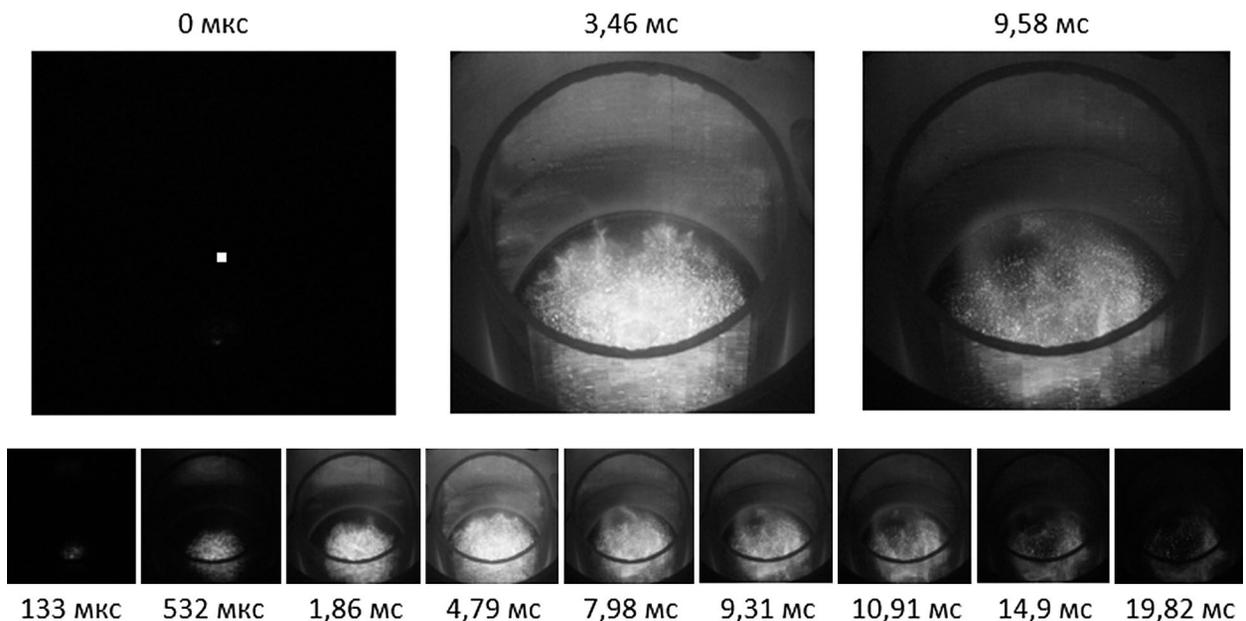


Рис. 4. Облако светящихся частиц для смеси реголит LMS-1D + 10% Mg в атмосфере аргона (мощность импульса — 400 кВт, длительность импульса — 6 мс).

которые являются границами объектов. Классический алгоритм обнаружения границ задействует свертку изображения с помощью оператора, который основывается на чувствительности к большим перепадам яркости на изображении, а при проходе однородных участков возвращает ноль. Главной особенностью техники обнаружения границ является возможность извлечь точную линию.

По результатам работы мы получаем кадры, на которых взвешенные в объеме реактора частицы представлены в виде эллипсов (границ светящихся частиц с исходных кадров), см. рис. 5, 6. Программа

предоставляет возможность вручную отфильтровать области, ошибочно принятые за частицы, а также расставить дополнительные метки в местах, где взвешенные частицы были проигнорированы алгоритмом.

На рис. 7 и 8 представлена динамика изменения числа наблюдаемых в реакторе частиц для смесей порошков LMS-1D + Fe 10% и LMS-1D + Mg 10% для импульсов мощностью 300 кВт и длительностью 6 мс (рис. 7) и для импульса мощностью 400 кВт и длительностью 6 мс (рис. 8).



Рис. 5. Аппроксимированные программой частицы, левитирующие в объеме реактора для смеси LMS-1D + 10% Fe в атмосфере аргона (мощность импульса — 400 кВт, длительность импульса — 6 мс).



Рис. 6. Аппроксимированные программой частицы, левитирующие в объеме реактора для смеси LMS-1D + 10% Mg в атмосфере аргона (мощность импульса — 400 кВт, длительность импульса — 6 мс).

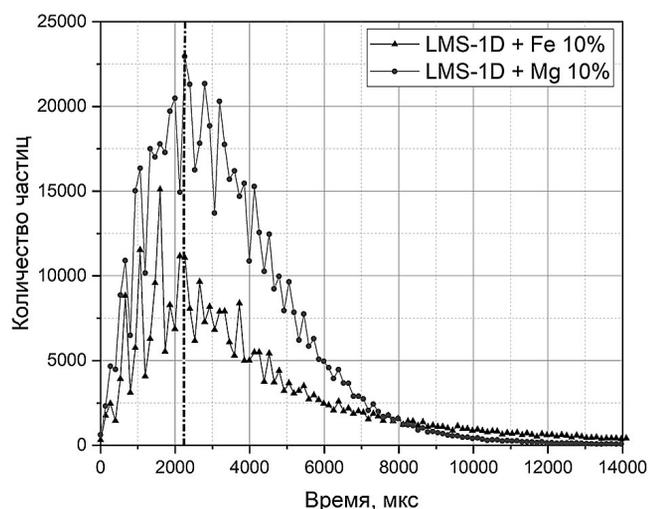


Рис. 7. Динамика изменения количества наблюдаемых частиц в смесях LMS-1D + Fe 10% и LMS-1D + Mg 10% для мощности импульса 300 кВт, длительности — 6 мс.

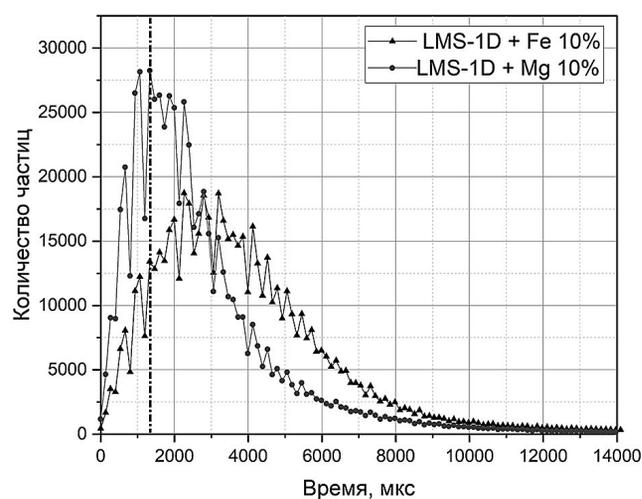


Рис. 8. Динамика изменения количества наблюдаемых частиц для смесей LMS-1D + Fe 10% и LMS-1D + Mg 10% для мощности импульса 400 кВт, длительности — 6 мс.

Исходя из того, что средний размер частицы реголита 20 мкм, верхний слой порошка имеет порядка 10^6 частиц. По нашим оценкам, светящиеся частицы составляют до 1.5% от общего количества частиц, но в то же время существуют частицы, которые взлетают, но не светятся, и их наш алгоритм не учитывает.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена автоматизированная методика подсчета частиц реголита в пылевом облаке, позволяющая оценить количество светящихся частиц, взвешенных в объеме плазмохимического реактора, в следствии микроволнового пробоя, инициированного излучением мощного импульсного гиротрона.

Описанный метод не лишен недостатков, например, методика не обеспечивает приемлемого подсчета частиц в объеме реактора при интенсивной засветке камеры в момент микроволнового пробоя. Частично это может быть решено установкой фильтров на объектив камеры, но в этом случае исчезает возможность наблюдения стадий послесвечения по окончании пробоя, так как яркости свечения частиц после пробоя недостаточно для наблюдения их через фильтр.

Кроме того, установка может быть улучшена путем добавления системы лазерной подсветки частиц в реакторе для наблюдения и подсчета частиц, которые по тем или иным причинам не обладают достаточным уровнем светимости или она отсутствует вовсе.

Полученные результаты планируется использовать в имитационных экспериментах по осаждению заряженных частиц реголита на солнечные панели космических аппаратов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Эксперименты по созданию левитирующих облаков заряженных частиц реголита проведены за счет средств проекта РФФ № 23-79-01078.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторский состав выражает благодарность д.ф.-м.н. Н.Н. Скворцовой, к.ф.-м.н. В.Д. Борзосекову и всему научному коллективу, принимающему участие в экспериментах по плазмохимическому синтезу, за помощь в проведении исследований. Кроме того, авторский состав выражает благодарность Программе 10 Экспериментальная

лабораторная астрофизика и геофизика НЦФМ за экспертную оценку научной проблемы представляемой работы и организацию совместной исследовательской деятельности в области астро- и геофизики широкого круга специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. E. Gayanova, E. V. Voronova, S. V. Kuznetsov, E. A. Obraztsova, N.N. Skvortsova, A. S. Sokolov, I. R. Nugaev and V.D. Stepakhin, High Energy Chem. 57, 1, 53 (2023).
2. N. S. Akhmadullina, N. N. Skvortsova, E. A. Obraztsova, V. D. Stepakhin et al., Chem. Phys. 516, 63 (2019).
3. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, A. P. Golub and A. Yu. Dubinskii, Planet. Space Sci. 156, 71 (2018).
4. И. А. Кузнецов, А. В. Захаров, Л. М. Зеленый, С. И. Попель и др., Астрон. журн. 100, 1, 41 (2023).
5. S. I. Popel, A. P. Golub', A. V. Zakharov, and L. M. Zelenyi, Plasma Phys. Rep. 46 (3), 265 (2020).
6. J. Williams, Journal of Plasma Physics 82(03) (2016).
7. Y. Zeng, Zh. Ma, Y. Feng, Review of Scientific Instruments, 93 (3) (2022).
8. Н. Н. Скворцова, В. Д. Степахин, Д. В. Малахов, Л. В. Колик, Е. М. Кончечков, Е. А. Образцова, А. С. Соколов, А. А. Сорокин, Н. К. Харчев и О. Н. Шишилов, Патент №2727958 Российская Федерация, рег. 28 июля 2020 г.
9. Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, В. Д. Борзосеков, Л. В. Колики др., Успехи прикладной физики 1, 5, 564 (2013).
10. А. С. Соколов, Д. В. Малахов и Н.Н. Скворцова, Инженерная физика 11, 3 (2018).
11. М. В. Тригуб, Д. В. Малахов, В. Д. Степахин, Г. С. Евтушенко, Д. А. Балабанов и Н. Н. Скворцова, Оптика атмосферы и океана 33, 3, 199 (2020).
12. А. А. Летунов, Н. Н. Скворцова, И. Г. Рябкина, Г. М. Батанов, и др., Инженерная физика 10, 36 (2013).
13. E.V. Voronova, A. V. Knyazev, A. A. Letunov, V. P. Logvinenko, N. N. Skvortsova, and V. D. Stepakhin, Physics of Atomic Nuclei. 84, 1761 (2021).
14. ImageJ Independent Platform, <https://imagej.nih.gov/ij/>

**A METHOD FOR ESTIMATING
THE NUMBER OF REGOLITH PARTICLES IN A DUST CLOUD
IN A DISCHARGE INITIATED BY GYROTRON RADIATION**

**A. S. Sokolov*, T. E. Gayanova, A. K. Kozak, D. V. Malakhov,
I. R. Nugaev, D. E. Kharlachev, V. D. Stepakhin**

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

**E-mail: dmc63@yandex.ru*

The article proposes a new method for estimating the number of particles in experiments on modeling the interaction of cosmic and lunar dust with the surface of spacecraft. The experiments are based on the creation of a dusty plasma cloud, when exposed to radiation from a powerful pulsed gyrotron on a substance simulating cosmic or lunar dust. This approach was tested using a lunar regolith simulator. The dynamics of particles in dust clouds obtained as a result of microwave discharge is analyzed using the ImageJ program.

Keywords: plasma, microwave discharge, gyrotron, regolith, ImageJ