

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА АКТИВАЦИЮ ИМИТАТОРОВ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ РЕГОЛИТА БЕЗАТМОСФЕРНЫХ ТЕЛ

© 2024 г. И. А. Кузнецов^{1,*}, И. А. Шашкова¹, А. Н. Ляш¹, А. Ю. Поройков²,
С. А. Бедняков^{1,3}, Е. В. Кронрод^{4,5}, Г. Г. Дольников¹, А. Е. Дубов¹, О. Н. Вошан¹,
М. Э. Абделаал^{1,6}, С. И. Попель¹, Т. И. Морозова¹, А. А. Карташева¹,
П. В. Столяренко⁷, Я. Тянь², А. В. Захаров¹, Л. М. Зеленый¹

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

⁴Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия

⁵Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁶Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁷Факультет космических исследований, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Россия

*E-mail: kia@cosmos.ru

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята в печать 11.03.2024 г.

Начиная с первых автоматических миссий к Луне, была зарегистрирована активность пылевых частиц безатмосферных тел. С тех пор проведено множество теоретических и экспериментальных исследований этого эффекта, однако в настоящее время нет четкого понимания роли внешних воздействий на динамику этого явления. В данной работе представлены результаты экспериментов по определению влияния жесткого УФ-излучения на активность пылевых частиц. Показано, что оно вносит значительный вклад в динамику частиц. Результаты определения условий отрыва частиц от поверхности находятся в соответствии с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: космическая пыль, пылевая плазма, пылевые частицы, экспериментальное моделирование, космические исследования

DOI: 10.31857/S0004629924040044 EDN: KFTKXO

1. ВВЕДЕНИЕ

С начала изучения космического пространства в целом и окололунного пространства в частности возник большой интерес к проявлениям плазменно-пылевой динамики безатмосферных тел [1]. Так, например, автоматические лунные аппараты и астронавты миссий «Аполлон» засвидетельствовали эффекты, связанные с лунной пылью вблизи лунной поверхности — так называемые «Lunar horizon glow» и «Lunar dusty fountains» [2, 3, 4]. В ходе пилотируемых миссий обнаружилось весьма негативное влияние пыли и лунного реголита на технику и аппаратуру в процессе исследования Луны астронавтами [5].

Существует ряд теоретических исследований, предполагающих степень «населенности» окололунного пространства частицами пыли в зависимости от различных внешних и локальных условий. Такие исследования показывают возможные механизмы отрыва частиц и перемещения их над лунной поверхностью, а также дают оценки возможной концентрации пылевых частиц порядка $n_d 10^{-3} \text{ см}^{-3}$, где n_d составляет несколько единиц [6].

Наиболее эффективный метод исследований физических процессов в космосе — это прямые исследования тел и связанных с ними физических процессов *in situ*. Именно исследования автоматическими космическими аппаратами позволило полу-

чить современные представления о телах Солнечной системы и физических процессах в различных областях и средах при различных условиях космического пространства. Однако по очевидным причинам возможности космических исследований ограничены, и большое значение имеют методы исследований, основанные на лабораторных экспериментах, численном, аналитическом моделировании физических процессов.

В последние десятилетия проводится активная работа, направленная на изучение плазменно-пылевых структур и динамики пылевых частиц под различными внешними условиями при помощи лабораторных методов и методов численного моделирования [7–20]. Активизацию исследований в этом направлении можно связать с тремя основными факторами: вновь возникший интерес к изучению Луны, в том числе при помощи планируемых пилотируемых миссий, качественное улучшение характеристик технических средств (вычислительной мощности, разрешения цифровых оптических сенсоров, доступность), а также возрастающий интерес к исследованиям свойств пылевой плазмы. Таким образом, для проверки наблюдаемых явлений и гипотез были созданы экспериментальные установки, стенды и лаборатории, направленные на изучение различных свойств пыли и пылевой плазмы при различных условиях — в том числе в космическом пространстве.

Надо отметить, что отличие силы гравитации безатмосферных космических тел и Земли может быть значительным, что необходимо учитывать при проведении экспериментов. Процесс обезвешивания пылевых частиц размерами до 100 мкм сложно смоделировать в лабораторных условиях, однако при решении обратной экспериментальной задачи с увеличением разности потенциалов электродов, между которыми располагаются пылевые частицы, в условиях лабораторного вакуума модельные эксперименты можно масштабировать с учетом различия гравитации.

Исследования, посвященные динамике пылевых частиц безатмосферных тел, импактным процессам и плазменно-пылевой динамике, проводятся в лаборатории Dust Accelerator Laboratory (DAL, Колорадо, США), являющейся частью виртуального института IMPACT (The Institute for Modeling Plasma, Atmospheres, and Cosmic Dust (IMPACT) [15].

В институте IMPACT созданы экспериментальные установки, на которых активно ведутся работы по лабораторному моделированию разреженной плазмы, схожей с экзосферной плазмой

безатмосферных тел по параметрам и по развитию методов ее детектирования [14, 21]. Значимая часть работ группы также посвящена лабораторным исследованиям, имитирующим воздействие внешних факторов космического пространства на реголит безатмосферных тел [22].

Исследованием механизмов отрыва пылевых частиц от поверхности при помощи экспериментальных методов занимаются также группы из Kyushu Institute of Technology (Япония) и ONERA (Франция). Исследования предполагают определение факторов и их пороговых значений, при которых возможна активация пыли при различных ее характеристиках. Например, в недавних работах японской группы [18, 23] было показано, что плотность упаковки частиц реголита и количество полостей в реголите значительно влияют на интенсивность отрыва частиц от поверхности при воздействии пучком электронов. Группа из ONERA проводила эксперименты по активации пылевых частиц при помощи жесткого УФ излучения и электрического поля [24]. Главными результатами таких экспериментов является приближение к пониманию роли внешних воздействий в активации и поддержании плазменно-пылевой динамики.

В недавней работе авторов из КНР приводятся результаты экспериментов по электростатической левитации частиц лунного реголита, доставленного миссией ЧаньЭ-5 [17]. В работе определены параметры электростатического поля, достаточные для активации (левитации) частиц настоящего лунного реголита.

В данной работе представлено описание экспериментальной установки и методика проведения экспериментов. В разделе 4 приведены результаты экспериментального исследования отрыва частиц от поверхности и дальнейшего их перемещения под воздействием электрических полей и ультрафиолета UV-C диапазона в зависимости от гранулометрических и морфологических свойств частиц.

В обсуждениях результатов эксперимента приведено сравнение полученных результатов с теоретическими ожиданиями для левитирующих частиц безатмосферных тел.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Исследования активации частиц-имитаторов пылевого компонента безатмосферных тел были выполнены на экспериментальной установке ИКИ РАН, схема установки представлена на рис. 1.

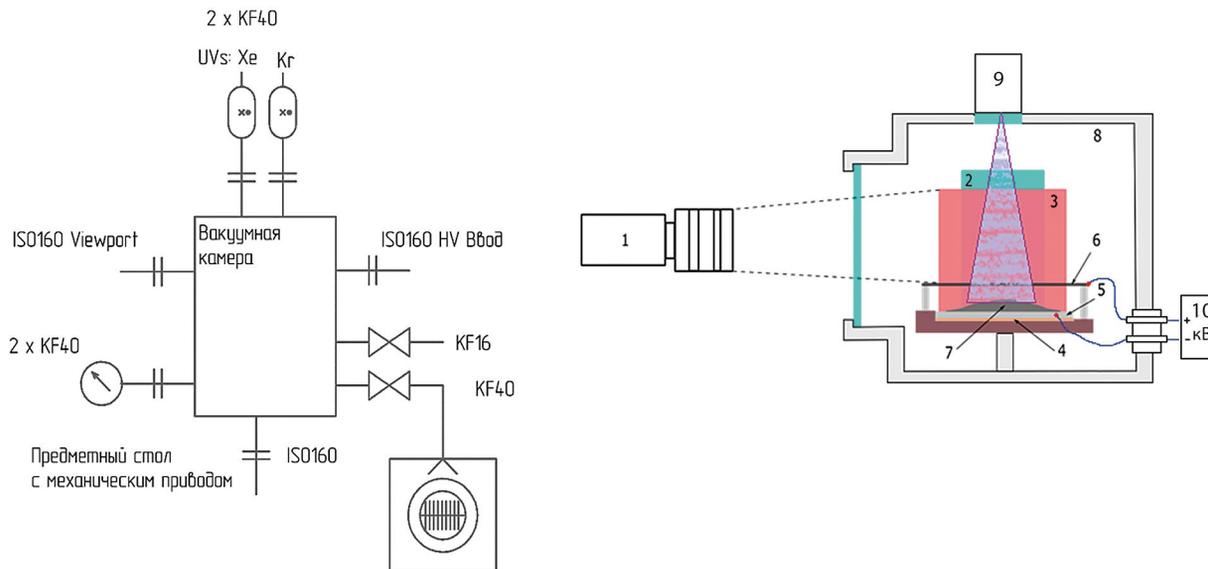


Рис. 1. Схема вакуумной установки (слева), схема эксперимента по исследованию левитации частиц пыли (справа). Обозначения: 1 — КМОП-камеры, 2 — зеркало, 3 — расширенный лазерный луч, 4 — непроводящая подложка, 5 — проводящая подложка, 6 — стальная сетка, 7 — частицы пыли, 8 — вакуумная камера; 9 — источник УФ-излучения; 10 — источник напряжения.

С боковой стороны камеры располагается фланец, предназначенный для системы регистрации процессов левитации пылевых частиц, с оптическим окном и типоразмером ISO160. Напротив оптического фланца располагается фланец с высоковольтным вакуумным вводом, способным вводить напряжение до 30 кВ. Сверху над образцами располагался источник УФ-излучения. Характеристики экспериментальной установки приведены в табл. 1. Данная установка создавалась в ИКИ РАН для экспериментальной работы по наблюдению динамики пылевых частиц безатмосферных тел. Подробное описание работы систем регистрации пылевых частиц приведено в работе [25].

В качестве пылевых частиц применялся образец, имитирующий поверхностный слой реголита в виде

набора микрочастиц с известными физическими характеристиками. Исследуемый образец помещается на предметный стол на уровне оптического фланца. Высота расположения образцов может быть адаптирована при необходимости при помощи подъемного механизма с механическим приводом.

Для исследования процессов активации пылевых частиц и их динамики в зависимости от электрических свойств и морфологии этих частиц применялся метод визуализации треков частиц с помощью стереопары видеокамер машинного зрения с последующим расчетом трехмерных траекторий движения частиц, оценки их скоростей и зарядов.

На рис. 2 представлены выполненные под микроскопом фотографии частиц, применявшихся в

Таблица 1. Характеристики экспериментальной установки

Размеры	280×540 мм, фланец \varnothing 150 мм
Полезный (полный) объем, м ³	0.0018 (0.0132)
Давление, торр	От $5 \cdot 10^{-5}$
Стереопара из двух видеокамер для регистрации динамики частиц	Baumer VCXG-24M, моно, 1/1.2" CMOS, 1920×1200, 39 к/с, IMX249, GigE Vision
Лазерная подсветка	532 нм, 300 мВт
Потенциал подложки, кВ	2.5–12
Источник УФ излучения	Ag: 126 нм; Kr: 146 нм; Xe: 172 нм, мощность порядка 10 мВт/см ²
Источник электронов	ток $I_a \leq 4.4$ мкА, $n \leq 1.6 \cdot 10^7$ м ⁻³ , $T_e \leq 4.4 \cdot 10^5$ К

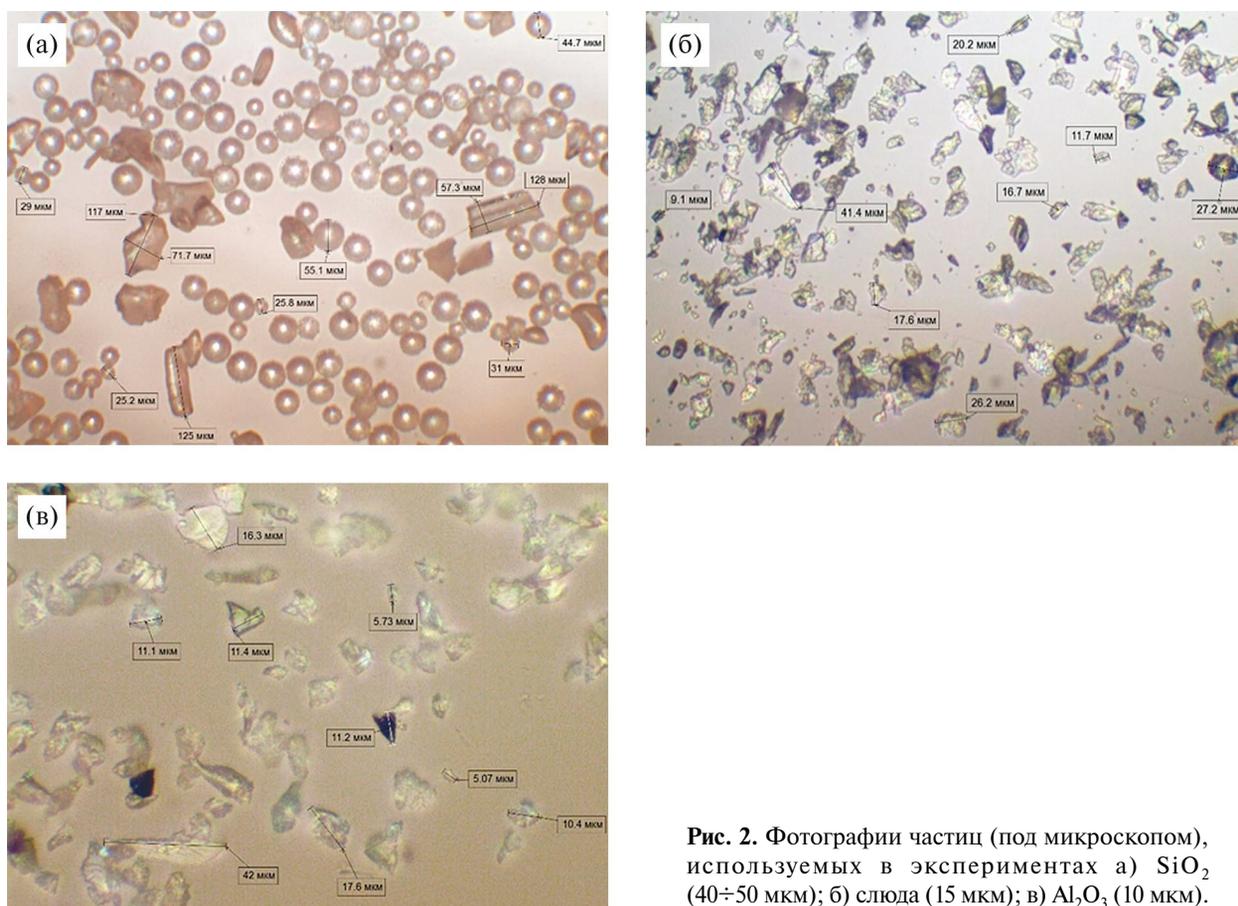


Рис. 2. Фотографии частиц (под микроскопом), используемых в экспериментах а) SiO_2 ($40 \div 50$ мкм); б) слюда (15 мкм); в) Al_2O_3 (10 мкм).

Таблица 2. Материалы, используемые в эксперименте

Состав	Размеры, мкм	Плотность, г/см ³
SiO_2	$40 \div 50$	2.65
Слюда: SiO_2 54.78%, Al_2O_3 28.23%, Fe_2O_3 5.72%, K_2O 10.59%	15	3.20
Al_2O_3	10	3.95

экспериментах. В табл. 2 приведены характеристики материалов, применявшихся для исследований.

2.1. Оптическая схема и методы регистрации

Оптическая схема регистрации динамики частиц при проведении лабораторного эксперимента представлена на рис. 3. Две видеокамеры Baumer VCXG-24M, моно, 1/1.2" CMOS, 1920×1200, 39 к/с, IMX249, GigE Vision с площадью пикселя 5.86×5.86 мкм² (позиция 1 на рис. 3) направлены на исследуемый объем (позиция 8) размером $5 \times 5 \times 3$ мм³. Видеокамеры расположены под углом и синхронизированы импульсом с частотой 3 Гц. Одновременно исследуемый объем подсвечивается лазерным излучением. Подсветка формируется с помощью оптической системы, состоящей из ла-

зера (2) с длиной волны 532 нм и мощностью 300 мВт, цилиндрической линзы (3) и зеркала (4). Проходя через цилиндрическую линзу и направляясь зеркалом, расширенный лазерный пучок освещает весь исследуемый объем.

2.2. Электрическая схема эксперимента

Электрическая схема эксперимента представлена на рис. 4. На электрод PV1, расположенный внутри вакуумной камеры, помещается слой калиброванных микрочастиц либо аналога реголита. При проведении эксперимента на этот электрод может подаваться положительный или отрицательный потенциал в диапазоне от 0 до 30 кВ (в рамках данного эксперимента потенциал электрода не

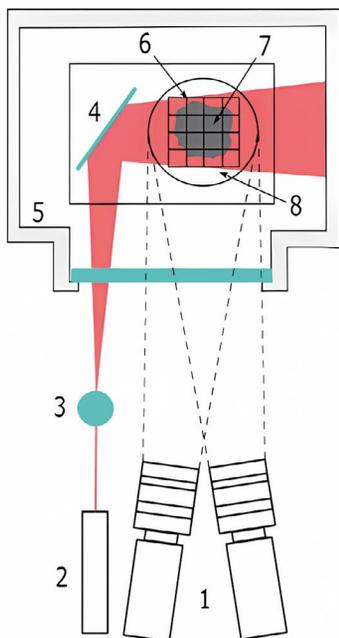


Рис. 3. Схема визуализации динамики пылевых частиц [25].

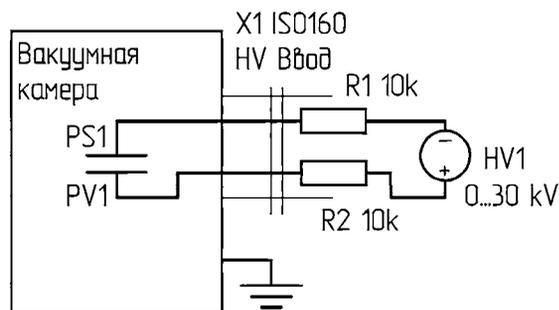


Рис. 4. Электрическая схема проведения эксперимента. Полярность подаваемого на электроды потенциала может быть изменена в зависимости от задач эксперимента.

превышал 10 кВ). Над электродом на расстоянии 11 мм располагается проводящая сетка (PS1), на которую также может подаваться положительный или отрицательный потенциал. Корпус вакуумной камеры заземлен.

Представленная конфигурация электродов в вакуумной камере представляет собой электрический конденсатор, между обкладками которого размещаются имитаторы лунного реголита. При этом создается электрическое поле с заданной напряженностью.

Параметры конденсатора, распределение потенциала и напряженности электрического поля определяются геометрией электродов и величиной подаваемого на обкладки конденсатора потенциала.

2.3. Материалы и геометрия электродов

Как известно, материал лунного реголита обладает относительно слабой проводимостью — порядка 10^{-8} См даже при солнечном освещении [26]. Таким образом, при проведении эксперимента необходимо не только подобрать имитатор реголита со схожей проводимостью, но и разместить его таким образом, чтобы не возникало контакта с электродом, к которому подведен положительный потенциал. Также известно, что поверхность безатмосферных тел может приобретать средний электрический потенциал в десятки, сотни, а по некоторым измерениям и в тысячи вольт [27, 28]. Электрод PV1 в первой версии представляет собой медный слой на стеклотекстолите, ориентированный к низу вакуумной камеры. Таким образом, верхняя часть текстолита имитирует непроводящий слой, на котором и расположены исследуемые образцы, нижняя же позволяет задавать электрический потенциал поверхности Луны или безатмосферного тела. Электрод (расположенный

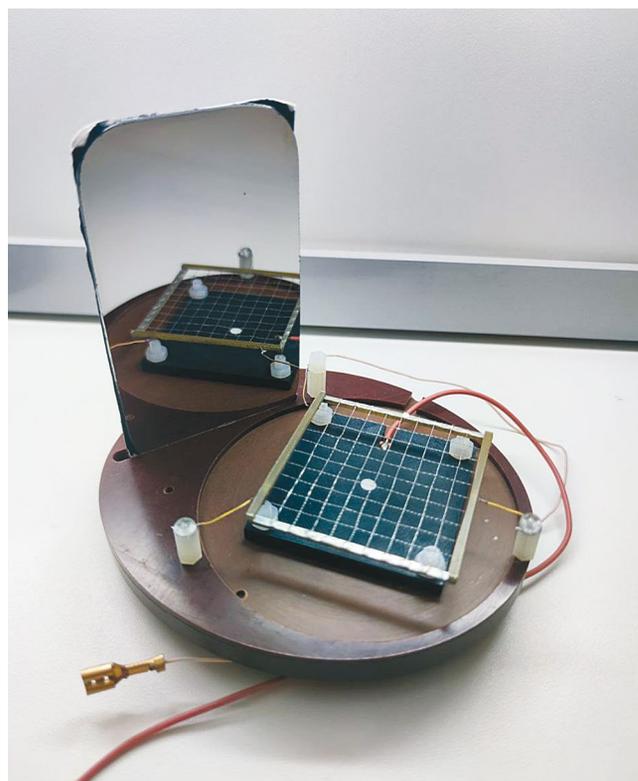


Рис. 5. Фотография полиамидной формы, электрода и сетки в собранном виде. Исследуемый образец помещен на диэлектрическую подложку. Над ним сетка PS1. С нижней стороны диэлектрической подложки — стеклотекстолит — располагается электрод PV1. Зеркало необходимо для перенаправления лазерной плоскости в измерительный объем.

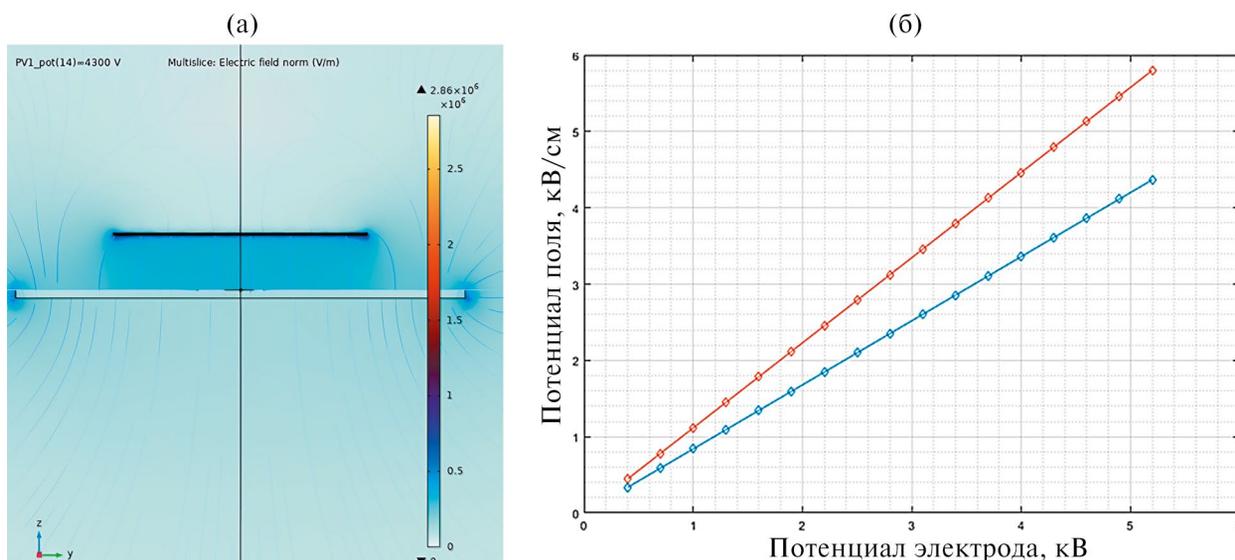


Рис. 6. а) Распределение напряженности электростатического поля при подаче потенциала 4300 В на электрод PV1 и подключении сетки (электрод PS1) к 0; б) Зависимость напряженности электростатического поля вблизи электродов PV1 (синий) и PS1 (красный) от подаваемого на электрод PV1 потенциала.

на текстолите) фиксируется в полиамидной форме, которая устанавливается на предметный стол вакуумной камеры. Также при помощи технологий трехмерной печати были изготовлены дополнительные электроды для исследования динамики активации частиц в зависимости от свойств подложки.

На этой же форме при помощи полиамидных стоек фиксируется металлическая сетка PS1 с общей площадью $50 \times 50 \text{ мм}^2$ и прозрачностью 80%. Сетка располагается на высоте от 8 до 11 мм над диэлектрической подложкой (и, соответственно, исследуемым образцом) — в зависимости от используемой в эксперименте подложки. Фотография данной конструкции представлена на рис. 5.

2.4. Электрические поля в экспериментальной установке

Электрическое поле между электродами PV1 и PS1 определяется геометрией электродов, выбранной полярностью, материалом подложки (стеклотекстолит) и поданным потенциалом. Полученное таким образом значение электрического поля в дальнейшем будет считаться определяющим для отрыва частиц.

Учитывая сложную форму электрода PS1 (сетка), величина и структура электрического поля определялась с помощью методов численного моделирования в среде COMSOL. Была создана трехмерная модель электродов и диэлектрика. Полученная картина трехмерного распределения электриче-

ского потенциала и напряженности электростатического поля по объему экспериментальной установки представлена на рис. 6а, а зависимость значения напряженности поля от поданного потенциала — на рис. 6б.

При этом из результатов моделирования очевидно, что краевые эффекты от тонкой проволоки сетки PS1 могут влиять на напряженность поля. Так, на удалении 0.1 мм от проволоки сетки напряженность поля возрастает до 27.3 кВ/см. Такие эффекты могут влиять на траекторию частиц, зафиксированных камерой. Однако, проведя исследование в среде COMSOL, можно установить, что эти эффекты распространяются на расстояние 0.05 см от проводника сетки, что суммарно составляет не более 500 мм^2 из общей площади, перекрываемой электродом PS1 2500 мм^2 . Таким образом, при анализе треков частиц нужно принимать во внимание, что около 20% зарегистрированных частиц могли дополнительно ускориться за счет воздействия краевых эффектов сетки.

2.5. Источник ультрафиолетового излучения

Для исследования процессов активации пылевых частиц УФ-излучением в ходе эксперимента используются эксимерные источники с длиной волны 146 нм (с энергией фотона 8.5 эВ) для газового наполнения эксимерной лампы Kr_2 [6]. Источник УФ излучения (позиция 9 на рис. 1) расположен вертикально таким образом, чтобы в конус рассеи-

вания попадал предметный стол с образцами частиц. Оценка для пика мощности излучения лампы у ее торцевого выходного окна из MgF_2 составляет порядка 10 мВт/см^2 . Питание эксимерных ламп осуществляется от источника высокочастотного (20...60 кГц) высоковольтного (до 8 кВ) напряжения.

Таким образом, экспериментальная установка способна облучать образцы симуляторов реголита ультрафиолетовым излучением той части солнечного спектра, которая, как предполагается, способна создавать фотоэффект для реголита Луны и других безатмосферных тел, заряжая частицы реголита положительным зарядом.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования влияния УФ-излучения на процесс активации частиц применялась подложка с проводящей поверхностью, а также частицы дополнительно подвергались воздействию электростатического поля, что позволяло преодолеть силы адгезии и силу тяжести, значения которых в лабораторном эксперименте на Земле значительно превышают аналогичные величины в экзосферах безатмосферных тел.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем:

1. Частицы размещались на проводящей подложке.
2. В измерительном объеме вакуумной камеры создавалось давление $10^{-4} \dots 10^{-6}$ Торр.
3. Положительный потенциал на одном из электродов постепенно повышался до появления событий отрыва частиц от подложки. Другой электрод оставался при нулевом потенциале. Значение найденного потенциала $U_{\text{ПА}}$ соответствовало порогу активации частиц без воздействия УФ-излучения.
4. Затем в отсутствие электростатического поля частицы подвергались воздействию УФ-излучения в течение времени $t = 10 \dots 20$ мин, мощность лампы устанавливалась с помощью регулирования значений силы тока $I = 3 \text{ А}$ и напряжения $U = 15 \text{ В}$ на источнике питания лампы (оценка потока УФ-излучения на поверхности с частицами составила не более 10 мВт).
5. Под воздействием УФ-излучения на один из электродов вновь подавался положительный потенциал, увеличивавшийся через каждую минуту. При появлении движущихся частиц достигнутое значение потенциала на сетке $U_{\text{ПА}}^{\text{УФ}}$ соответство-

вало порогу активации под воздействием УФ-излучения и электростатического поля.

6. После достижения порогового значения потенциала $U_{\text{ПА}}^{\text{УФ}}$ выполнялось дальнейшее увеличение потенциала на сетке до получения устойчивой картины движения частиц.
7. Изображения треков частиц в течение эксперимента регистрировались стереопарой видеокамер в режиме синхронизированной съемки со скоростью 3 кадра/с.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Исследование влияния УФ-излучения на процесс активации частиц SiO_2 (40÷50 мкм) электростатическим полем

В ходе эксперимента наблюдалось значительное снижение порога потенциала активации частиц при воздействии УФ-излучения. Потенциал активации частиц SiO_2 без воздействия УФ-излучения составил $U_{\text{ПА}} = 1.2 \text{ кВ}$. При воздействии УФ-излучения на частицы потенциал активации уменьшился до $U_{\text{ПА}}^{\text{УФ}} = 0.4 \text{ кВ}$. Таким образом, без воздействия УФ-излучения частицы имеют более высокий потенциал активации и количество движущихся частиц увеличивается с ростом напряженности электростатического поля. При воздействии УФ-излучения потенциал активации частиц значительно снижается, но с ростом напряженности электростатического поля увеличения числа движущихся частиц не наблюдается, напротив, возникает снижение количества движущихся частиц на рассматриваемом интервале значений напряженности (от 0.8 кВ/см до 2.5 кВ/см).

Оценка величин зарядов частиц показала, что как под воздействием электростатического поля, так и при совместном воздействии УФ-излучения и электростатического поля заряды частиц SiO_2 (40÷50 мкм) находятся в диапазоне от 10^{-14} Кл до $5 \cdot 10^{-14}$ Кл. При этом значительного влияния на величины зарядов частиц при различных значениях напряженности электростатического поля УФ-излучение не оказывает.

На рис. 7 приведена диаграмма количества и величин зарядов зарегистрированных частиц SiO_2 (40÷50 мкм), подвергавшихся воздействию электростатического поля и УФ-излучения.

В табл. 3 приведено количество частиц, зафиксированных в эксперименте в зависимости от условий (значения потенциала на электроде и/или наличия УФ-излучения).

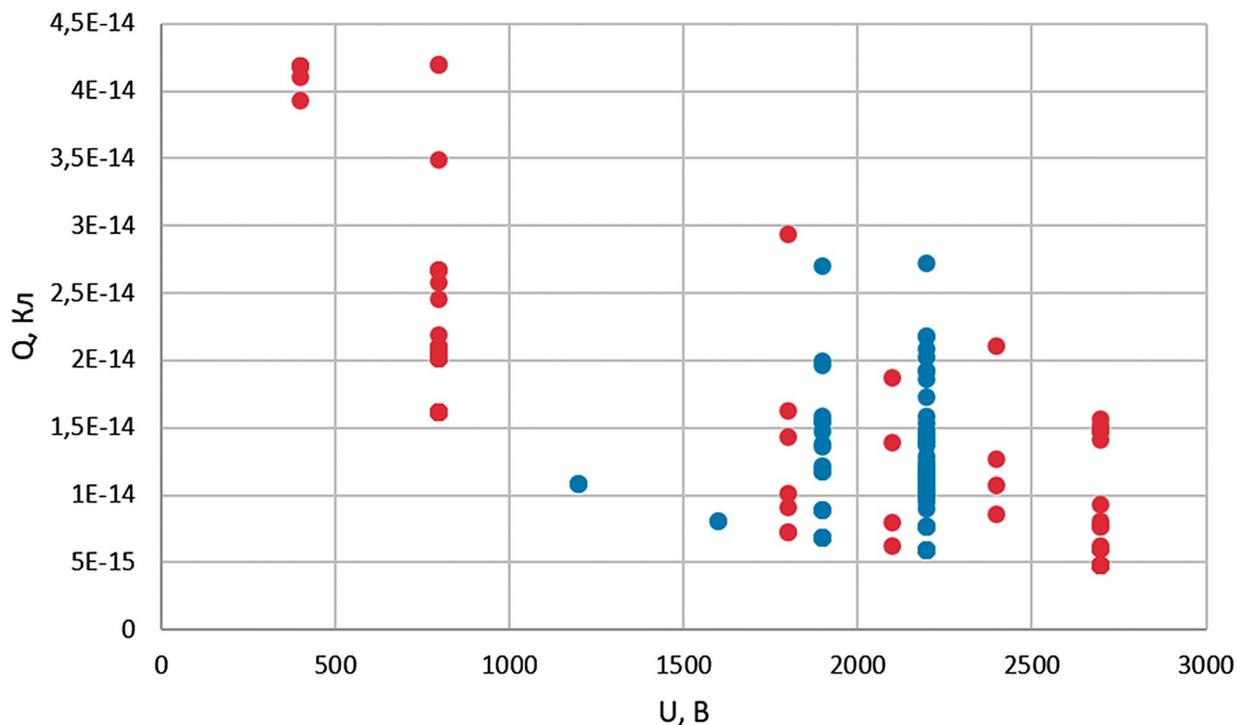


Рис. 7. Диаграмма величин зарядов, зарегистрированных и обработанных движущихся частиц SiO_2 ($40 \div 50$ мкм), подвергавшихся воздействию электростатического поля и УФ-излучения без предварительного экспонирования. Синим маркером отмечены частицы, находившиеся только под воздействием электростатического поля, красным — частицы, освещенные УФ-излучением и одновременно находившиеся под воздействием электростатического поля.

Таблица 3. Количество зарегистрированных в эксперименте частиц SiO_2 ($40 \div 50$ мкм) в зависимости от воздействия электростатического поля и/или УФ-излучения

Потенциал сетки, кВ	Условия УФ-облучения	Количество зарегистрированных частиц	Длительность наблюдений (общее количество кадров при данном потенциале)
1.2	Без УФ	3	45
1.6		2	45
1.9		25	45
2.2		59	45
0.4	Предварительно в течение 10 мин облучение УФ 10 мВт без электрического поля. Далее в течение эксперимента облучение УФ сохраняется	5	250
0.8		51	201
1.8		7	126
2.1		4	216
2.4		4	231
2.7		33	309

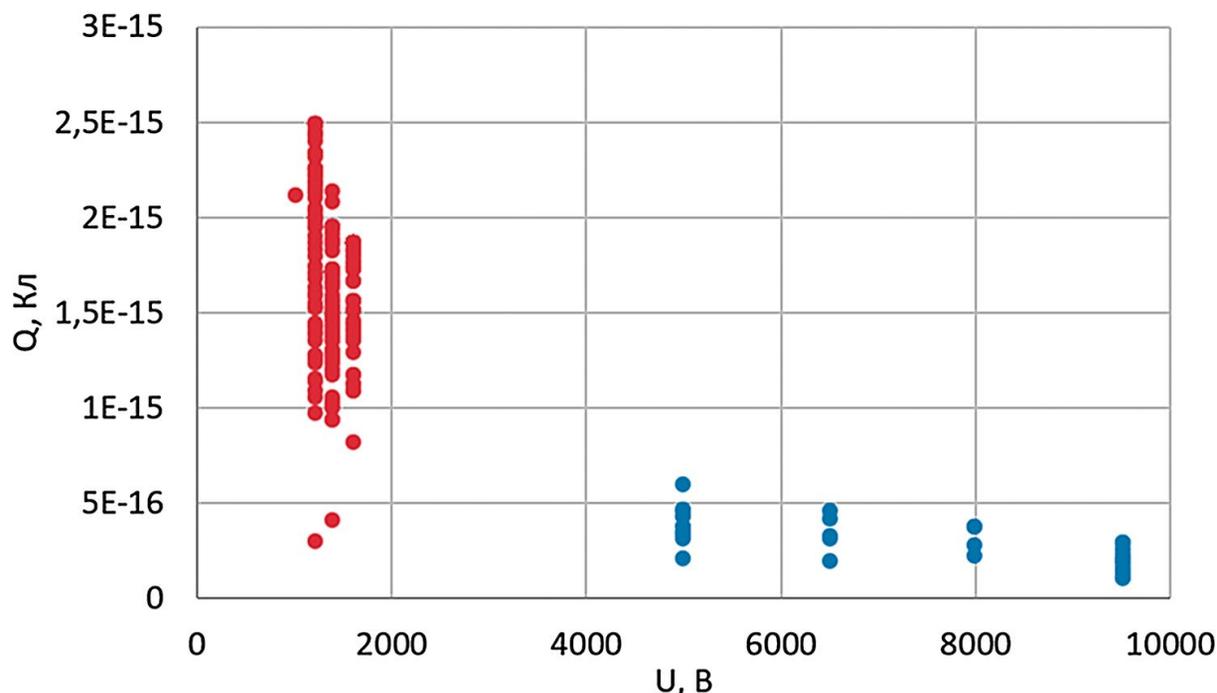


Рис. 8. Диаграмма количества и величин зарядов движущихся частиц слюды (15 мкм), подвергавшихся воздействию электростатического поля и УФ-излучения. Синим маркером отмечены частицы, находившиеся только под воздействием электростатического поля, красным — частицы, освещенные УФ-излучением с интенсивностью до 10 мВт и одновременно находившиеся под воздействием электростатического поля.

4.2. Исследование влияния УФ-излучения на процесс активации частиц слюды (15 мкм) электростатическим полем

Потенциал активации частиц слюды (15 мкм) без воздействия УФ-излучения составил $U_{ПА} = 5.0$ кВ. При воздействии УФ-излучения на частицы потенциал активации уменьшился до $U_{ПА}^{УФ} = 1,0$ кВ. Без воздействия УФ-излучения частицы слюды имеют более высокий потенциал активации, но не наблюдалось увеличения количества движущихся частиц с ростом напряженности электростатического поля. При воздействии УФ-излучения потенциал активации частиц значительно снижается, при этом с ростом напряженности (при достижении 1.6 кВ на электроде) резко увеличивается число движущихся частиц, однако при дальнейшем повышении потенциала количество движущихся частиц уменьшается.

Оценка величин зарядов частиц показала, что под воздействием электростатического поля и УФ-излучения заряды частиц значительно выше (10^{-15} Кл), чем при воздействии только электростатического поля (10^{-16} Кл). При этом наблюдается значительное смещение в большую сторону потенциала активации частиц в сравнении с частицами SiO₂. Данный эффект предположительно

вызван значительно большими адгезивными силами частиц слюды в сравнении со сферическими частицами SiO₂, однако данное предположение нуждается в проверке.

На рис. 8 приведена диаграмма количества зарегистрированных частиц слюды (в зависимости от напряженности электрического поля) и их электрических зарядов при воздействии УФ-излучения (красные точки) и без него.

В табл. 4 приведено количество частиц слюды, зарегистрированных в эксперименте при конкретных условиях (значении потенциала на электроде и/или наличии УФ-излучения).

4.3. Исследование влияния УФ-излучения на процесс активации электростатическим полем частиц Al₂O₃ (10 мкм)

Без воздействия УФ-излучения частицы имеют более высокий потенциал активации, количество зарегистрированных частиц увеличивается с ростом напряженности электростатического поля. Минимальный потенциал активации частиц Al₂O₃ (10 мкм) без воздействия УФ-излучения составил $U_{ПА} = 6.0$ кВ. При воздействии УФ-излучения на частицы потенциал активации уменьшился до

Таблица 4. Количество зарегистрированных частиц слюды (15 мкм) в зависимости от воздействия электростатического поля и/или УФ-излучения

Потенциал сетки, кВ	Условия УФ-облучения	Количество зарегистрированных частиц	Длительность наблюдений (общее количество кадров при данном потенциале)
5.0	Без УФ	17	90
6.5		4	90
8.0		4	90
9.5		18	90
1.0	Предварительно в течение 10 мин облучение УФ 10 мВт без электрического поля. Далее в течение эксперимента облучение УФ сохраняется	1	108
1.2		77	108
1.4		146	135
1.6		66	123

$U_{\text{ПА}}^{\text{УФ}} = 3.2$ кВ. С ростом напряженности электростатического поля значительно увеличивается количество зарегистрированных частиц.

Оценка величин зарядов частиц показала, что под воздействием электростатического поля и УФ-

излучения заряды частиц значительно выше, чем при воздействии только электростатического поля.

На рис. 9 приведена диаграмма количества и величин зарядов частиц Al_2O_3 (10 мкм), подвергавшихся воздействию электростатического поля и УФ-излучения.

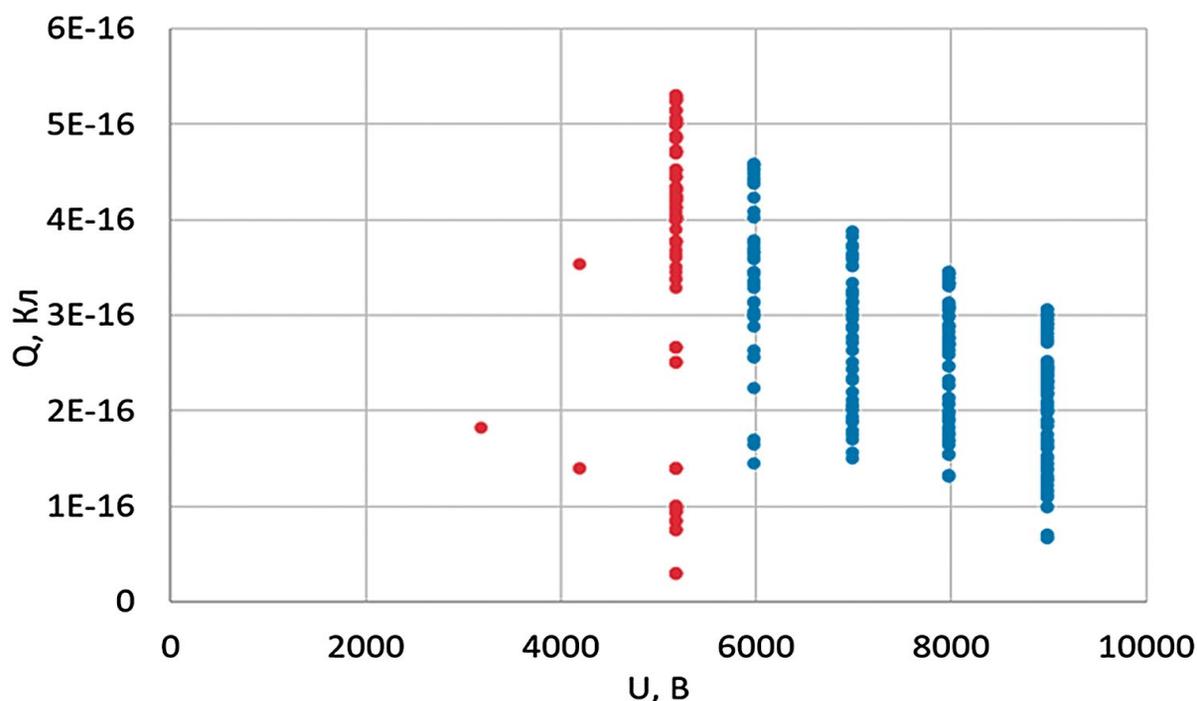


Рис. 9. Диаграмма количества зарегистрированных частиц Al_2O_3 (10 мкм) и значений их зарядов. Синим маркером отмечены частицы, находившиеся только под воздействием электростатического поля, красным — частицы, освещенные УФ-излучением с потоком до 10 мВт и одновременно находившиеся под воздействием электростатического поля.

Таблица 5. Количество зарегистрированных частиц Al_2O_3 (10 мкм) в зависимости от воздействия электростатического поля и/или УФ-излучения

Потенциал сетки, кВ	Условия УФ-облучения	Количество зарегистрированных частиц
6.0	Без УФ	45
7.0		47
8.0		188
9.0		326
3.2	Предварительно в течение 10 мин облучение УФ 10 мВт без электрического поля. Далее в течение эксперимента УФ-облучение отсутствует	1
4.2		3
5.2		987

В табл. 5 приведено количество частиц, активированных в эксперименте при различных условиях.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных лабораторных исследований процессов активации частиц под воздействием электростатического поля и УФ-излучения были выполнены оценки потенциалов активации частиц различных материалов и размеров. Показано, что воздействие УФ-излучения приводит к понижению величины потенциала активации для

всех рассматриваемых образцов более чем в 1.5 раза. Также воздействие УФ-излучения приводит к увеличению зарядов частиц, находящихся в электростатическом поле при значениях потенциалов активации. Дальнейшее увеличение напряженности электростатического поля не приводит к росту зарядов движущихся частиц.

На рис. 10 показана зависимость напряженности электростатического поля, требуемой для отрыва частиц, от диаметра частиц для различных величин адгезии частиц и гравитации тела, полученная в

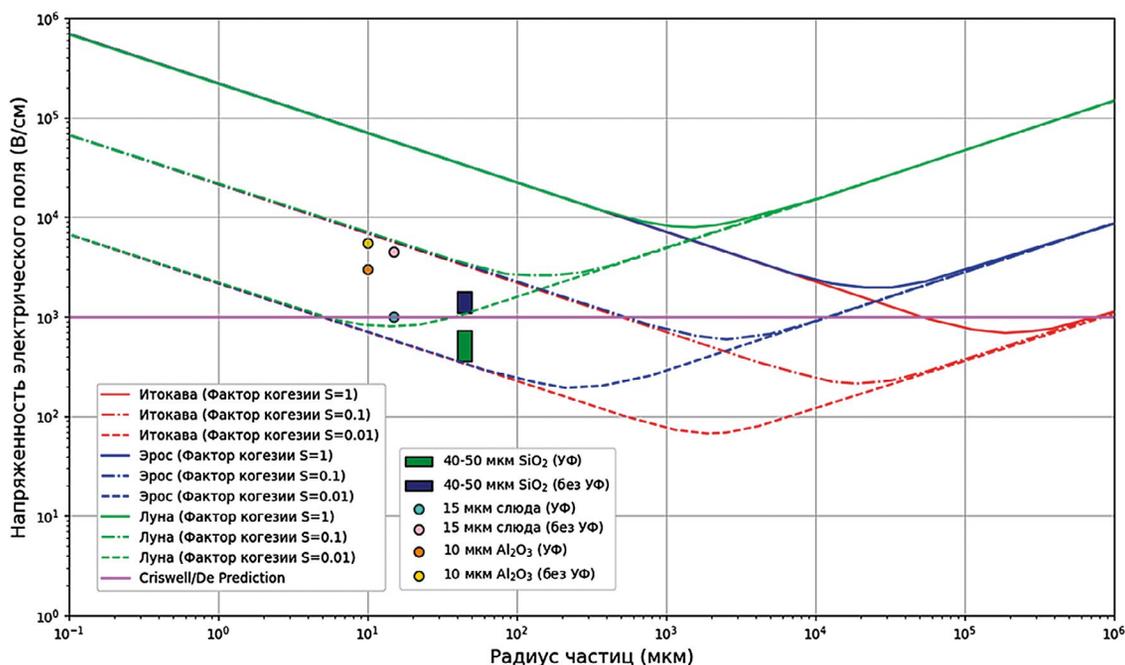


Рис. 10. Сравнение необходимого значения величины напряженности электрического поля для отрыва частиц от поверхности, полученного в результате теоретического моделирования [30, рис. 3.2] и экспериментальных данных для частиц Al_2O_3 с размером 10 мкм (оранжевая при воздействии УФ и желтая без воздействия УФ точки), частиц слюды с размером 15 мкм (голубая при воздействии УФ и розовая без воздействия УФ точки) и частиц SiO_2 размером от 40 до 50 мкм (зеленый прямоугольник при воздействии УФ и черный — без воздействия УФ).

работе [29]. В ходе проведенных экспериментов было выявлено, что в условиях земной гравитации частицы с размером от 40 до 50 мкм в диаметре под воздействием одновременно электростатического поля и ультрафиолета начинают отрываться от поверхности при напряженности поля 0.36 кВ/см, а стабильная динамика начинается при напряженности поля 0.73 кВ/см, что соответствует нижней границе оценки напряженности поля, необходимой для отрыва частиц с поверхностей астероидов Эрос и Итокава. В отсутствие ультрафиолета необходимая для отрыва частиц напряженность поля в условиях эксперимента составила 1.10 кВ/см (стабильно частицы начали отрываться при 1.8 кВ/м), что ближе к оценке [30] для Луны.

Таким образом, результаты эксперимента позволяют предположить, что влияние ультрафиолетовой части спектра солнечного излучения может существенно дополнять картину электростатической левитации частиц реголита безатмосферных тел. Количество частиц, активированных электростатическим полем, растет при увеличении напряженности поля. Наблюдением, требующим дальнейшего изучения, является то, что одновременное воздействие УФ-излучения и возрастание напряженности электростатического поля, напротив, приводят к снижению количества частиц.

При этом, учитывая масштабы по времени экспонирования частиц (например, для Луны это может достигать порядка 14 земных дней) и другие внешние воздействия (сейсмические, термические, электромагнитные, плазменные), динамика — как и граничные условия для ее инициации — перемещения пылевых частиц у поверхности безатмосферных тел может существенно превосходить лабораторные показатели. Также из экспериментов видно, что свойства частиц (морфология, гранулометрия, электрическая проводимость) значительно влияют на потенциал их активации.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия экспериментов по наблюдению динамики пылевых частиц в условиях воздействий электростатическим полем и жестким ультрафиолетом диапазона UV-C.

В ходе экспериментальной работы сделаны следующие наблюдения:

- активация (отрыв от поверхности) частиц начинается при напряженности поля, предсказанной в теоретических исследованиях;

- при дополнительном воздействии ультрафиолетом пороговое значение напряженности электрического поля, необходимого для активации частиц, снижается как минимум в 1.5 раза;
- с некоторого порога одновременное воздействие УФ-излучения и возрастание напряженности электростатического поля приводит к снижению количества зарегистрированных частиц.

Данные эксперименты, в целом, подтверждают наблюдаемую картину динамики частиц безатмосферных тел, позволяя оценить вклад воздействия солнечного УФ-излучения на данный процесс.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была выполнена при поддержке Программы 10 Экспериментальной лабораторной астрофизики и геофизики НЦФМ. Анализ имитаторов реголита и сравнение результатов с теоретическими исследованиями было выполнено при поддержке госзадания Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. Robertson, S. Sture*, Rev. Geophys. 45, RG2006 (2007).
2. *D. R. Criswell* Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space (Springer, New York, edited by R. J. L. Garard, pp. 545–556, 1973).
3. *J. J. Rennilson and D. R. Criswell*, Moon 10 (1974).
4. *H. Zook and J. McCoy*, Geophys. Res. Lett. 18, 11 (1991).
5. *J. R. Gaier* The Impact of Lunar Dust on Human Exploration (Cambridge Scholars Publishing, edited by J. S. Levine, pp. 67–87, 2021).
6. *S. I. Popel, L. M. Zelenyi, A. P. Golub', A. Yu. Dubinskii*, Planet. Space Sci. 156 (2018).
7. *X. Wang, M. Horányi, S. Robertson*, J. Geophys. Res. 114, A05103 (2009).
8. *N. Ding, J. Wang, J. Polansky*, IEEE Trans. Plasma Sci. 41, 12 (2013).
9. *T. M. Flanagan and J. Goree*, Phys. Plasmas 13, 12 (2006).
10. *C. M. Hartzell and D. J. Scheeres*, J. Geophys. Res. 118 (2013).
11. *T. E. Sheridan, J. Goree, Y. T. Chiu, R. L. Rairden, J. A. Kiessling*, J. Geophys. Res. 97, A3 (1992).
12. *X. Wang, M. Horányi, S. Robertson*, J. Geophys. Res. 115, A11102 (2010).
13. *X. Wang, M. Horányi, S. Robertson*, Planet. Space Sci. 59, 14 (2011).

14. X. Wang, J. Schwan, N. Hood, H. W. Hsu, E. Grün, and M. Horányi, *JoVE* 134, e57072 (2018).
15. A. Shu, A. Collette, K. Drake, E. Gün, M. Horányi, S. Kempf, A. Mocker, T. Munsat, P. Northway, R. Srama, Z. Sternovsky, E. Thomas, *Rev. Sci. Instrum.* 83, 075108 (2012).
16. I. A. Kuznetsov, S. L. G. Hess, A. V. Zakharov, F. Cipriani, E. Seran, S. I. Popel, E. A. Lisin, O. F. Petrov, G. G. Dolnikov, A. N. Lyash, S. I. Kopnin, *Planet. Space Sci.* 156, 62 (2018).
17. J. Gu, X. Qian, Y. Liu, Q. Wang, Y. Zhang, X. Ruan, X. Deng, Y. Lu, J. Song, H. Zhang, Y. Dong, M. Wei, S. Li, W. H. Wang, Z. Zou, M. Yang, W. Yao, *Research Square*, (preprint), <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2923910/v1> (2023).
18. N. C. Orger, K. Toyoda, H. Masui, M. Cho, *Adv. Space Res.* 68, 3 (2021).
19. A. Carroll, N. Hood, R. Mike, X. Wang, H.-W. Hsu, M. Horányi, *Icarus* 352 (2020).
20. Dust accelerator laboratory (dal),
URL: <https://impact.colorado.edu/facilities.html>.
21. J. I. Samaniego, X. Wang, L. Andersson, D. Malaspina, R. E. Ergun, and M. Horányi, *J. Geophys. Res.* 123, 6054 (2018).
22. N. Hood, A. Carroll, R. Mike, X. Wang, J. Schwan, H.-W. Hsu, and M. Horányi, *Geophys. Res. Lett.* 45, 13206–13212 (2018).
23. N. C. Orger, K. Toyoda, H. Masui, and M. Cho, *Adv. Space Res.* 63, 3270 (2019).
24. A. Champlain, J. C. Mat'eo-V'elez, J. F. Roussel, S. Hess, P. Sarrailh, G. Murat, J. P. Chardon, and A. Gajan, *J. Geophys. Res.* 121, 103 (2016).
25. A. V. Zakharov, A. Yu. Poroykov, S. A. Bednyakov, A. N. Lyash, I. A. Shashkova, I. A. Kuznetsov, G. G. Dolnikov, *Measurement* 171, 108831 (2021).
26. I. W. Carrier, G. R. Olhoft, and W. Mendell *The Lunar Sourcebook* (Cambridge University Press, edited by G. H. Heiken, D. T. Vaniman, and B. M. French, pp. 475–594, 1991).
27. J. W. Freeman and M. Ibrahim, *Moon* 8 (1975).
28. J. S. Halekas, G. T. Delory, R. P. Lin, T. J. Stubbs and W. M. Farrell, *J. Geophys. Res.* 113, A09102 (2008).
29. C. N. Hartzell and D. J. Scheeres, *Planet. Space Sci.* 59 (2011).
30. C. N. Hartzell, *Aerospace Engineering Sciences Graduate Theses & Dissertations* 48 (2012).

EXPERIMENTAL STUDY OF THE UV IRRADIATION INFLUENCE ON THE ACTIVATION OF DUST PARTICLES OF ATMOSPHERELESS BODIES REGOLITH SIMULATORS

**I. A. Kuznetsov^{a,*}, I. A. Shashkova^a, A. N. Lyash^a, A. Yu. Poroykov^b,
S. A. Bednyakov^{a,c}, E. V. Kronrod^{d,e}, G. G. Dolnikov^a, A. E. Dubov^a, O. N. Voshchan^a,
M. E. Abdelaal^{a,g}, S. I. Popel^a, T. I. Morozova^a, A. A. Kartasheva^a, P. V. Stoliarenko^f,
Y.Y. Tian^b, A. V. Zakharov^a, L. M. Zelenyi^a**

^a*Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia*

^c*Moscow State University named after M. V. Lomonosov,
Scientific Research Institute of Nuclear Physics named after D. V. Skobel'syn, Moscow, Russia*

^d*Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry named after V. I. Vernadsky of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

^e*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

^f*Faculty of Space Research, Moscow State University named after M. V. Lomonosov, Moscow, Russia*

^g*National Research University "Moscow Institute of Physics and Technology", Dolgoprudny, Russia*

*E-mail: kia@cosmos.ru

The activity of dust particles on airless bodies has been recorded since the early automated missions to the Moon. Since then, numerous theoretical and experimental studies of this effect have been conducted, yet at present, there is no clear understanding of the influence of external factors on the dynamics of this phenomenon. Experimental work has been carried out to determine the contribution of hard UV radiation to the activity of dust particles. It has been shown that the impact of UV radiation significantly affects the dynamics of the particles. The results on determining the conditions for particle detachment from the surface are in line with theoretical calculations.

Keywords: cosmic dust, dusty plasma, dust particles, experimental modeling, space research