

Отчет 2022 г.

Тема ПЛАНЕТА. Исследование атмосфер и поверхностей планет

Гос. рег. № 01200602993

Науч. рук.: чл.-корр. РАН Кораблев О.И.

Раздел 4. МАЛЫЕ ТЕЛА и КОСМИЧЕСКАЯ ПЫЛЬ

Группа «Малые тела и космическая пыль» в составе лаб. 531 в 2022 году проводила работы по следующим направлениям:

- (i) Тема «Планета»,
- (ii) Создание и подготовка научных приборов для проектов ФКП, а также предложений для будущих проектов,
- (iii) Подготовка предложений и экспериментальной базы для исследований физических процессов и плазменно-пылевой среды у поверхностей безатмосферных тел для создаваемого Национального центра физики и математики (НЦФМ) в городе Саров.

4.1. Тема «Планета»

Экспериментальная работа: исследование плазменно-пылевых процессов у поверхности Луны и других безатмосферных тел методами лабораторного моделирования.

Продолжены эксперименты по моделированию лунной пылевой динамики с помощью лабораторных установок на основе вакуумных камер. Микрочастицы, приготовленные из аналогов лунного реголита, помещались на диэлектрическую подложку в область электрического поля, создаваемого двумя электродами, расположенными сверху и снизу от этой подложки. На электроды подавалось напряжение порядка единиц кВ. Одновременно микрочастицы подвергались кратковременному воздействию ультрафиолетового излучения. Впервые удалось подобрать условия, при которых порог напряжения, необходимого для активации частиц, заметно снижается при действии УФ-излучения. В результате анализа экспериментальных результатов сформулированы новые гипотезы о возможной природе и особенностях процессов пылевой левитации.

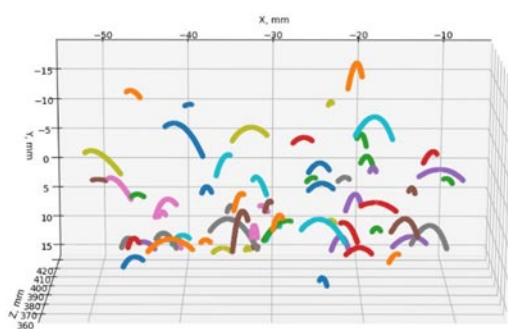
Основные исследования проводились на экспериментальной установке с источником электростатического поля, ультрафиолетового излучения, потока электронов, воздействующих на исследуемые образцы. Для регистрации и последующего анализа треков частиц использовалась система визуализации с лазерной подсветкой. В качестве исследуемых образцов пылевых частиц были выбраны наборы проводящих и непроводящих частиц, различных по своему минералогическому составу, гранулометрическим и морфологическим характеристикам.

В ходе выполненного цикла экспериментов получены следующие результаты:

- подтвержден эффект левитации (отрыва от поверхности) пылевых частиц при воздействующем на них электрическом поле;
- непроводящие частицы камчатского андезита размером от 36 до 50 мкм начинают отрываться от поверхности при нахождении в электростатическом поле напряженностью от 4,1 кВ/см без облучения частиц УФ;
- для визуализации пылевых частиц в плазме при моделировании условий в приповерхностной экзосфере безатмосферных тел (Луна, спутники Марса, астероиды) был выбран метод фотограмметрии и на его основе усовершенствована методика визуализации пылевых частиц в экспериментальной установке ИКИ РАН для исследования процессов активации (левитации) пылевых частиц, позволяющая определять параметры движения частиц (рисунок 1, рисунок 2), рассчитывать их скорости и заряды (рисунок 3, рисунок 4);
- разработанное на языке программирования C# для технологии .Net программное обеспечение для регистрации экспериментальных стереопар изображений позволяет проводить калибровку стереосистемы видеокамер и синхронно регистрировать экспериментальные изображения; алгоритм обработки экспериментальных данных реализован на языке программирования Python с применением библиотеки OpenCV и позволяет определять параметры траекторий движения частиц в эксперименте;
- по результатам обработки экспериментальных данных определены траектории движения сферических частиц SiO₂ диаметром 50 мкм и 100 мкм, а также частиц вольфрама размером 10 мкм; рассчитаны распределения частиц по скоростям и зарядам; полученные распределения могут быть использованы для оценки параметров комплексной плазмы;
- при облучении образцов пылевых частиц УФ-излучением (146 нм) граница активации частиц по напряженности поля снижается до 1,1...1,3 кВ/см;
- получены распределения по зарядам и по скоростям для частиц различных размеров и материалов;
- при повышении потенциала (и, соответственно, напряженности поля) наблюдается увеличение потока левитирующих частиц, однако их активность носит, скорее, импульсный, спорадический характер – периоды «затишья» сменяются периодами массовой активации частиц; при увеличении напряженности поля интенсивность таких всплесков в среднем существенно возрастает.

Замечены и другие интересные явления. Например, в ходе экспериментов дважды частица двигалась по спирально-параболической траектории – как если бы она находилась в магнитном поле. Также однократно был зафиксирован «пылевой фонтан» – выброс нескольких десятков частиц из одной точки. Эти эффекты требуют дополнительного исследования.

Траектории частиц из эксперимента с частицами SiO размером 50 мкм



10

Рисунок 1 – Восстановленные траектории частиц SiO₂ (монодисперсные, размером 50 мкм), полученные в ходе обработки данных эксперимента.

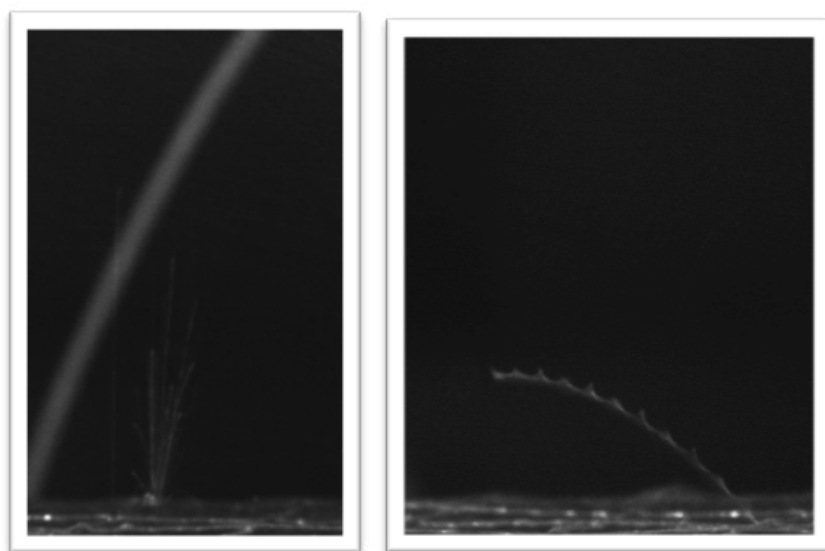


Рисунок 2 – Траектории частиц камчатского андезита. Пример «пылевого фонтана» слева и спирально-параболической траектории справа.

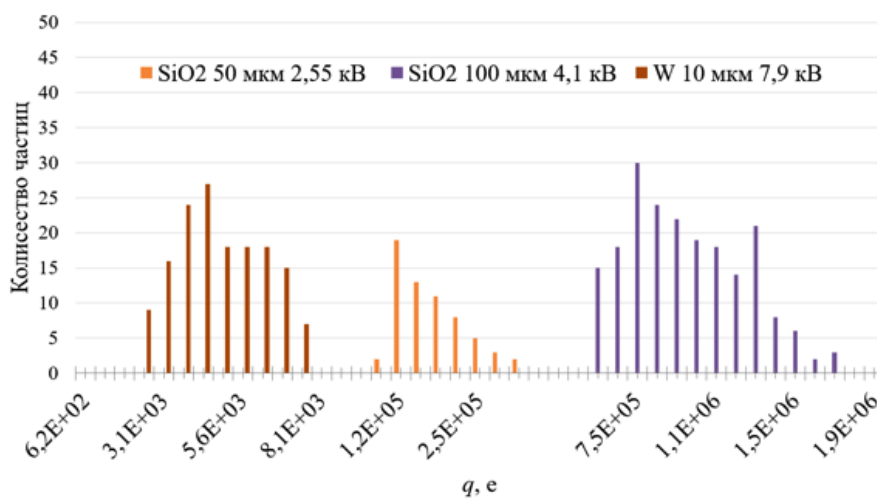


Рисунок 3 – Распределение частиц различных размеров и материалов по заряду.

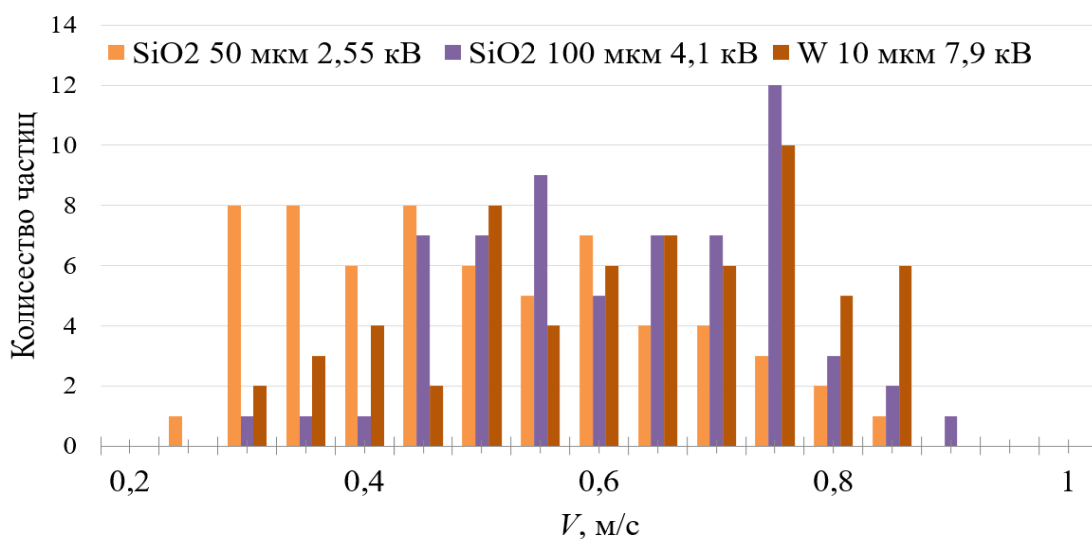


Рисунок 4 – Распределение частиц по скоростям.

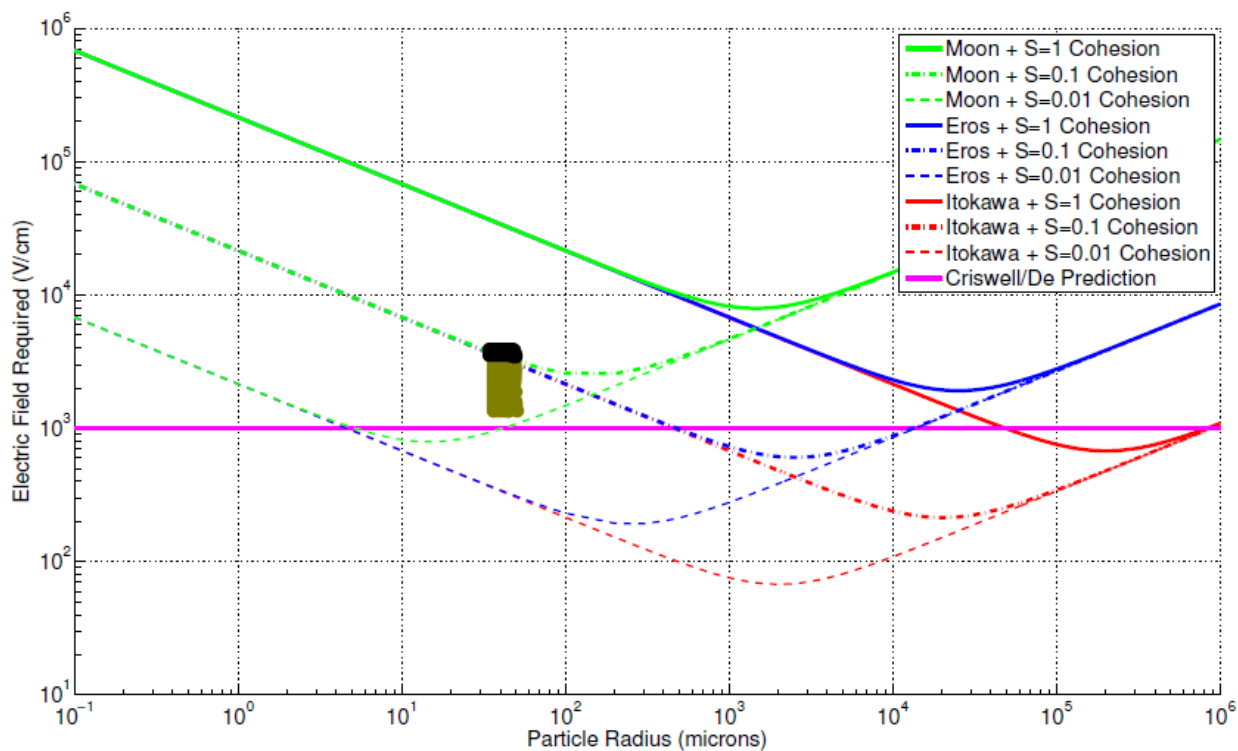


Рисунок 5 – Сравнение параметров частиц и электрического поля с теоретическими оценками [Hartzell et al., 2012]. Оливковым цветом показана область, соответствующая параметрам частиц и эксперимента при воздействии ультрафиолетом, при которых происходит активация частиц. Черным – область параметров без воздействия ультрафиолетом. Результаты эксперимента подтверждают гипотезы об электростатической природе левитации частиц Луны и позволяют пересмотреть и уточнить некоторые оценки интенсивности данного явления. Результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими предположениями и проведенными ранее экспериментами (рисунок 5).

Для развития данной работы предлагается провести дополнительные эксперименты, уточняющие особенности рассматриваемых процессов, а именно:

- изучение влияния длительности облучения УФ на активность частиц (может быть существенно для оценок активности пылевой динамики объектов с различным периодом вращения);
- введение дополнительных внешних воздействий (сейсмомеханическое воздействие, термоудар, поток плазмы, магнитные поля) и определение их веса в пылевой динамике безатмосферных тел;
- изучение влияния морфологических, химических, физических свойств частиц на их активность.

Экспериментальная работа: моделирование радиочастотных излучений во время пылевой активности в нижней атмосфере Марса.

Проводились исследования по моделированию микроразрядов в разреженной газовой-пылевой среде. Считается, что подобные микроразряды являются источником радиочастотных излучений у поверхности Марса во время пылевых бурь. Такие исследования планировалось выполнить с помощью датчика ЭМА, включенного в состав прибора Пылевой Комплекс на платформе ЭкзоМарс. При моделировании регистрация шумовых электромагнитных сигналов осуществлялась в цифровом виде в блоке ЭМА с использованием узла АЦП. Подготовлен лабораторный стенд, включающий аэротрубу, созданный для имитации ветра и динамики пылевых частиц в атмосфере Марса. С помощью этого стенда и специально разработанных дополнительных узлов создавались вихревые потоки с пылевыми частицами. Электромагнитный шум, генерируемый при столкновениях заряженных пылевых частиц, регистрировался датчиком ЭМА. Выполнено уточнение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) блока с целью калибровки блока ЭМА перед началом лабораторных экспериментов.

Экспериментальная работа: исследование особенностей пьезокерамических пластин (ПКП) при регистрации микрочастиц.

Проведено изучение распределения амплитуд сигналов от пьезокерамических пластин (ПКП) при (i) воздействии на различные участки поверхности ПКП механическим импульсом одинаковой величины и при (ii) воздействии на ПКП механическим импульсом различной величины. Выполнен анализ, математическая и программная обработка данных, полученных от пьезокерамических датчиков устройств ПмЛ и ПК. Результаты выполненных исследований необходимы для физической интерпретации данных прибора ПмЛ проекта Луна-Глоб при воздействии микрометеоритных частиц.

Экспериментальная работа: исследование влияния пылевых частиц при их осаждении на поверхность оптического датчика.

Подобные исследования планировались в рамках эксперимента с прибором Пылевой Комплекс, установленным на посадочную платформу проекта ЭкзоМарс. Рассматривалась возможность применимости подобного метода для исследования в

лунных экспериментах и анализировались результаты экспериментов пылевого прибора проекта Chang'e 5 китайской лунной программы.

Обработка экспериментальных данных

Разработан метод обработки массива данных с помощью программных средств среды MatLab. Эта работа была выполнена с целью подготовки к анализу научной информации, полученной с помощью приборов ПК и ПмЛ. Данный метод позволяет получить значения параметров движущейся одиночной пылевой частицы. Например, вычисленные с помощью экспериментальных данных значения максимальной амплитуды сигнала и время достижения значения максимальной амплитуды, дают возможность получить значения импульса движущейся пылевой частицы с высокой точностью. Обработка данных с помощью этого метода позволяет получить зависимости времени нарастания амплитуды и импульса пылевой частицы от ее диаметра. Было показано, что указанные параметры линейно возрастают с увеличением диаметра пылевых частиц. Кроме того, полученные из обработки данных значения скорости нарастания максимальной амплитуды дают информацию о характеристиках самой пьезопластины. Обработка массива данных с помощью предложенного программного метода позволяет исследовать характеристики движущегося массива пылевых частиц, например, вычислить значения массопереноса и оценить разброс по величине импульса для одной фракции пылевых частиц.

Имитаторы лунного реголита

Проведен анализ имитаторов грунтов лунного реголита с целью выбора оптимальных характеристик лунного грунта при проведении экспериментального исследования динамики пылевых частиц в условиях, близких к лунным. Выбор грунтов определялся следующими параметрами, исходя из их возможного влияния на динамику пылевых частиц: 1) химический состав и минералогия 2) распределение частиц по размерам гранулы в пределах от 1 до 1000 мкм, с медианным размером от 250 до 300 мкм 3) насыпная плотность и механические свойства в диапазоне значений, характерных для лунного грунта (насыпная плотность – от 1,4 до 1,7 г/см³, когезия – от 0,5 до 3 кПа, внутренний угол трения – от 10 до 20°). Результаты проведенных исследований показали, что в качестве имитаторов лунного реголита целесообразно выбрать следующие грунты:

- 1) **андезибазальт** – в качестве минералогического аналога лунного реголита;
- 2) **MMS Sand** – аналог, близкий по минералогическому составу, содержащий значительную фракцию частиц небольшого размера (порядка 100 нм), с округлой формой частиц – в противоположность острокраевым частицам неправильной формы, образующим лунную пыль; предложен для экспериментов по выяснению влияния формы на левитацию;
- 3) **JSC MARS** – насыпная плотность частиц соответствует значениям, характерным для лунного реголита; диапазон когезии достаточно широкий, что может оказаться полезным для поисковых исследований по изучению влияния данного параметра на пылевую динамику.

Развитие экспериментальной базы

Выполнялись работы по совершенствованию установок и экспериментальных методик для проведения лабораторных исследований при моделировании физических процессов у поверхностей безатмосферных тел.

Теоретическая работа

Выполнен анализ физических процессов у поверхности безатмосферных тел, в частности, Луны, астероидов, комет, которые приводят к эрозии их поверхностных, а иногда и более глубоких слоев. При этом учитывались внешне воздействия на тела – микрометеорные потоки, солнечное излучение, космические лучи, которые являются основными причинами эрозии. Рассмотрены основные особенности безатмосферных тел, принадлежащих к различным классам. Проведен анализ основных физических механизмов, которые могут приводить к высвобождению и выносу пылевых частиц с поверхности реголитов. В частности, проанализированы последствия высокоскоростных ударов микрометеоров, энергетические аспекты ударных событий, электростатические процессы высвобождения частиц с поверхности, термодинамические процессы, происходящие в приповерхностных слоях ядер комет, рассмотрены условия выноса пылевых частиц с поверхности вращающегося тела и условия, при которых тело может разрушиться. В зависимости от особенностей этих тел, процессы эрозии, а также причины ее возникновения, могут в значительной степени различаться. Определены основные нерешенные проблемы, связанные с процессами эрозии тел, которые требуют дальнейших исследований. Результаты выполненного анализа опубликованы в журнале *Physics of Plasma* (Q1).

Теоретическая работа

Рассмотрена граница раздела между диэлектриком и средой, содержащей носители заряда с умеренной подвижностью. При воздействии на эту границу стохастических потоков положительных и отрицательных частиц с одинаковой средней плотностью тока j_0 , и предположении, что поверхность поглощает все падающие заряды, по всей поверхности возникают флуктуирующие и взаимодействующих друг с другом противоположно заряженные пятна различных размеров D . Фурье-разложение сводит эту совокупность взаимодействующих пятен к ансамблю независимо флуктуирующих волн плотности заряда. Было показано, что величина флуктуирующего электрического поля может иметь довольно большую величину непосредственно над каждым пятном заряда, но экспоненциально уменьшается с расстоянием от плоскости. Время жизни τ пятна заряда обратно пропорционально плотности j_0 стохастического тока, а пропорциональные амплитуды флуктуаций не зависят от j_0 . Зависимость параметров флуктуаций от размера пятна заряда D может меняться в зависимости от свойств проводящей среды. Результаты этой работы опубликованы в журнале *Langmuir* (Q1)

4.2. Создание и подготовка научных приборов для проектов ФКП

В течение 2022 г. проводились работы по созданию приборов, включенных в КНА КА реализуемых в настоящее время проектов Федеральной космической программы, а также подготовлены предложения для перспективных экспериментов на борту КА:

- создан прибор ПмЛ (Пылевой мониторинг Луны), в составе КНА проекта Луна-25; прибор прошел все необходимые испытания, отработки, калибровки;
- создан прибор ПК (Пылевой Комплекс), в составе КНА проекта ЭкзоМарс-2; прибор прошел все необходимые испытания, отработки, калибровки;
- проводится оптимизация конфигурации прибора ПмЛ-2 (Пылевой мониторинг Луны) в составе КНА проекта Луна-27;
- начаты работы по созданию приборов АПРС и НЕФАС для проекта Венера-Д (посадочный аппарат и аэростатный зонд);
- подготовлено предложение по созданию прибора для исследований пылевых образований на орбитах Луны для включения в состав КНА проекта Луна-26;
- подготовлено предложение по созданию прибора для исследований пылевой обстановки вблизи создаваемой Российской орбитальной служебной станции (РОСС).
-

4.3. Подготовка предложений и экспериментальной базы для исследований физических процессов и плазменно-пылевой среды у поверхностей безатмосферных тел для создаваемого в городе Саров Национального центра физики и математики (НЦФМ).

Публикации и выступления на конференциях

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. А. В. Захаров, Г. Г. Дольников, И. А. Кузнецов, А. Н. Ляш, F. Esposito, C. Molfese, I. Arruego Rodríguez, E. Seran, M. Godefroy, A. E. Дубов, И. В. Докучаев, М. Г. Князев, А. В. Бондаренко, В. М. Готлиб, В. Н. Каредин, И. А. Шашкова, М. Е. Абделаал, А. А. Карташева, А. В. Шеховцова, С. А. Бедняков, В. В. Барке, А. В. Яковлев, В. А. Грушин, С. И. Попель, О. И. Кораблев, Д. С. Родионов, Н. С. Даксбери, О. Ф. Петров, Е. А. Лисин, М. М. Васильев, А. Ю. Поройков, Н. Д. Борисов, F. Cortecchia, B. Saggin, F. Cozzolino, D. Brienza, D. Scaccabarrozz, G. Mongelluzzo, G. Franzese, C. Porto, A. Martín Ortega Rico, N. Andrés Santiuste, J. R. de Mingo, C. I. Popa, S. Silvestro, J. R. Brucato. ПЫЛЕВОЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ АТМОСФЕРЕ МАРСА. *Астрономический вестник*, 2022, том 56, № 6, с. 371–38. [DOI: 10.1134/S0038094622060065]; квартиль Q3; IF 0.790.

A. V. Zakharov, G. G. Dolnikov, I. A. Kuznetsov, A. N. Lyash, F. Esposito, C. Molfese, I. Arruego Rodríguez, E. Seran, M. Godefroy, A. E. Dubov, I. V. Dokuchaev, M. G. Knyazev, A. V. Bondarenko, V. M. Gotlib, V. N. Karedin, I. A. Shashkova, M. E. Abdelaal, A. A. Kartasheva, A. V. Shekhovtsova, S. A. Bednyakov, V. V. Barke, A. V. Yakovlev, V. A. Grushin, A. S. Bychkova, S. I. Popel, O. I. Korablev, D. S. Rodionov, N. S. Duxbury, O. F. Petrov, E. A. Lisin, M. M. Vasiliev, A. Yu. Poroikov, N. D. Borisov, F. Cortecchia, B. Saggin, F. Cozzolino, D. Brienza, D. Scaccabarrozz, G. Mongelluzzo, G. Franzese, C. Porto, A. Martín Ortega Rico, N. Andrés Santiuste, J. R. de Mingo, C. I. Popa, S. Silvestro, and J. R. Brucato. Dust Complex for Studying the Dust Particle

Dynamics in the Near-Surface Atmosphere of Mars. *Solar System Research*, 2022, Vol. 56, No. 6, pp. 351–368.

2. Л.М. Зеленый, И.А. Кузнецов, А.В. Захаров, С.И. Попель, А.Н. Ляш и др. Пылевые частицы в космосе: возможности экспериментальных исследований. *АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ*, 2022. Принята в печать 01.11.2022 г.
3. A.V. Zakharov, S. I. Popel, I. A. Kuznetsov, N. D. Borisov, E. V. Rosenfeld, Yu. Skorov, and L. M. Zelenyi. Physical processes leading to surface erosion and dust particles dynamics of airless bodies. *Physics of Plasmas* 29, 000000, 2022, doi: 10.1063/5.0117833. Q1, IF 2,357.
4. E.V. Rosenfeld, A.V. Zakharov, V.V. Djakin. Charge Fluctuations on a Flat Interface between Dielectric and Electrolyte or Dense Plasma. *Langmuir*, 2022, 38, 9382–9388. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c01347>, Q1, IF 4.384.
5. I. Kuznetsov, I. Shashkova, A. Poroykov, A. Zakharov, S. Bednyakov, A. Bychkova, G. Dolnikov, A. Dubov, A. Kartasheva, A. Lyash, A. Shehovtsova. Experimental evidence of the dust particles detachment possibility in the E-field. *ASTRONOMY AT THE EPOCH OF MULTIMESSENGER STUDIES*, Proceedings of the VAK-2021 conference, Aug 23–28, 2021, Edited by A.M. Cherepashchuk, Moscow Janus-K, 2022, DOI: 10.51194/VAK2021.2022.1.1.088, труды конференции.
6. G. Franzese, S.Nuria, F.Esposito, A.Zakharov, I.Kuznetsov, A.Lyash *et al.* Analysis and management algorithms of the noise level for the ExoMars MicroMED instrument, 2022 *IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, 2022, pp. 225-230, doi: 10.1109/MetroAeroSpace54187.2022.9856236.

Конференции, тезисы и абстракты

1. I.A. Kuznetsov, A.V. Zakharov, G.G. Dolnikov, A.N. Lyash, S.A. Bednyakov, A.E. Dubov, M. Essam, A.A. Kartasheva, A.Yu. Poroikov, I.A. Shashkova, A.V. Shekhovtsova, S.I. Popel. LUNAR DUSTY PLASMA INVESTIGATION INSTRUMENTS ONBOARD “LUNA-25” AND “LUNA-27” SPACECRAFTS in abstract book of THE 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PHYSICS OF DUSTY PLASMAS, p.73, Moscow, May, 2022.
2. 2) Abdelaal, M. E., Zakharov, A. V., Kuznetsov, I, Lyash, A. Investigate the Dynamics of Dust Particles Under the Airless Bodies' Conditions to Study the Lunar Horizon Glow, abstract 53rd Lunar and Planetary Science Conference, March, 2022, Texas. LPI Contribution No. 2678, 2022, id.1260, <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2022/pdf/1260.pdf>.
3. 3) A.V. Zakharov, G.G. Dolnikov, .A. Kuznetsov A.N. Lyash, M. Essam, A.A. Kartasheva, A.Yu. Poroikov, A.V. Shekhovtsova, S.I. Popel Investigation of lunar dusty exosphere with future Russian lunar missions: Development of the Instrument & Simulation Control publication: 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 2022. Online at <https://www.cosparathens2022.org/>. Abstract B3.1-0021-22.
4. M E Abdelaal, A V Zakharov, G G Dolnikov, I A Kuznetsov, A Shekhovtsova, A N Lyash, I A Shashkova, A Y Poroykov, A E Dubov, A Kartasheva. Dust particle dynamics and

electromagnetic phenomena. Тезисы доклада, XIX конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 13-15 апреля 2022 г.

5. A. Kuznetsov, A.V. Zakharov, G.G. Dolnikov, A.N. Lyash, S.A. Bednyakov, A.E. Dubov, A.A. Kartasheva, I.A. Shashkova. INVESTIGATION OF THE LUNAR DUSTY PLASMA AND ELECTRIC FIELD DYNAMICS WITH LUNAR DUST MONITORING INSTRUMENT. 13MS3-MN-17, in abstract book of THE THIRTEENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 2022, p.109, IKI RAN 2022.
6. I. Kuznetsov, I. Shashkova, A. Poroykov, A. Zakharov, A. Lyash, S. Bednyakov, G. Dolnikov, A. Dubov, A. Kartasheva, A. Shehovtsova, M. Essam, E. Kronrod. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DUST PARTICLES LOFTING PROCESSES. 13MS3-SB-15, in abstract book of THE THIRTEENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 2022, p.271, IKI RAN 2022.
7. Абделаал М. Е., Захаров А.В., Докучаев И. В., Ляш А.Н., Кузнецов И. А., Дубов А.Е., Дольников Г.Г., Бедняков С.А. Анализ низкочастотных электромагнитных шумов для оценки пылевой динамики атмосфера Марса. Тезисы доклада на двенадцатой международной конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА», <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=224&thesis=9230>.
8. I. Kuznetsov, I. Shashkova, A. Poroykov, A. Zakharov, S. Bednyakov, A. Bychkova, G. Dolnikov, A. Dubov, A. Kartasheva, A. Lyash, and A. Shehovtsova. Experimental evidence of the dust particles detachment possibility in the E-field. Astronomy at the epoch of multi messenger studies. Proceed. of the VAK-2021 conference, Aug. 23-28, 2021. Ed. By A.M. Cherepaschuk et al., Moscow, Janus-K, 2022, pp.246-248. DOI: 10.51194/VAK2021.2022.1.1.088.
9. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, and A. V. Zakharov. Dusty Plasmas at the Moon: Current Research and New Vistas, 18th International Workshop “Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation” (Moscow, Russia, 2022), Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 2022.
10. I. A. Kuznetsov, A. V. Zakharov, G. G. Dolnikov, A. N. Lyash, S. A. Bednyakov, A. E. Dubov, M. Essam, A. A. Kartasheva, A. Yu. Poroikov, I. A. Shashkova, A. V. Shekhovtsova, and S. I. Popel. Lunar Dusty Plasma Investigation Instruments Onboard “Luna-25” and “Luna-27” Spacecrafts, 9 ICPDP. 9th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas. Space Research Institute (IKI). Moscow. Russia. May 23-27, 2022, Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow (2022), p. 73.
11. A. V. Zakharov, S. I. Popel, and L. M. Zelenyi. Dusty Plasmas in the Vicinity of the Moon: Current Research and New Vistas, 9 ICPDP. 9th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas. Space Research Institute (IKI). Moscow. Russia. May 23-27, 2022, Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow (2022), p. 127.

12. S. I. Popel, L. M. Zelenyi, and A. V. Zakharov. Dust and Dusty Plasmas at the Moon: Current Research and New Vistas, 44th COSPAR Scientific Assembly (Athens, Greece, 2022), July 16-24, 2022, C3.2-0032-22.
13. A. Zakharov, I. Kuznetsov, G. Dolnikov, A. Lyash, I. Shashkova, M. Essam, A. Kartasheva, S. Popel, A. Shekhovtsova, and E. Kronrod. Investigation of Lunar Dusty Exosphere with Future Russian Lunar Missions: Development of the Instrument and Simulation Control, 44th COSPAR Scientific Assembly (Athens, Greece, 2022), July 16-24, 2022, B3.1-0021-22.
14. I. Kuznetsov, I. Shashkova, A. Poroykov, A. Zakharov, S. Bednyakov, A. Bychkova, G. Dolnikov, A. Dubov, A. Kartasheva, A. Lyash, and A. Shekhovtsova. Experimental evidence of the dust particles detachment possibility in the E-field. Astronomy at the epoch of multi messenger studies. Proceed. of the VAK-2021 conference, Aug. 23-28, 2021. Ed. by A.M. Cherepaschuk et al., Moscow, Janus-K, 2022, pp. 246-248. DOI: 10.51194/VAK2021.2022.1.1.088.

Статья в научно- популярном журнале

Л.Зеленый, А.Захаров. Загадки лунной пыли. Русский Космос, 2022, № 2, стр. 42-49.