

Отчет 2021 г.

Тема ПЛАНЕТА. Исследование атмосфер и поверхностей планет

Гос.рег. № 01200602993

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

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|--|
| ВВЕДЕНИЕ | |
| 1 Раздел 1 Марс. | |
| 2 Раздел 2 Венера | |
| 3 Раздел 3 Ранняя эволюция планетных тел..... | |
| 4 Раздел 4 Малые тела Солнечной системы..... | |
| 5 Раздел 5 Внесолнечные планетные системы | |
| 6 Раздел 6 Теоретические исследования..... | |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | |

Раздел 4. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Лабораторные методы исследований приповерхностной экзосферы Луны и других безатмосферных тел

В 2021 году продолжались лабораторные исследования и моделирование динамических плазменно-пылевых процессов, которые могут встречаться вблизи поверхности Луны и других безатмосферных тел. Эти исследования проводились на вакуумных установках отд. 53 ИКИ РАН.

4.1.1 Определение величины напряженности электрического поля, необходимой для возможного отрыва частиц реголита безатмосферных тел

Наиболее вероятной причиной левитации пылевых частиц над освещенной поверхностью безвоздушных тел является электростатический механизм. Однако есть две существенные проблемы, возникающие при объяснении этого эффекта. Первая из них связана с вопросом о том, как электрический заряд (несколько единиц или даже десятков элементарных зарядов e^-), необходимый для левитации в поле двойного электрического слоя, может накапливаться на пылинке, лежащей на поверхности, и насколько большим он должен быть. Вторая проблема связана с выяснением природы силы, которая отрывает частицу пыли от поверхности, преодолевая адгезионную силу Ван-дер-Ваальса. По ряду гипотез (Hartzell et al., 2011; De, Criswell, 1977), для отрыва частиц необходимо электрическое поле, таким образом поверхность тела должна обладать неким потенциалом, отличным от электрического потенциала приповерхностной плазмы. Величина напряженности поля оценивается как 10^3 В/см. В лабораторной установке была воссоздана ситуация нахождения пылевых частиц (симулянта) на диэлектрической поверхности в поле с напряженностью 3125 В/см. При приложении такого электрического поля наблюдался массовый отрыв частиц от поверхности по параболическим траекториям, что подтверждает ряд результатов, полученных в теоретических работах.

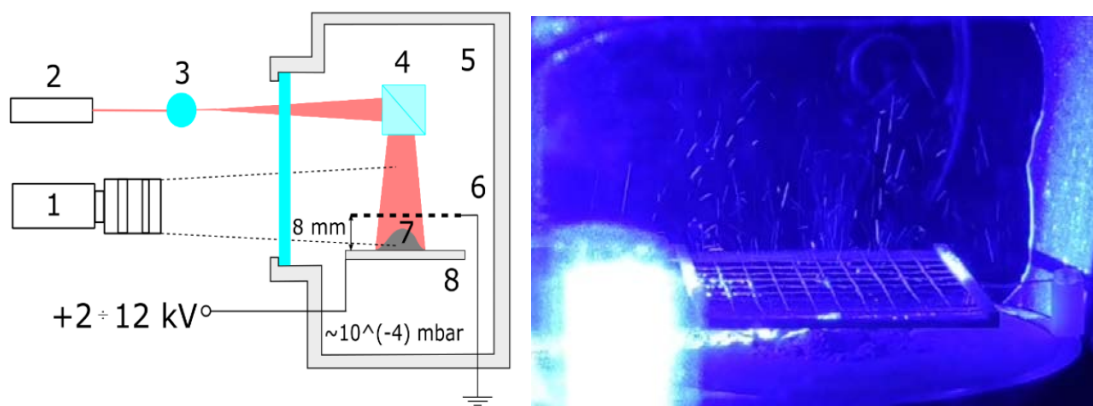


Рисунок – Схема эксперимента по созданию условий для левитации частиц (слева, 1 – скоростная камера, 2 – лазер, 3,4 – оптическая схема для подсветки частиц, 5 – вакуумная камера, 6 – заземленная сетка, 7 – образцы частиц, 8 – подложка) и треки взлетевших частиц (справа).

4.1.2 Восстановление траекторий пылевых частиц при моделировании физических процессов в приповерхностной экзосфере Луны

Выполнены лабораторные исследования по визуализации движения пылевых частиц с одновременной оценкой ее параметров. При выполнении исследований использовалась экспериментальная установка на основе вакуумной камеры для физического моделирования левитации пылевой плазмы. Визуализация левитации пылевых частиц осуществляется стереосистемой из двух камер. Частицы освещались лазерным лучом, который формируется специальной оптической системой.

Основная цель работы - определение траектории левитации частицы в трехмерных координатах. Траектории были получены классическим подходом - вычислением координат трехмерных точек из двухмерных координат точек с разных камер стереосистемы. Максимальная мощность источника света была ограничена из-за возможности дополнительного воздействия на исследуемые частицы. Поэтому недостаток света в исследуемом объеме привел к необходимости использования специальной техники обработки изображений.

Предлагаемый подход и методика обработки изображений позволяют не только визуализировать, но и получать количественные значения параметров левитации. Эти параметры вносят ценный вклад в физические эксперименты по моделированию левитации пылевой плазмы.

Разработанный инструмент визуализации траекторий пылевых частиц необходим для адекватной интерпретации научных данных, полученных в ходе планируемого эксперимента ПМЛ на лунных спускаемых аппаратах «Луна-25» (запуск запланирован на 2022 г.) и «Луна-27».

По материалам исследований опубликована статья в журнале Measurement (Q1).

4.1.3 Метод оценки запыленности поверхностей КА

Проведены лабораторные исследования, направленные на разработку методов оценки запыленности поверхностей КА. Проведены калибровки датчика: сняты показания при распределении кратных масс монодисперсной пыли. Даны оценки чувствительности датчика к пылевым частицам. Для 0,0025 г песка с размером частиц 20-25 мкм, распределенного равномерно по чувствительной области датчика, составляющей $S = 3.8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, зафиксирована чувствительность по К и ИК каналам датчика. Для измерений использован датчик МАХ30105.

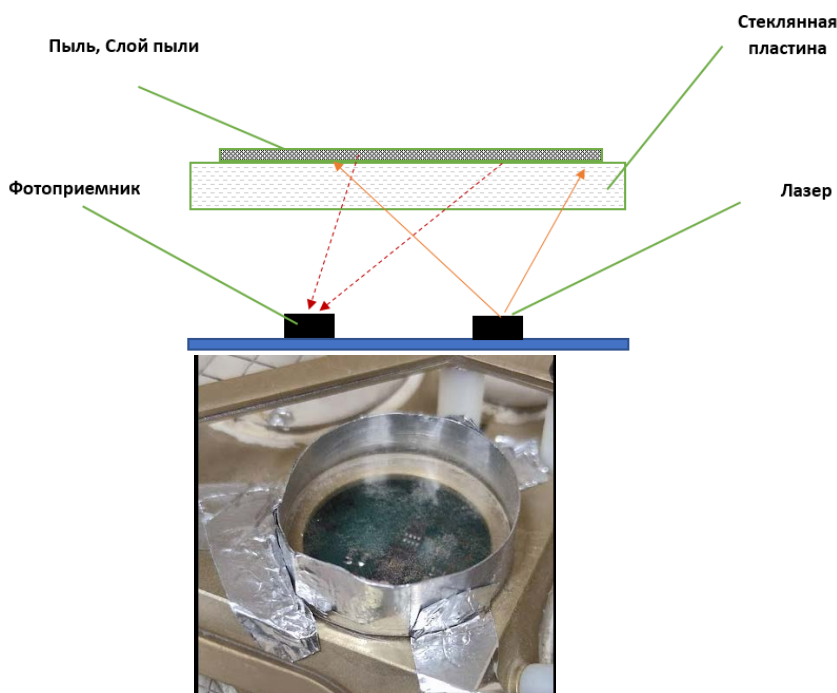


Рисунок – Схема работы датчика определения запыленности, фотография чувствительной области датчика МАХ3105.

4.1.4. Разработка метода регистрации пылевых частиц на орбитах Луны

Выполнены исследования возможности регистрации пылевых частиц на орбитальном аппарате вокруг Луны. Метод регистрации основан на установке пьезодатчиков на корпусе панелей солнечных батарей КА. Численные оценки и лабораторное макетирование показало, что прибор, основанный на предложенном методе, должен иметь апертуру на полтора порядка больше, чем прибор LDEX, работавший на КА LADEE. Кроме того, порог диапазона скоростей регистрируемых микрочастиц на орбите Луны таким прибором будет значительно больше в сравнении с возможностями прибора LDEX.

Получены экспериментальные данные, подтверждающие работоспособность методов детектирования межпланетной пыли с помощью солнечных панелей космических аппаратов. Опыты проводились с помощью небольшого фрагмента ($\sim 200 \text{ см}^2$) солнечной панели с приклеенными к его поверхности пьезоэлектрическими датчиками для регистрации механического импульса, подключаемых напрямую или через усилитель к осциллографу. На разные участки этой поверхности с высоты 10 см производилось сбрасывание одиночных сферических металлических частиц, при свободном падении

приобретающих импульсы, предположительно, входящие в диапазон значений, характерных для межпланетной космической пыли субмикронного размера. Было показано, в частности, что сигнал от частицы размером 0,2 мкм может быть зарегистрирован даже в отсутствие усиления, а использование системы регистрации из 3 датчиков позволяет при известной скорости распространения акустических волн в материале с хорошей точностью рассчитывать место попадания частицы в солнечную панель. Эти данные указывают на возможность использования метода для оценки одиночных или суммарных импульсов частиц, встречающихся на пути движения космического аппарата, а также для определения потоков таких частиц. Метод позволяет производить наблюдения за межпланетной и орбитальной пылью с апертурой детектора более 1 м^2 , достигаемой за счет использования элементов конструкции аппарата (солнечных панелей), т. е. при минимальных массовых потребностях (масса одного пьезодатчика не превышает 10 г). Также с помощью таких датчиков возможно наблюдать степень сохранности солнечной панели основываясь на регистрации частоты колебаний панели.

На основе полученных результатов подготовлено предложение по прибору для включения в состав орбитального аппарата Луна-26.

4.2. Изучение взаимовлияния лунных посадочных аппаратов и приповерхностной экзосферы Луны

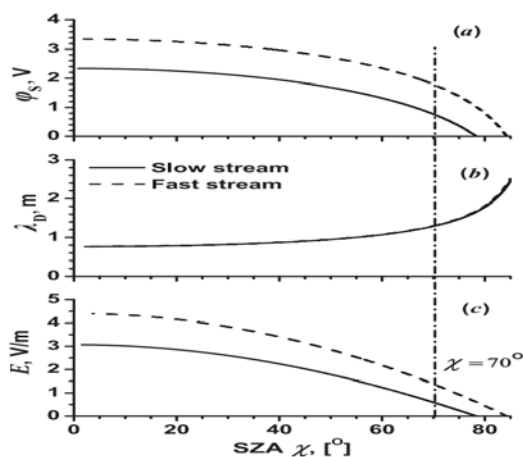
Проводились исследования взаимовлияния лунных посадочных аппаратов и приповерхностной экзосферы Луны.

В частности, продолжались работы по численному моделированию влияния приповерхностной плазмы у Луны на распределение электрического потенциала на корпусе посадочного аппарата. При этом рассматривались конкретные случаи изменения потенциала КА с учетом предполагаемого места посадки КА Луна-25 и в зависимости от местного времени.

Результаты работы были опубликованы и докладывались на конференциях.

4.3. Изучение условий плазменно-пылевой экзосферы в полярных областях приповерхностной экзосферы Луны.

С целью поддержки исследований динамики пылевых частиц в приповерхностной экзосфере Луны с помощью посадочного аппарата Луна-25, проводились исследования возможных условий в предполагаемом месте посадки КА Луна-25. Предлагаемые места посадки станций Луна-25 расположены в районе кратера Богуславского (около 70° лунной широты в Южном полушарии). Получены значения потенциала лунной поверхности ($\phi_s = 0,8 \div 1,8 \text{ В}$), длины Дебая ($\lambda_D = 1,3 \text{ м}$) и электрического поля ($E = 0,6 \div 1,4 \text{ В/м}$) на 70° широте Луны в зависимости от скорости солнечного ветра, и определено распределение частиц пыли вблизи этих широт. Предложено краткое описание методов определения параметров пылевой плазмы вблизи лунной поверхности.



5.

Рис.1 Зависимость потенциала ϕ_s , дебаевского радиуса λ_D , и электрического поля от лунной широты

Расчет распределения частиц пыли на 77° широте в зависимости от высоты над лунной поверхностью указывает на характерный диаметр частиц пыли ≤ 200 нм при концентрации $\sim 2000/\text{см}^3$. Чувствительность пьезоэлементов, входящих в состав прибора ПмЛ для Луны-25, не позволяет измерять параметры пылевых частиц таких малых размеров, но позволяет изучать влияние микрометеоритов на формирование лунного реголита.

По материалам исследований опубликована статья.

4.4. Изучение флуктуаций электрического заряда и локальных электрических полей на поверхности диэлектрика при воздействии потоков плазмы и УФ излучения

Продолжались теоретические работы по изучению флуктуаций электрического заряда и локальных электрических полей на поверхности диэлектрика при воздействии потоков плазмы и УФ излучения. Эти исследования направлены на понимание возникновения условий отрыва пылевых частиц от поверхности реголита. Отрыв пылевых частиц от поверхности реголита может происходить тогда, когда значения возникающих электростатических полей превышают гравитационную силу и силу адгезии Ван дер Ваальса. В выполненных работах показано, что такие условия могут возникнуть в микроробластях поверхности при флуктуациях электрического заряда на поверхности реголита под действием потоков заряженных частиц или УФ излучения (фотоэффекта).

По материалам этих исследований опубликована статья в журнале Plasma.

Работы, которые выполнялись в 2021 году группой исследований космической пыли вне темы Планета

1. Подготовка прибора «Пылевой Мониторинг Луны» (ПмЛ), включенного в состав КНА проекта Луна-25
2. Подготовка прибора «Пылевой Комплекс» (ПК), включенного в состав КНА проекта ЭкзоМарс

3. НИР «Разработка основ физической модели окололунного пространства для актуализации приоритетных технологических направлений и перечень ключевых технологических средств и технологий в обеспечение сценариев пилотируемых миссий до 2040 года». Договор с ЦНИИМАШ.

Публикации и выступления на конференциях

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

- A.V.Zakharov, A.Yu.Poroykov, S.A.Bednyakov, A.N.Lyash, I.A.Shashkova, I.A.Kuznetsov, G.G.Dolnikov, Recovery of dust particles trajectory in modeling physical processes in the near-surface exosphere of the moon, *Measurements*, 171, 108831, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.108831> **Q1**
- А. В. Захаров, Г. Г. Дольников, И. А. Кузнецов, А. Н. Ляш, А. Е. Дубов, В. В. Афонин, С. А. Бедняков, А. С. Бычкова, В. А. Грушин, И. В. Докучаев, А. А. Каргашева, С. И. Попель, И. А. Шашкова, А. В. Шеховцова, А. В. Яковлев, М. М. Васильев, Е. А. Лисин, О. Ф. Петров, Н. Д. Борисов, Л. М. Зеленый. Прибор ПМЛ на посадочном аппарате ЛУНА-25: Плазменно-пылевые измерения в приповерхностной экзосфере. *Астрономический Вестник*, 2021, том 55, № 6, с. 1–12
- G G Dolnikov, A A Kartasheva, A S Bychkova, I A Shashkova, I A Kuznetsov, A N Lyash, A E Dubov, S I Popel and A V Zakharov Dusty plasma environment near lunar surface. XXXV International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2020). *Journal of Physics: Conference Series* 1787 (2021) 012050 IOP Publishing
 doi:10.1088/1742-6596/1787/1/012050 1
- Л. М. Зелёный, А. В. Захаров, И. А. Кузнецов, А. В. Шеховцова. Лунная пыль как фактор риска при исследовании Луны. *Вестник Российской академии наук*, 2021, том 91, № 11, с. 50–60 50 © 2021 г.
- Zakharov, A.V.; Rosenfeld, E.V. Charge Density Fluctuations on a Dielectric Surface Exposed to Plasma or UV Radiation. *Plasma* 2021, 4, 201–213. <https://doi.org/10.3390/plasma4020012> (MPDI)
- A. Zakharov, The Lunar dust puzzle. *Oxford Research Encyclopedia. Planetary science*.
<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.23>
<https://oxfordre.com/planetaryscience/view/10.1093/acrefore/9780190647926.001.0001/acrefore-9780190647926-e-23>

Статьи в сборниках материалов конференций

- Kuznetsov et al., Experimental evidence of the dust particles detachment possibility in the E-field, *Сборник трудов конференции ВАК-2021 (в печати)*
- Бычкова А.С. и др. Применение панелей солнечных батарей космических аппаратов для регистрации пылевых частиц в планетных миссиях, *Сборник трудов XVIII конференции молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования"*, 14–16 апреля 2021 г., ИКИ РАН, Москва, 2021, с. 13-19.

Доклады и тезисы конференций

- Кузнецов И.А. et al., Лунная плазменно-пылевая экзосфера: методы моделирования и исследования, XVIII Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования", 14–16 апреля 2021 г., ИКИ РАН
- Кузнецов И.А. et al., Гранулометрия лунной пыли и методы её исследований, XXII международной конференции "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле", 7 сентября - 3 октября 2021 года, ГЕОХИ РАН, ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН.
- Zakharov A. V. et al., Lunar Near-Surface Dusty Plasma Investigations with PmL Instrument of the "Luna-25" Mission, Lunar Surface Science Workshop, Fundamental and Applied Lunar Surface Research in Physical Sciences, August 18–19, 2021
- Захаров А.В., Кузнецов И.А., Бедняков С.А. и др. «Пылевые частицы безатмосферных тел: изучение in-situ и лабораторное моделирование», Всероссийская астрономическая конференция 2021, 23-28 августа 2021, ГАИШ МГУ
- Alexander ZAKHAROV et al., Dust Complex instrument onboard ExoMars-2020 Surface Platform, 12M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 11-15, 2021
- Inna SHASHKOVA et al., Investigation of the dust particles dynamics under the airless bodies' conditions: experimental set-up, 12M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 11-15, 2021
- Iliа KUZNETSOV et al., Investigation of the lunar near-surface dusty plasma exosphere interaction with spacecraft with PiC method simulation, 12M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 11-15, 2021
- Alexander ZAKHAROV et al., Lunar near-surface dusty plasma investigations with PmL instrument, 12M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 11-15, 2021
- Mohamad ESSAM ABDELAAL et al., Study the trajectory of dust particles by simulating the plasma environment on the Moon's surface, 12M-S3, Space Research Institute, Moscow, Russia, October 11-15, 2021
- Отчет № СЧ НИР 2021/54/001 о составной части НИР «Разработка основ физической модели окололунного пространства для актуализации приоритетных технологических направлений и перечня ключевых технологических средств и технологий в обеспечение сценариев пилотируемых миссий до 2040 года». (промежуточный, этап 1). Руководитель СЧ НИР, А.В.Захаров. УДК 52(15):001.12/1.8. Рег.№ НИОКТР СЧНИР2021/54/001. Рег.№ ИКРБС. [459 стр., 160 рис., 26 таб., 525 ист.](#)