Итоговый отчет о выполнении проекта
№ 17-12-01458
«Методы исследований динамики пылевых частиц безатмосферных тел»

(представляется в последний год практической реализации проекта вместе с отчетом о выполнении проекта)

5.1. Заявленный в проекте план работы на весь срок выполнения проекта, предлагаемые методы и подходы *(в соответствии с исходной заявкой на участие в конкурсе)*

Методы и подходы решения поставленных задач:
Основываясь на теоретических проработках, направленных на выяснение общей картины современных представлений опонимании формирования приповерхностной экзосферы вблизи безатмосферных тел, процессов динамики пылевых частиц вблизи их поверхностей, предполагается выполнить численное моделирование процессов воздействия внешних факторов космического пространства (солнечного УФ-излучения, потоков солнечного ветра, микрометеоритов) на реголит в условиях вакуума. Кроме того, в рамках численного моделирования будет произведена оценка взаимовлияния посадочного аппарата и окружающей среды для определения возможных искажений как при работе научных приборов, так и представляющих угрозу работе аппарата в целом. Выполнение численного моделирования предполагается классическим методом моделирования плазмы «частиц в ячейках» (PiC, Particle-in-cell) с добавлением пылевой компоненты.Для выполнения численного моделирования предполагается провести детальный анализ возможностей имеющихся средств численного моделирования пылевых сред, включая такие программные продукты, как:
•SPIS-DUST, разработанная при поддержки Европейского космического агентства и позволяющая симулировать трехмерные PiC-модели влияния плазменно-пылевой экзосферы на КА;
•КАРАТ, разработанное в ОИВТ РАН и позволяющее проводить моделирование плазменных образований, их динамики, неустойчивостей, взаимодействия пылевых частиц в плазме;
• iPic3D, созданный консорциумом EPiGRAM (ExascaleProGRAmmingModels) и представляющий собой гибкий, адаптируемый непосредственно для исследуемых условий код на языке C++.
По результатам анализа существующих программных продуктов будет принято решение о дальнейшей работе с ним, либо же об использовании собственных методов численного моделирования в среде Matlab или аналогичной.
При рассмотрении конкретных задач численного моделирования будут применяться методы магнитной гидродинамики, физической кинетики, нелинейной физики плазмы, радиационной газовой динамики, химической физики, квантовой механики и квантовой молекулярной динамики.В рамках разработки рекомендаций по развитию экспериментальных методов исследований, сбора и анализа частиц лунной пыли, исследования свойств пылевой плазмы и электрофизических свойств лунной поверхности, измерения электрических полей у Луны, а с целью исследования воздействия пылевых частиц на лунные посадочные аппараты и из системы, будут проводиться тесные консультации с разработчиками научных приборов и служебных систем лунных посадочных станций «Луна-Глоб», «Луна-Ресурс», включенных в Федеральную космическую программу РФ.
Основные задачи численного моделирования включают в себя:
• проверка и уточнение имеющихся и создаваемых теоретических моделей формирования приповерхностной экзосферы вблизи безатмосферных тел, процессов динамики пылевых частиц вблизи их поверхностей;
• детальное исследование проявлений пылевой динамики в зависимости от внешних условий;
• детальное исследование влияния космического аппарата, находящегося на поверхности тела, лишенного атмосферы на результаты измерений параметров плазменно-пылевой среды и электростатические поля.
• детальное исследование влияния пылевой динамики на КА и их системы.
Вместе с тем, планируется доработать существующие экспериментальные установки, позволяющие проводить лабораторное моделирование пылевой динамики при различных внешних условиях. В качестве имеющегося задела предполагается использовать две установки:
(1) установка на базе вакуумной камеры, позволяющая после доработки
• имитировать основные физические условия, связанные с приповерхностной пылевой динамикой и экзосферой, аналогичные условиям вблизи поверхностей Луны, астероидов и других безатмосферных тел (давление, УФ-излучение, потоки электронов и ионов, поток пылевых частиц, электрическое поле, магнитное поле, присутствие симулянта лунного реголита);
• измерять и отрабатывать методики измерения таких величин, как скорость, импульс, заряд пылевых частиц, давление,

напряженность поля, токи электронный и ионный;
• осуществлять работы с материалами-имитаторами реголитов;
• создавать условия в установке, отвечающие требованиям теоретических моделей, описывающих различные условия приповерхностной экзосферы и её взаимодействия с УФ-излучением, потоками солнечного ветра, с хвостом магнитосферы Земли, с целью проверки этих моделей
• изменять внешние параметры во времени для наблюдения за динамикой пыли (например, имитировать проход терминатора, изменения внешних параметров плазмы);
• устанавливать приборы и материалы для исследования воздействия на них пылевых частиц и внешних воздействий;
(2) установка на базе аэродинамической трубы, позволяющая:
• создавать потоки незаряженных пылевых частиц;
• измерять скорость воздушных потоков, концентрацию частиц;
• устанавливать приборы и материалы для исследования воздействия на них пылевых частиц;
• проверять и отрабатывать новые методики регистрации и исследования пылевых частиц;
Доработка установки на основе вакуумной камеры планируется начать с усовершенствования имеющегося задела - установки для экспериментальных исследований и моделирования плазменно-пылевых процессов - путем ее последовательной модернизации и отработки новых технологий создания условий, приближенных к условиям вблизи поверхностей космических тел.
При проектировании установки на базе аэродинамической трубы будет использован опыт создания малой аэродинамической трубы, имеющейся в ИКИ РАН для экспериментов с незаряженными пылевыми частицами и отработки детекторов для регистрации низкоскоростных микрочастиц.
На протяжении всего периода выполнения проекта планируются работы с экспериментальными установками (как уже имеющимися, так и вновь созданными) и сопоставлением полученных на них результатов с данными численного моделирования.

Общий план работы на срок выполнения проекта:
2017 г.
• анализ и уточнение теоретических моделей, подготовка публикаций;
• подготовка программного продукта к численному моделированию
• модифицирование имеющихся лабораторных средств экспериментальной работы;
• экспериментальные исследования с использованием лабораторных установок, подготовка публикаций;
• разработка и усовершенствование методов регистрации низкоскоростных микрочастиц (~ 10^(-10) - 10^(-8) г).
• подготовка отчета по работам в 2017 г.
2018 г.
• Продолжение работ разработке теоретических моделей, подготовка публикаций;
• Численное моделирование поведения пылевых частиц и пылевой динамики при различных внешних условиях - различное состояние солнечного ветра, пересечение хвоста магнитосферы Земли (для случая Луны), подготовка публикаций;
• Работа с экспериментальными установками, экспериментальная имитация пылевых и плазменно-пылевых сред, подготовка публикаций;
• Дальнейшая модификация экспериментальных установок, продолжение работ по созданию новых экспериментальных установок
• подготовка отчета по работам в 2018 г.
2019 г.
• Продолжение работ разработке теоретических моделей, подготовка публикаций;
• Численное моделирование влияния посадочного аппарата на результаты измерений плазменно-пылевых параметров приповерхностных экзосфер безатмосферных тел, подготовка публикаций;
• Дальнейшая модификация экспериментальных установок;
• Проведение экспериментов по имитации пылевых и плазменно-пылевых сред в различных условиях и их воздействие на реголит с привязкой к конкретным космическим телам (Луна, спутники Марса, астероиды)
• Проведение экспериментов по оценке влияния пыли и плазменно-пылевой среды на приборы и материалы, включая биологические, а также на служебные системы космических аппаратов
• Выработка рекомендаций по уменьшению влияния воздействия пылевых частиц на элементы и системы космических аппаратов.
• подготовка отчета за 2019 г. и по проекту в целом.

Ожидаемые результаты
По завершению работы по проекту предполагается:
1. получить новые результаты по теоретическим исследованиям и численному моделированию формирования плазменно-пылевой экзосферы вблизи тел, лишенных атмосферы, в частности учет влияния рельефа поверхности Луны (холмы, большие камни, кратеры) на приповерхностные электростатические поля и динамику пыли, роль локальных карстовых магнитных полей, особенностей плазменно-пылевых процессов в районе терминатора Луны, изменения свойств приповерхностной экзосферы Луны при пересечении Луной при ее орбитальном движении хвоста магнитосферы Земли и др.
2. получить новые результаты, по теоретическим исследованиям и численному моделированию процессов в приповерхностных областях малых тел Солнечной системы - спутников Марса, Фобоса и Деймоса, астероидов, а также влияния этих процессов на формирование пылевого тора,связанного с орбитами этих тел,
3. получить результаты процессов воздействияпылевых частиц на различные материалы (включая биологические),
4. предложить методы регистрации низкоскоростных (< 100 м/сек) микрочастиц (10^(-10) - 10^(-8) г) для космического применения,
5. выработать рекомендации и предложить методы защиты космических аппаратов и их систем от агрессивного влияния пылевой компоненты приповерхностной экзосферы.

5.2. Содержание фактически проделанной работы, полученные результаты *(за все годы, не более 10 стр.)*
5.2.1. Выполнена теоретическая работа, в которой исследована роль зарядовых флуктуаций в левитации пылевых частиц над поверхностью безатмосферных тел. Как известно, на микро частицу, лежащую на поверхности реголита безатмосферного небесного тела (Луна, спутники Марса, астероиды) в общем случае действуют, три основные силы: сила гравитации Fg, сила адгезии Ван-дер-Ваальса FvdW, удерживающие частицу на поверхности и электростатическая сила Fc, отталкивающая ее от поверхности. Объяснение возможности левитации частиц над поверхностью сталкивалось с трудностью, что указанные три силы разной природы, действующие на пылинку с характерным размером порядка сотен или тысяч нанометров, совершенно несопоставимы по величине, причем Fc, которая должна поднимать частицу от поверхности, на много порядков меньше сил, удерживающих ее на поверхности, Fc << Fg << FvdW. Выполненные эксперименты на поверхности Луны показали, что средняя величина приповерхностного электростатического поля не способна создать электростатическую силу, способную преодолеть силу адгезии ванн дев Вальса и оторвать пылевыу частицу от поверхности луны. В течение последних 10-20 лет предпринимались попытки объяснить указанную трудность. При этом, несмотря на некоторые успехи, многие вопросы оставались открытыми. В серии теоретических работ, выполненных в рамках гранта РНФ №17-12-01458, удалось найти механизм возникновения отталкивающих электростатических сил, связанных с флуктуациями заряда на поверхности реголита, которые по порядку величины близки к силам адгезии ванн дел Вальса.

5.2.2. Проведено описание волновых процессов при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны в пренебрежении магнитным полем. Показано, что ионно-звуковые волны возбуждаются в областях магнитного переходного и/или пограничного слоев магнитосферы в результате развития линейной гидродинамической неустойчивости, тогда как генерация пылевых звуковых волн обусловлена развитием линейной кинетической неустойчивости во всей области взаимодействия хвоста магнитосферы с пылевой плазмой у Луны. В обеих ситуациях развитие неустойчивостей обусловлено относительным движением ионов магнитосферы и заряженных пылевых частиц. Исследованы процессы развития ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентности. Для случаев ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентности определены плотности энергии колебаний, эффективные частоты столкновений, а также возникающие в системе электрические поля.
Показано, что в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Марса – Фобоса за счет фотоэлектрических и электростатических процессов происходит формирование пылевой плазмы. На основе физико-математической модели для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещенной части Фобоса определены функции распределения фотоэлектронов у его поверхности, найдены высотные зависимости концентрации пылевых частиц, их зарядов и размеров, а также электрических полей. Из-за малой гравитации над поверхностью Фобоса поднимаются существенно более крупные пылевые частицы, чем над поверхностью Луны. При этом роль адгезии, которая представляется существенным процессом, препятствующим отрыву пылевых частиц от лунной поверхности, на Фобосе значительно уменьшается.
Рассмотрена природа возникновения двух плазменно-пылевых облаков в результате удара метеороида о поверхность Луны. Показано, что одно из облаков сформировано частицами реголита, выбрасываемого ударной волной

метеороидного удара с лунной поверхности в свободное пространство, тогда как второе - затвердевшими каплями расплава. Проведены вычисления основных характеристик этих облаков: скоростей расширения облаков, характерных размеров частиц в каждом из облаков, концентраций частиц, их зарядов и т.д. Получено качественное соответствие данным наблюдений, полученных в расчетах скоростей расширения облаков.
Показана возможность образования микросферул в инициированных ударами метеороидов о поверхность Луны плазменно-пылевых процессах. Продемонстрировано, что из вещества зоны плавления, формируемой в результате удара высокоскоростного метеороида о лунную поверхность, образуются сферулы, которые первоначально поднимаются над поверхностью Луны, а затем падают на нее. Именно такие сферулы и наблюдаются при исследовании лунного грунта. Находясь над поверхностью Луны, жидкие сферулы затведевают и в результате взаимодействия с электронами и ионами, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды, становясь частью плазменно-пылевой системы над Луной. Получены значения концентрации сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью, а также их распределение по размерам. Верхний предел размера сферул в их распределении обусловлен существованием верхнего предела статистических данных по размерам для достаточно мелких метеороидов и составляет несколько микрометров. Размеры сферул, существенно большие 1 мкм, соответствуют размерам метеороидов, большим 1 см. Для крупных метеороидов однозначную статистику по размерам построить не удается. Поэтому возможным оказывается лишь построение распределения по размерам сферул, имеющих микронные и субмикронные размеры. Для достаточно крупных сферул возможна лишь оценка размеров метеороидов, удары которых по лунной поверхности послужили причиной образования этих сферул. Показано, что присутствие сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью может быть обнаружено в рамках будущих миссий «Луна-25» и «Луна-27» с помощью пьезоэлектрических датчиков.
Представлено описание возбуждения нижнегибридных волн в области взаимодействия приповерхностной окололунной пылевой плазмы и магнитосферы Земли. Определены линейные инкременты, характеризующие возбуждение нижнегибридных волн. Показано, что основным нелинейным процессом, в котором участвуют нижнегибридные волны, является модуляционное взаимодействие. Проведена оценка плотности энергии нижнегибридных волн, характеризующей нижнегибридную турбулентность. Найдены электрические поля, возникающие при развитии нижнегибридной турбулентности в плазменно-пылевой системе у Луны.
5.2.3. В ходе выполнения проекта была проведена работа по численному моделированию методом PiC для изучения пламенно-пылевой динамики в различных условиях. Численное моделирование осуществлялось с целью:
• оценки плазменно-пылевой динамики Луны, получение значений потенциалов поверхности и приповерхностной плазмы, а также динамики пылевой компоненты (концентрации, скоростей частиц в зависимости от их размеров и свойств) при различных условиях и воздействиях на поверхность;
• оценки взаимовлияния КА на поверхности с лунной экзосферой, влияния плазменно-пылевой динамики на системы и научные инструменты КА при различных условиях;
• верификации результатов, полученных в экспериментальной установке, а именно: сравнения получаемых концентраций пыли в зависимости от условий; оценка плазменной динамики; проведение серии моделирований с целью нахождения оптимальных условий для отрыва и левитации пыли.
• определения плазменно-пылевой динамики вблизи поверхностей малых безатмосферных тел на примере Фобоса, оценка пылевых концентраций на разных высотах, сравнение с полученными теоретическими данными.
Для решения задач по численному моделированию, в результате анализа имеющихся кодов и ПО плазменно-пылевых процессов и их влияния на космические аппараты (КА), было выбрано ПО SPIS-Dust, позволяющее, при воссоздании необходимых параметров области моделирования, модели поверхности безатмосферного тела и модели КА, проводить численное трехмерное моделирование пылевой плазмы и ее взаимодействия с поверхностями методом частиц в ячейках (известен также, как PiC – Particle-in-Cell). По данным, собранным для подготовки к реализации моделирования, были проведены расчеты условий для Лунной поверхности при различных взаимных расположениях Луны, Земли и Солнца. Были учтены воздействия на окружающую плазму со стороны КА, также как и обратное воздействие. Для моделирования были заданы свойства реголита, влияющие на расчет динамики пылевой компоненты в лунной экзосфере. Для детального исследования взаимовлияния лунной экзосферы и КА была создана модель КА с заданными свойствами материалов и поверхностей, а также была разработана эквивалентная электрическая схема КА. Для моделирования плазменно-пылевой динамики малых безатмосферных тел за образец взяты условия Фобоса. Для воссоздания условий вблизи поверхности Фобоса проделано следующее:
1. Моделирование счетных объемов для случаев плоской поверхности и случаев со значимым рельефом, призванным создать границы света и тени, а также сымитировать линию терминатора.
2. Заданы свойства поверхности Фобоса, соответствующие известным данным и теоретическим расчетам. Приняты соответствующие свойства поверхности (температура, плотность, проводимость).
3. Для моделирования заданы условия, соответствующие условиям вблизи поверхности Фобоса в разное время суток.

Задан соответствующий угол для Солнца, скорректировано значение солнечного излучения для орбиты Фобоса, использованы значения для энергий электронов, фотоэлектронов, ионов, а также их скоростей и концентраций. Задано значение ускорения свободного падения, соответствующее Фобосу.
4. Задан и настроен набор виртуальных детекторов в симуляции для оценки таких параметров, как динамика потенциала плазмы в различных точках над поверхностью, концентраций пылевых частиц в зависимости от высоты, скоростей и траекторий пылевых частиц.
5. Проведение численного моделирования для различных условий.
Условия, для которых произведено моделирование:
1. Плоская поверхность, Солнце в зените. Базовые оценки потенциалов поверхности и приповерхностной плазмы, пылевой компоненты.
2. Рельефная поверхность с наличием кратеров. Солнце под углом 30 градусов к горизонту.
3. Проводится подготовка публикации по результатам моделирования динамики приповерхностной экзосферы и её взаимовлияния с КА.
Для воссоздания условий эксперимента в вакуумной камере в рамках численного моделирования методом PiC в среде SPIS-Dust были проделаны следующие работы:
1. Моделирование трёхмерной модели экспериментальной установки в среде gmesh. Задание физических поверхностей и счетного объема. Учтена возможность различного расстояния между подложкой с исследуемым материалом и задающей сеткой.
2. Задание свойств поверхностей и используемых материалов, физических свойств внутри моделируемой экспериментальной установки.
3. Моделирование эквивалентной электрической схемы, используемой в эксперименте.
4. Определение свойств плазмы, внешних воздействий, гравитации и давления. Определение концентраций носителей плазмы. Определение свойств пылевой составляющей эксперимента.
5. Проведение моделирования и оценка результатов.
Было произведено численное моделирование для следующих условий:
1. Материал: непроводящие пылевые частицы Mica Powder; материал подложки: непроводящий; напряжение на задающей сетке: 5 кВ; расстояние до сетки: 3 мм;
2. Материал: частицы Вольфрама 10 мкм; материал подложки: проводящий; напряжение на задающей сетке: 8 кВ; расстояние до сетки: 7 мм;
3. Материал: непроводящие пылевые частицы Mica Powder; материал подложки: непроводящий; напряжение: отсутствует; используется источник электронов.

5.2.4. В соответствии с планом работ по лабораторному моделированию процессов в пылевой плазме проводились экспериментальные исследования по измерению параметров стохастического движения пылевых частиц методами механической (пьезоэлектрической), зарядовой и оптической регистрации. Эксперименты проводились на трех специально созданных установках, а именно:
- вакуумной установке с оптической системой регистрации левитирующих частиц под действием электростатических полей, термоэмиссионной электронной плазмы и ультрафиолетовой подсветки;
- вакуумной установке с электростатическим инжектором проводящих заряженных частиц;
- аэродинамической установке, позволяющей формировать потоки незаряженных частиц с заданными скоростями.
Произведен выбор и подготовка порошков (набора частиц), наиболее соответствующих реальным пылевым частицам, входящим в состав грунта Луны и Марса и способным образовывать приповерхностные слои при подъеме, обусловленном силами разной физической природы. Выбор порошков произведен по соответствию элементного состава материалов. Подготовка проб частиц производилась разделением на фракции по размерам, соответствующим гранулометрическому составу Лунного и Марсианских грунтов, на просеивающем устройстве «Виброгрохот».
Выполнены работы по разработке зарядо-чувствительных методов регистрации и измерению параметров сигналов, наведённых движущимися заряженными частицами. Разработан многоканальный измерительный комплекс, предназначенный для подключения и опроса блоков пьезо- и зарядо-чувствительных датчиков в различной конфигурации. Разработано программное обеспечение для обработки и отображения получаемых данных.
Произведены отладочные эксперименты. Выполнены серии экспериментов с различными наборами пылевых частиц и различной конфигурацией датчиков.
Выполнена доработка и модификация макетов датчиков с целью увеличения чувствительности метода по величине регистрируемого заряда, что достигалось как выбором конструкции датчиков заряда, так и улучшением характеристик зарядо-чувствительных усилителей. В части конструктивных доработок экспериментально подбирались сетки для индукционных датчиков с различными размерами ячеек, дополнительно вводились экранирующие сетки для

минимизации внешних наводок. В качестве ударных датчиков исследовались пьезокерамические пластины, электрический отклик от которых пропорционален количеству движения (импульсу) попадающих в них пылевых частиц.
Проведенные кросс-калибровочные измерения на установке с инжектором заряженных частиц (потоки заряженных частиц с размерами от 10 до 300 мкм и со скоростями от 2 до 60 м/сек) позволили провести отбор, тестирование и калибровки ударных датчиков, и датчиков заряда пылевых частиц. Вследствие того, что процессы инжекции, пролета частиц и моменты их фиксации являются случайными событиями, сопоставление импульса, заряда и электрического сигнала осуществляется статистически, после набора большого числа событий.
В результате проведенных экспериментальных работ определена чувствительность разработанных методов регистрации по количеству движения (импульсу), порог регистрации составил величину в 45*10^(-13) Н*сек, что позволяет обнаруживать и измерять контактным методом характеристики низкоскоростных частиц. Например, с массами от 1,5 *10^(-12) кг и менее, движущихся со скоростями 3 м/сек и более. Достигнутый уровень регистрации заряда единичной пролетающей частицы составил 1500 элементарных зарядов. Порог регистрации определен как превышение в 3 сигма над средним значением уровня шума. Следует отметить, что уровень порога регистрации в условиях космического эксперимента может быть в 2-3 раза лучше, поскольку отсутствуют характерные источники шума в виде вибраций работающей установки и электрических наводок. Такое предположение подтвердилось экспериментальной проверкой лабораторного прибора в экранированной, безэховой камере.
Для хранения и работы с большим объемом данных было создано «облачное хранилище» - база данных экспериментов, с возможностью удаленного доступа для участников работ, содержащая описание и процедуры для пакетной цифровой обработки экспериментальных данных, а также для их экспорта в стандартные форматы (MS Excel). [Электронный ресурс]: Облачное хранилище экспериментальных данных по моделированию условий в пылевой плазме у поверхности безатмосферных тел. Отдел физики планет ИКИ РАН (грант РНФ № 17-12-01458). URL: https://spacedust.space/ (дата создания 04.09.2017)).
Также проведена разработка источников плазмообразования и систем контроля параметров плазмы. Разработаны автономные электронные блоки для измерения вольтамперных характеристик плазмы зондами Ленгмюра.
Проведено физическое моделирование левитации пылевых частиц на поверхности безатмосферных тел. Разработана и создана вакуумная установка с оптической системой регистрации левитирующих частиц, состоящая из двух частей. Первая часть основана на вакуумной камере с турбомолекулярным насосом и датчиком давления. Внутри камеры находится диэлектрическая подложка, с электродом, расположенным под нею, на который подается напряжение от 2 до 12 кВ от высоковольтного источника напряжения. На подложку насыпаются частицы микронного размера из различных материалов. Над подложкой расположена металлическая сетка с шагом 5х5 мм, подсоединенная к нулевому потенциалу источника напряжения. Расстояние от решетки до подложки варьировалось в диапазоне 5-10 мм.
Вторая часть установки – это оптическая система иллюминации и регистрации изображений левитирующих частиц. Она состоит из полупроводникового лазера с длиной волны 450 нм или 532 нм (разные длины волн использовались в разных экспериментах), нескольких линз и зеркала для расширения лазерного пучка и направления его для подсветки исследуемой области, а также оптического окна вакуумной камеры. Объем подсвечиваемой области составил 5×5×3 см^3. Для регистрации изображений левитирующих частиц были использованы две камеры машинного зрения Baumer. Для определения параметров частиц разработан алгоритм цифровой обработки изображений и реализован в виде программного обеспечения. Для определения параметров частиц использовалась информация о траектории их полета. Для этого была применена стереосистема камер. Перед проведением эксперимента происходила калибровка стереосистемы с помощью классической мишени – «шахматной доски». Среднеквадратичное отклонение ошибки обратной проекции лучей при калибровке лежало в диапазоне 0,5-0,7 пикселя. Алгоритм обработки состоит из следующих этапов. Удаление шума путем вычитания из кадра обрабатываемого кадра без частиц. После этого проводится пороговая фильтрация изображений для выделения траекторий левитирующих частиц. Следующий шаг – определение связанных компонент и их фильтрация по длине и форме треков. Эти действия проводятся над изображениями с каждой камеры отдельно. Следующие этапы проводятся для двух кадров с разных камер, соответствующих одному моменту времени. Для определенных связанных компонент на одном изображении находятся соответствующие им пары на другом изображении. Поиск происходит путем расчета нормированной корреляционной функции. Далее происходит расчет двухмерных координат соответствующих точек траектории. Эти точки пересчитываются в трехмерные координаты по определенной на этапе калибровки информации о взаимном расположении камер стереоситемы.
Определённые траектории левитирующих частиц далее были использованы для оценки величины их заряда. Для этого использовалось приближение, что частицы ускоряются за счет электрического поля между подложкой и сеткой. После сетки частицы продолжают полет по баллистической траектории только под действием силы тяжести. В экспериментальных исследованиях были исследованы частицы SiO2 (размером 50 и 100 мкм), W (размером 10 мкм) и

частицы слюды (размером 15 мкм). Определённые заряды частиц лежат в диапазоне от 1,0*10^-16 до 3,0*10^-13 Кл.

Все планируемые работы выполнены полностью:
да

5.3. Основные результаты выполнения проекта *(не более 10 стр.)*

5.3.1. Учитывая квантовый и случайный характер возникновения заряда на поверхности реголита Луны и других безатмосферных тел, находящихся под влиянием солнечного УФ-излучения и потока солнечного ветра, на микро поверхностях реголита возникают флуктуации электрического заряда. Если размер таких микро поверхностей сопоставим или несколько больше размеров лежащих на них пылинок, то возникновение на них зарядовых флуктуаций позволяет решить основные проблемы, стоящие при объяснении левитации микро частиц над поверхностью Луны: (а) каким образом микроскопическая пылинка, лежащая на поверхности, может накапливать заряд в десятки или сотни единиц заряда, необходимые для отрыва частиц от поверхности и (б) каким образом эта частица, обладающая необходимым зарядом способна преодолеть силы адгезии, которые превышают ее гравитацию в тысячи и миллионы раз. Флуктуации заряда на поверхности, внутри которых находится пылинка, приводят к появлению подъемной силы, пропорциональной квадрату величины локальной плотности заряда. Простые оценки показывают, что этот механизм способен обеспечить возникновение сил отталкивания, по порядку величины сравнимых с силами Ван-дер-Ваальса. Оторвавшись от поверхности в сильном локальном флуктуирующем электрическом поле, частица попадает в слабое поле двойного слоя над поверхностью и левитирует.

5.3.2. Проведено описание волновых процессов при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны в пренебрежении магнитным полем. Показано, что ионно-звуковые волны возбуждаются в областях магнитного переходного и/или пограничного слоев магнитосферы в результате развития линейной гидродинамической неустойчивости, тогда как генерация пылевых звуковых волн обусловлена развитием линейной кинетической неустойчивости во всей области взаимодействия хвоста магнитосферы с пылевой плазмой у Луны. В обеих ситуациях развитие неустойчивостей обусловлено относительным движением ионов магнитосферы и заряженных пылевых частиц. Исследованы процессы развития ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентности. Для случаев ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентности определены плотности энергии колебаний, эффективные частоты столкновений, а также возникающие в системе электрические поля.

Показано, что в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Марса – Фобоса за счет фотоэлектрических и электростатических процессов происходит формирование пылевой плазмы. На основе физико-математической модели для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещенной части Фобоса определены функции распределения фотоэлектронов у его поверхности, найдены высотные зависимости концентрации пылевых частиц, их зарядов и размеров, а также электрических полей. Из-за малой гравитации над поверхностью Фобоса поднимаются существенно более крупные пылевые частицы, чем над поверхностью Луны. При этом роль адгезии, которая представляется существенным процессом, препятствующим отрыву пылевых частиц от лунной поверхности, на Фобосе значительно уменьшается.

Рассмотрена природа возникновения двух плазменно-пылевых облаков в результате удара метеороида о поверхность Луны. Показано, что одно из облаков сформировано частицами реголита, выбрасываемого ударной волной метеороидного удара с лунной поверхности в свободное пространство, тогда как второе - затвердевшими каплями расплава. Проведены вычисления основных характеристик этих облаков: скоростей расширения облаков, характерных размеров частиц в каждом из облаков, концентраций частиц, их зарядов и т.д. Получено качественное соответствие данным наблюдений, полученных в расчетах скоростей расширения облаков.

Показана возможность образования микросферул в инициированных ударами метеороидов о поверхность Луны плазменно-пылевых процессах. Продемонстрировано, что из вещества зоны плавления, формируемой в результате удара высокоскоростного метеороида о лунную поверхность, образуются сферулы, которые первоначально поднимаются над поверхностью Луны, а затем падают на нее. Именно такие сферулы и наблюдаются при исследовании лунного грунта. Находясь над поверхностью Луны, жидкие сферулы затведевают и в результате взаимодействия с электронами и ионами, а также солнечным излучением приобретают электрические заряды, становясь частью плазменно-пылевой системы над Луной. Получены значения концентрации сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью, а также их распределение по размерам. Верхний предел размера сферул в их распределении обусловлен существованием верхнего предела статистических данных по размерам для достаточно мелких метеороидов и составляет несколько микрометров. Размеры сферул, существенно большие 1 мкм, соответствуют размерам метеороидов, большим 1 см. Для крупных метеороидов однозначную статистику по размерам построить не удается. Поэтому возможным оказывается лишь построение распределения по размерам сферул, имеющих микронные

и субмикронные размеры. Для достаточно крупных сферул возможна лишь оценка размеров метеороидов, удары которых по лунной поверхности послужили причиной образования этих сферул. Показано, что присутствие сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью может быть обнаружено в рамках будущих миссий «Луна-25» и «Луна-27» с помощью пьезоэлектрических датчиков.
Представлено описание возбуждения нижнегибридных волн в области взаимодействия приповерхностной окололунной пылевой плазмы и магнитосферы Земли. Определены линейные инкременты, характеризующие возбуждение нижнегибридных волн. Показано, что основным нелинейным процессом, в котором участвуют нижнегибридные волны, является модуляционное взаимодействие. Проведена оценка плотности энергии нижнегибридных волн, характеризующей нижнегибридную турбулентность. Найдены электрические поля, возникающие при развитии нижнегибридной турбулентности в плазменно-пылевой системе у Луны.
5.3.3. По результатам численного моделирования достигнуты следующие результаты:
Проведено моделирование методом PiC взаимовлияния лунной экзосферы, лунной поверхности и КА при условиях лунной ночи и при условиях нахождении Луны в хвосте земной магнитосферы. По результатам моделирования получены данные о плотности частиц (электронов, ионов) вблизи поверхностей Луны и КА для различных случаев взаимного положения Луны, Солнца, Земли. Рассчитаны данные потенциалов плазмы вблизи поверхностей КА, в том числе его научной аппаратуры, а также потенциалов поверхностей КА и Луны. Выявлена и произведена оценка искажения потенциала плазмы в результате влияния КА.
С помощью численного моделирования в среде SPIS-DUST произведена оценка пылевых концентраций на уровне посадочного КА при различных внешних условиях (в зависимости от солнечного ветра и взаимного положения Луны, Земли и Солнца). При сопоставлении с теоретическими расчетами, результат имеет высокую степень соответствия.
Получены результаты численного моделирования для различных условий экзосферы у поверхности малого безатмосферного тела на примере условий Фобоса. Результаты численного моделирования позволяют сделать следующие оценки:
• Для случая с Солнцем в зените, поверхность имеет, в целом, равномерно распределённое значение потенциала. Наблюдаются незначительные вариации потенциалов на поверхности и вблизи, в пределах единиц вольт. Присутствует пылевая составляющая. При концентрации пыли в приповерхностном слое, достигающей 10^9 м^-3, с высотой (уже к 10 м) концентрация пыли падает до 10^5 м^-3.
• Для случая рельефа на поверхности и наличия теневых областей ситуация более интересная. Отчетливо видно, что разница в потенциалах поверхности отличается значительно, имея при этом различный знак. Разность превышает 50 В. Для значения же потенциала плазмы наблюдается следующая картина. Вблизи поверхности располагается слой плазмы с преобладанием положительных зарядов, тогда как с высоты порядка 10 м заряд меняется. Данный «негативный» слой плазмы располагается на высотах от 10 м до 40 м. После чего плазма становится нейтральной.
• Исследование концентраций пылевых частиц показало, что самое наибольшие концентрации (ожидаемо) находятся в приповерхностной зоне (вплоть до 2*10^8 м^-3 в первых
50 м над поверхностью со снижением концентрации до 4,3*10^7 м^-3 к 100 м над поверхностью. При этом к высоте 1 км расчетная концентрация пылевых частиц достигает 3,8*10^7 м^-3. Такие пылевые частицы как раз способны формировать пылевые скопления (т.н. «пылевые торы») в системе Марса. Вблизи же поверхности (десятки см), согласно полученным результатам, концентрации могут превышать 10^10 м^-3.
Произведена кросс-калибровка с результатами эксперимента в вакуумной камере для случая активации пылевой динамики электростатическим полем. По результатам численного моделирования наблюдается взлёт пылевых частиц, помещенных в условия, соответствующие экспериментальным. При сопоставлении концентраций, полученных в численном моделировании и в экспериментальной установке, разность составляет не более порядка. При сравнении условий эксперимента и условий, заданных в моделировании, с теоретическими расчетами условий вблизи поверхностей безатмосферных тел, можно сделать вывод о возможной пылевой активности для ряда небесных тел. Результаты численного моделирования в большой степени соответствуют результатам экспериментов в лабораторной установке. Так, концентрации частиц, полученные при моделировании, составляют до 1,62*10^10 м^-3. Скорости отрыва в среднем составляют 0,5 м/с, однако, согласно результатам моделирований, частицы разгоняются до десятков м/с.
По результатам численного моделирования плазменно-пылевой экзосферы вблизи безатмосферных тел на примере Фобоса можно сделать вывод, что при наличии реголита с гранулометрическим распределением, схожим с образцами лунного реголита, электростатические эффекты могут создавать условия (в особенности на границах освещенных областей и вблизи линии терминатора), при которых пылевая составляющая будет иметь ярко выраженную динамику. В таких количествах пылевые частицы могут создавать множество негативных эффектов при изучении Фобоса с помощью КА, а именно: снижение эффективности солнечных панелей, присутствие паразитных сигналов в информации с датчиков, снижение работоспособности камер. Следует уделить особое внимание возможным помехам в системах КА

при его посадке. Данный вопрос следует изучить отдельно, а упомянутые эффекты следует учитывать при проектировании КА и миссий к подобным телам.
5.3.4. В результате проведенных экспериментальных работ были промоделированы условия, соответствующие условиям на поверхностях безатмосферных космических объектов, приводящих к возникновению левитации пылевых частиц, при воздействии электростатического поля, ультрафиолетового излучения и низко-температурной электронной плазмы. Разработана методика наблюдения и измерений характеристик движения левитирующих частиц на основе оптических методов. Получены численные оценки для напряженности электрического поля, приводящего к отрыву от поверхности разноразмерных частиц. Проведено исследование физических процессов, приводящих к появлению пылевой плазмы при воздействии разнородных факторов космического пространства.
Для экспериментального моделирования пылевой компоненты приповерхностных слоев Марса и Луны подобраны, на основе имеющихся литературных данных и соответствующего элементного анализа, минеральные аналоги. Для Луны как наиболее подходящий выбран минерал «Андезит», для Марса – алюмосиликаты.
Разработана методика измерений массопереноса в интенсивных пылевых потоках на основе применения пьезоэлектрических датчиков. Разработан аппаратно-программный комплекс для сбора и обработки данных.
Разработаны приборы и методика измерений заряда и зарядопереноса движущимися частицами, на основе измерения наведенного заряда в проводниках. Достигнутая чувствительность датчиков заряда составила величину порядка 1000 – 2000 зарядов электрона на отдельную частицу при скорости движения до 100 м/с.
Для пьезоэлектрических и датчиков заряда интегрированных с измерительными системами проведены оценки предельных измерительных диапазонов и определены точности измерений.
Для моделирования плазменной компоненты, характерной для приповерхностного слоя Луны, модифицирована вакуумная установка. Модификация заключалась в дополнении установки термоэмиссионным источником электронов с контролируемыми параметрами.
Для определения параметров плазмы, таких как концентрация, температура, функция распределения электронов, ионов и потенциал среды в экспериментальной установке реализован метод зондовых измерений.
Параметры плазмы определяются по результатам измерения вольтамперной характеристики (ВАХ) плазмы зондами Ленгмюра. Задача измерения ВАХ решалась с помощью специально разработанных и изготовленных электронных блоков – модулей на основе измерения плавающего потенциала при сканировании тока зонда.
Модернизация установки источником плазмы и системой контроля позволили проверить, откалибровать датчики зондов Ленгмюра и получить численные характеристики в условиях реальной плазмы. Были получены ВАХ плазмы и сделаны оценки токовой и вольтовой чувствительности разработанных зондов Ленгмюра. Чувствительность разработанных зондов по токовым измерениям составила 10^-11 А. Подтверждена работоспособность блоков зонда Ленгмюра в условиях низкотемпературной (Te=10^5), разреженной (ne=10^7-10^8 м^-3) плазмы. Произведены кросс- калибровки датчиков с датчиками сторонних разработчиков. Для изготовленных датчиков подготовлено программное обеспечение позволяющее обрабатывать данные. Разработана методика физического эксперимента по измерению потенциала электрического поля и его динамике в условиях низкотемпературной разреженной плазмы моделирующей условия у поверхности Луны.
Начаты и продолжаются эксперименты по реализации условий наведения заряда поверхности безатмосферных тел вакуумным ультрафиолетовым излучением с линейчатым спектром, имитирующим непрерывный спектр УФ излучения солнца. Рассматривается экспериментальна возможность моделирования учета воздействия на поверхность протонов солнечного ветра с помощью инжектора ионов.
В части оптической регистрации левитирующих частиц было проведено физическое моделирование левитации пылевых частиц на поверхности безатмосферных тел на основе разработанной экспериментальной установки. Были проведены эксперименты по левитации микрочастиц различного материала и размера. Был разработан и реализован алгоритм обработки изображений, полученных стереосистемой камер, с траекториями левитирующих частиц для получения параметров частиц. На основе обработанных экспериментальных изображений было получено распределение левитирующих частиц по зарядам в зависимости от их материала и размера.

Все запланированные научные результаты достигнуты:
да

5.4. Описание выполненных работ и полученных научных результатов (в том числе степень выполнения проекта) для публикации на сайте РНФ

на русском языке *(до 3 страниц текста, также указываются ссылки на информационные ресурсы в сети Интернет (url-адреса), посвященные проекту)*
Как известно, еще в ранних экспериментах советских и американских посадочных аппаратов на поверхности Луны

было показано, что микрочастицы реголита способны подниматься с поверхности Луны и левитировать над поверхностью, При этом, еще тогда стало ясно, что основная причина левитации – приповерхностное электростатическое поле, возникающее в результате воздействия на поверхность солнечного излучения (УФ-излучение и солнечный ветер). Однако, объяснение этого эффекта возникает встречало трудности: три основные силы разной природы, действующие на пылевые частицы, лежащие на поверхности: электростатические силы отталкивания Fc , силы тяготения Fg и силы адгезии van der Waals FvdW, действующие на пылинку с характерным размером порядка сотен или тысяч нанометров, совершенно несопоставимы по величине, причем Fc, которая должна поднимать частицу от поверхности, на много порядков меньше сил, удерживающих ее на поверхности, Fc << Fg << FvdW. В серии работ, выполненных по гранту РНФ №17-12-01458 за период 2017- 2019 гг. показано, что учет зарядовых флуктуаций на поверхности позволяет решить основные проблемы, которые стояли при объяснении левитации: (1) как микроскопическая пылинка, лежащая на поверхности, может накапливать заряд в десятки или сотни единиц заряда, необходимые для отрыва частиц от поверхности? и (2) каким образом эта частица, обладающая необходимым зарядом способна преодолеть силы адгезии, которые превышают ее гравитацию в тысячи и миллионы раз? Оторвавшись от поверхности в сильном локальном флуктуирующем электрическом поле, частица попадает в слабое поле двойного слоя над поверхностью. Простые оценки показывают, что этот механизм способен обеспечить возникновение сил отталкивания, по порядку величины сравнимых с силами Ван-дер-Ваальса.

Показано, что при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны происходит возбуждение ионно-звуковой, пылевой звуковой и нижнегибридной турбулентности. Определены плотности энергии ионно-звуковых, пылевых звуковых и нижнегибридных колебаний, эффективные частоты столкновений, а также возникающие в системе электрические поля.

Показано, что в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Марса – Фобоса за счет фотоэлектрических и электростатических процессов происходит формирование пылевой плазмы. Определены функции распределения фотоэлектронов у поверхности Фобоса, найдены высотные зависимости концентрации пылевых частиц, их зарядов и размеров, а также электрических полей. Показано, что из-за малой гравитации над поверхностью Фобоса поднимаются существенно более крупные пылевые частицы, чем над поверхностью Луны.

Изучена природа возникновения двух плазменно-пылевых облаков в результате удара метеороида о поверхность Луны. Показано, что одно из облаков сформировано частицами реголита, выбрасываемого ударной волной метеороидного удара с лунной поверхности в свободное пространство, тогда как второе - затвердевшими каплями расплава. Получено качественное соответствие данным наблюдений, полученных в расчетах скоростей расширения облаков.

Показана возможность образования микросферул в инициированных ударами метеороидов о поверхность Луны плазменно-пылевых процессах. Получены значения концентрации сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью, а также их распределение по размерам. Верхний предел размера сферул в их распределении обусловлен существованием верхнего предела статистических данных по размерам для достаточно мелких метеороидов и составляет несколько микрометров. Размеры сферул, существенно большие 1 мкм, соответствуют размерам метеороидов, большим 1 см. Возможным оказывается лишь построение распределения по размерам сферул, имеющих микронные и субмикронные размеры. Для достаточно крупных сферул возможна лишь оценка размеров метеороидов, удары которых по лунной поверхности послужили причиной образования этих сферул. Показано, что присутствие сферул в пылевой плазме над лунной поверхностью может быть обнаружено в рамках будущих миссий "Луна-25" и "Луна-27" с помощью пьезоэлектрических датчиков.

В ходе выполнения проекта также была проведена работа по численному моделированию методом PiC для изучения пламенно-пылевой динамики в различных условиях. Численное моделирование осуществлялось с целью оценки приповерхностной плазменно-пылевой динамики в экзосфере Луны и малых безатмосферных тел, расчетов взаимовлияния плазменной экзосферы с КА, оценки влияния плазменно-пылевого окружения на датчики и системы посадочных КА, верификации результатов, полученных в теоретических расчетах и экспериментальной установке.

По результатам моделирования получены данные о плотности частиц (электронов, ионов) вблизи поверхностей Луны и КА для различных случаев взаимного положения Луны, Солнца и Земли. Рассчитаны данные потенциалов плазмы вблизи поверхностей КА, в том числе его научной аппаратуры, а также потенциалов поверхностей КА и Луны. Обнаружена значительная разница потенциалов непроводящих поверхностей (более 500 В) для лунной ночи, что, конечно, необходимо учитывать при разработке КА и приборов. Стоит также учитывать, что упрощенная 3d модель КА не может учитывать всех возможных точек скопления заряда, и в реальности разница потенциалов может быть существенно выше. Выявлена и произведена оценка искажения потенциала плазмы в результате влияния КА в условиях лунной ночи и в условиях нахождении Луны в хвосте магнитосферы Земли; данные методы могут внести существенный вклад в интерпретацию данных с датчиков плазмы КА (зондов Ленгмюра) и других датчиков плазменно-пылевой обстановки КА.

Также численное моделирование осуществлялось с целью определения плазменно-пылевой динамики вблизи поверхностей малых безатмосферных тел на примере Фобоса, оценка пылевых концентраций на разных высотах, сравнение с полученными теоретическими данными.
В рамках моделирования были воспроизведены предполагаемые условия, влияющие на плазменно-пылевую динамику вблизи поверхности Фобоса.
По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что при наличии реголита с гранулометрическим распределением схожим с образцами лунного реголита электростатические эффекты могут создавать условия (в особенности на границах освещенных областей и вблизи линии терминатора), при которых пылевая составляющая будет иметь ярко выраженную динамику с концентрациями вплоть до
10^10 м^-3. В таких количествах пылевые частицы могут создавать множество негативных эффектов при изучении Фобоса с помощью КА, а именно: снижение эффективности солнечных панелей, присутствие паразитных сигналов в информации с датчиков, снижение работоспособности камер. Отдельно следует уделить особое внимание возможным помехам в системах КА при его посадке. Данные вопрос следует изучить отдельно, а упомянутые эффекты следует учитывать при проектировании КА и миссий к подобным телам.
Результаты численного моделирования плазменно-пылевой экзосферы в лабораторной установке в большой степени соответствуют результатам экспериментов в лабораторной установке. Так, концентрации частиц, полученные при моделировании, составляют до 1,62*10^10 м^-3. Скорости отрыва в среднем составляют 0,5 м/с, однако, согласно результатам моделирований, частицы разгоняются до десятков м/с.
На созданных экспериментальных установках было выполнено моделирование плазменно-пылевых условий на поверхностях космических тел с целью изучения физических процессов. Установки также позволяют калибровать измерительные датчики параметров пылевой плазмы и отрабатывать методики проведения экспериментов, что крайне важно для разработки научных приборов будущих космических миссий.

на английском языке

As is known, even in the early experiments of Soviet and American landing vehicles on the lunar surface, it was shown that regolith microparticles are able to rise from the lunar surface and levitate above the surface.At the same time, it became clear then that the main reason for levitation is the near-surface electrostatic field arising in the result of exposure to the surface of solar radiation (UV radiation and solar wind). However, the explanation of this effect arises encountered: three main forces of different nature acting on dust particles lying on the surface: electrostatic repulsive forces Fc, gravitational forces Fg and adhesion forces van der Waals FvdW, acting on a dust particle with a characteristic size of the order of hundreds or thousands nanometers are completely incomparable in magnitude, and Fc, which should lift the particle from the surface, is many orders of magnitude less than the forces holding it on the surface, Fc << Fg << FvdW. In a series of works performed under the grant of the Russian Science Foundation No. 17-12-01458 for the period 2017-2019. It is shown that taking charge fluctuations on the surface into account allows us to solve the main problems that were encountered in explaining levitation: (1) how can a microscopic dust particle lying on the surface accumulate tens or hundreds of charge units needed to detach particles from the surface? and (2) how is this particle, possessing the necessary charge, able to overcome the adhesion forces that exceed its gravity by thousands and millions of times? Having broken away from the surface in a strong local fluctuating electric field, the particle enters the weak field of the double layer above the surface. Simple estimates show that this mechanism is capable of providing repulsive forces that are comparable in order of magnitude with the forces of van der Waals.
It is shown that when the Earth's magnetosphere tail interacts with dusty plasma at the surface of the Moon, ion acoustic, dust acoustic, and lower-hybrid turbulences are excited. The energy densities of ion acoustic, dust acoustic, and lower-hybrid oscillations, effective collision frequencies, and also the electric fields arising in the system are determined.
It is shown that in the near-surface layer above the illuminated part of Martian satellite Phobos, dusty plasmas are formed due to photoelectric and electrostatic processes. The distribution functions of photoelectrons near the Phobos surface are determined. The altitude dependences of number densities of dust particles, of their charges and sizes, and also of the electric fields are found. It is shown that due to low gravity, significantly larger dust particles rise above the surface of Phobos than above the surface of the Moon.
The nature of an appearance of two dusty plasma clouds as a result of a meteoroid impact on the surface of the Moon is studied. It is shown that the first of the clouds is formed by particles of regolith ejected by a meteoroid shock wave from the lunar surface into free space, while the second one iby solidified melt drops. Qualitative agreement is shown between the observed data and the data obtained in the calculations of cloud expansion rates.
A possibility of the formation of microspherules in dusty plasma processes initiated by impacts of meteoroids on the lunar surface is shown. The values of the number density of spherules in the dusty plasma above the lunar surface as well as their size distribution are obtained. The upper limit of the size of the spherules in their distribution is due to the existence of an

upper limit of statistical data on the sizes for rather small meteoroids and is of about several micrometers. The sizes of spherules, significantly larger than 1 μm, correspond to the sizes of meteoroids, larger than 1 cm. It is only possible to construct the size distribution of spherules having micron and submicron sizes. For sufficiently large spherules, only an estimate of the size of meteoroids is possible the impact of which on the lunar surface caused the formation of these spherules. It is shown that the presence of spherules in a dusty plasma above the lunar surface can be detected in future missions Luna-25 and Luna-27 using piezoelectric devices.
During the project, work on the numerical simulation using the PiC method to study flame-dust dynamics in various conditions was carried out. Numerical modeling was performed with the aim of evaluating near-surface plasma-dust dynamics in the exosphere of the Moon and small atmosphereless bodies, calculating the interaction of the plasma exosphere with the spacecraft, assessing the effect of the dusty plasma environment on the sensors and systems of the landing spacecraft, as well as verifying the results obtained in theoretical calculations and an experimental setup.
Based on the simulation results, data were obtained on the density of particles (electrons, ions) near the surfaces of the moon and spacecraft for various cases of the relative positions of the moon, sun and earth. The data on the potentials of the plasma near the surfaces of the spacecraft, including its scientific equipment, as well as the potentials of the surfaces of the spacecraft and the moon, are calculated. A significant potential difference of non-conductive surfaces (more than 500 V) for a moonlit night was discovered, which, of course, must be considered when developing spacecraft and instruments. It should also be considered that the simplified 3d model of the spacecraft cannot consider all possible points of charge accumulation, and in reality, the potential difference can be significantly higher. The plasma potential distortion as a result of the influence of the spacecraft under the conditions of a moonlit night and when the moon is in the tail of the Earth's magnetosphere is revealed and evaluated. These methods can make a significant contribution to the interpretation of data from spacecraft plasma sensors (Langmuir probes) and other sensors of the plasma-dust environment of the spacecraft.
Numerical modeling was also carried out with the aim of determining the dusty plasma dynamics near the surfaces of small atmosphereless bodies using the example of Phobos, estimating dust concentrations at different heights, and comparing them with the obtained theoretical data.
In the framework of the simulation, the assumed conditions affecting the dusty plasma dynamics near the Phobos surface were reproduced.
According to the results of numerical modeling, it can be concluded that in the presence of regolith with a particle size distribution similar to lunar regolith samples, electrostatic effects can create conditions (especially at the boundaries of illuminated regions and near the terminator line), under which the dust component will have a pronounced dynamics with concentrations up to before
10^10 m^-3. In such quantities, dust particles can create many negative effects when studying Phobos using spacecraft, namely: a decrease in the efficiency of solar panels, the presence of spurious signals in information from sensors, and a decrease in the operability of cameras. Particular attention should be paid to possible interference in spacecraft systems during its landing. These issues should be studied separately, and the effects mentioned should be considered when designing spacecraft and missions to such bodies.
The results of numerical simulation of the plasma-dust exosphere in a laboratory setup are largely consistent with the results of experiments in a laboratory setup. So, the particle concentrations obtained during the simulation are up to 1.62 * 10^10 m^-3. The separation velocities are on average 0.5 m/s, however, according to the simulation results, particles accelerate to tens of m / s.
An experimental setups allowing to simulate the dust plasma conditions on the surfaces of cosmic bodies with the purpose of studying physical processes are created. The installations also allow to calibrate the measuring sensors of the dusty plasma parameters, and to work out methods of the experiments conducting, which is extremely important for the development of scientific instruments of the future space missions.

5.5. Перечень публикаций по проекту за весь срок выполнения проекта ***(заполняется автоматически на основании форм 2о)***

1. *Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М. (Popel S.I. Golub' A.P., Zakharov A.V., Zelenyi L.M.)* **Dusty Plasma near the Surface of Phobos** JETP Letters Volume 106, No. 8. P. 485-490 (2017 г.)

---

2. *Кузнецов И.А., Хессб С.Л.Г., Захаров А.В., Киприани Ф., Серан Е., Попель С.И., Лисин Е.А., Петров О.Ф., Дольников Г.Г., Ляш А.Н., Копнин С.И. (Kuznetsov I.A., Hessb S.L.G., Zakharov A.V., Cipriani F.,Seran E., Popel S.I.,Lisin E.A., Petrov O.F., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Kopnin S.I.)* **Numerical modelling of the Luna-Glob lander electric charging on the lunar surface with SPIS-DUST** Planetary and Space Science Volume 156, July 2018, Pages 62-70 (2018 г.)

---

3. *Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М., БережнойА.А., Зубко Е.С., Итен М., Лена Р., Спозетти С., Великодский Ю.И., Терещенко А.А., Атаманюк Б. (Popel S.I., Golub' A.P., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Berezhnoy A.A., Zubko E.S., Iten M., Lena R., Sposetti S., Velikodsky Yu.I., Tereshchenko A.A., Atamaniuk B.)* **Formation of Dusty Plasma Clouds at Meteoroid Impact on the Surface of the Moon** JETP Letters Volume 108, Issue 6, PP. 356-363 (2018 г.)

---

4. *Розенфельд Е.В., Захаров А.В. (Rosenfeld E.V., Zakharov A.V.)* **Charge Fluctuations on a Dielectric Surface Exposed to Plasma Flows or UV Radiation** Plasma Physics Reports Vol. 44, No. 11, pp. 1053–1056 (2018 г.)

---

5. *Розенфельд Е.В., Захаров А.В. (Rosenfeld E.V., Zakharov A.V.)* **Dust shedding from a dielectric surface in plasma as a result of charge fluctuations** Physics of Plasmas Volume 25, Issue 10, 103703 (2018 г.)

---

6. *Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М. (Popel S.I. Golub' A.P., Zakharov A.V., Zelenyi L.M.)* **Formation of Microspherules of Lunar Regolith in Dusty Plasma Processes Induced by Meteoroid Impacts** Plasma Physics Reports №3, Т. 46 (2020 г.)

---

7. *Поройков А.Ю., Бедняков С.А., Захаров А.В., Дольников Г.Г., Ляш А.Н., Шашкова И.А., Кузнецов И.А. (Poroykov A.Yu., Bednyakov S.A., Zaharov A.V., Dolnikov G.G., Lyash A.N., Shashkova I.A., Kuznetsov I.A.)* **Application of the particle trajectory imaging for modelling dusty plasma levitation on the Moon** Journal of Physics: Conference Series (2020 г.)

---

8. *Розенфельд Е.В., Захаров А.В. (Rosenfeld E.V., Zakharov A.V.)* **Charge fluctuations on the sunlit surface of airless bodies and their role in dust levitation** Icarus 338, 113538, 2020 (2020 г.)

5.6. Возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности (РИД), созданные при выполнении проекта:
Нет

5.7. Публикационные показатели реализации проекта

(нарастающим итогом, данные формируются автоматически)

Показатели публикационной активности приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку Российского научного фонда.

Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

Показатели	Единица измерения	2017 г.		2017-2018 г.		2017-2019 г.	
		план	факт	план	факт	план	факт
Количество публикаций по проекту членов научного коллектива в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (SCOPUS)	Ед.	2	1	5	5	8	8
в том числе в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 определяется по базе данных http://www.scimagojr.com/)	Ед.		0		0		1
Число цитирований публикаций по проекту членов научного коллектива в научных журналах, индексируемых в международной базе данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) в отчетном году	Ед.		0		0		5
Количество публикаций по проекту членов научного коллектива в изданиях, учитываемых в базе данных «РИНЦ»	Ед.	2	0	5	0	8	0

5.8. Научным коллективом опубликовано с указанием на получение финансовой поддержки от Фонда по направлению научного исследования не менее 8 публикаций в изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus), не менее 8 публикаций в изданиях, учитываемых в Российском индексе научного цитирования:

нет

Пояснения о причинах невыполнения данного пункта соглашения (п.2.6.5 соглашения):

Всего по результатам выполнения проекта заявлено и опубликовано 8 публикаций, из них 8 индексируются в базе данных «Скопус» (SCOPUS), 6 публикаций индексируются в «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) и «Скопус», (SCOPUS), 1 публикация в издании, входящем в первый квартиль (Q1).

Сведения о публикациях требуют корректировки (в том числе имеется дублирование)

нет

5.9. Возможность практического использования результатов проекта в экономике и социальной сфере (при наличии, в том числе формирование научных и технологических заделов, обеспечивающих экономический рост и социальное развитие Российской Федерации, создание новой или усовершенствование производимой продукции (товаров, работ, услуг), создание новых или усовершенствование применяемых технологий)

Полученные научные результаты о моделировании приповерхностной экзосферы Луны и плазменно-пылевых процессах над поверхностью Луны могут быть использованы при проектировании автоматических и пилотируемых экспедиций на Луну, которые в последнее время обсуждаются для включения в Федеральную космическую программу на перспективу 10-15 лет.

В рамках поставленных целей проекта созданы физические модели, развиты новые теоретические подходы и рекомендации по развитию экспериментальных методов, разработаны численные коды и сформулированы новые постановки экспериментов. Полученные в рамках проекта результаты чрезвычайно своевременны ввиду наличия многочисленных данных по пылевой компоненте в системах Земля-Луна, Земля-Марс, полученных в космических миссиях таких, как VIKING, LADEE, Mars Express, ExoMars Trace Gas Orbiter, Mars Exploration Rover Opportunity, Mars Science Laboratory Curiosity, а также будущих космических проектов («Луна-25», «Луна-26», «Луна-27», «Фобос-Грунт 2» и др.). Результаты, полученные в рамках проекта, позволяют углубить современные представления о процессах, происходящих в космической плазме, магнитосфере Земли, в окрестностях спутника Земли – Луны, системе Марса, нано- и микромасштабных пылевых частицах в природе, свойствах пылевой плазмы и дадут возможность развития современных физических и физико-химических моделей для комплексных систем, содержащих нано- и

микромасштабные пылевые частицы, которые могут найти применение в различных областях технологии, физики и астрофизики.

Настоящим подтверждаю:

- самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
- что при обнародовании результатов, полученных в рамках реализации поддержанного РНФ проекта, научный коллектив ссылался на получение финансовой поддержки проекта от РНФ и на организацию, на базе которой выполнялось исследование;
- свое согласие с опубликованием РНФ сведений из итогового отчета о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
- что проект не имел других источников финансирования;
- что проект не являлся аналогичным***** по содержанию проекту, одновременно финансируемому из других источников.

***** Проекты, аналогичные по целям, задачам, объектам, предметам и методам исследований, а также ожидаемым результатам. Экспертиза на совпадение проводится экспертным советом Фонда.

Подпись руководителя проекта _____ /А.В. Захаров/

Изменения в составе участников

Дольников Геннадий Геннадьевич

Кузнецов Илья Александрович

Попель Сергей Игоревич