

1. Список авторов–сотрудников ИКИ РАН:

С. И. Попель, А. П. Голубь, Л. М. Зеленый, Т. И. Морозова, А. В. Захаров

2. Название: Цикл работ о пыли и пылевой плазме в экзосфере Луны и над поверхностью Фобоса

3. Ссылки на публикации:

а) Попель С.И., Морозова Т.И. Волновые процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны // Физика плазмы. 2017. Т. 43, № 5. С. 474-484. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X17050075>

б) Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораньи М. Удары высокоскоростных метеороидов и плазменно-пылевое облако над поверхностью Луны // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, № 10. С. 594-599. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021364017100113>

в) Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М. Пылевая плазма у поверхности Фобоса // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106, № 8, в печати (статья должна выйти в октябре 2017 г.).

4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность:

Проблема изучения мелкодисперсных пылевых частиц и пылевой плазмы в экзосфере Луны и над поверхностью Фобоса. Актуальность данной научной проблемы обусловлена необходимостью создания целостной картины, характеризующей роль мелкодисперсных частиц и пылевой плазмы в экзосфере Луны и над поверхностью спутника Марса – Фобоса, что, в частности, необходимо для развития экспериментальных методов сбора и анализа частиц пыли, исследования свойств пылевой плазмы и электрофизических свойств поверхности, измерения электрических полей на спускаемых модулях будущих космических аппаратов (в том числе, «Луна-25», «Луна-27», «Фобос-Грунт-2»), а также анализа результатов имеющихся и будущих наблюдений.

5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение:

а) Волновые линейные и нелинейные процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны;

б) Образование плазменно-пылевого облака в экзосфере Луны и объяснение данных измерений по его наблюдению, проведенных в рамках миссии NASA LADEE;

в) Моделирование плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое над освещенной частью спутника Марса – Фобоса.

Значимость задач обусловлена тем, что их решение позволяет углубить современные представления о процессах, происходящих в экзосфере Луны и у поверхности Фобоса, о мелкодисперсных нано- и микромасштабных пылевых частицах в природе, о свойствах пылевой плазмы. В частности, решение данных задач необходимо для создания целостной картины, характеризующей роль мелкодисперсных пылевых частиц и пылевой плазмы, а также процессы ее формирования в экзосфере Луны и над поверхностью Фобоса.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность:

Теоретические исследования и численное моделирование с опорой на данные наблюдений. Применялись методы магнитной гидродинамики, физической кинетики, нелинейной и химической физики, теории пылевой плазмы, физики взрыва и ударных явлений, геологии и геофизики.

7. Полученные результаты и их значимость:

а) Представлено описание волновых линейных и нелинейных процессов при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны. Картина волновых процессов существенным образом зависит от параметров плазменно-пылевой системы. Так, например, возбуждение ионно-звуковых волн возможно в областях магнитного переходного и/или пограничного слоев магнитосферы. Возбуждение пылевых звуковых волн возможно 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. Оказывается, что в силу довольно длительного характера развития неустойчивостей в указанных двух ситуациях успевает установиться развитая плазменная турбулентность. Ионно-звуковая турбулентность рассматривается с позиций сильной турбулентности. Тогда как для описания пылевой звуковой турбулентности следует использовать теорию слабой турбулентности. Для случаев ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентности определены эффективные частоты столкновений, характеризующие аномальную потерю импульса ионов вследствие их взаимодействия с волнами, а также определены возникающие в системе электрические поля. Оказывается, что при развитии ионно-звуковой турбулентности в плазменно-пылевой системы у Луны могут возбуждаться электрические поля, несколько меньшие электрических полей у поверхности Луны, возникающих в процессе зарядки ее поверхности при взаимодействии Луны с солнечным излучением, но, тем не менее, вполне значимые для установления адекватной картины электрических полей над Луной. Полученные эффективные частоты столкновений следует учитывать при записи гидродинамических уравнений для ионов пылевой плазмы с учетом ее турбулентного нагрева.

б) Показано, что образование плазменно-пылевого облака в экзосфере Луны на больших высотах (~100 км) связано с ударами метеороидов о лунную поверхность. Важную роль при образовании пылевого облака играет расплавленное вещество, выбрасываемое с поверхности Луны в результате ударов метеороидов. Капли расплавленного вещества приобретают скорости, лежащие в диапазоне между первой и второй космическими скоростями для Луны, и могут совершать финитное движение вокруг нее. При подъеме над лунной поверхностью жидкие капли затвердевают и приобретают электрические заряды, в частности, за счет их взаимодействия с электронами и ионами солнечного ветра, а также с солнечным излучением. Показано, что концентрация пылевых частиц в плазменно-пылевом облаке, присутствующем в экзосфере Луны, меньше или порядка 10^{-8} частиц в кубическом сантиметре, что находится в соответствии с данными измерений, проведенных LADEE.

в) 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. Отмечается, что 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.

Результаты, представленные в данном цикле работ, позволяют углубить современные представления о процессах, происходящих в экзосфере Луны и у поверхности Фобоса, о мелкодисперсных нано- и микромасштабных пылевых частицах в природе, о свойствах пылевой плазмы. В частности, решение данных задач весьма существенно для создания целостной картины, характеризующей роль мелкодисперсных пылевых частиц и пылевой плазмы в экзосфере Луны и у поверхности Фобоса, для понимания процессов формирования пылевой плазмы в экзосфере Луны и у поверхности Фобоса, а также для объяснения ряда наблюдений. В частности, **впервые объяснена природа плазменно-пылевого облака в экзосфере Луны на больших высотах, и на основании расчетов получены концентрации пылевых частиц в нем в соответствии с данными измерений, проведенных в рамках миссии NASA LADEE.**