

Морозова Татьяна Игоревна

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОЦЕССАХ  
ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И В  
ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ В ОКРЕСТНОСТЯХ  
ЛУНЫ И ЗЕМЛИ**

Специальность 01.04.02 —  
«Теоретическая физика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2018

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель: **Попель Сергей Игоревич, д.ф.-м.н., проф.**

Официальные оппоненты:

Борисов Николай Дмитриевич, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН

Майоров Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

Научный консультант:

Копнин Сергей Игоревич, к.ф.-м.н.

Защита состоится на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 на базе Институт Космических Исследований Российской академии наук 28.06.2018 по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 2018 года .

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н. Буринская Татьяна Михайловна

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Пылевой плазме посвящено множество работ. Впервые она упоминается в работе Ленгмюра в 1924 г. В девяностых годах 20го века наблюдался всплеск количества работ по пылевой плазме в связи с развитием различных приложений в науке, технике и природе. В настоящее время продолжается активное изучение свойств и процессов в пылевой плазме. В год публикуется более 1000 работ по этой теме. Исследования лабораторной пылевой плазмы посвящаются изучению таких процессов, как плазменное травление, плазменное напыления в микроэлектронике, управляемый термоядерный синтез (пылевая плазма была обнаружена в пристеночных областях термоядерных установок с магнитным удержанием [1; 2]). Проводится множество опытов с пылевой плазмой в лабораторных условиях, которые имеют важное значение для фундаментальной физики. Например, в 1994 году впервые был получен плазменно-пылевой кристалл [3–5]. Свойства пылевой плазмы следует учитывать в ракетостроении [2; 6] и в особенностях аппаратуры, устанавливаемой на космических кораблях и станциях. Пылевая плазма была обнаружена вблизи искусственных спутников Земли, в атмосфере Земли, в приповерхностном слое Луны, в атмосфере Марса, в кольцах Юпитера и Сатурна [7], в атмосфере Титана, в зодиакальном пылевом облаке и комах комет [8–10]. Это свидетельствует о том, что пылевая плазма широко распространена в Солнечной системе и ее изучение важно для понимания процессов, происходящих в различных космических системах. Исследования также представляют большой интерес и важность для будущих межпланетных миссий. пылевая плазма широко встречается и вне Солнечной системы. Значительная часть пыли в космосе присутствует в темных туманностях, в оболочках вокруг холодных звезд, в молекулярных облаках [11, с. 54], в протопланетных дисках [12] и многих других астрофизических системах.

Среди работ по пылевой плазме особую важность представляют исследования, посвященные изучению волновых процессов в природный и лабораторной пылевой плазме, а также процессов зарядки пылевых частиц. Данная работа посвящена исследованию свойств заряженной пыли в лабораторных и природных плазменно-пылевых системах, таких как ионосфера Земли и пылевая плазма около лунной поверхности. Во второй главе данной работы приводится описание механизмов зарядки пылевых частиц и примеры астро-

физического применения процессов зарядки и дробления частиц (например, в пылевой плазме протопланетных дисков).

Изучение лунной пыли берет свое начало с миссий кораблей “Аполлон” в 1969-1972 годах. Тогда было замечено, в области терминатора солнечный свет рассеивается и появляются так называемые лунные зори (lunar horizon glows) и стримеры над лунной поверхностью. Из этих наблюдений были сделаны предположения, что рассеяние солнечного света может происходить из-за наличия пыли у лунной поверхности, источником которой является поверхность Луны. Также во время этих миссий проводились измерения субмикронной пыли в экзосфере Луны до высот 100 км [13]. Во время работы спускаемых аппаратов “Surveyor” в 1968 году получили данные, на основании которых был сделан вывод, что пылевые частицы с размерами около 5 мкм могут парить примерно в 10 см над поверхностью Луны [14]. Интерес к описанию плазменно-пылевой системы у поверхности Луны резко возрос в 90е годы с подъемом науки о пылевой плазме и развитием методов описания процессов, происходящих в ней [7]. Существенное внимание уделялось исследованиям и экспериментальным методам, моделирующим условия, похожие на условия вблизи поверхности Луны. В настоящее время готовятся будущие российские миссии по изучению Лунной экзосферы “Луна-25” и “Луна-27”, что дает новый толчок к изучению свойств заряженной пыли около лунной поверхности. На посадочных модулях станций “Луна-25” и “Луна-27” предполагается разместить аппаратуру, которая будет как непосредственно детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, так и осуществлять оптические измерения. В недавней американской миссии LADEE (“Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer” – “Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды”) [15] лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты.

Интенсивные работы ведутся и в области физики земной ионосферы, в которой пыль присутствует на высотах 80–120 км. С проявлением свойств пыли связаны такие явления, как серебристые облака и полярные мезосферные радиоотражения, представляющие собой облака ледяных частиц нано- и микромасштабных размеров (см., например, [16; 17]) Токи электронов и ионов, а также солнечное излучение могут приводить к процессам зарядки пылевых частиц. В зависимости от состава и времени суток частицы могут приобретать как положительные, так и отрицательные заряды. Когда ионосферная плазма

содержит заряженные пылевые частицы, говорят о запылённой ионосферной плазме (см., например, [18]) Основной источник пыли в ионосфере на высотах 80 – 120 км – метеорные потоки. Максимум концентрации пылевых частиц метеорного происхождения находится на высотах 80 – 90 км и может составлять более  $10^4 \text{ см}^{-3}$  [17]). Пыль также попадает в ионосферу Земли в результате конвективного переноса частиц вулканического происхождения и сажи от крупных пожаров [19]). Пылевые частицы могут образовываться в результате конденсации паров воды [17; 19; 20]). Наличие заряженных пылевых частиц влияет на ионизационные свойства нижней ионосферы Земли [17])и на волновые процессы, протекающие в ионосферной плазме. Одним из важнейших проявлений свойств запылённой ионосферы Земли является возможность существования низкочастотных пылевых звуковых возмущений, существование которых связано с движением заряженных мелкодисперсных пылевых частиц [18; 21]

Область ионосферы Земли в диапазоне высот от 80 до 120 км может быть изучена на данный момент только с помощью экспериментов пролётных ракет. В 1999, 2000, 2001, 2003 годах были проведены эксперименты [22] по наблюдению радиоизлучения ионосферы у поверхности Земли. Данные наблюдения показали, что во время метеорных потоков Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды на фоне флуктуаций радиошумов наблюдаются устойчивые «пылевые» линии с частотами несколько десятков Гц. Это типичные частоты для пылевой звуковой моды в условиях запылённой ионосферы на высотах 80–120 км. Таким образом, появление флуктуаций радиошумов можно связать с наличием пылевых частиц, образованных пересыщенными парами веществ, попадающих в ионосферу в результате абляции метеорного вещества [21]. В связи с этим актуальной является проблема построения теории пылевых звуковых возмущений в пылевой плазме ионосферы Земли на высотах 80-120 км, определение линейных и нелинейных механизмов их возбуждения, а также выявление эффектов их существования.

**Целью** данной работы является изучение нелинейных проявлений плазменно-пылевых процессов и формирования пылевой плазмы в ионосфере Земли и окрестностях Луны; описание механизмов зарядки пылевых частиц в лабораторной пылевой плазме и их возможное применение к природным системам; разработка теории, описывающей нелинейные волновые эффекты

в пылевой плазме приповерхностного слоя Луны, когда она находится вне и внутри хвоста магнитосферы Земли; описание возможности возникновения неоднородностей концентраций электронов и ионов в плазме запыленной ионосферы Земли, возникающих вследствие модуляционной неустойчивости электромагнитных волн, связанной с пылевой звуковой модой.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать процессы зарядки пылевых частиц жестким рентгеновским излучением и найти условия, при которых возможно дробление частиц.
2. Рассмотреть процессы достижения пылевыми частицами аномально высоких зарядов в результате воздействия на них высокоэнергетического пучка электронов.
3. Исследовать волновые процессы и развитие плазменной турбулентности в пылевой плазме приповерхностного слоя Луны в ситуациях, когда Луна находится вне и внутри хвоста магнитосферы Земли.
4. Описать механизм возникновения неоднородностей концентраций электронов и ионов в результате модуляционной неустойчивости электромагнитных волн, связанной с пылевой звуковой модой.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Зарядка пылевых частиц под действием жесткого рентгеновского излучения осуществляется за счет ионного тока, электронного тока, фотоэлектронного тока, а также обратного тока фотоэлектронов с частиц, окружающих пылевую частицу, что может приводить к созданию достаточно высоких величин положительных зарядов на поверхности, при которых происходит разрушение частиц.
2. При зарядке пылевых частиц высокоэнергетичным пучком электронов существенное влияние на величину заряда пылевой частицы оказывает ток автоэлектронной эмиссии. Именно этот ток значительно снижает величину отрицательного заряда на частице. Под воздействием достаточно интенсивного потока электронов пучка, пылевые частицы в плазме могут приобретать предельно высокие заряды, что подтверждается проводимыми экспериментами по аномально высокой зарядке пылевых частиц.

3. Функция распределения фотоэлектронов (по скоростям) у поверхности освещенной части Луны представляется в виде суперпозиции двух функций распределения, характеризующихся различными температурами электронов: электроны с меньшей энергией выбиваются из лунного реголита фотонами с энергиями, близкими к работе выхода реголита, тогда как происхождение электронов с большей энергией связано с фотонами, соответствующими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения. Существенное влияние на функцию распределения электронов в приповерхностной лунной плазме оказывает движение солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц. Указанное свойство функции распределения приводит к возможности развития плазменных неустойчивостей и возбуждению высокочастотных волн с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных волн. Кроме того, оказывается возможным распространение линейных и нелинейных пылевых звуковых волн в приповерхностной лунной плазме. При описании пылевых звуковых солитонов следует учитывать адиабатический захват электронов, что сказывается на их свойствах.
4. При взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны в результате относительного движения плазмы хвоста магнитосферы и окололунной плазмы могут развиваться гидродинамическая и кинетическая линейные неустойчивости. В результате развития кинетической неустойчивости происходит возбуждение пылевых звуковых волн. Развитие гидродинамической неустойчивости приводит к генерации ионно-звуковых колебаний. В силу довольно длительного характера развития неустойчивостей в указанных двух ситуациях успевает установиться развитая плазменная турбулентность. Рассмотрены пылевая-звуковая и ионно-звуковая турбулентности. При развитии ионно-звуковой турбулентности в плазменно-пылевой системе 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.

5. Предложено объяснение механизма формирования неоднородностей концентраций электронов и ионов в запыленной ионосфере в контексте развития модуляционного взаимодействия электромагнитных волн, связанного с возбуждением возмущений, имеющих частоты в области пылевых звуковых волн. Предложенный механизм показывает, что в результате развития модуляционного взаимодействия на высотах 80 – 120 км возможно возбуждение достаточно интенсивных неоднородностей электронной и ионной концентраций, составляющих несколько процентов от невозмущенных значений.

### **Научная новизна:**

1. Впервые было предложено описание достижения пылевыми частицами аномально высоких зарядов под действием высокоэнергетичного пучка электронов и предложен механизм дробления пылевых частиц под действием жесткого рентгеновского излучения.
2. Впервые было дано описание волновых процессов и неустойчивостей в пылевой плазме около поверхности Луны в случае ее нахождения в хвосте магнитосферы Земли.
3. Было проведено оригинальное исследование линейных и нелинейных волн в плазме приповерхностного слоя Луны в ситуации, когда Луна находится вне хвоста магнитосферы Земли.
4. Впервые было предложено описание механизма формирования неоднородностей плотности электронов и ионов в запыленной ионосфере Земли в результате модуляционного взаимодействия электромагнитных волн, связанного с пылевой звуковой модой.

### **Практическая значимость**

Результаты диссертации могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением физических свойств пылевой плазмы. Методы, развитые в диссертации, могут быть полезны для дальнейшего развития теории волновых и нелинейных процессов в космической, лабораторной, околоземной и ионосферной пылевой плазме.

Волновые движения в области взаимодействия хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны (или те или иные их проявле-



ния) могут повлиять на результаты измерений, осуществляемых с помощью аппаратуры, которую предполагается разместить на спускаемых аппаратах станций “Луна-25” и “Луна-27”. Возможность возникновения волновых движений в приповерхностной лунной плазме должна быть учтена при обработке и интерпретации полученных данных.

Показанная возможность возбуждения интенсивных неоднородностей электронной и ионной концентраций в ионосфере Земли ( $\delta n_{e(i)}/n_{e(i)} \approx 0.05$ ) на высотах 80 – 120 км в результате развития модуляционного взаимодействия может объяснить пропадание радио сигналов на данных высотах, что может быть полезно специалистам по радиофизике и геолокации.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на: Международных (Звенигородских) конференциях по физике плазмы и УТС, Научных конференциях МФТИ, III Научно-технической конференции "Низкотемпературная плазма в процессах получения функциональных покрытий с элементами научной школы (Казань, 2011 г.), Международного коллоквиума "Ломоносов и Гумбольдт: научное сотрудничество России и Германии - от истоков до наших дней"(Москва, 2011 г.), 5th, 6t and 7th Moscow Solar System Symposium, ежегодных конференциях «Физика плазмы в Солнечной Системе», 13th workshop Complex systems of charged particles and their interaction with electromagnetic radiation, 41st EPS Conference on Plasma Physics, Moscow workshop Non-ideal plasma physics, Международных конференциях по физике плазмы в Солнечной системе (2014, 2015, 2017, 2018 гг.), на Конференциях молодых ученых в ИКИ РАН (2015-2017 гг.) на Всероссийской астрономической конференции (2017) и многих других российских и зарубежных конференциях, а также на научных школах SOMA-14, SPSASHighAstro (San Paolo, Brasil, 2017), The 1st APSCO ISSI-BJ Space Science School (Thailand, 2016), на международных воркшопах International Workshop on Astrophysical Turbulence: from Galaxies to Planets (Dresden, Germany, 2013), Team Meeting: Dusty Plasma Effects in the system Earth-Moon (Bern, Switzerland, 2013, 2014). Был сделан семинар в ИНАСАН.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях [1–8], 8 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1–8], 46 — в тезисах докладов [9–55].

## Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава является обзорной. В разделе 1.1 вводится понятие пылевой плазмы, а также приводится описание различных процессов в пылевой плазме, которые исследовались в лабораторных условиях. В разделе 1.2 описываются проявления пылевой плазмы в природных системах, таких как темные туманности, протопланетные диски, атфомферы планет, окрестности безатмосферных тел, комы комет и др. В п. 1.4 представлено заключение к первой главе работы.

Вторая глава посвящена исследованию процессов достижения пылевыми частицами аномально высоких зарядов в пылевой плазме. В разделе 2.1 рассматривается задача о зарядке пылевых частиц жестким рентгеновским излучением и приводятся условия, при которых возможно дробление частиц. Изменение заряда пылевой частицы описывается уравнением:

$$\frac{\partial q_d}{\partial t} = \sum_{\alpha} I_{\alpha}(q_d),$$

где полный ток  $\sum_{\alpha} I_{\alpha}(q_d)$  в данном случае определяется суммой электронного  $I_e(q_d)$  и ионного  $I_i(q_d)$  токов, а также тока фотоэлектронов  $I_{ph}(q_d)$ , образующихся в результате фотоэффекта при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом частицы. Покидая частицу в результате фотоэффекта, фотоэлектроны попадают в плазменную среду, вносят вклад в микроскопический ток электронов на пылевую частицу и тем самым оказывают влияние на процессы зарядки пылевых частиц. Также в полный ток вносит вклад обратный ток фотоэлектронов  $I_{eph}(q_d)$ , выбитых с соседних пылевых частиц, называемый обратным фототоком. Показано, что в данных условиях критических зарядов важными оказываются ток фотоэлектронов на частицу и обратный ток фотоэлектронов с частиц, окружающих пылевую частицу. Находятся минимальные интенсивности излучения, при которых возможно дробление пылевых частиц (Рис. 1).

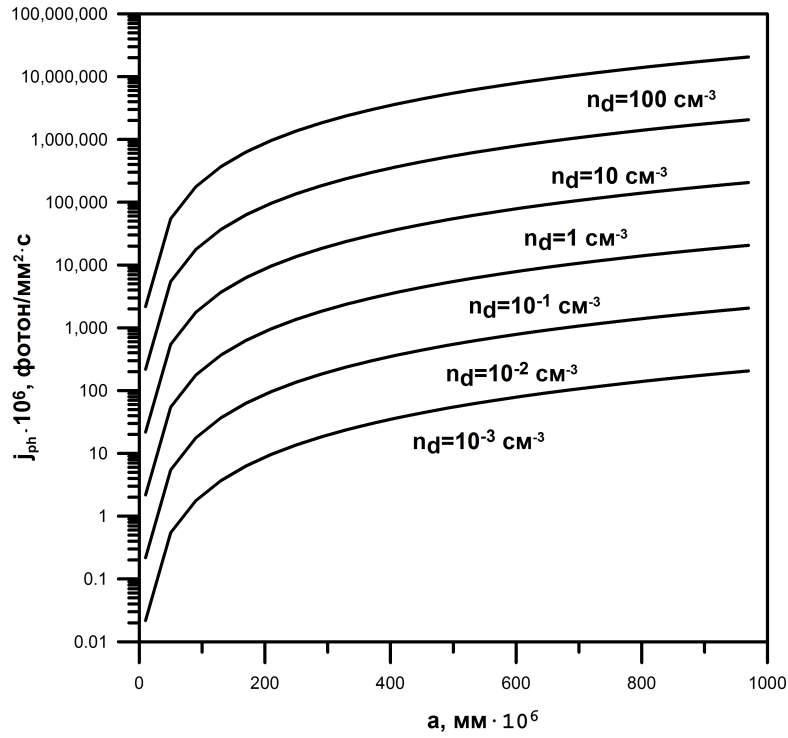


Рис. 1 — Зависимость минимальной плотности потока фотонов, необходимой для разлома мелкодисперсных частиц от их радиуса для различных значений концентраций пылевых частиц

В разделе 2.2 описываются механизмы достижения anomalно высоких зарядов пылевых частиц под действием высокоэнергетичного пучка электронов в несколько десятков эВ. Показывается, что за счет автоэлектронной эмиссии, модифицированной эффектом Шоттки происходит уменьшение величины максимального заряда, который может приобретать пылевая частица. Ток автоэлектронной эмиссии дается выражением:

$$j_A = \frac{16\pi m_e}{(2\pi\hbar)^3} \int_0^\infty \frac{D(E)E dE}{\exp((E - \mu)/T) + 1},$$

где  $E$  — суммарная энергия электронов,  $\mu$  — энергия Ферми,  $D(E)$  — проницаемость потенциального барьера. С учетом эффекта Шоттки она принимает вид:

$$D(E) = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_e} \int_a^{r_0} \sqrt{\chi - \frac{Z_d e^2}{a} + \frac{Z_d e^2}{r} - \frac{e^2 a^3}{2r^2(r^2 - a^2)} - E} dr \right\},$$

где  $r_0 = Z_d e^2 / (E - \chi + Z_d e^2 / a)$ ,  $q_d = eZ_d$ .

Данные расчетов максимально возможных зарядов алюминиевых частиц с характерным радиусом  $a = 50$  мкм пучком электронов с энергией 25 кэВ показали, что величина заряда достигает  $10^7$  зарядов электронов, что согласуется с экспериментом [23].

В разделе 2.3 обсуждаются возможные астрофизические применения зарядки пылевых частиц в плазме, достижения высоких зарядов частиц и возможности их дробления. В частности, процессы достижения пылевыми частицами высоких положительных зарядов могут быть реализованы в протопланетных дисках, когда рентгеновское излучение молодой звезды может иметь достаточные интенсивности, чтобы происходило дробление пыли. В связи с чем в диске образуется некоторое распределение пыли по размерам, которое видно из наблюдений и которое можно объяснить методами, представленными в разделе 2.1 данной диссертации.

**Третья глава** посвящена исследованию волновых процессов в пылевой плазме у поверхности Луны. Рассматриваются ситуации, когда Луна находится вне и внутри хвоста магнитосферы Земли. В разделе 3.3 рассматриваются линейные волны, которые могут возникать в пылевой плазме приповерхностного слоя Луны в случае, когда Луна находится вне хвоста магнитосферы Земли. Отмечается, что нарушение изотропии функции распределения электронов в приповерхностной лунной плазме связано с движением солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц, что приводит к развитию неустойчивости и возбуждению высокочастотных волн с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных волн. В разделе 3.4 для той же ситуации приводятся условия, при которых возможно распространение солитонов в данной плазменно-пылевой системе. Приведены графики профелей пылевых звуковых солитонов. Показано, что следует учитывать адиабатический захват электронов и использовать формулу Гуревича для распределения электронов.

В разделах 3.5-3.8 рассматривается ситуация, когда Луна находится в хвосте магнитосферы Земли. Обсуждается, что движение Луны по своей орбите (и вместе с ней плазменно-пылевой системы у поверхности) относительно плазмы хвоста магнитосферы Земли создает условия для возникновения различных неустойчивостей и турбулентных движений. В частности, в разделе 3.7.1 рассмотрена гидродинамическая неустойчивость, в разделе 3.7.2 –

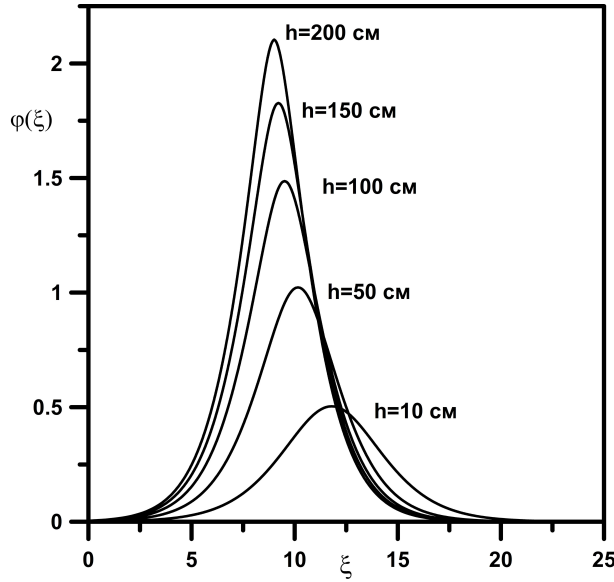


Рис. 2 — Профили  $\varphi(\xi)$ , характеризующие пылевые звуковые солитоны на различных высотах  $h$  при  $\theta = 82^\circ$ ,  $M = 9$  и параметрах плазменно-пылевой системы, вычисленных при  $N_0 = 2.1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 0.15 \text{ эВ}$ .

кинетическая неустойчивость. Найдены инкременты и характерные времена развития неустойчивостей, которые оказываются меньше, чем время нахождения Луны в частях хвоста магнитосферы Земли, что свидетельствует о том, что имеет место развитие данных неустойчивостей в приповерхностной Лунной плазме, когда Луна проходит соответствующие части хвоста магнитосферы Земли.

Для гидродинамической неустойчивости условия её развития определяются неравенством:

$$u < \omega_{piM} \lambda_D,$$

где  $u$  — скорость движения Луны по своей орбите,  $\omega_{piM}$  — частота колебаний ионов плазмы хвоста магнитосферы Земли,  $\lambda_D$  — дебаевский радиус. Анализ параметров в различных областях хвоста магнитосферы и пылевой плазмы у Луны показывает, что выполнение условия развития неустойчивости возможно в областях магнитного переходного и/или пограничного слоев магнитосферы при  $u \sim 1 \text{ км/с}$  и параметрах фотоэлектронов, характеризуемых данными из нижней части табл. 1, т.е. для случая квантового выхода лунного реголита из работы [24]. При этом  $a \sim 100 \text{ нм}$ ,  $|Z_d| \sim 10$ ,  $n_d \sim 10 \text{ см}^{-3}$ ,  $n_{iM} \sim 10 \text{ см}^{-3}$ ,  $m_d \sim 10^{-14} \text{ г}$ ,  $T_{e(ph)} \sim 1 \text{ эВ}$ ,  $n_{e(ph)} \sim 10^2 \text{ см}^{-3}$ , а характерное время развития неустойчивости составляет порядка 0.1 с. Таким образом, времени, в течение которого происходит взаимодействие пылевой плазмы с

областями магнитного переходного и/или пограничного слоев магнитосферы, вполне достаточно для того, чтобы произошла генерация волн за счет гидродинамической неустойчивости. Более того, следует ожидать эффективного развития нелинейных процессов.

Характерное значение инкремента кинетической неустойчивости имеет вид:

$$\gamma \sim \omega_{pd} \frac{T_{e(ph)} n_{iM}}{T_{iM} n_{e(ph)} v_{TiM}} u.$$

Условие развития неустойчивости  $u > \omega_{pd} \tilde{\lambda}_D$  достаточно легко реализуется в условиях плазмы в области взаимодействия хвоста магнитосферы с Луной. Для этого потоковая скорость  $u$  должна превосходить величины, составляющие от нескольких см/с до нескольких десятков см/с для разных параметров задачи. Наибольшие значения инкремента в рассматриваемой ситуации достигаются в условиях, когда фотоэлектроны имеют температуру  $T_e = 1$  эВ, т.е. для квантового выхода лунного реголита из работы [24]. В этом случае можно ожидать характерных времен развития неустойчивости  $\tau \sim (\gamma_k)^{-1}$  порядка одного часа. Таким образом, в период взаимодействия хвоста магнитосферы с Луной, которое продолжается около семи земных суток, возможно развитие пылевой звуковой турбулентности за счет рассматриваемого эффекта.

В пункте 3.8 описываются нелинейные процессы в пылевой плазме у поверхности Луны. Предполагается следующая схема развития плазменной турбулентности: ионы плазмы магнитосферы раскачивают колебания (или волны) вследствие гидродинамической или кинетической неустойчивости. Вследствие этого (аналогично задаче об аномальном сопротивлении плазмы) имеет место аномальная потеря импульса ионов (передача колебаниям, т. е. коллективным движениям пылевых частиц). В стационарном состоянии насыщения, достигаемого, когда рост неустойчивости ограничивается нелинейными процессами, имеет место турбулентный нагрев плазмы, природу которого определяет турбулентность, вызванная неустойчивостью. Турбулентный нагрев неодинаков для ионной и пылевой компонент. Найдены эффективные частоты и характерные электрические поля, возникающие у поверхности Луны в процессе развития ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентностей. Например, для случая ионно-звуковой турбулентности эффективная частота

столкновений дается выражением:

$$\nu_{\text{eff}} \sim \frac{\lambda_{DiM}}{\lambda_D} \frac{v_{TiM}}{u} \omega_{pd} \left( \frac{n_{iM}}{n_d} \frac{m_d}{Z_d m_i} \right)^{1/6}.$$

В условиях областей магнитного переходного и/или пограничного слоев магнитосферы в плазменно-пылевой системы у Луны могут возбуждаться электрические поля  $E \sim 0.3$  В/м, что несколько меньше ожидаемых электрических полей у поверхности Луны  $E \sim 2T_{e(ph)}/e\lambda_{De(ph)}$  [25], имеющих порядок 1 В/м и возникающих в процессе зарядки поверхности Луны при ее взаимодействии с солнечным излучением.

Для пылевой звуковой турбулентности эффективная частота столкновений имеет вид:

$$\nu_{\text{eff}} \sim \frac{u|Z_d|}{\lambda_{DiM}} \frac{T_{e(ph)}^{7/2}}{T_{iM}^{5/2} T_d} \left( \frac{n_{iM}}{n_{e(ph)}} \right)^{1/2}.$$

Электрические поля порядка  $E \sim 10^{-6}$  В/м, возбуждаемые при развитии пылевой звуковой турбулентности в плазменно-пылевой системы у Луны, существенно меньше электрических полей, возбуждаемых при развитии ионно-звуковой турбулентности.

В разделе 3.9 сформулированы выводы к третьей главе работы.

В четвертой главе приведено описание модуляционного взаимодействия электромагнитных волн в ионосфере Земли, связанного с возбуждением возмущений, имеющих частоты в области пылевых звуковых волн. В пункте 4.1 дается описание явлений, связанных с проявлением заряженной пыли в ионосфере Земли. В разделе 4.2 дается теоретическое описание модуляционного взаимодействия электромагнитных волн в запыленной ионосфере Земли, и этим механизмом объясняется возникновение неоднородностей концентраций электронов и ионов. Приводится основная система уравнений, выводятся инкременты модуляционной неустойчивости для случаев зарядов разных знаков и для разных диапазонов частот, в которые попадает частота низкочастотных возмущений, моделирующая электромагнитную волну накачки. Оказывается, что для монохроматической волны накачки вариации концентраций электронов и ионов  $n_{e1}/n_{e0} \sim n_{i1}/n_{i0} \sim (\omega_{pe}/\omega_0)^2 |\mathbf{E}_0|^2 8\pi n_{e0} T_{e0}$ . Для параметров нагревного стенда НААРР делаются расчеты величины вариации электронной плотности. Максимальные полученные величины таких

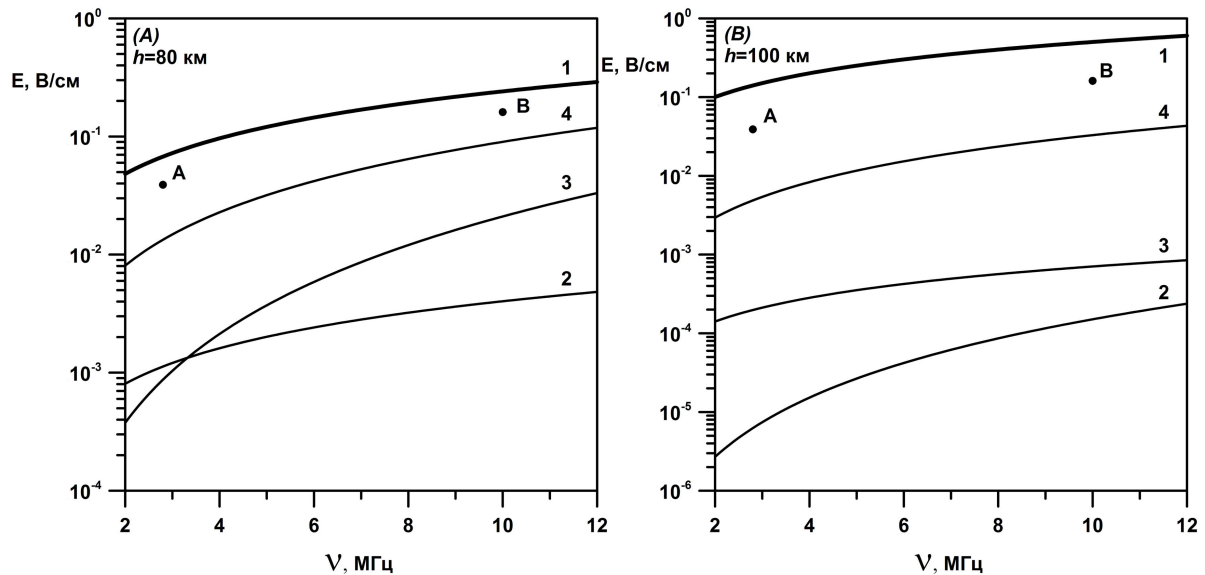


Рис. 3 — Амплитуды  $E$  и частоты  $\nu = \omega_0/2\pi$  волны накачки, характеризующие области развития модуляционных процессов, приводящих к формированию неоднородностей запыленной ионосферной плазмы на высотах 80 км (а) и 100 км (б). Кривые «1» ограничивают сверху область применимости используемого в работе подхода. Кривые «2», «3», «4» соответствуют порогам модуляционной неустойчивости в случае отрицательно заряженных пылевых частиц (кривые «2»), а также положительного заряда пылевых частиц в двух ситуациях  $\omega_{\chi_e} \gg \Omega \gg C_{sd}K$  (кривые «3») и  $\Omega \gg \omega_{\chi_e} \gg C_{sd}K$  (кривые «4»). Таким образом, кривые «2», «3», «4» ограничивают снизу область развития модуляционных процессов в соответствующих ситуациях.

вариаций составляют 0.028 для высоты 80 км и излучения на частоте 2.8 МГц (Рис. 3).

В разделе 4.2.4 сформулированы выводы к четвертой главе работы.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Исследованы процессы достижения высоких зарядов на пылевых частицах в пылевой плазме под действием жесткого рентгеновского излучения и под действием высокоэнергетичного пучка электронов. В первом случае пылевые частицы в плазме могут приобретать аномально высокие положительные заряды. Показано, что электростатическое давление на поверхности заряженных пылевых частиц может приводить к их полному или частичному разрушению. Опре-



делены минимальные размеры неразрушающихся пылевых частиц, находящихся под воздействием интенсивного рентгеновского излучения. Разработана модель, описывающая процессы зарядки пылевых частиц, находящихся под воздействием высокоэнергетичного пучка электронов и учитывающая нелинейные эффекты. Показано, что в этом случае пылевые частицы в плазме могут приобретать аномально высокие заряды вплоть до  $5 \cdot 10^7$  зарядов электрона для частиц размером 100 мкм. Установлено, что помимо тока электронного пучка, а также микроскопических токов электронов и ионов окружающей плазмы на частицу важным током, влияющим на величину заряда пылевой частицы, является ток автоэлектронной эмиссии. Именно этот ток приводит к значительному снижению величины отрицательного заряда на пылевой частице. Установленный результат качественно подтверждается проводимыми экспериментами по аномально высокой зарядке пылевых частиц.

2. Рассмотрены волновые процессы в пылевой плазме у поверхности Луны. Показано, что функция распределения фотоэлектронов (по скоростям) представляется в виде суперпозиции двух функций распределения, характеризующихся различными температурами электронов: электроны с меньшей энергией выбиваются из лунного реголита фотонами с энергиями, близкими к работе выхода реголита, тогда как происхождение электронов с большей энергией связано с фотонами, соответствующими пику в спектрах солнечного излучения, связанного с линией H Лайман-альфа. Нарушение изотропии функции распределения электронов в приповерхностной лунной плазме связано с движением солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц, что приводит к развитию неустойчивости и возбуждению высокочастотных волн с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных волн. Получены законы дисперсии, характеризующие распространение линейных волн, инкременты развития неустойчивостей, приводящих к их генерации. Показано, что в ситуации, когда пылевая плазма у поверхности Луны взаимодействует с хвостом магнитосферы Земли, оказывается возможным развитие гидродинамической и кинетиче-

ской неустойчивостей, в результате развития которых возбуждаются ионно-звуковые и пылевые звуковые волны. Показано, что 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 Земли с пылевой плазмой в приповерхностном слое Луны.

3. Установлено, что в силу довольно длительного характера развития гидродинамической и кинетической неустойчивостей при взаимодействии пылевой плазмы у поверхности Луны с плазмой хвоста магнитосферы Земли успевают установиться развитая ионно-звуковая и пылевая звуковая плазменная турбулентности соответственно. 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. В ситуации, когда Луна находится вне хвоста магнитосферы Земли показана возможность распространения пылевых звуковых солитонов в приповерхностной лунной пылевой плазме. Продемонстрировано, что при их описании следует учитывать эффект захвата электронов потенциальными стенками, существование которых обусловлено положительным электростатическим потенциалом солитона. Определены области возможных чисел Маха и амплитуд, для которых возможно распространение солитонов. Найдены солитонные решения для различных высот над лунной поверхностью.
4. Описан механизм формирования неоднородностей электронной и ионной концентраций в запыленной ионосфере в результате развития модуляционного взаимодействия электромагнитных волн, связанного с возбуждением возмущений, имеющих частоты в области пылевых звуковых волн. Определены инкременты и пороги разви-

тия модуляционной неустойчивости, при которых происходит эффективное формирование неоднородностей компонент запыленной ионосферной плазмы. В рамках предложенного подхода определены масштабы неоднородностей электронной концентрации в запыленной ионосфере, возникающей в случае воздействия электромагнитных волн от нагревного стенда НААРР в ситуации, когда присутствуют заряженные пылевые частицы в мезосфере Земли. Показана возможность возбуждения достаточно интенсивных неоднородностей электронной и ионной концентраций в запыленной мезосфере Земли в результате развития модуляционного взаимодействия.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. Destruction of Microparticles Related to Dusty Plasma Processes and Possible Technological Applications // Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics. 2012. № 6(82), pp. 84-86.*
2. *Т.И. Морозова, С.И. Копнин, С.И. Попель. О возможности управляемого разрушения микрочастиц плазменно-пылевыми методами // Труды МФТИ. — 2013. — Том 5, № 2. — С. 120-125.*
3. *С.И. Копнин, С.И. Попель, Т.И. Морозова. К вопросу о модуляционном возбуждении неоднородностей в плазме запыленной ионосферы // Физика плазмы. — 2015. — Т. 41, № 2. — С. 188–194.*
4. *Т.И. Морозова, С.И. Копнин, С.И. Попель. Волновые процессы в пылевой плазме у поверхности Луны // Физика плазмы. — 2015, Т. 41, № 10, с. 867–876.*
5. *С.И. Попель, Т.И. Морозова. Волновые процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны // Физика плазмы. — 2017, Т. , № 5 , с. 474– 484).*
6. *С.И. Копнин, Т.И. Морозова., С.И. Попель. Пылевые звуковые солитоны у поверхности Луны // Труды МФТИ. — 2017, Т. 9, № 4, с. 867– 876.*

7. Kopnin S.I., Morozova T.I., Popel S.I. , *Electron Beam Action and High Charging of Dust Particles* // IEEE Transactions on Plasma Science, Issue 99, Date of Publication: 12 September 2017, 3 pages. DOI: 10.1109/TPS.2017.2748378
8. Izvekova Yu.N., Popel S.I. , Morozova T.I. *Interaction of the Earth's Magnetotail with Dusty Plasma near the Lunar Surface: Wave Processes and Turbulent Magnetic Reconnection* // IEEE Transactions on Plasma Science, Issue 99, Date of Publication: 20 September 2017, 6 pages. DOI: 10.1109/TPS.2017.2752084
9. S. I. Kopnin, T. I. Morozova, and S. I. Popel. *On Limiting Values of Dust Charges in Complex Plasmas*// AIP Conference Proceedings, Dusty/Complex Plasmas: Basic and Interdisciplinary Research”, Edited by V.Yu. Nosenko, P.K. Shukla, M.H. Thoma, H.M. Thomas, American Institute of Physics, Melville, New York (2011), ISBN 978-0-7354-0967-5, pp. 249-250.
10. С.И. Копнин, Т.И. Морозова, С.И. Попель, *О минимальном размере капель жидкости в комплексной плазме в присутствии электромагнитного излучения. Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2011), стр. 216, Москва, 2011.*
11. S. I. Kopnin, T. I. Morozova, and S. I. Popel, *On Limiting Values of Dust Charges in Complex Plasmas*. Sixth Intl. Conf. on the Physics of Dusty Plasmas (Garmisch-Paternkirchen, Germany, 2011). Book of Abstracts, p. 78.
12. С.И. Копнин, Т.И. Морозова, С.И. Попель, *К вопросу об аномально высокой зарядке пылевых частиц в комплексной (пылевой) плазме, Физика низко-температурной плазмы - 2011: материалы Всероссийской (с международным участием) конференции (21-27 июня 2011 г.): в 2 т. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. - Т. 2. - С. 165-168.*
13. S.I. Kopnin, T.I. Morozova, S.I. Popel, and P.K. Shukla, *Abnormally High Dust Particle Charges in Complex Plasmas and Quantum Schottky Effect*, International Topical Conference on Plasma Science: Strongly Coupled

- Ultra-Cold and Quantum Plasmas (Lisbon, Portugal, 2011). Book of Abstracts, p. 45.
14. *S.I. Kopnin, T.I. Morozova, and S.I. Popel, On Minimum Size of Liquid Droplets in Ionospheric Plasma in the Presence of Solar Radiation*, Abstracts of XII Conference of Young Scientists "Interaction of Fields and Radiation with the Matter"(Irkutsk, Russia, 2011). Programm and Abstracts, p. 49.
  15. *С.И. Копнин, Т.И. Морозова, С.И. Попель, О возможности разрушения полиминеральных микрочастиц вследствие аномально высокой зарядки микрочастиц в комплексной (пылевой) плазме // Труды 54-й научной конференции МФТИ. Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе. Аэрофизика и космические исследования. Москва-Долгопрудный, 2011, стр. 161-162.*
  16. *С.И. Копнин, Т.И. Морозова, С.И. Попель, О предельных значениях зарядов нано- и микромасштабных частиц в комплексной (пылевой) плазме, III Научно-техническая конференция "Низкотемпературная плазма в процессах получения функциональных покрытий", с элементами научной школы (Казань, Россия, 2011).*
  17. *Т.И. Морозова, Аномально высокие заряды пылевых частиц в комплексной плазме, квантовый подход, Международный коллоквиум "Ломоносов и Гумбольдт: научное сотрудничество России и Германии - от истоков до наших дней" (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 2011).*
  18. *Копнин С.И., Морозова Т.И., Попель С.И. Некоторые эффекты, сопровождающие аномально высокую зарядку полиминеральных нано- и микромасштабных частиц // Тезисы докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 2012, Москва. - С. 204.*
  19. *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. Destruction of Microparticles Related to Dusty Plasma Processes and Possible Technological Applications // Alushta-2012. International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop "Nano- and Micro-Sized*

- Structures in Plasmas”. Book of Abstracts (Alushta (Crimea), Ukraine, 2012), p. 220.
20. *S.I. Popel, V.V. Adushkin, A.P. Golub', T.I. Morozova, Cavitation Mechanism of Formation and Disintegration of Fine Particles of Different Mineral and Chemical Nature, Humboldt Conference "Chemistry and Life" (Poltava, Ukraine, 2013), P. 55.*
  21. *Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. О возможности управляемого дробления микрочастиц плазменно-пылевыми методами // XL Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. Тезисы докладов (Звенигород, 2013). С. 180.*
  22. *Копнин С.И., Морозова Т.И., Попель С.И. О возможности существования пылевой звуковой моды в экзосфере Луны // Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. XIII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2013), Москва. – С. 43-44.*
  23. *Popel S.I., Adushkin V.V., Golub' A.P., Morozova T.I. Nanoscale Particles in Technological Processes of Benefication // Humboldt-Kolleg Symposium "NANO-2013. Knowledge Society: mutual influence and interference of science and society" (Chisinau, Moldova, 2013), p. 42.*
  24. *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. On propagation of dust acoustic solitons in the lunar exosphere, International Workshop on Astrophysical Turbulence: from Galaxies to Planets (Dresden, Germany, 2013).*
  25. *Morozova T.I. On propagation of dust acoustic solitons in the lunar exosphere, Team Meeting "Dusty Plasma Effects in the system Earth-Moon" (Bern, Switzerland, 2013).*
  26. *Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. Модуляционная неустойчивость широких спектров волн и возможность генерации плазменных неоднородностей в запыленной ионосфере // Труды 56-й научной конференции МФТИ: "Всероссийской научной конференции. Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информа-*

ционном обществе”. Аэрофизика и космические исследования. Москва-Долгопрудный-Жуковский, 2013, стр. 121-122.

27. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. *Пылевые звуковые солитоны в приповерхностном слое Луны* // Сборник тезисов девятой ежегодной конференции “Физика плазмы в Солнечной Системе”, Москва, 2014, стр. 98.
28. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. *Модуляционная неустойчивость широких спектров волн и возможность генерации плазменных неоднородностей в запыленной ионосфере* // Сборник тезисов девятой ежегодной конференции “Физика плазмы в Солнечной Системе”, Москва, 2014, стр. 73.
29. Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. *Modulational excitation of density perturbations in dusty ionosphere*. Proceedings of the 41st EPS Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, Europhysics Conference Abstracts. Vol.38F, O4.J104, ISBN: 2-914771-90-8 (2014).
30. Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. *Localized structures of nanosize charged dust grains in the lunar exosphere*. Proceedings of the 41st EPS Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, Europhysics Conference Abstracts. Vol.38F, P1.147. ISBN: 2-914771-90-8 (2014).
31. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. *Модуляционная неустойчивость и возбуждение неоднородностей концентрации в плазме запыленной ионосферы* // Труды 57-й научной конференции МФТИ: “Всероссийской научной конференции. Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе”. Аэрофизика и космические исследования. Москва-Долгопрудный-Жуковский, 2014, стр.
32. T. I. Morozova, S. I. Kopnin, and S. I. Popel, *Dust acoustic solitons in a dusty exosphere of the Moon being under the action of solar radiation*, Book of Abstracts. X International Conference "Problems of Geocosmos" (Saint-Petersburg, Petrodvorets, Russia, 2014), p. 178.

33. *T. I. Morozova, S. I. Kopnin, and S. I. Popel, Formation of inhomogeneities of dusty ionospheric plasmas as a result of modulational instability development of electromagnetic waves of solar radiation*, Book of Abstracts. X International Conference "Problems of Geocosmos" (Sankt-Petersburg, Petrodvorets, Russia, 2014), pp. 178-179.
34. *T. I. Morozova, S. I. Kopnin, and S. I. Popel, Nonlinear dust acoustic waves in a dusty plasma over the Moon*, The Fifth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2014), 5MS3-PS-42, pp. 182-183.
35. *T. I. Morozova, S. I. Kopnin, and S. I. Popel, Linear and non-linear waves in the lunar exosphere*, The International Conference Mode Conversion, coherent structures and turbulence. Moscow, 24 - 27 November, 2014
36. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. Плазменные волны у поверхности Луны Тезисы конференции молодых ученых, 13-15 апреля 2015, Москва.
37. *T. I. Morozova, S. I. Kopnin, and S. I. Popel, Modulational excitation of density perturbations in dusty ionosphere*, 13th Workshop "Complex systems of charged particles and their interaction with electromagnetic radiation", April 8-9, Moscow, 2015
38. *T. I. Morozova and S. I. Popel, Dust-Acoustic Shocks in Plasmas Containing Variable-Charge Impurities*, 42st EPS Conference on Plasma Physics (Lisbon, Portugal, 2015), P5.401.
39. *T. Morozova and S. Popel, Linear waves in the near-surface plasma layer of the illuminated part of the Moon*, Bulletin of The American Physical Society, Vol. 60 (2015), Abstract. YP12.00068 (57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Savannah, Georgia, USA, 2015).
40. Морозова Т. И. Линейные и нелинейные волны и неустойчивости в приповерхностном слое освещенной части Луны, Физика космоса, Труды 45-й Международной студенческой научной конференции, Екатеринбург 1—5 февраля 2016 г.



41. Т.И. Морозова, С.И. Попель, *Волны и неустойчивости в плазме приповерхностного слоя Луны при её взаимодействии с магнитосферой Земли*, Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной Системе», 1519 февраля 2016, ИКИ РАН, Сборник тезисов
42. Т.И. Морозова, Ю.Н. Извекова, С.И. Попель, *Пылевая плазма в атмосфере Марса*, Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной Системе», 1519 февраля 2016, ИКИ РАН, Сборник тезисов
43. Морозова Т.И., Попель С.И. *Электростатические волны и неустойчивости в плазме приповерхностного слоя Луны при её взаимодействии с магнитосферой Земли*. Тезисы XLIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 8-12 февраля 2016 г., г. Звенигород
44. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. *Модуляционная неустойчивость электромагнитных волн и возбуждение неоднородностей в запыленной ионосфере*. Сборник тезисов XIII Конференции молодых ученых, посвященной Дню Космонавтики, г. Москва 13-15 апреля 2016
45. Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. *Adiabatic trapping of electrons and localized wave structures in lunar dusty plasmas and Earth's mesosphere*, 7th Moscow Solar System Symposium, October 2016, Moscow, Russia
46. Morozova T.I., Popel S.I. *Waves in the region of interaction between Earth's magnetosphere and lunar dusty plasma*, 7th Moscow Solar System Symposium, October 2016, Moscow, Russia
47. Morozova T.I., Popel S.I. *Wave processes in dust plasma near the surface of the Moon*, the 1st APSCO ISSI-BJ Space science school "How to design a space science mission". Thailand, Chon Buri Province, 17-26 October 2016
48. Morozova T.I., Popel S.I. *Plasma wave processes at the Moon: case of interaction of a lunar dusty plasma with Earth magnetotail*. Annual Moscow workshop Non-ideal plasma physics. December 7-8, 2016, Moscow, Russia
49. Морозова Т.И., Попель С.И. *Волновые плазменные процессы у поверхности Луны при её взаимодействии с хвостом магнитосферы Земли*. Сбор-

ник тезисов XIV Конференции молодых ученых, посвященной Дню Космонавтики, г. Москва 12-14 апреля 2017

50. Морозова Т.И., Попель С.И. *Нелинейные волновые процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны.* Сборник тезисов XLIV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, с.202, 13-17 февраля 2017 г., г. Звенигород, Россия
51. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. *Солитоны в плазме приповерхностного слоя Луны и пылевой околоземной плазме с учетом адиабатического захвата электронов.* Двенадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной Системе», 610 февраля 2017, ИКИ РАН, Сборник тезисов
52. Морозова Т.И., Попель С.И. *Волновые процессы у поверхности Луны при ее взаимодействии с хвостом магнитосферы Земли.* Двенадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной Системе», 610 февраля 2017, ИКИ РАН, Сборник тезисов
53. Морозова Т.И., Попель С.И. *Неустойчивости и турбулентные движения в пылевой плазме у поверхности Луны при ее взаимодействии с плазмой хвоста магнитосферы Земли.* Всероссийская астрономическая конференция «Астрономия: познание без границ», 17-22 сентября 2017.
54. Морозова Т.И., Копнин С.И., Попель С.И. *Модуляционное взаимодействие и генерация неоднородностей концентраций запыленной ионосферной плазмы.* Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной Системе», 12-16 февраля 2018, ИКИ РАН, Сборник тезисов, стр. 108
55. Извекова Ю.Н., Морозова Т.И., Попель С.И. *Генерация нижнегибридных волн в плазме при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с Луной.* Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной Системе», 12-16 февраля 2018, ИКИ РАН, Сборник тезисов, стр. 39

## Список цитируемой литературы

1. Цытович В.Н., Винтер Дж. Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. – 1998. – Т. 168, № 8. – С. 899–907.
2. Winter J., Gebauer G. Dust in Magnetic Confinement Fusion Devices and its Impact on Plasma Operation // Journal of Nuclear Materials. – 1999. – V. 266–269. – P. 228–233.
3. Chu J.H., I Lin. Direct observation of Coulomb crystals and liquids in strongly coupled plasmas // Phys. ref. lett. – 1994. – V. 72, – No. 25, pp. 4009-4012.
4. Thomas H.M., Morfill G.E., Demmel V. et al. Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma // Phys. ref. lett.– 1994. – V. 73, – No. 5, pp. 652-655.
5. Фортов В.Е., Нефедов А.П., Торчинский В.М, и др. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Том 64, № 2. – С. 86-91.
6. Shipple E.C. Potentials of surfaces in space // Rep. Prog. Phys. – 1981. – V. 44, No 11.
7. Попель, С. И. Лекции по физике пылевой плазмы. Москва. МФТИ. 2012. 160 стр.
8. Gueymard, C. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models // Solar Energy, V. 76, Issue 4, April 2004, Pages 423-453.
9. Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция солнечной системы. – 1979. – М.: Мир. – 511 с.
10. Goertz C.K. Dusty Plasmas in the Solar System // Reviews of Geophysics – 1989. – V. 27, No. 2. – P. 271–292.
11. Засов, М. С. and Кононович, Э.В. Астрономия. Москва. Физматлит. 2008. 254 стр.

12. *Drain B.T. Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium.* PRINCETON UNIVERSITY PRESS. PRINCETON SERIES IN ASTROPHYSICS. 2011. 540 p.
13. *Zook H., McCoy J. Large scale lunar horizon glow and a high altitude lunar dust exosphere // Geophys. Res. Lett. – 1991. – V.18, No. 11. – P. 2117-2120.*
14. *Rennilson J.J., Criswell D.R. Surveyour's observations of Lunar horizon glow. The Moon. – 1974. No. 10. – P. 121-142*
15. *Elphic R. C., Delory G. T., Hine B. P., Mahaffy P. R., Horanyi M., Colaprete A., Benna M., Noble S. K. // Space Sci. Rev. 2014. V. 185. P. 3.*
16. *V. A. Bronshtén and N. I. Grishin. Noctilucent Clouds // Moscow. Nauka. 1970.*
17. *Клумов Б.А., Морфилл Г.Е., Попель С.И. Формирование структур в запылённой ионосфере // ЖЭТФ. – 2005. – Т. 127, № 1. – С. 171–185.*
18. *Hunten D.M., Turco R.P., Toon O.B. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and thermosphere // Journal of the Atmospheric Science. – 1980. – V.37. – P. 1342–1357.*
19. *Rao N.N., Shukla P.K., Yu. M.Y., Dust–Acoustic Waves in Dusty Plasmas // Planetary and Space Science. – 1990. – V. 35, No. 4. – P. 543–546.*
20. *Копнин С.И., Попель С.И., Ю Минг Модуляционное возбуждение низкочастотных пылевых звуковых колебаний в нижней ионосфере // Физика плазмы. – 2007. – Т. 33, № 4. – С. 323–336.*
21. *Копнин С.И. Диссертация на тему "ПЫЛЕВЫЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ЗАПЫЛЁННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ*  
*МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ), 2008, Москва.*
22. *Мусатенко С.И., Мусатенко Ю.С., Курочка Е.В., Ласточкин А.В., Чолий В.Я., Максименко О.И., Слипченко А.С. Пылевая плазма в средне-*

широтной ионосфере в периоды метеорных потоков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 182–192.

23. M. N. Vasil'ev, N. A. Vorona, A. V. Gavrikov, O. F. Petrov, V. S. Sidorov, V. E. Fortov. *Anomalously high charging of dispersed particles by 25-keV electron beam* // Techn. Phys. Lett. – 2010, № 36, pp. 1143-1145.
24. Willis R.F., Anderegg M., Feuerbacher B., Fitton B. // *Photon and Particle Interactions With Surfaces in Space*, ed. by R.J.L. Gard, D.Reidel, Dordrecht (1973), p. 389.
25. Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. // *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47. № 6. Р. 455.