

На правах рукописи

УДК 533.951

Копнин Сергей Игоревич

**ПЫЛЕВЫЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ЗАПЫЛЁННОЙ
ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ**

Специальность 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико–математических наук

Долгопрудный 2008

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Пылевой плазмой называется частично или полностью ионизованный газ, содержащий пылевые частицы. Иногда такую плазму называют комплексной плазмой, коллоидной плазмой, плазмой с конденсированной дисперсной фазой, запылённой плазмой и др. В настоящее время проводятся интенсивные исследования пылевой плазмы, на что указывают многочисленные публикации (ежегодно публикуется более 1000 работ по этой тематике) в различных изданиях. С пылевой плазмой связаны такие приложения, как технологии плазменного напыления в микроэлектронике, плазменное травление и др. Повышенный интерес к пылевой плазме также вызван развитием технологий получения тонких плёнок и частиц с размерами в наномасштабном диапазоне. В процессе развития исследований в области управляемого термоядерного синтеза пылевая плазма была обнаружена в пристеночной области термоядерных установок с магнитным удержанием. Пылевая плазма представляет интерес и с точки зрения ракетостроения, т.к. она была обнаружена вблизи искусственных спутников Земли. Наряду с этим, производится множество исследований свойств пылевой плазмы и процессов, протекающих в ней, с точки зрения фундаментальной физики. В 1994 году был впервые получен плазменно–пылевой кристалл. Были высказаны гипотезы о происхождении Солнечной системы из облака пылевой плазмы. Во Вселенной, как полагают, существует многообразие плазменно–пылевых систем. Это – солнечный ветер, ионосфера и магнитосфера Земли, планетарные кольца, межзвёздные и межпланетные плазменно-пылевые облака, хвосты и комы комет и др. В настоящее время все эти объекты активно исследуются.

Интенсивные работы ведутся и в области физики пылегазовых облаков в атмосфере, а также физики серебристых облаков и полярных мезосферных радиоотражений, представляющих собой облака ледяных частиц нано- и микромасштабных размеров в ионосферной плазме на высотах 80 – 95 км. При этом, на поверхности пылевых частиц протекают различные процессы, из которых можно выделить рекомбинацию электронов и ионов. Нескомпенсированные потоки электронов и ионов, а также действие фотоэффекта могут приводить к отрицательной, либо положительной зарядке пылевых частиц. В случае, когда ионосферная плазма содержит заряженные пылевые частицы, говорят о *запылённой* ионосферной плазме.

Одним из источников пыли в ионосфере на высотах 80 – 120 км служат метеорные потоки. Максимум концентрации пылевых частиц метеорного происхождения приходится на высоты 80 – 90 км и составляет более 10^4 см^{-3} . Не исключён конвективный перенос

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико–технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: доктор физико–математических наук
Попель Сергей Игоревич

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук
Гавриленко Валерий Петрович
доктор физико–математических наук
Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы

Ведущая организация: Объединённый институт высоких температур РАН

Защита состоится «___» июня 2008 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д212.156.03 при Московском физико–техническом институте по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико–технического института.

Автореферат разослан «___» мая 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.156.03
кандидат физико–математических наук

Арсенин А.В

частиц вулканического происхождения, частиц сажи от крупных пожаров и др. Пылевые частицы могут образовываться также и в результате конденсации паров воды.

Исследование нижней части ионосферы Земли (в диапазоне высот от 80 до 120 км) представляет большой интерес, т.к. это наименее изученная область атмосферы. Трудности исследований на этих высотах связаны с тем, что они недостижимы для стратостатов. В то же время плотность воздуха на этих высотах всё ещё высока и препятствует движению искусственных спутников Земли. Поэтому способы изучения и диагностики этой области высот весьма ограничены. Непосредственные эксперименты на данных высотах реализуются лишь с помощью пролётных ракет.

Наличие заряженных пылевых частиц в нижней ионосфере кардинальным образом влияет на её ионизационные свойства [C1], а также на волновые процессы, протекающие в запылённой ионосферной плазме. Одним из важнейших проявлений свойств запылённой ионосферной плазмы является возможность существования низкочастотных пылевых звуковых возмущений, существование которых связано с движением заряженных мелкодисперсных пылевых частиц. В 1999, 2000, 2001, 2003 годах проводились эксперименты [C2] по наблюдению радиоизлучения ионосферы у поверхности Земли. Оказалось, что во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды на фоне флуктуаций радишумов наблюдаются устойчивые «пылевые» линии с частотами порядка нескольких десятков Гц, типичными для пылевой звуковой моды в условиях запылённой ионосферной плазмы в области высот 80 – 120 км. Таким образом, появление флуктуаций радишумов можно связать с наличием пылевых частиц, образованных пересыщенными парами веществ, попадающих в ионосферу в результате абляции метеорного вещества. В связи с этим актуальной является проблема построения теории пылевых звуковых возмущений в запылённой ионосферной плазме, определение механизмов (в том числе и нелинейных) их возбуждения, а также выявление эффектов, связанных с существованием линейных и нелинейных пылевых звуковых возмущений.

Диапазон частот пылевых звуковых волн, существующих в запылённой ионосфере, перекрывается с инфразвуковой областью частот. Инфразвук (от латинского *infra* – ниже, под) представляет собой упругие волны, аналогичные звуковым, но с частотами, находящимися в области частот, меньших частот, слышимых человеком. Обычно за верхнюю границу инфразвуковой области принимают частоты около 25 Гц. Таким образом, актуальной проблемой является изучение возможности генерации инфразвуковых колебаний пылевыми звуковыми возмущениями в запылённой ионосферной плазме и их наблюдения у поверхности Земли. Пылевые звуковые возмущения могут также служить источником акустико-гравитационных волн (АГВ), имеющих длины волн, большие или порядка 1 км и частоты, находящиеся в

инфразвуковой области. Рассмотрение основных проявлений АГВ, возбуждаемых пылевыми звуковыми возмущениями, во время метеорных потоков, которые могут быть зафиксированы наземными наблюдателями, также представляет несомненный интерес. Исследования волновых свойств запылённой ионосферной плазмы может быть также полезно с точки зрения её диагностики.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка теории, описывающей волновые процессы, связанные с движением мелкодисперсных пылевых частиц, в плазме запылённой ионосферы; рассмотрение возможности нелинейного возбуждения пылевых звуковых возмущений; выявление обусловленных пылевыми звуковыми возмущениями физических эффектов в тропосфере, стратосфере и ионосфере, наблюдение которых может служить подтверждением существования пылевой звуковой моды в природе; определение свойств пылевых звуковых солитонов в ионосферной плазме.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показана возможность существования пылевых звуковых волн в плазме запылённой ионосферы. Определены их законы дисперсии. Установлено, что к затуханию пылевых звуковых волн в запылённой ионосфере, в основном, приводят процессы столкновений пылевых частиц с другими компонентами запылённой ионосферной плазмы, главным образом, с нейтральными атомами и молекулами. Показано, что важным процессом, приводящим к возбуждению пылевых звуковых возмущений в плазме запылённой ионосферы, является модуляционная неустойчивость электромагнитных волн, связанная с джоулевым нагревом, пондеромоторной силой, эффектами зарядки и динамики пылевых частиц. Определены инкременты, условия развития и пороги этого процесса.

2. Показано, что возникновение наблюдаемых в спектре радишумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Геминиды, Ориониды низкочастотных спектральных линий с характерными частотами, составляющими несколько десятков Герц, обусловлено модуляционным возбуждением электромагнитными волнами пылевых звуковых возмущений на высотах 80 – 120 км. Тем самым, предложен физический механизм возникновения указанных линий в спектре радишумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков и впервые продемонстрирована возможность существования пылевой звуковой моды в природе.

3. Показано, что возбуждение пылевых звуковых возмущений во время интенсивных метеорных потоков приводит к генерации инфразвуковых колебаний, которые в диапазоне частот от нескольких десятых до нескольких десятков Герц у поверхности Земли могут превалировать над инфразвуковыми колебаниями от других источников. Возбуждение пылевых звуковых возмущений в ионосферной плазме во время интенсивных метеорных потоков может приводить также к формированию на высотах 110–120 км акустико–гравитационных вихревых структур. В результате, во время интенсивных метеорных потоков оказывается возможным усиление относительной интенсивности зелёного излучения ночного неба.

4. Показана возможность существования пылевых звуковых солитонов в плазме запылённой ионосферы. Определены их форма и свойства в зависимости от параметров плазмы и знаков зарядов пылевых частиц. Установлено, что знаки зарядов пылевых частиц однозначно определяют характер возмущений («горб» или «ямка» плотности) электронов и ионов в пылевых звуковых солитонах. Указанное свойство солитонов может использоваться при диагностике параметров пылевых частиц в плазме запыленной ионосферы.

Научная новизна

Впервые развита теория, описывающая волновые процессы, связанные с движением мелкодисперсных частиц, в плазме запыленной ионосферы и показана возможность возбуждения пылевых звуковых возмущений в плазме запылённой ионосферы в процессе развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн.

Впервые показано, что возникновение наблюдаемых в спектре радишумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков низкочастотных спектральных линий обусловлено модуляционным возбуждением электромагнитными волнами пылевых звуковых возмущений на высотах 80 – 120 км. Тем самым, предложен физический механизм возникновения указанных линий в спектре радишумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков и впервые продемонстрирована возможность существования пылевой звуковой моды в природе.

Впервые показано, что возбуждение пылевых звуковых возмущений во время интенсивных метеорных потоков может приводить к генерации инфразвуковых колебаний, которые в диапазоне частот от нескольких десятых до нескольких десятков Гц у поверхности Земли могут превалировать над инфразвуковыми колебаниями от других источников.

Впервые установлено, что возбуждение пылевых звуковых возмущений в ионосферной плазме во время интенсивных метеорных потоков может приводить к

формированию на высотах 110 – 120 км акустико–гравитационных вихревых структур. В результате, во время интенсивных метеорных потоков оказывается возможным усиление относительной интенсивности зелёного излучения ночного неба.

Впервые показано, что знаки зарядов пылевых частиц в плазме запыленной ионосферы однозначно определяют характер возмущений электронов и ионов в распространяющихся в ней пылевых звуковых солитонах.

Практическая ценность

Результаты диссертации могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением физических свойств лабораторной, околоземной и космической пылевой плазмы, исследованием электрофизических и оптических свойств аэрозолей, процессами, происходящими в активных геофизических экспериментах (например, при инъекции в околоземную плазму вещества со спутников или геофизических ракет), проблемами плането- и звёздообразования, процессами энергопереноса в продуктах сгорания твёрдых топлив. Методы, развитые в диссертации, могут быть полезны: для дальнейшего развития теории волновых процессов в лабораторной, околоземной и ионосферной пылевой плазме; при объяснении результатов низкочастотных радиометрических и акустических исследований у поверхности Земли, постановке новых задач, относящихся к указанным исследованиям, интерпретации данных наблюдений излучения ионосферы; при разработке способов диагностики состава пылевой ионосферной плазмы и свойств пылевых частиц. Результаты данной работы могут также способствовать развитию ряда приложений технологической пылевой плазмы, направленных на разработку методов удаления пылевых частиц в производстве микросхем, создание материалов и покрытий с заданными свойствами путём контролируемого осаждения взвешенных пылевых частиц на подложку и т.д.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на XLV научной конференции Московского физико–технического института (Москва-Долгопрудный, Россия, 2002), на 30 Европейской конференции по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы (Санкт-Петербург, Россия, 2003), XLVI научной конференции Московского физико–технического института (Москва-Долгопрудный, Россия, 2003), на 35^{ой} Научной ассамблее COSPAR (Париж, Франция, 2003), на Международной конференции «Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence» (Москва, Россия, 2004), на XLVII научной конференции Московского физико–технического института

(Москва-Долгопрудный, Россия, 2004), на XLVIII научной конференции Московского физико–технического института (Москва-Долгопрудный, Россия, 2005), на 4^{ой} международной конференции по физике пылевой плазмы (Орлеан, Франция, 2005), на XXXIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2006), на Генеральной ассамблее геофизического научного сообщества (Вена, Австрия, 2006), на III Ежегодном митинге азиатско-океанийского геонаучного сообщества (Сингапур, 2006), на VII Международном симпозиуме по радиационной плазмодинамике (Москва, 2006), на XLIX научной конференции Московского физико–технического института (Москва-Долгопрудный, Россия, 2006), на XXXIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, (Звенигород, Россия, 2007), на Генеральной ассамблее геофизического научного сообщества (Вена, Австрия, 2007), на Молодёжной научной конференции «Физика и прогресс», (Санкт-Петербург, 2007), на 50^{ой} научной конференции Московского физико–технического института (Москва-Долгопрудный, Россия, 2007), на Генеральной ассамблее геофизического научного сообщества (Вена, Австрия, 2008), на XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 2008). Также, основные результаты неоднократно докладывались на научных семинарах в Московском физико–техническом институте и Институте динамики геосфер Российской Академии наук.

Публикации

В основу диссертации положены работы автора [1 – 20], опубликованные в журналах Физика плазмы, Planetary and Space Science, Advances in Space Research, в сборниках «New Vistas in Dusty Plasmas», «Нано- и микромасштабные частицы в геофизических процессах», «Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли», «Динамические процессы во взаимодействующих геосферах», а также в трудах международных и всероссийских конференций.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Она изложена на 119 страницах машинописного текста и иллюстрирована 11 рисунками. Библиография включает 146 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** показана актуальность темы, изложена цель работы, дана её общая характеристика, показано её место среди других исследований по этой тематике, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы.

В **Первой главе** представлен краткий обзор исследований по пылевой плазме. Акцент сделан на месте данной работы среди других исследований по тематике. Освещены работы других авторов, посвящённых исследованиям нелинейных возмущений и эффектов, вызванных присутствием заряженных пылевых частиц в ионосферной плазме в области высот 80 – 120 км.

В разделе 1.1 описаны источники пылевых частиц в ионосфере. Кратко изложена теория образования серебристых облаков и полярных мезосферных радиоотражений, представляющих собой пылевые структуры в запылённой ионосферной плазме. Описаны другие источники пылевых частиц в ионосфере на высотах 80 – 120 км (метеорные потоки, порождающие первичные и вторичные пылевые частицы метеорного происхождения). В разделе 1.2 введено понятие пылевой (комплексной) плазмы. Приведены некоторые типы волновых процессов, протекающих в лабораторной пылевой плазме. В разделе 1.3 описаны волновые процессы, протекающие в ионосферной плазме: приведены характерные законы дисперсии для электромагнитных волн, ленгмюровских волн, ионных плазменных колебаний, ионно–звуковых волн. Показано основное отличие запылённой ионосферной плазмы от плазмы, не содержащей заряженных пылевых частиц. Показано, что в результате сильной амбиполярной диффузии электронов и ионов в ионосферной плазме затруднено распространение и существование электростатических колебаний, связанных с возмущениями электронной и ионной концентраций [СЗ]. Ситуация кардинально меняется, если в ионосферной плазме содержатся массивные заряженные пылевые частицы. В этом случае характерные временные масштабы, связанные с пылевыми частицами, становятся много больше характерного времени амбиполярной диффузии. Например, для параметров взятых на высоте 90 км: концентрации электронов $n_e \approx 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, концентрации заряженных пылевых частиц $n_d \approx 100 \text{ см}^{-3}$ и их характерному размеру $a \sim 10 \text{ нм}$, концентрации нейтралов $n_n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$, температуры $T \approx 150 \text{ К}$ значение для времени диффузии заряженных пылевых частиц $t_{d,a} \sim 1 \text{ с}$, а для амбиполярной диффузии электронов и ионов $t_{d,i-e} \sim 10^{-3} \text{ с}$. При таком соотношении характерных времён оказывается возможным существование пылевых звуковых волн. В разделе 1.4 приведено описание наблюдений радишумов во время интенсивных метеорных потоков в 1999, 2000, 2001, 2003 годах. В

ходе этих наблюдений на несущей электромагнитной волне с длиной волны $\lambda \approx 2$ м, регистрировались флуктуации радиошумов. Оказалось, что во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды на фоне флуктуаций радиошумов наблюдаются устойчивые «пылевые» линии в диапазоне частот 20 – 60 Гц. Указанные частоты являются типичными для пылевой звуковой моды. Таким образом, появление флуктуаций радиошумов можно связать с наличием пылевых частиц, образованных из пересыщенных паров веществ, попадающих в ионосферу в результате абляции метеорного вещества [С4].

Вторая глава посвящена рассмотрению линейных и нелинейных волн в ионосферной плазме, содержащей заряженные пылевые частицы и физических процессов, сопровождающих их распространение.

В разделе 2.1 описаны процессы зарядки пылевых частиц в ионосферной плазме и приведена система уравнений, пригодная для описания волновых движений в столкновительной запылённой плазме нижней ионосферы. Отмечено, что полный ток на пылевую частицу $I(q_d) = I_e(q_d) + I_i(q_d) + I_{ph}(q_d)$ определяется суммой электронного $I_e(q_d)$ и ионного $I_i(q_d)$ токов, а также фототока $I_{ph}(q_d)$ (q_d – электрический заряд пылевой частицы). Причём, фототок может возникать только в дневное время под действием солнечного излучения. Однако фотоэффекту подвержены не все пылевые частицы, что обусловлено их составом. На высотах 70 – 130 км спектр солнечного излучения резко обрывается на длинах волн, около 170 нм, что соответствует энергии 7,3 эВ. Если, при этом, вещество, составляющее пылевую частицу, имеет работу выхода большую 7,3 эВ, то фотоэффекта не происходит. Например, работа выхода чистого льда составляет около 8,9 эВ. Таким образом, пылевая частица состоящая из чистого льда не подвержена фотоэффекту ни в дневное ни, тем более, в ночное время. Частицы же, обладающие примесями щелочноземельных металлов (работа выхода для большинства щелочноземельных металлов не превосходит 7,3 эВ) могут быть подвержены фотоэффекту. Для частиц метеорного происхождения работа выхода составляющего их вещества также не превосходит 7,3 эВ. При этом, присутствие фотоэффекта при зарядке пылевых частиц соответствует дневным условиям, а его отсутствие – ночным. Действие фотоэффекта, как правило, приводит к положительному заряду пылевых частиц.

Исходными для описания столкновительной запылённой плазмы нижней ионосферы являются гидродинамические уравнения, модифицированные на случай присутствия в плазме заряженных пылевых частиц. Отметим, что в плазме нижней ионосферы имеет место сильная амбиполярная диффузия электронов и ионов. В результате этого можно считать, что электроны и ионы находятся в диффузионном равновесии при распространении пылевых звуковых волн, что подразумевает однородные

изотропные распределения электронов и ионов на характерных пространственно-временных масштабах данной задачи.

В разделе 2.2 проводится развитие линейной теории пылевых звуковых волн. Учёт линейных слагаемых в разложении температуры электронов (ионов) $T_{e(i)}$, концентрации электронов (ионов, пылевых частиц) $n_{e(i,d)}$, заряда пылевых частиц q_d по степеням электрического поля \mathbf{E} позволяет получить систему уравнений, описывающую пылевые звуковые возмущения:

$$0 = -T_{e0} \nabla n_{e1} - n_{e0} \nabla T_{e1} + en_{e0} \mathbf{E}, \quad (1)$$

$$0 = -T_{i0} \nabla n_{i1} - n_{i0} \nabla T_{i1} - en_{i0} \mathbf{E}, \quad (2)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial T_{e1}}{\partial t} - \frac{\chi_e}{2} \Delta T_{e1} + \overline{v_{ei}} (T_{e1} - T_{i1}) - \frac{T_{e0}}{n_{e0}} \frac{\partial n_{e1}}{\partial t} + = 0, \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial T_{i1}}{\partial t} - \frac{\chi_i}{2} \Delta T_{i1} + \overline{v_{ei}} (T_{i1} - T_{e1}) - \frac{T_{i0}}{n_{i0}} \frac{\partial n_{i1}}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

где индекс «0» – соответствует невозмущённым величинам, а индекс «1» – величинам, линейным по \mathbf{E} ; $\overline{v_{ei}} = 3(m_e/m_i)v_{ei}$ – эффективная частота столкновений электронов с ионами, характеризующая скорость изотермолизации электронов и ионов; $m_{e(i)}$ – масса электрона (иона); $\chi_e = 3.16T_e/(m_e v_e)$, $\chi_i = 3.9T_i/(m_i v_i)$ – электронный и ионный коэффициенты температуропроводности соответственно, $v_{e(i)}$ – частота столкновений электронов (ионов) со всеми компонентами запылённой ионосферной плазмы, $\eta_{e0} = 0,73 n_{e0} T_{e0}/v_{e0}$, $\eta_{i0} = 0,96 n_{i0} T_{i0}/v_{i0}$ – невозмущённые коэффициенты вязкости.

В случае сильностолкновительной плазмы ($\overline{v_{ei}} \gg \omega_s, \omega_{\chi_i}, \omega_{\chi_e}$, где $\omega_{\chi_e} = \chi_e K^2/2$, $\omega_{\chi_i} = \chi_i K^2/2$, ω_s и K – частота и модуль волнового вектора низкочастотного [пылевого звукового] возмущения), что соответствует условиям нижней ионосферы, вариации для электронной и ионной концентраций имеют вид:

$$\frac{n_{e1}}{n_{e0}} = \frac{e\varphi}{T_{e0}}, \quad \frac{n_{i1}}{n_{i0}} = -\frac{e\varphi}{T_{i0}}, \quad (5)$$

где потенциал электростатического поля плазмы φ определяется из соотношения $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$. Таким образом, можно считать, что электроны и ионы удовлетворяют распределениям Больцмана в условиях диффузионного равновесия в сильностолкновительной ионосферной плазме. При этом закон дисперсии пылевых звуковых волн $\omega_s(K)$ имеет вид:

$$\omega_s(K) = \sqrt{\frac{\omega_d^2}{a} - \left(\frac{v_{dn}}{2}\right)^2} - i\frac{v_{dn}}{2}, \quad (6)$$

где в случае $q_d > 0$

$$a = 1 + \frac{1}{K^2 \lambda_{de}^2} \left(1 + \frac{1 - \frac{1-z}{2} \frac{2\omega_s}{3\omega_s + i\omega_\chi} \frac{\overline{iv_e}}{\omega_s + iv_{ch}}}{1 + \frac{2\omega_s}{3\omega_s + i\omega_\chi}} \right), \quad (7)$$

а в случае $q_d < 0$

$$a = 1 + \frac{1}{K^2 \lambda_{de}^2} \left(1 + \frac{1 + \tau}{\tau} \frac{\overline{iv_e}}{\omega_s + iv_{ch}} \right) + \frac{1}{K^2 \lambda_{di}^2}, \quad (8)$$

$\omega_d = \sqrt{4\pi n_d q_d^2 / m_d}$ – пылевая плазменная частоты, m_d – масса пылевой частицы, n_d – концентрация пылевых частиц, $\lambda_{de(i)} = \sqrt{T_{e(i)} / 4\pi n_{e(i)} e^2}$ – электронный (ионный) радиус Дебая, v_{ch} – характерная частота зарядки, $\overline{v_e}$ – частота столкновений электронов с пылевыми частицам, $z = -eq_{d0} / aT_{eo}$, $\tau = T_{e0} / T_{i0}$.

Из выражения (6) видно, что затухание пылевых звуковых волн обусловлено частотой столкновений пылевых частиц с нейтральной компонентой ионосферы. Для широкого диапазона параметров нижней запылённой ионосферы: температуры нейтралов $T_n \approx 130 \div 155$ К, их концентрации $n_n \approx 2,4 \cdot 10^{24}$ см⁻³, характерного размера пылевых частиц $a \sim 10 \div 10^3$ нм, концентрации пылевых частиц $n_d \approx 10 \div 10^3$ см⁻³ характерное значение $v_{dn} \sim 0,01 \div 0,1$ с⁻¹.

В разделе 2.3 рассмотрены нелинейные пылевые звуковые возмущения на примере пылевых звуковых солитонов в условиях серебрястых облаков и полярных мезосферных радиоотражений. Обнаружено их уникальное свойство в запылённой ионосферной плазме, а именно, зависимость вида возмущения (уменьшение или увеличение концентрации электронов в пылевом звуковом солитоне) от знака заряда.

Для описания пылевых звуковых солитонов используется система уравнений, включающая в себя гидродинамические уравнения (уравнение непрерывности и уравнение, описывающее закон сохранения количества движения) для пылевых частиц, распределения Больцмана для электронов и ионов, уравнение Пуассона для электростатического потенциала, а также стационарное уравнение в рамках зондовой модели, позволяющее определить зависимость зарядов пылевых частиц от

параметров плазмы. При анализе этой системы уравнений используется стандартный метод сагдеевского потенциала.

На основе указанной системы уравнений получены численные решения в виде пылевых звуковых солитонов произвольной амплитуды, а также исследована зависимость знака заряда пылевых частиц от знака амплитуды электростатического потенциала в пылевых звуковых солитонах. На рис. 1 и 2 приведены профили зависимости амплитуды солитонов φ_0 от значения числа Маха M (определяемого как отношение скорости солитона к величине $\sqrt{T_i/m_d}$) для характерных параметров запыленной ионосферы [C5] $T_e = T_i = 135 \div 155$ К, $n_{d0} \approx 100 \div 1150$ см⁻³, $n_{e0} \approx 10^2 \div 10^5$ см⁻³. Анализ проводился следующим образом. Для различных параметров вычислялись размеры и заряды пылевых частиц на основе модели, учитывающей конденсацию паров воды. Определялась зависимость размера пылевых частиц от их концентрации.

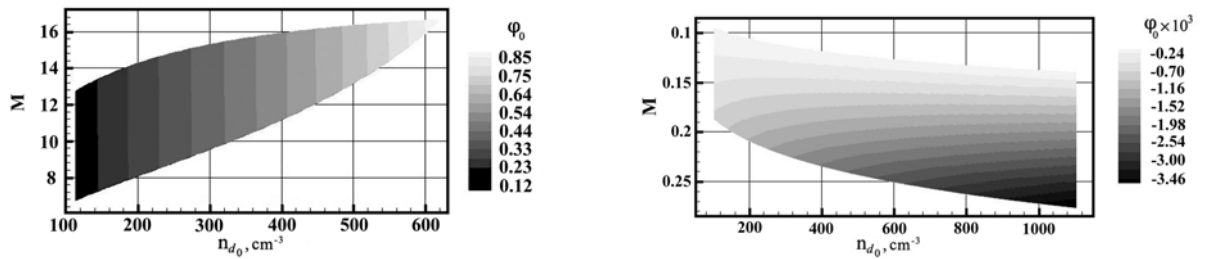


Рис. 1. Профили амплитуд солитонов φ_0 на плоскости (M, n_{d0}) в случае положительных зарядов пылевых частиц для параметров $T_e = T_i = 141,1$ К, $n_{e0} \approx 3 \cdot 10^4$ см⁻³. **Рис. 2.** Профили амплитуд солитонов φ_0 на плоскости (M, n_{d0}) в случае отрицательных зарядов пылевых частиц для параметров $T_e = T_i = 141,1$ К, $n_{e0} \approx 3 \cdot 10^4$ см⁻³.

Кроме того, получено аналитическое выражение для пылевых звуковых солитонов в случае малых амплитуд:

$$\varphi = \frac{3M^2 [(1 + \tau + Z_{d0}d)M^2 - Z_{d0}^2d]}{(1 - \tau^2 + Z_{d0}d)M^4 - 3Z_{d0}^3d} \operatorname{ch} \left(\frac{\xi}{2} \left\{ 1 + \tau + Z_{d0}d - \frac{Z_{d0}^2d}{M^2} \right\}^{1/2} \right). \quad (9)$$

Таким образом, показано, что в случае положительного заряда пылевых частиц (когда в их состав входят примеси щелочноземельных металлов) в пылевых звуковых солитонах наблюдается увеличение (уменьшение) концентрации электронов (ионов). В случае отрицательного заряда пылевых частиц (пылевые частицы состоят их чистого льда) ситуация противоположная: наблюдается уменьшение (увеличение) концентрации электронов (ионов). Наблюдения пылевых звуковых солитонов в пылевой мезосфере могут оказаться полезными с точки зрения диагностики плазмы запыленной ионосферы,

серебристых облаков и полярных мезосферных радиоотражений, а также определения веществ и материалов, составляющих пылевые частицы.

Третья глава посвящена разработке теории возбуждения пылевых звуковых возмущений в запылённой ионосферной плазме в результате развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн. Показано, что в результате модуляционной неустойчивости электромагнитных волн оказывается возможным возбуждение пылевых звуковых возмущений на высотах 80 – 120 км. Определены инкременты, условия развития и пороги этого процесса. Приведено объяснение изменений в наблюдаемых спектрах радишумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков.

В разделе 3.1 выписаны основные уравнения для модуляционной неустойчивости электромагнитных волн в запылённой ионосферной плазме. В условиях диффузионного равновесия электронов и ионов система, описывающая этот процесс, имеет вид:

$$en_{e0}\nabla\varphi - T_{e0}\nabla n_{e1} - n_{e0}\nabla T_{e1} - \frac{n_{e0}e^2}{2m_e\omega_0^2} \cdot \nabla|\mathbf{E}|^2 = 0, \quad (10)$$

$$en_{i0}\nabla\varphi + \kappa T_{i0}\nabla n_{i1} + \kappa n_{i0}\nabla T_{i1} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 n_{d1}}{\partial t^2} + v_{dn} \frac{\partial n_{d1}}{\partial t} = \frac{n_{d0}q_{d0}\Delta\varphi}{m_d}, \quad (12)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial T_{e1}}{\partial t} - \frac{\chi_e}{2} \Delta T_{e1} + \overline{v_{ei}}(T_{e1} - T_{i1}) - \frac{T_{e0}}{n_{e0}} \frac{\partial n_{e0}}{\partial t} = \frac{2v_e e^2 |\mathbf{E}|^2}{m_e \omega_0^2}, \quad (13)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial T_{i1}}{\partial t} - \frac{\chi_i}{2} \Delta T_{i1} + \overline{v_{ei}}(T_{i1} - T_{e1}) - \frac{T_{i0}}{n_{i0}} \frac{\partial n_{i1}}{\partial t} = 0, \quad (14)$$

$$\varepsilon_{\pm} \mathbf{E}_{\pm} - \frac{c^2}{\omega_{\pm}^2} \mathbf{k}_{\pm} \times (\mathbf{k}_{\pm} \times \mathbf{E}_{\pm}) = \frac{n_{e1}}{n_{e0}} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{\pm}^2} \mathbf{E}_{0\pm}. \quad (15)$$

Здесь φ – потенциал низкочастотного возмущения; \mathbf{E} – электрическое поле электромагнитной волны накачки; κ – показатель адиабаты, в случае изотермического процесса $\kappa = 1$, в случае адиабатического процесса $\kappa = 3$; $\omega_{\pm} = \Omega \pm \omega_0$ и $\mathbf{k}_{\pm} = \mathbf{K} \pm \mathbf{k}_0$; ω_0 , \mathbf{k}_0 – частота и волновой вектор, соответствующие волне накачки; Ω , \mathbf{K} – частота и волновой вектор модуляционного возмущения; $\omega_{pe}^2 = 4\pi n_{e0} e^2 / m_e$ – электронная ленгмюровская частота; $\varepsilon_{\pm} = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega_{\pm}^2$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость ионосферной плазмы; $\mathbf{E}_{+} = \mathbf{E}$, $\mathbf{E}_{-} = \mathbf{E}^*$, $\mathbf{E}_{0+} = \mathbf{E}_0$, $\mathbf{E}_{0-} = \mathbf{E}_0^*$. В уравнениях (10) – (15) одновременно учтены как процессы зарядки пылевых частиц, так и динамика пылевых частиц.

В разделе 3.2 проведён анализ модуляционной неустойчивости в условиях действия фотоэффекта (дневное время) когда величина заряда пылевых частиц положительна и

достаточна велика. Роль ионов пренебрежимо мала, вследствие их малой концентрации или полного отсутствия. В этих условиях для типичных параметров запылённой нижней ионосферы: $n_{d0} \approx 100 \text{ см}^{-3}$, $T_{e0} \approx 155 \text{ К}$, $a \approx 10^2 \text{ нм}$, плотности нейтрального газа $\rho_0 = 1.23 \cdot 10^{-8} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, потока солнечного излучения, аппроксимированного посредством спектров излучения [С6], справедливыми оказываются соотношения $v_e, v_{ch} \gg \Omega, \omega_{\chi_e} \gg \bar{v}_{ei} \gg v_{dn}, C_S K$, где $C_S^2 = n_{d0} q_d^2 T_{e0} / n_{e0} e^2 m_d$. При этом возможна реализация двух случаев:

$$\Omega \gg \omega_{\chi_e} \gg C_S K, \quad (16)$$

$$\omega_{\chi_e} \gg \Omega \gg C_S K. \quad (17)$$

В случае $\omega_{\chi_e} \gg C_S K \gg \Omega$ волна быстро затухает, и модуляционная неустойчивость не успевает развиваться.

В случае выполнения соотношения (16) из системы уравнений (10)–(15) следует, что инкремент развития модуляционной неустойчивости имеет вид:

$$\gamma_{\text{mod}} = \left(\frac{1}{3} v_e C_S^2 K^2 \frac{\omega_{pe}^4}{\omega_0^2} \frac{K^2 c^2}{\omega_0^2 v_e^2 + K^4 c^4} \right)^{1/3} \left(\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \right)^{1/3}. \quad (18)$$

Режим развития модуляционной неустойчивости с инкрементом (18) реализуется при выполнении следующих условий:

$$\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \gg \max \left(\frac{3 C_S K}{8 v_e} \frac{\omega_0^2 v_e^2 + K^4 c^4}{K^2 c^2} \frac{\omega_0^2}{\omega_{pe}^4}, \frac{3 (\omega_{\chi_e})^3}{8 v_e C_S^2 K^2} \frac{\omega_0^2 v_e^2 + K^4 c^4}{K^2 c^2} \frac{\omega_0^2}{\omega_{pe}^4} \right), \quad (19)$$

При фиксированной амплитуде волны накачки инкремент (30) лежит в пределах:

$$\frac{3}{8} v_e \frac{\omega_0^4}{\omega_{pe}^4} \frac{C_S^2}{c^2} \left(\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \right)^{-1} \ll \gamma_{\text{mod}} \ll \frac{8}{3} v_e \frac{\omega_{pe}^4}{\omega_0^4} \left(\frac{C_S K c K}{\omega_{\chi_e} v_e} \right)^2 \frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}}. \quad (20)$$

В случае, когда реализуется соотношение (17) инкремент развития модуляционной неустойчивости имеет вид:

$$\gamma_{\text{mod}} = 2\sqrt{2} \left(v_e \frac{C_S^2 K^2}{\omega_{\chi_e}} \right)^{1/2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0} \frac{Kc}{\sqrt{\omega_0^2 v_e^2 + K^4 c^4}} \left(\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \right)^{1/2}. \quad (21)$$

При фиксированной амплитуде волны накачки инкремент (21) лежит в пределах:

$$8v_e \left(\frac{C_S K c K}{\omega_{\chi_e} \omega_0} \right)^2 \frac{\omega_{pe}^4}{v_e^2 \omega_0^2 + K^4 c^4} \frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \ll \gamma_{\text{mod}} \ll \left(8v_e \frac{C_S^2 K^2}{\omega_{\chi_e}} \right)^{3/4} \frac{\omega_{pe}^3}{\omega_0^{5/2} v_e} \sqrt{\frac{C_S}{c}} \left(\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \right)^{3/4}. \quad (22)$$

В разделе 3.3 анализ модуляционной неустойчивости проводится для ночных условий (или в случае частиц с работой выхода большей 7.3 эВ), когда фотоэффект отсутствует. При этом пылевые частицы заряжены отрицательно, а характерные

параметры для высот 80 – 120 км следующие: $n_{d0} \approx 100 \text{ см}^{-3}$, $n_{e0} \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, $T_{e0} \approx 155 \text{ К}$, $a \approx 10^2 \text{ нм}$, $\rho_0 = 1.23 \cdot 10^{-8} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Справедливыми оказываются следующие соотношения $v_e \gg \Omega$, v_{ch} , ω_χ , $\bar{v}_e \gg v_{dn}$, $\Omega \omega_\chi \gg C_S^2 K^2$.

При выполнении соотношения $\Omega \ll \omega_\chi$ не происходит развитие модуляционной неустойчивости. Интерес представляют случаи $\Omega \gg \omega_\chi$. При этом инкремент модуляционной неустойчивости имеет вид:

$$\gamma_{\text{mod}} \approx \frac{\Omega_0^3}{k^2 \left(C_a^2 + \frac{\gamma+1}{3} C_T^2 \right)}, \quad (23)$$

где $C_a^2 = C_T^2 = T_{e0}/m_d$, $\Omega_0 = (8v_{\text{eff}}\omega_{pe}^2 V_0^2/3c^2)^{1/3}$ – характерная частота, $V_0^2 = e^2 |\mathbf{E}_0|^2 / (2m_e m_d \omega_0^2)$, эффективная частота столкновений при этом имеет вид:

$$\frac{v_{\text{eff}}}{v_e} = \frac{\left(\kappa\tau + \frac{-i\Omega}{-3i\Omega + \omega_\chi} (\kappa+1)\tau \right) \left(\frac{\alpha v_{ed}}{-i\Omega + v_{ch}} + \frac{C_S^2 K^2}{\Omega^2 + iv_{dn}\Omega} \right)}{1 + \mu + \frac{v_{ed}}{-i\Omega + v_{ch}} + \frac{i\Omega\tau}{-3i\Omega + \omega_\chi} \left(\frac{\alpha v_{ed}}{-i\Omega + v_{ch}} + \frac{C_S^2 K^2}{\Omega^2 + iv_{dn}\Omega} \right) - \frac{\tau C_S^2 K^2}{\Omega^2 + iv_{dn}\Omega}}. \quad (24)$$

Режим развития модуляционной неустойчивости с инкрементом (35) реализуется при:

$$\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \gg \frac{3}{4} \frac{\omega_\chi}{v_{\text{eff}}} \frac{\omega_0^2 v_e^2 + K^4 c^4}{\omega_{pe}^4} \frac{\omega_0^2}{K^2 c^2} \frac{C_a^2 + \frac{\gamma+1}{3} C_T^2}{V_{Sd}^2}, \quad (25)$$

где $V_{Sd}^2 = T_{e0}/m_d$ имеет характерный порядок величины скорости распространения пылевой звуковой волны.

Максимальное значение инкремента модуляционной неустойчивости (23) при фиксированной амплитуде волны накачки имеет вид:

$$\gamma_{\text{mod}}^{\text{max}} \approx \frac{4}{3} v_{\text{eff}} \left(\frac{4v_{\text{eff}} c^2 K^2}{3\omega_\chi} \right)^{1/2} \left(\frac{\omega_{pe}^4}{\omega_0^2} \frac{V_{Sd}^2}{C_a^2 + \frac{\gamma+1}{3} C_T^2} \right)^{3/2} \frac{1}{\omega_0^2 v_e^2} \left(\frac{|\mathbf{E}_0|^2}{4\pi n_{e0} T_{e0}} \right)^{3/2}. \quad (26)$$

Порог модуляционной неустойчивости электромагнитных волн в запылённой ионосферной плазме определяется линейным декрементом затухания пылевых звуковых волн $v_{dn}/2$ ($v_{dn} \sim 0,01 \div 0,1 \text{ с}^{-1}$).

В разделе 3.4 приводится объяснение модификации наблюдаемых спектров радишумов ионосферной плазмы во время метеорных потоков Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды в 1999, 2000, 2001, 2003 годах. Оказывается, что при

распространении электромагнитной волны в запылённой нижней ионосфере Земли в результате модуляционного взаимодействия возбуждаются электростатические низкочастотные колебания с характерными частотами, близкими к частотам пылевых звуковых волн, что может приводить к модуляции электромагнитных волн. Именно низкочастотная составляющая промодулированной волны на фоне ионосферных шумов и фиксируется у поверхности Земли [С2]. Полученные теоретические результаты (в частности, пороговые значения модуляционной неустойчивости) находятся в хорошем соответствии с наблюдаемыми данными шумов ионосферной плазмы во время метеорных потоков.

Четвёртая глава посвящена исследованию возможности генерации пылевыми звуковыми возмущениями, возбуждаемыми во время интенсивных метеорных потоков, колебаний акустического типа.

В разделе 4.1 разрабатывается теория генерации инфразвуковых волн пылевыми звуковыми возмущениями. Показано, что облако пылевых частиц (представляющее собой запылённую ионосферную плазму) является источником излучения звуковых волн с максимальной амплитудой колебаний звукового поля порядка фонового атмосферного давления. Установлено, что у поверхности Земли максимальная амплитуда инфразвуковых колебаний, вызванных пылевыми звуковыми возмущениями в запылённой плазме нижней ионосферы, составляет величину порядка:

$$P_{n1,\max}(r,t) \approx \frac{\rho_0 V_1}{4\pi H} \left(\frac{\delta K}{K} \right) \left(\frac{\varphi_0 n_{d0} q_{d0}}{P_{no}} \right)^2 \frac{\exp\left(\frac{m_n g H}{2T_{n0}}\right)}{\omega_{s0}^{-2}(K) + \nu_{dn}^{-2}}, \quad (27)$$

здесь δK – волновое число инфразвуковой волны, H – высота локализации пылевого облака в ионосферной плазме, V_1 – его объём.

Для характерных параметров запылённой нижней ионосферы: температуры нейтралов $T_{n0} \approx 130 \div 200$ К, их концентрации $n_n \approx 10^{12} \div 10^{15}$ см⁻³, характерного размера пылевых частиц $a \sim 1 \div 10^3$ нм, концентрации пылевых частиц $n_d \approx 10 \div 10^3$ см⁻³, концентрации электронов $n_e \approx 10^4 \div 10^5$ см⁻³, концентрации ионов $n_i \approx 10^4 \div 10^5$ см⁻³ $P_{n1,\max}$ может составлять несколько Паскалей. На рис. 3 представлены амплитудно-частотные зависимости, характеризующие распределение инфразвуковых колебаний у поверхности Земли от различных источников (большие и малые взрывы, волны Рэля при землетрясениях, магнитные бури, ураганы, смерчи, сверхзвуковая авиация, микробаромы и грозы; волны, ассоциируемые с горами и др.). Области 1 – 6 построены на основе данных, предоставленных Ю.С. Рыбновым. Кривая 7 характеризует инфразвуковые колебания, происхождение которых связано с существованием пылевых звуковых волн в

нижней ионосфере Земли во время метеорных потоков. Зависимость 7 определена при следующих параметрах: высота локализации пылевого облака $h \approx 90$ км, его характерный вертикальный размер порядка 1 км, его горизонтальный размер – 10 км, размер пылевых частиц, составляющих облако, $a \approx 25$ нм, их концентрация $n_d \approx 10^2$ см⁻³, концентрация электронов $n_e \approx 10^5$ см⁻³, температура нейтралов $T_{n0} \approx 140$ К. Видно, что для частот от нескольких десятых до нескольких десятков Гц генерация инфразвуковых колебаний пылевыми звуковыми возмущениями во время метеорных потоков Персеиды, Леониды, Геминиды, Ориониды может быть наиболее важным источником инфразвука у поверхности Земли.

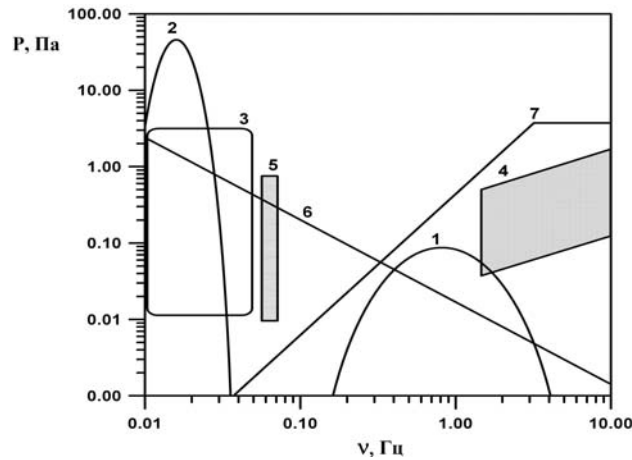


Рис. 3. Амплитудно-частотные зависимости, характеризующие распределение инфразвуковых колебаний у поверхности Земли от различных источников. Представлены: область инфразвуковых возмущений, порождаемых малыми взрывами (1); область инфразвуковых волн от больших взрывов (2); инфразвуковые колебания от волн Рэлея при землетрясениях, магнитных бурь, ураганов, смерчей, волн, ассоциируемых с горами (3); область волн, источником которых является сверхзвуковая авиация, грозы (4); микробаромы (5); область, ограничивающая зону существования локального турбулентного шума (6); область существования волн, связанных с пылевой звуковой модой во время метеорных потоков (7).

В разделе 4.2 установлена возможность возбуждения пылевыми звуковыми возмущениями акустико–гравитационных волн с характерным законом дисперсии $\omega^2 = k_{s,x}^2 N^2 / k_s^2$, где квадрат волнового вектора акустико–гравитационных волн имеет вид: $k_s^2 = k_{s,x}^2 + k_{s,z}^2 + 1/4H^2$, $N^2 = -\left[d\rho_0^{-1}/dz + (\gamma\rho_0 P_{n0})^{-1} (dP_{n0}/dz) \right] (dP_{n0}/dz)$. В областях атмосферы, где $N^2 < 0$, развивается конвективная неустойчивость, приводящая к раскату АГВ с инкрементом $\gamma_a \approx N$. Условие $N^2 < 0$ определяет область, где выполняется неравенство $(d \ln(\rho_0)/dz)/(d \ln(P_{n0})/dz) < 1/\gamma$. Для стандартной атмосферы это неравенство справедливо в области высот 110 – 120 км. На этих высотах в результате развития конвективной неустойчивости происходит формирование акустико–

гравитационных вихревых структур, наличие которых может приводить к усилению зелёного излучения ночного неба [С7] во время интенсивных метеорных потоков таких, как Персеиды, Ориониды, Леониды и Геминиды.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

1. Показана возможность существования пылевых звуковых волн в плазме запылённой ионосферы. Определены их законы дисперсии. Установлено, что к затуханию пылевых звуковых волн в запыленной ионосфере, в основном, приводят процессы столкновений пылевых частиц с другими компонентами запылённой ионосферной плазмы, главным образом, с нейтральными атомами и молекулами. Показано, что важным процессом, приводящим к возбуждению пылевых звуковых возмущений в плазме запылённой ионосферы, является модуляционная неустойчивость электромагнитных волн, связанная с джоулевым нагревом, пондеромоторной силой, эффектами зарядки и динамики пылевых частиц. Определены инкременты, условия развития и пороги этого процесса.

2. Показано, что возникновение наблюдаемых в спектре радиощумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Геминиды, Ориониды низкочастотных спектральных линий с характерными частотами, составляющими несколько десятков Герц, обусловлено модуляционным возбуждением электромагнитными волнами пылевых звуковых возмущений на высотах 80 – 120 км. Тем самым, предложен физический механизм возникновения указанных линий в спектре радиощумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков и впервые продемонстрирована возможность существования пылевой звуковой моды в природе.

3. Показано, что возбуждение пылевых звуковых возмущений во время интенсивных метеорных потоков приводит к генерации инфразвуковых колебаний, которые в диапазоне частот от нескольких десятых до нескольких десятков Герц у поверхности Земли могут превалировать над инфразвуковыми колебаниями от других источников. Возбуждение пылевых звуковых возмущений в ионосферной плазме во время интенсивных метеорных потоков может приводить также к формированию на высотах 110 – 120 км акустико–гравитационных вихревых структур. В результате, во время интенсивных метеорных потоков оказывается возможным усиление относительной интенсивности зелёного излучения ночного неба.

4. Показана возможность существования пылевых звуковых солитонов в плазме запылённой ионосферы. Определены их форма и свойства в зависимости от параметров плазмы и знаков зарядов пылевых частиц. Установлено, что знаки зарядов пылевых частиц однозначно определяют характер возмущений («горб» или «ямка» плотности) электронов и ионов в пылевых звуковых солитонах. Указанное свойство солитонов может

использоваться при диагностике параметров пылевых частиц в плазме запыленной ионосферы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

[1] Kopnin S.I., Kosarev I.N., Popel S.I., and Yu M.Y. Localized Structures of Nanosize Charged Dust Grains in Earth's Middle Atmosphere // *Planetary and Space Science*. – 2004. – V. 52. – P. 1187–1194.

[2] Копнин С.И., Косарев И.Н., Попель С.И., Ю Минг Пылевые звуковые солитоны в плазме запыленной ионосферы Земли // *Физика плазмы*. – 2005. – Т. 31, № 2. – С. 224–232.

[3] Popel S.I., Kopnin S.I., Kosarev I.N. and Yu M.Y. Solitons in Earth's Dusty Mesosphere // *Advances in Space Research*. – 2006. – No. 2. – P. 414–419.

[4] 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.

[5] Копнин С.И., Попель С.И. Генерация инфразвуковых колебаний низкочастотными пылевыми звуковыми возмущениями в нижней ионосфере Земли // *Физика плазмы*. – 2008 – Т. 34, № 6. – С. 517–526.

[6] Kopnin S.I., Popel S.I. Dust Acoustic Mode Manifestations in Earth's Dusty Ionosphere // *New Vistas in Dusty Plasmas* / Edited by L. Boufendi, M. Mikkian, P.K. Shukla. – Melville, New York: American Institute of Physics, 2005. – P. 161–164.

[7] Копнин С.И., Косарев И.Н., Попель С.И. Пылевые нелинейные структуры в мезосфере Земли – В сб.: *Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли* / Под ред.: Ю.И. Зецера. – М.: ИДГ РАН, 2003. – С. 107–115.

[8] Копнин С.И., Попель С.И. Нано- и микромасштабные частицы в ионосфере Земли – В сб. *Нано- и микромасштабные частицы в геофизических процессах* / Под ред.: В.В. Адушкина и С.И. Попеля, М.: МФТИ, 2006. – С. 74–81.

[9] Копнин С.И., Попель С.И. Проявления пылевой звуковой моды в ионосфере – В сб. *Нано- и микромасштабные частицы в геофизических процессах* / Под ред.: В.В. Адушкина и С.И. Попеля, М.: МФТИ, 2006. – С. 104–115.

[10] Копнин С.И., Попель С.И. Формирование нано- и микромасштабных частиц в атмосфере во время метеорных потоков и генерация инфразвуковых колебаний – В сб. *Динамические процессы во взаимодействующих геосферах* / Под ред. С.Б. Турунтаева, М.: ИДГ РАН, 2006. – С. 420–427.

- [11] Kopnin S.I., Kosarev I.N. and Popel S.I. Nonlinear Perturbations in Dusty Mesosphere // 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St. Petersburg, 7-11 July 2003. European Conference Abstracts. – V. 27A, – P. 4.126.
- [12] Popel S.I., Kopnin S.I., Kosarev I.N. and Yu M.Y. Nonlinear Structures in Earth's Dusty Ionosphere // The International Conference MSS-04, Moscow, 2004. Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence. – P. 344–349.
- [13] Копнин С.И., Попель С.И. Пылевая звуковая мода в ионосфере Земли. – Тезисы докладов XXXIII Звенигородской конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, Россия. – М., 2006 – С. 174.
- [14] Копнин С.И., Попель С.И. Модуляционная неустойчивость электромагнитной волны в плазме запылённой ионосферы. – Тезисы докладов XXXIII Звенигородской конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, Россия. – М., 2006. – С. 240.
- [15] Kopnin S.I., Popel S.I. Dust Acoustic Mode in Earth's Ionosphere // General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2006. – Geophysical Research Abstracts. – V. 8, – P. 00504.
- [16] Копнин С.И., Попель С.И. Пылевая звуковая мода в геофизических процессах // VII Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике, Звенигород, Россия. – Сборник научных трудов, М., 2006. – С. 161–162.
- [17] Копнин С.И., Попель С.И. Возбуждение инфразвуковых колебаний в пылевой плазме ионосферы. – Тезисы докладов XXXIV Звенигородской конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, Россия. – М., 2006. – С. 192.
- [18] Kopnin S.I., Popel S.I. Excitation of Infrasonic Oscillations During Meteor Fluxes // General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2007. – Geophysical Research Abstracts. – V. 9, – P. 00629.
- [19] Копнин С.И. Наблюдаемые эффекты в запыленной плазме ионосферы, связанные с интенсивными метеорными потоками. – Сборник тезисов. Молодёжная научная конференция «Физика и прогресс», Санкт–Петербург, Россия. Санкт–Петербург, 2007. – С. 18.
- [20] Kopnin S.I., Popel S.I., and Yu M.Y. Phenomena Associated with Dusty Plasma Formation in the Ionosphere during Meteor Showers // General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2008. – Geophysical Research Abstracts. – V. 10, – P. 07346.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [C1] Клумов В.А., Морфилл Г.Е., Попель С.И. // ЖЭТФ. – 2005. – Т. 127, № 1. – С. 171.
- [C2] Мусатенко С.И., Мусатенко Ю.С., Курочка Е.В. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46. – С. 182.
- [C3] Lie-Svendsen O., Blix T.A., Hoppe U. and Thrane E. // Journal of Geophysical Research. – 2003. – V. 108, No. D8. – P. 8442.
- [C4] Kopnin S.I., Popel S.I. // New Vistas in Dusty Plasmas / Edited by L. Boufendi, M. Mikkian, P.K. Shukla. – Melville, New York: American Institute of Physics, 2005. – P. 161.
- [C5] Havnes O., Aslaksen T., Brattli A. // Physica Scripta. – 2001. – V. T89. – P. 133.
- [C6] Klumov V.A., Popel S.I., Bingham R. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. С. 524.
- [C7] Абурджания Г.Д., Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: КомКнига, 2006.