

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Трухачёва Фёдора Михайловича  
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛИТОНОВ АКУСТИЧЕСКОГО ТИПА С  
ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПЛАЗМЕ»

на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по  
специальности 1.3.9 – физика плазмы

Волны и неустойчивости играют важную роль в динамике плазмы. Исследования в данной области связаны с такими задачами как нагрев плазмы, ускорение заряженных частиц, космическая погода и др. Несмотря на давнюю историю и огромное количество публикаций по указанной проблеме, существует множество нерешенных проблем, связанных с физикой волн в плазме. Диссертация Трухачёва Ф.М. посвящена теоретическому исследованию нелинейных волн и солитонов в плазме. В частности, представлены исследования процессов взаимодействия заряженных частиц с ионно-, электронно- и пыле-акустическими солитонами в плазме без магнитного поля. Рассмотрено два случая – консервативный и диссипативный, а также проведен их сравнительный анализ. На основе полученных автором теоретических результатов

проведено описание экспериментов по исследованию пыле-акустических волн.

**Актуальность** работы не вызывает сомнений и следует из актуальности исследований плазменных коллективных процессов, что подтверждается огромным количеством научных статей по данной проблематике.

В работе представлены следующие результаты, определяющие ее **научную новизну**: Показано, что ионно-звуковые солитоны в модели неограниченной плазмы осуществляют сдвиг ионов плазменного фона на расстояние до 5 радиусов Дебая в направлении своего движения. Этим свойством нельзя пренебрегать для солитонов любой амплитуды (в том числе малой). Проведено обобщение результатов на электронно-акустические и пыле-акустические плазменные моды. Показано, что односторонний перенос заряженных частиц солитоном индуцирует плазменные токи, которые названы солитонными токами. Проведен детальный анализ солитонных токов. В частности показано, что их величина может быть существенной для случая группы последовательно движущихся солитонов, что часто наблюдается в плазме магнитосферы Земли. В рамках модели холодной плазмы рассчитаны возмущенные солитонами функции распределения по скоростям и по энергиям для заряженных частиц. Построены новые теоретические модели для оценки дебаевского радиуса в пылевой плазме, а также для анализа свойств пыле-акустических солитонов при учете самосогласованных флуктуаций заряда пылевых частиц. Рассчитана динамика заряженных частиц, взаимодействующих с диссипативными пыле-акустическими солитонами, проведены оценки величины тепловыделения, сопровождающие процесс взаимодействия. Открыт и проанализирован новый колебательный процесс, возникающий в пылевой плазме, населенной пыле-акустическими солитонами.

Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения и списка использованной литературы. Объем работы составляет 240 страниц, в том



числе 4 таблицы и 66 рисунков. Список литературных источников содержит 311 наименований.

**Во Введении** обосновывается актуальность работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Раздел содержит формулировки целей, задач и защищаемых положений.

**В первой главе** диссертации представлены основные методы теоретического анализа волн акустического типа в плазме. Основное внимание уделено методам нелинейной гидродинамики. Рассмотрены самосогласованные гидродинамические модели ионно-, электронно- и пыле-акустических волн. Рассмотрены случаи холодной и теплой плазмы. Для пыле-акустической моды детально исследована ситуация с флуктуирующим зарядом пылевых частиц, а также рассмотрен случай с ненулевой диссипацией. Рассмотрен нелинейный механизм переноса заряженных частиц гармоническими волнами в плазме, известный как дрейф Стокса. Описан новый метод расчета дебаевского радиуса в пылевой плазме.

**Во второй главе** детально исследовано свойство плазменных солитонов акустического типа, заключающееся в однонаправленном переносе заряженных частиц. С использованием КдВ уравнения найдена явная зависимость дистанции переноса вещества как функции амплитуды. Открыт новый механизм возбуждения электрических токов в плазме. Детально исследованы токи, индуцируемые солитонами акустического типа. В частности, показано, что такие токи имеют импульсный характер с ненулевой постоянной составляющей. Исследовано влияние плазменных солитонов акустического типа на функции распределения по скоростям и энергиям заряженных частиц. Показано, что возмущенные функции распределения по скоростям имеют форму, сходную с функциями распределения, характеризующими плазму, которая содержит пучки заряженных частиц.

**Третья глава** посвящена анализу микродинамических и термодинамических свойств диссипативных пыле-акустических солитонов. В частности, исследованы траектории и фазовые траектории заряженных пылевых частиц в окрестности солитонов. Определена роль диссипации в упорядочивании траекторий заряженных частиц. Построена модель для расчета величины тепловыделения, связанного с движением диссипативных пыле-акустических солитонов. Теоретически предсказан новый колебательный процесс, возбуждаемый диссипативными солитонами в пылевой плазме. Механизм колебательного процесса связан с электростатическим взаимодействием пылевых заряженных частиц с передним фронтом диссипативного пыле-акустического солитона. Предложена концепция упругого и неупругого рассеяния заряженных пылевых частиц передним фронтом пыле-акустических солитонов.

В **четвертой главе** представлены примеры использования теоретических результатов для интерпретации экспериментов. Описаны эксперименты по изучению эволюции нелинейных пыле-акустических волн и, в том числе, солитонов в пылевой плазме. Особое внимание уделено интерпретации экспериментов по исследованию криогенной пылевой плазмы, где приходится сталкиваться с дефицитом диагностических методик. С использованием разработанных теоретических моделей и методов получены оценки важных плазменных параметров, таких как дебаевский радиус, температура ионов и др.

**Научная значимость** работы заключается в развитии физики волн и самоорганизованных структур в плазме. Важно отметить, что в диссертации представлены как новые методы анализа нелинейных плазменных волн, так и новые явления и эффекты.

**Прикладная значимость** работы подтверждается результатами по интерпретации экспериментальных данных, представленными в работе. Стоит отметить новые методы плазменной диагностики, рекомендации к



пространственно-временному разрешению диагностического оборудования для регистрации плазменно-волновых явлений и др.

По материалам диссертации автором совместно с соавторами опубликовано более 40 статей в российских и международных научных журналах, 25 из которых легли в основу настоящей диссертационной работы, в том числе 23 из перечня ВАК. Результаты работы апробированы на 35 российских и международных конференциях.

Личный вклад Трухачёва Ф.М. подтверждается публикациями по теме диссертации и не вызывает сомнений. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты работы могут быть полезны исследователям, занимающимся проблемами коллективных процессов в плазме, анализом самоорганизованных структур, диагностикой плазмы. Можно выделить ряд научных организаций: ИКИ РАН, СПбГУ, ОИВТ РАН, ИОФ РАН, МФТИ, МГУ и др.

Диссертационная работа не свободна от недостатков. В частности, имеются следующие замечания:

1. Диссертационная работа называется «Взаимодействие солитонов акустического типа с заряженными частицами в плазме». Однако тема диссертационной работы раскрыта не полностью. Автор рассматривает ионно-звуковые солитоны, в основном, как классические (консервативные) солитоны (главы 1 и 2), а также пыле-акустические солитоны, распространяющиеся в пылевой плазме (главы 1, 3, 4). При этом фактически не описаны пылевые ионно-звуковые солитоны, являющиеся также солитонами акустического типа, для которых взаимодействие с заряженными (пылевыми) частицами весьма важно. Такие солитоны, как правило, не являются консервативными (см., например, S.I. Popel, A.P. Golub', T.V. Losseva, A.V. Ivlev, S.A. Khrapak, and G. Morfill, Weakly-Dissipative Dust-Ion-Acoustic Solitons, Physical Review E 67,

№.5 (2003) 056402). Далее, не отмечены гибридные солитоны, при описании которых важен учет динамики как ионов, так и пылевых частиц (см., например, T.V. Losseva, S.I. Popel, A.P. Golub', and P.K.Shukla, Evolution of Weakly-Dissipative Hybrid Dust Ion-Acoustic Solitons in Complex Plasmas, Physics of Plasmas **16**, No. 9 (2009) 093704). Объем диссертационной работы позволяет, по крайней мере, в обзоре представить основные исследования по теме диссертации. Кроме того, с одной стороны, автор описывает пылевую плазму при рассмотрении пыле-акустических временных масштабов, а с другой, почему-то не учитывает влияния заряженной пыли на распространение ионного звука.

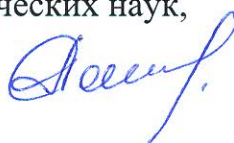
2. В главе 3 автор рассматривает диссипативные солитоны. Вообще говоря, солитон – это нелинейная волновая структура, которая, как правило, не должна менять свою форму. В результате воздействия диссипативных процессов форма нелинейной волновой структуры может измениться. В этой связи, для того чтобы трактовать имеющуюся волновую структуру как солитон, следует проверить выполнение свойств, присущих солитону, для этой волновой структуры. К ним, например, относится сохранение формы солитонов после их взаимодействия. Такая процедура проводится, например, в случае диссипативных пылевых ионно-звуковых солитонов и гибридных солитонов (см. ссылки на работы, представленные в замечании 1). Автор не проводит подобного исследования.
3. В диссертации практически не рассматриваются модели теплой плазмы, учитывающие давление заряженных частиц (исключением являются результаты, представленные в 3 главе). Существенный интерес представляло бы рассмотрение влияния ионного давления на явления переноса, обсуждаемые в работе.



Все перечисленные замечания не снижают общей значимости диссертационной работы. Рассмотренная диссертация является законченной научной работой, соответствующей всем критериям, установленным в п. 9 положения о порядке присуждения учёных степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 25.01.2024 г.), а ее автор Трухачёв Фёдор Михайлович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Официальный оппонент:

профессор, заведующий лабораторией  
плазменно-пылевых процессов в  
космических объектах ИКИ РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Попель Сергей Игоревич

Адрес: Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

<http://www.iki.rssi.ru/>

E-mail: [iki@cosmos.ru](mailto:iki@cosmos.ru)

Тел: +7(495) 333-52-12

Подпись С.И. Попеля заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН  
кандидат физико-математических  
наук



  
Садовский Андрей Михайлович