

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН
чл. корр. РАН А.А. Петрукович
«11» сентября 2019 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Диссертация «Нелинейные взаимодействия волн в магнитной гидродинамике вращающейся плазмы со свободной границей в поле силы тяжести» выполнена в отделе Физики планет Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Климачков Дмитрий Александрович работал в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2019 году Д.А. Климачков окончил очную аспирантуру Института космических исследований РАН по специальности «Теоретическая физика». Диплом 107704 0275303 выдан 27.09.2019.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2019 г. ИКИ РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Петросян АракелСаркисович, работает заведующим сектором 53.9 в ФГБУН ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Нелинейные взаимодействия волн в магнитной гидродинамике вращающейся плазмы со свободной границей в поле силы тяжести» принято следующее заключение:

Актуальность и направление исследования

Диссертационная работа Климачкова Дмитрия Александровича посвящена теоретическому исследованию крупномасштабных волновых процессов в магнитогидродинамических течениях вращающейся плазмы.

Вопрос о крупномасштабных волновых процессах является важным в связи с необходимостью понимания динамики различных астрофизических объектов и с необходимостью исследования общих свойств астрофизической плазмы в таких объектах, например, течений магнитоактивных атмосфер экзопланет, захваченных приливами родительской звезды, атмосфер нейтронных звезд, течений плазмы на Солнце и в звездах. Полная система уравнений, описывающих процессы в таких объектах, является сложной как для теоретического анализа, так и для численного моделирования. Поэтому требуется развитие упрощенной теории крупномасштабных магнитогидродинамических течений плазмы при наличии вращения.

Теория мелкой воды в магнитной гидродинамике является основной для исследования крупномасштабных волновых процессов во вращающейся плазме. Однако известные уравнения не описывают важную ситуацию тонкого слоя плазмы со свободной границей при наличии внешнего вертикального магнитного поля. Наличие вертикального магнитного поля делает принципиальным учет вертикальной компоненты магнитного поля в приближении мелкой воды. В диссертации соискателем развита теория, позволяющая описывать магнитогидродинамические течения мелкой воды при наличии вращения и внешнего вертикального магнитного поля. Такая теория также включает случаи течений плазмы в горизонтальном магнитном поле. Развита теория обобщена на случай сжимаемых течений. На основе полученных уравнений исследованы линейные волны Пуанкаре и Россби и их нелинейные взаимодействия при обеих конфигурациях магнитного поля.

В первой главе работы развита теория магнитогидродинамических течений в приближении мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле с учетом вращения, исследуются волны магнито-Пуанкаре и магнитострофические волны и их нелинейные взаимодействия. Для описания тонкого слоя вращающейся плазмы получена система магнитогидродинамических уравнений в приближении мелкой воды при наличии внешнего вертикального магнитного поля. Получены дисперсионные соотношения для волн магнито-Пуанкаре и магнитострофических волн как во внешнем вертикальном магнитном поле, так и в горизонтальном магнитном поле. Показано наличие трехволновых взаимодействий для рассматриваемых волн в обеих конфигурациях магнитного поля. Методом многомасштабных разложений получены нелинейные уравнения на амплитуды взаимодействующих волн для каждого случая трехволновых взаимодействий. Исследованы распадные неустойчивости и явления параметрического усиления для каждого случая трехволновых взаимодействий.

Во второй главе получена система магнитогидродинамических уравнений в приближении мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле на бета плоскости для изучения волн магнито-Россби и их нелинейных взаимодействий. В главе найдены дисперсионные соотношения для волн Россби во внешнем вертикальном магнитном поле и в горизонтальном магнитном поле. Показано наличие трехволновых взаимодействий волн Россби для обеих конфигураций магнитного поля. Для исследования нелинейных взаимодействий асимптотическим методом многих масштабов получены нелинейные амплитудные уравнения. Исследованы параметрические неустойчивости для взаимодействующих волн Россби для обеих конфигураций магнитного поля.

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию эффектов крупномасштабной сжимаемости на волновую динамику крупномасштабных магнитогидродинамических течений. Для этого получена система уравнений магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды с учетом крупномасштабной сжимаемости. Показаны отличия в дисперсионных соотношениях для волн магнито-Пуанкаре, магнитоостровных волн и волн магнито-Россби в сравнении с несжимаемыми течениями. Показаны отличия в коэффициентах трехволновых взаимодействий и в инкрементах параметрических неустойчивостей для исследуемых волн во внешнем вертикальном магнитном поле и в горизонтальном магнитном поле в сравнении с несжимаемыми течениями. Для системы уравнений в отсутствие вращения и внешнего вертикального магнитного поля найдены все сильнонелинейные непрерывные и разрывные автомодельные решения. Решена задача распада произвольного разрыва как на ровной границе, так и на наклонной плоскости и показано, что решение представляет собой конфигурации волн, аналогичные случаю несжимаемых течений. Показано, как изменились области начальных параметров, в которых реализуется конкретная конфигурация течения.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Результаты, представленные в диссертации, получены при определяющем вкладе автора. Соискатель принимал участие в постановке задач, проводил все аналитические исследования, принимал участие в интерпретировании полученных результатов, занимался подготовкой статей под руководством научного руководителя.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Уравнения мелкой воды магнитной гидродинамики с вращением во внешнем вертикальном магнитном поле получены методом усреднения трехмерной системы магнитогидродинамических уравнений по высоте слоя, который успешно применяется в геофизической гидродинамике и в физике планетных атмосфер. Полученные уравнения при отсутствии внешнего вертикального магнитного поля переходят в широко известные уравнения мелкой воды магнитной гидродинамики. Результаты линейной теории согласуются с результатами в гидродинамике нейтральной жидкости и с результатами в магнитогидродинамических течениях без вертикального магнитного поля. Нелинейная теория волн Россби и волн Пуанкаре в магнитогидродинамических течениях мелкой воды во вращающейся плазме развита хорошо зарекомендовавшим себя асимптотическим методом многих масштабов. Сильнонелинейные непрерывные и разрывные автомодельные решения, как и решения задачи Римана переходят в соответствующие известные решения для несжимаемой магнитной гидродинамики и для гидродинамических течений сжимаемой жидкости. Решения получены строгими методами математического анализа квазилинейных уравнений математической физики. Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается 5 публикациями по теме работы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, а также докладами на многочисленных международных и российских конференциях.

Научная новизна полученных результатов

Впервые получена система магнитогидродинамических уравнений в приближении мелкой воды с учетом вращения во внешнем вертикальном магнитном поле как в несжимаемом, так и в сжимаемом случае. Показано, что в таких течениях принципиален учет вертикальной магнитного поля. Впервые показано, что в таких течениях реализуются трехволновые взаимодействия волн магнито-Пуанкаре и магнитострофических волн, а также волн магнито-Россби. Вычислены коэффициенты взаимодействия для каждой из трехволновых конфигураций и найдены инкременты параметрических неустойчивостей. Впервые получены сильнонелинейные непрерывные и разрывные автомодельные решения для магнитогидродинамических уравнений в приближении мелкой воды с учетом сжимаемости, и решена задача распада произвольного разрыва.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Полученная в работе система магнитогидродинамических уравнений в приближении мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле может быть использована для описания таких астрофизических течений как магнитоактивные атмосферы экзопланет, захваченных приливами родительской звезды, течений в аккреционных дисках нейтронных звезд, течений атмосфер нейтронных звезд, течений солнечного тахоклина. Учет крупномасштабной сжимаемости представляется важным для анализа данных недавних наблюдений, в которых на Солнце были обнаружены волны Россби. Развитая теория волн Россби в магнитной гидродинамике может применяться для исследования солнечных и звездных осцилляций.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

Климачков Д.А., Петросян А.С., Нелинейные взаимодействия волн в магнитной гидродинамике астрофизической плазмы в приближении мелкой воды, ЖЭТФ, Том 149, Вып. 5, стр. 965, 2016

Климачков Д.А., Петросян А.С., Нелинейная теория магнитогидродинамических течений сжимаемой жидкости в приближении мелкой воды, ЖЭТФ, Том 150, Вып. 3, стр. 602, 2016

Klimachkov D.A., Petrosyan A.S., Parametric Instabilities in Shallow Water Magnetohydrodynamics of Astrophysical Plasma in External Magnetic Field, Phys. Lett. A, 381, p.106, 2017

Климачков Д.А., Петросян А.С., Волны Россби в магнитной гидродинамике вращающейся плазмы в приближении мелкой воды, ЖЭТФ, Том 152, Вып. 4, стр. 705, 2017

Климачков Д.А., Петросян А.С., Крупномасштабная сжимаемость во вращающихся течениях астрофизической плазмы в приближении мелкой воды, ЖЭТФ, Том 154, Вып. 6, стр. 1239, 2018

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, WebofScience и Scopus. Все основные положения диссертационной работы опубликованы в указанных статьях.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.04.02 – Теоретическая физика»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующему разделу паспорта специальности «01.04.02–Теоретическая физика»: «Развитие теории и исследования общих свойств и закономерностей нелинейной динамики сильно неравновесных систем. Разработка теории хаоса и турбулентности».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Климачкова Дмитрия Александровича «Нелинейные взаимодействия волн в магнитной гидродинамике вращающейся плазмы со свободной границей в поле силы тяжести» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 Теоретическая физика.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики планет» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 10 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 10 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «6» декабря 2019 г.

Председатель НТС отдела 53 ИКИ РАН,

д.ф.-м.н., чл.корр. РАН

О.И. Кораблев

Секретарь НТС отдела 53 ИКИ РАН,

к.ф.-м.н.

А.А. Федорова