

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИКИ РАН

И.И. Корр. РАН

А.А. Петрукович

28 февраля 2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Диссертация «Магнитогидродинамическая теория волновых процессов во вращающейся стратифицированной плазме» выполнена в отделе Физики планет Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Федотова Мария Андреевна работала в ИКИ РАН в должности инженера.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана 14.10.2021 г. ИКИ РАН.

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

По результатам рассмотрения диссертации «Магнитогидродинамическая теория волновых процессов во вращающейся стратифицированной плазме» принято следующее заключение:

### **Актуальность и направление исследования**

Диссертационная работа Федотовой Марии Андреевны посвящена теоретическому исследованию волновых процессов в магнитогидродинамических течениях вращающейся плазмы с учетом стратификации и сжимаемости.

Изучение фундаментальных свойств астрофизической плазмы помогает понять детальную эволюцию плазменных объектов, повсеместно наблюдаемых во Вселенной. В последнее время активно развиваются теоретические и численные исследования, направленные на решение проблемы описания и изучения крупномасштабных течений астрофизической плазмы путем исследования общих свойств, характеризующих объекты во Вселенной. С одной стороны, магнитная гидродинамика вращающихся течений является предметом исследования в области

динамики плазмы, как самостоятельного раздела теоретической физики. Поэтому результаты диссертационной работы самодостаточны и имеют непосредственное фундаментальное значение. С другой стороны, изучение таких течений имеет непосредственное отношение к астрофизике. Полученные в работе теоретические результаты имеют большое значение для понимания и предсказательного моделирования вращающихся астрофизических объектов. Течения в плазменной астрофизике, так же как течения в геофизике, как правило, являются стратифицированными. Учет стратификации в магнитогидродинамических моделях вращающейся плазмы важен для анализа множества астрофизических объектов и явлений, например, процессов в солнечном тахоклине (тонком слое внутри Солнца, находящимся над конвективной зоной), в устойчиво-стратифицированных областях в недрах звезд (излучающей зоны) и планет (внешний жидкий слой ядра), в астрофизических дисках, в магнитоактивных атмосферах экзопланет. Кроме того, учет стратификации позволяет существенно расширить возможности для интерпретации новых данных наблюдений крупномасштабных волн Россби на Солнце. Важным принципиальным отличием течений астрофизической плазмы является свойство сжимаемости, характеризующее большинство наблюдаемых объектов во Вселенной. Первые экспериментальные наблюдения крупномасштабных течений астрофизической плазмы выполнены на основе изучения магнитных полей или методами астросейсмологии, что естественным образом мотивирует развитие магнитогидродинамической теории с учетом как эффектов сжимаемости, так и эффектов магнитных полей.

**В первой главе** диссертационной работы получены магнитогидродинамические уравнения в приближении двуслойной мелкой воды во внешнем магнитном из полной системы уравнений магнитной гидродинамики несжимаемой вращающейся плазмы усреднением по высоте слоев в предположении гидростатичности распределения давлений и малости высот рассматриваемых слоев плазмы по отношению к характерному горизонтальному линейному размеру задачи. Найдены новые дисперсионные соотношения для волн магнито-Пуанкаре и магнито-Россби на  $\beta$ -плоскости с учетом эффектов стратификации, исследованы их нелинейные взаимодействия и получены инкременты неустойчивостей типа распад и усиление. Нелинейные взаимодействия найденных волн могут быть важны для интерпретации различных явлений в плазменной астрофизике, в особенности солнечной погоды.

**Во второй главе** диссертационной работы исследуются устойчиво и непрерывно стратифицированные течения вращающейся астрофизической плазмы в приближении Буссинеска в четырёх различных приближениях силы Кориолиса. Найдены новые типы волн, восстанавливаемыми силами которых являются сила Кориолиса, сила Лоренца и сила

плавучести. Исследовано влияние стратификации и учёта горизонтальной составляющей вектора Кориолиса на найденные типы волн, исследованы их нелинейные взаимодействия и получены инкременты неустойчивостей типа распад и усиление.

**В третьей главе** диссертационной работы получены магнитогидродинамические уравнения в неупругом приближении для сжимаемой стратифицированной вращающейся плазмы. В таком приближении акустические волны отфильтрованы, а градиент плотности зависит от градиента давления и от градиента температуры. Учёт силы Кориолиса выполнен в четырёх различных приближениях. Найдены новые типы волн, восстанавливающими механизмами которых являются вращение, магнитное поле, сжимаемость и стратификация. Проведено сравнение найденных типов волн с их аналогами в несжимаемых течениях в приближении Буссинеска, исследованы их нелинейные взаимодействия и получены инкременты неустойчивостей типа распад и усиление.

#### **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**

Магнитогидродинамические уравнения мелкой воды выведены с помощью метода усреднения по глубине слоя исходной системы уравнений. Данный метод широко используется и хорошо себя зарекомендовал в геофизической гидродинамике и в физике планетных атмосфер. Полученная система магнитогидродинамических уравнений в приближении двуслойной мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле в частном случае переходит в классические уравнения нейтральной жидкости и широко известные в астрофизике магнитогидродинамические уравнения без внешнего магнитного поля. Уравнения сжимаемой плазмы в неупругом приближении магнитной гидродинамики выведены с помощью метода, широко используемого и хорошо себя зарекомендовавшего в работах по исследованию течений астрофизической плазмы. Все полученные результаты линейной теории, развитые в диссертации, согласуются с известными результатами для течений нейтральной жидкости и для магнитогидродинамических течений. Развитие нелинейной теории осуществляется хорошо зарекомендовавшим себя асимптотическим

методом многомасштабных разложений. Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается 6 публикациями по теме работы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, а также докладами на многочисленных международных и российских конференциях.

### **Научная новизна полученных результатов**

Впервые система магнитогидродинамических уравнений в приближении двуслойной мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле получена из полной трехмерной системы уравнений магнитной гидродинамики для случая стратифицированных вращающихся течений. Впервые исследованы волны магнито-Пуанкаре на  $\beta$ -плоскости, найдены новые дисперсионные соотношения для волн магнито-Пуанкаре и магнито-Россби с учетом эффектов стратификации, исследовано влияние стратификации на групповые и фазовые скорости волн магнито-Пуанкаре и магнито-Россби. Впервые сформулирована задача о реализуемости трехволновых взаимодействий для волн магнито-Пуанкаре и магнито-Россби на  $\beta$ -плоскости в приближении мелкой воды. Показано наличие нелинейных трехволновых взаимодействий волн магнито-Пуанкаре и волн магнито-Россби, вычислены коэффициенты взаимодействия трех волн, найдены инкременты неустойчивостей типа распад и усиление.

Впервые система магнитогидродинамических уравнений вращающейся стратифицированной плазмы в приближении Буссинеска исследована сразу для четырех различных приближений силы Кориолиса (стандартные  $f$ - и  $\beta$ -плоскости, нестандартные (с учетом горизонтальной составляющей вектора Кориолиса)  $f$ - и  $\beta$ -плоскости). Впервые в рамках полученных уравнений исследованы магнитные инерционно-гравитационные волны, магнитострофические волны и волны магнито-Россби. Показано нарушение условия перпендикулярности групповой скорости волновому вектору для магнитных инерционно-гравитационных волн в следствие наличия магнитного поля. Показано наличие нелинейных трехволновых взаимодействий найденных новых типов волн, получены коэффициенты взаимодействия и инкременты неустойчивостей типа распад и усиление.

Впервые система магнитогидродинамических уравнений сжимаемой вращающейся плазмы в неупругом приближении получена из полной трехмерной системы уравнений магнитной гидродинамики для случая сжимаемых течений. Система является новой, так как содержит одновременно силу Кориолиса и магнитное поле, а также предполагает постоянное ненулевое магнитное поле в исходном состоянии равновесия. Кроме того, полученная система впервые исследована сразу для четырех различных приближений силы Кориолиса. Найдены новые

типы волн в сжимаемых вращающихся течениях астрофизической плазмы с линейным профилем энтропии: магнитные инерционно-гравитационные волны, магнитострофические волны и волны магнито-Россби. Показано отличие от их аналогов в несжимаемых течениях в приближении Буссинеска. Кроме того, обнаружены магнитные инерционно-гравитационные и магнитострофические волны с принципиально новыми дисперсионными соотношениями. Показано наличие нелинейных трехволновых взаимодействий найденных новых типов волн, получены коэффициенты взаимодействия и инкременты неустойчивостей типа распад и усиление.

### **Научная и практическая значимость результатов исследования**

Полученные магнитогидродинамические уравнения двуслойной мелкой воды представляют собой единственную возможность самосогласованного учета внешнего магнитного поля и стратификации. Учет стратификации в магнитогидродинамических моделях мелкой воды для вращающейся плазмы важен для анализа осцилляций R-моды во вращающихся звездах и на Солнце и позволяет существенно расширить возможности для интерпретации имеющихся данных наблюдений крупномасштабных волн Россби на Солнце. Также найденные в работе резонансные взаимодействия волн магнито-Пуанкаре и магнито-Россби на  $\beta$ -плоскости являются принципиально важными для интерпретации различных явлений в плазменной астрофизике, в особенности солнечных сезонов.

В полученных магнитогидродинамических уравнениях в приближении Буссинеска учет трехмерности позволяет детально исследовать волновые процессы в магнитогидродинамике стратифицированной плазмы. Кроме того, произведенный в уравнениях учет горизонтальной составляющей силы Кориолиса является особенно принципиальным при изучении астрофизических экваториальных течений.

Полученные магнитогидродинамические уравнения сжимаемой вращающейся плазмы в неупругом приближении важны для анализа процессов в солнечном тахоклине, устойчиво стратифицированных областях в недрах звезд (излучающей зоны) и планет (внешний жидкий слой ядра), астрофизических дисках, экзопланетах, а также для анализа осцилляций вращающихся звезд и Солнца. Кроме того, произведенный в уравнениях учет горизонтальной составляющей силы Кориолиса является особенно принципиальным при изучении астрофизических экваториальных течений.

Полученные в диссертации результаты могут быть полезны при планировании космических миссий и астрофизических наблюдений.

#### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

Федотова, М.А., Климачков Д.А., Петросян А.С., Магнитогидродинамическая теория мелкой воды для течений стратифицированной вращающейся астрофизической плазмы.

Приближение бета-плоскости, магнитные волны Россби, Физика плазмы, Том 46, Вып. 1, стр. 57, 2020

Petrosyan, A., Klimachkov, D., Fedotova, M., Zinyakov, T., Shallow Water Magnetohydrodynamics in Plasma Astrophysics. Waves, Turbulence, and Zonal Flows. Atmosphere, 11, p. 314, 2020.

Федотова, М.А., Петросян А.С., Волновые процессы в трехмерных стратифицированных течениях вращающейся плазмы в приближении Буссинеска, ЖЭТФ, Том 158, Вып. 2, стр. 374, 2020

Федотова, М.А., Петросян А.С., Волновые процессы во вращающихся сжимаемых течениях астрофизической плазмы с устойчивой стратификацией, ЖЭТФ, Том 158, Вып. 6, стр. 1188, 2020

Fedotova, M., Klimachkov, D., Petrosyan, A., Variable Density Flows in Rotating Astrophysical Plasma. Linear Waves and Resonant Phenomena, Universe, 7, p. 87, 2021.

Fedotova, M., Klimachkov, D., Petrosyan, A., Resonant interactions of magneto-Poincaré and magneto-Rossby waves in quasi-two-dimensional rotating astrophysical plasma, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 509(1), p.312, 2022.

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 Федотовой Марии Андреевны «Магнитогидродинамическая теория волновых процессов во вращающейся стратифицированной плазме» 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 «11» ноября 2021 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