

ОТЗЫВ

официального оппонента члена-корреспондента РАН, профессора Зыбина Кирилла Петровича на диссертацию Климачкова Дмитрия Александровича *«Нелинейные взаимодействия волн в магнитной гидродинамике вращающейся плазмы со свободной границей в поле силы тяжести»*, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - «Теоретическая физика»

Диссертационная работа Климачкова Дмитрия Александровича посвящена изучению волновых процессов на основе магнитогидродинамической теории мелкой воды для течений тонкого слоя вращающейся астрофизической плазмы во внешнем вертикальном магнитном поле. Последовательное развитие теории мелкой воды с учётом влияния внешнего магнитного поля позволило автору включить в рассмотрение принципиально трехмерную структуру магнитного поля в таких течениях, что является важным результатом для понимания динамики течений солнечного тахоклина, динамики магнитоактивных атмосфер экзопланет, а также течений в атмосферах нейтронных звезд. На основе развитой теории исследованы линейные волны, получены нелинейные уравнения трехволновых взаимодействий, исследованы параметрические неустойчивости. Аналитическое исследование нелинейных взаимодействий волн в рассматриваемых течениях необходимо для более глубокого и полного понимания волновых процессов во вращающихся течениях астрофизической плазмы, в частности, актуально в связи с обнаружением волн Россби на Солнце. Выполненное в работе исследование крупномасштабной сжимаемости является принципиально важным обобщением развитой теории для более точного описания реально наблюдаемых во Вселенной плазменных течений. Таким образом, вместо использования сложной для теоретического исследования и моделирования полной трехмерной системы, становится возможным учесть эти эффекты в предложенной теории мелкой воды магнитной гидродинамики. Всё сказанное, несомненно, подтверждает актуальность диссертационной работы и полученных результатов для плазменной астрофизики. Проведенные теоретические исследования выполнены с использованием асимптотических методов многомасштабных разложений, а также с использованием современных методов анализа нелинейных уравнений, что, безусловно, обеспечивает достоверность полученных результатов.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 66 наименований.

Во введении к диссертации Климачкова Д.А. излагается современное состояние исследований в области изучения течений вращающейся астрофизической плазмы, сформулированы задачи и цели работы, обсуждается актуальность работы, её новизна, обоснованность и практическая значимость.

В первой главе диссертации развивается теория вращающихся магнитогидродинамических течений в приближении мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле на неровной границе. Автор впервые показал, что магнитное поле в системе магнитогидродинамических уравнений мелкой воды принципиально трехкомпонентно, в то время как поле скоростей остается двухкомпонентным. При этом Климачков Д.А. получил условие бездивергентности, которое в новой системе выполняется тождественно как следствие уравнений магнитной индукции при задании корректных начальных условий. В результате анализа дисперсионных поверхностей исследуемых волн автор показал, что

условие синхронизма может выполняться для различных трехволновых конфигураций. Асимптотическим методом многомасштабных разложений Климачков Д.А. получил слабонелинейное решение задачи взаимодействия волн во внешнем вертикальном магнитном поле и в горизонтальном магнитном поле. Для каждого из обнаруженных видов взаимодействий в работе получены системы нелинейных уравнений для медленно меняющихся амплитуд волн, причём для каждого случая автор получил аналитические выражения для коэффициентов взаимодействия волн в полученных уравнениях. Кроме того, в первой главе показано, что полученные системы уравнений предсказывают распадные неустойчивости и явления параметрического усиления и найдены инкременты параметрических неустойчивостей.

Во второй главе диссертации проведены важные исследования магнитогидродинамических уравнений мелкой воды в приближении бета-плоскости во внешнем магнитном поле для исследования крупномасштабных течений на вращающейся сфере. Климачков Д.А. провел линейный и слабонелинейный анализ волн магнито-Россби в магнитогидродинамическом приближении мелкой воды. Автор получил дисперсионные соотношения для волн магнито-Россби во внешнем вертикальном магнитном поле и в горизонтальном магнитном поле. Аналогично случаю течений на f -плоскости, автор развил слабонелинейную теорию волн магнито-Россби во внешнем вертикальном магнитном поле и в горизонтальном поле. Качественный анализ дисперсионных кривых волн магнито-Россби в магнитной гидродинамике показал возможность трехволновых взаимодействий в приближении слабой нелинейности. Методом многомасштабных асимптотических разложений Климачков Д.А. развил слабонелинейную теорию волн магнито-Россби и получил трехволновые уравнения для медленно меняющихся амплитуд. Анализ полученных систем уравнений показал, что в системе могут развиваться два типа параметрических неустойчивостей: параметрический распад и параметрическое усиление волн магнито-Россби. В данной главе Климачков Д.А. также исследовал найденные неустойчивости и нашел их инкременты.

В третьей главе диссертации полученная система уравнений обобщена на случай сжимаемой плазмы. В работе показано, что новая система нетривиальным образом зависит от отношения характерного вертикального масштаба течения и масштаба высот, на котором вариация плотности становится существенной. Таким образом, получен важный результат, заключающийся в том, что в отличие от магнитогидродинамических уравнений мелкой воды для несжимаемой плазмы, высота свободной поверхности не является определяющей характеристикой для описания течений, так как закон сохранения массы записывается через новую переменную, которая зависит от плотности жидкости и высоты столба. Климачков Д.А. показал, что динамика течений, описываемых полученной системой в случаях, когда характерная плотностная высота много меньше характерной высоты слоя, существенно отличается от случая, описываемого системой магнитогидродинамических уравнений несжимаемой жидкости мелкой воды вследствие различия выражений для скорости распространения слабых возмущений и того, что в качестве параметра используется переменная, нетривиально связанная с высотой слоя, несмотря на формальную аналогию гиперболической структуры систем уравнений для обеих моделей. Кроме того, в данной главе Климачков Д.А. исследовал нелинейную динамику магнитогидродинамических течений сжимаемой жидкости в приближении мелкой воды в отсутствие вращения. Автор в явном виде нашел все непрерывные и разрывные решения системы, а также все центрированные автомодельные решения. Решена задача распада произвольного разрыва для уравнений магнитной гидродинамики сжимаемой жидкости в приближении мелкой воды. Показано, что решение представляет собой одну из пяти конфигураций простых волн.

Для каждой конфигурации решения найдены необходимые и достаточные условия ее реализации. Климачков Д.А. провел сравнительный анализ полученного решения с решением классической задачи Римана для магнитной гидродинамики несжимаемой жидкости в приближении мелкой воды. Таким образом, в работе убедительно показано, что учет сжимаемости магнитной жидкости в приближении мелкой воды приводит к изменению границ областей начальных условий, реализующих различные конфигурации решения задачи Римана.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

В целом диссертационная работа Климачкова Д.А. представляет собой цельное и законченное исследование в области теоретической физики, результаты, полученные в работе, актуальны и удовлетворяют требованиям новизны, а также могут быть широко применимы для исследования крупномасштабных вращающихся астрофизических течений. Результаты, выносимые на защиту, достоверны и обоснованы. Результаты диссертации опубликованы в ведущих российских и международных журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых в международных базах данных, представлены на многих российских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Диссертационная работа содержит целый ряд результатов важных для понимания структуры магнитного поля в магнитогидродинамических течениях тонких слоёв плазмы во внешнем вертикальном магнитном поле и понимания линейной и нелинейной динамики волн в таких течениях, однако работа не лишена отдельных недостатков. В качестве замечаний можно отметить следующие:

1. На стр. 23 в уравнении 1.1 учитывается только сила Кориолиса, а центробежной силой нет. Она мала по какому параметру?
2. В диссертации автор широко применяет метод многомасштабных разложений по параметру нелинейности. В результате зануления секулярных членов получаются уравнения для медленного изменения амплитуды волн. Однако для дальнейшего решения полученной системы используется разложение по другому параметру — предполагается, что одна из амплитуд значительно больше двух других. Было бы интересно переставить пределы — сначала разложиться по амплитуде одной из волн, а потом по параметру нелинейности. Изменится ли результат?

Имеются небольшие замечания по оформлению.

В уравнении 3.1 давление состоит из суммы газового и магнитного давлений, однако в формулах 3.4 и 3.5 той же буквой обозначено только газовое давление.

На стр. 81 и 85 пропущены ссылки на рисунки, а на стр. 84 ссылка на формулу.

Однако, сделанные замечания не имеют принципиального характера и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы Климачкова Д.А. Диссертационная работа Климачкова Дмитрия Александровича отвечает всем требованиям, предъявленным ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.02 - теоретическая физика, а ее автор Климачков Дмитрий Александрович заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
Руководитель отделения
теоретической физики (ОТФ),
главный научный сотрудник ФИАН
чл.-корр. РАН, профессор

Зыбин Кирилл Петрович

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН ФИАН, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский
проспект, д.53, с.4., тел. 8 (499) 132-65-54, 8 (499) 135-14-29, e-mail: zybinkp@lebedev.ru

Подпись Зыбина Кирилла Петровича заверяю:

Ученый секретарь ФИАН
к.ф.-м.н.



Колобов Андрей Владимирович

14 апреля 2020 г.