



УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИПФ РАН,
академик РАН Т.Г. Денисов

08 » июля 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Кузнецова Алексея Александровича «Квазилинейная динамика квазимагнитостатической турбулентности в анизотропной бесстолкновительной плазме» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

Работа выполнена в отделе астрофизики и физики космической плазмы (130) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Кочаровский Владимир Владиленович, заведующий отделом астрофизики и физики космической плазмы ИПФ РАН, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН.

В 2022 г. соискатель учёной степени окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.02. Физика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2022 года по 31 августа 2026 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000042 от 08 июля 2026 года.

В период подготовки диссертации соискатель Кузнецов Алексей Александрович работал младшим научным сотрудником в отделе астрофизики и физики космической плазмы (130) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Все основные теоретические результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Аналитический вывод квазилинейных уравнений эволюции магнитной турбулентности и численные программы для их решения были разработаны лично автором. Решение этих уравнений на суперкомпьютере и количественная обработка их результатов тоже проводились лично

автором. Постановка начальных задач для численного моделирования осуществлялась автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя, компьютерные расчеты методом частиц в ячейках – при консультативной поддержке со стороны Гарасёва М.А., анализ магнитоактивной анизотропной бимаксвелловской плазмы в линейном приближении – при консультативной поддержке со стороны Емельянова Н.А., теоретический анализ результатов расчетов – при консультативной поддержке со стороны научного руководителя.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

В диссертационной работе разработан оригинальный квазилинейный численный подход к описанию эволюции квазимагнитостатической турбулентности и соответствующей деформации функции распределения частиц по скоростям, использующий приближение слабо нелинейной турбулентности, т.е. слабого взаимодействия её пространственных гармоник (мод). Этот подход и развитые с его помощью представления о магнитной турбулентности вейбелевского и шлангового типа являются универсальными, т.е. применимы к различным исходным функциям распределения частиц по скоростям, включая не только бимаксвелловские, но и бикаппа-, комбинированные пучковые, неосесимметричные и другие распределения, представляющие интерес для различных задач физики космической и лазерной плазмы, в том числе находящейся во внешнем магнитном поле.

Посредством совместного анализа результатов оригинального квазилинейного моделирования и стандартного для подобных задач моделирования методом частиц в ячейках оценена область применимости разработанного квазилинейного подхода, а значит, доминирования интегрального нелинейного взаимодействия между модами, а также получен ряд неизвестных ранее зависимостей между характеристиками квазимагнитостатической турбулентности для магнитоактивной плазмы с различными параметрами. Кроме того, выявлены условия возникновения и основные проявления резонансного трёх- и четырехволнового взаимодействия мод, выходящие за рамки квазилинейного приближения. Проведен учет и указаны следствия нелинейного нерезонансного рассеяния частиц согласованной магнитной турбулентностью на основе введе 11 ния их эффективных аномальных столкновений в построенные квазилинейные уравнения с использованием БГК-приближения.

Установлены новые закономерности эволюции пространственного спектра вейбелевской и шланговой турбулентности, в том числе её автомодельный характер при достаточно слабом внешнем магнитном поле и отсутствие в динамике спектра степенных пространственно-временных зависимостей при более сильном внешнем поле, существенно влияющим на дисперсионные свойства мод. Найдены четыре типа характерной временной эволюции амплитуд различных мод развивающейся турбулентности и для ряда типичных мод продемонстрированы последовательные переходы между экспоненциальным, сверхбыстрым, степенным и осцилляторным поведением. Показана возможность взаимного влияния апериодической вейбелевской и волновой ленгмюровской турбулентности в системе «плазма+пучок», включая значительное подавление одной турбулентности другой.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Проведенные исследования опираются на известные физические модели, широко используемые при изучении квазистационарных процессов в слабостолкновительной плазме и основанные на классических уравнениях Власова–Максвелла, а также на ряде общетеоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование: теории возмущений, спектральном разложении, корреляционном анализе, усреднении по второстепенным флуктуациям и других верифицированных инструментах исследования случайных полей. Полученные аналитические оценки и результаты численного моделирования согласованы с экспериментальными данными и теоретическими результатами известных работ других авторов в общей области применимости использованных тех или иных подходов. Предложенная интерпретация рассмотренных турбулентных явлений в неравновесной магнитоактивной плазме обоснована их качественным физическим анализом.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Научная значимость работы состоит, во-первых, в расширении квазилинейной теории с известного случая волновой (высокочастотной) неустойчивости на нетривиальный случай не волновой, а по существу аperiодической неустойчивости и, во-вторых, в возможности непосредственного применения этой теории к задачам физики магнитной турбулентности в лазерной плазме, получаемой абляцией мишеней фемтосекундными оптическими импульсами, и в космической плазме, формируемой вспышечными процессами в магнитосферах планет и экзопланет, в коронах Солнца и звезд поздних спектральных классов, в идущем от них звездном ветре и других астрофизических условиях. Теоретическая значимость состоит в установлении и предсказании закономерностей формирования и нелинейной эволюции квазимагнитостатической турбулентности и её пространственного спектра для широкой области параметров бесстолкновительной плазмы с анизотропным распределением частиц по скоростям и не слишком сильным внешним магнитным поле, не подавляющем аperiодическую шланговую неустойчивость. Практическая значимость обусловлена проведенным адекватным описанием целого ряда явлений в магнитной турбулентности, характерной для широкого круга ситуаций в неравновесной бесстолкновительной плазме, как астрофизической, так и лабораторной.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. Кузнецов А. А., Нечаев А. А., Гарасев М. А. и др. // Квазилинейное моделирование развития вейбелевской турбулентности в анизотропной бесстолкновительной плазме// ЖЭТФ. 2023. Т. 164, No. 6. С. 1098–1119.
2. Nechaev A. A., Kuznetsov A. A., Kocharovskii V. V. // On the analytical description of the nonlinear stage of the Weibel instability in collisionless anisotropic plasma// Journal of Plasma Physics. 2023. V. 89, No. 6. P. 175890601.
3. Кузнецов А. А., Кочаровский В. В., Кочаровский Вл. В., Нечаев А. А., Гарасёв М. А. // Насыщающее магнитное поле вейбелевской неустойчивости в плазме с

бимаксвелловским и бикаппа-распределением частиц// Физика плазмы. 2022. Т. 48, вып. 9. С. 836–846.

4. Кузнецов А. А., Кочаровский Вл. В. // Квазилинейное развитие и взаимное влияние ленгмюровской и вейбелевской турбулентности в плазме с пучком электронов// Физика Плазмы. 2026. Принята к печати.

5. Кузнецов А. А., Емельянов Н. А., Гарасев М. А. и др. // Нелинейные эффекты в магнитной турбулентности слабо замагниченной бесстолкновительной плазмы: квазилинейная эволюция, межмодовое взаимодействие и аномальное затухание// Известия вузов. Радиофизика. 2026. Принята к печати.

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых международных журналах. Они неоднократно обсуждались на различных конференциях и семинарах и получили высокую оценку ведущих специалистов.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.9. Физика плазмы.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

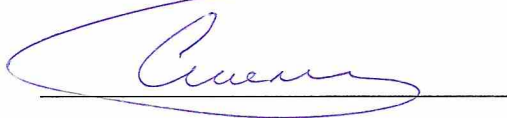
Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Квазилинейная динамика квазимагнитостатической турбулентности в анизотропной бесстолкновительной плазме» Кузнецова Алексея Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Присутствовало на заседании 17 чел.

Результаты голосования: «за» – 17 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.
протокол № 5 от 16 июня 2026 г.



Скалыга Вадим Александрович,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения физики
плазмы и электроники больших мощностей



Моченева Ольга Станиславовна,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения физики плазмы и
электроники больших мощностей