

Отзыв
официального оппонента

на диссертацию **Лужковского Артемия Араратовича**
«Самосогласованное описание нелинейного взаимодействия квазимонохроматических волн с резонансными частицами в неоднородной плазме»,

представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3. Теоретическая физика

Диссертационная работа Артемия Араратовича Лужковского посвящена исследованию нелинейного резонансного взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами в неоднородной плазме.

Актуальность темы диссертации обусловлена ключевой ролью коллективных эффектов, к которым относится и энергообмен между заряженными частицами и электромагнитными волнами, в динамике плазменных систем. В частности, в космической плазме генерация волн заряженными частицами с неустойчивым распределением по скоростям и обратный процесс резонансного поглощения волн определенной фракцией заряженных частиц определяют как эволюцию энергетических и угловых распределений частиц, так и электромагнитную обстановку. Одним из известных и активно изучаемых примеров таких плазменно-волновых систем является магнитосфера Земли, где резонансное взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме в значительной мере определяет динамику радиационных поясов и кольцевого тока и приводит как к потерям энергичных заряженных частиц из геомагнитной ловушки, так и к ускорению некоторой доли частиц.

Нелинейное резонансное взаимодействие частиц с волнами — сложный и многопараметрический процесс, характер которого сильно зависит от геометрии и параметров системы. Поэтому исследования этого процесса в различных конкретных ситуациях далеки от завершения. В частности, существует немало нерешенных задач о влиянии неоднородности среды на резонансное взаимодействие. В диссертации рассмотрены несколько таких задач и получены **новые результаты**, которые кратко охарактеризованы ниже в обзоре содержания работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. **Во Введении** излагается общая формулировка проблемы, обоснована ее актуальность, сформулированы цели и конкретные задачи исследования. Здесь же охарактеризованы научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, достоверность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, даны сведения об апробации работы включая публикации по теме диссертации и о личном вкладе автора в получение результатов.

Первая глава является справочной и содержит основные уравнения, характеристики используемых приближений и информацию о дисперсионных свойствах плазмы.

Во второй главе проанализирована задача о самосогласованном стационарном профиле поля каналированной свистовой волны, распространяющейся от ионосферы строго вдоль геомагнитного поля и взаимодействующей на циклотронном резонансе с энергичными электронами. Итерационным методом найден профиль амплитуды волны, определяемый ее усилением энергичными частицами. В свою очередь, распределение энергичных частиц, по которому вычисляются инкремент и коэффициент усиления, рассчитано с учетом влияния поля волны на частицы в неоднородном магнитном поле включая захват части электронов полем волны. В результате развит подход, позволяющий в перспективе учесть влияние нелинейных эффектов в усилении свистовой волны, излучаемой наземным источником (например, передатчиком очень низкочастотного (ОНЧ, $\sim 1\text{--}30$ кГц) диапазона), на ее взаимодействие с энергичными частицами в магнитосфере Земли.

В третьей главе исследована передача энергии от одних электронов другим посредством их взаимодействия со свистовой волной, распространяющейся от области минимума магнитного поля (магнитного экватора), на разных гармониках циклотронного резонанса. С учетом изменения волнового вектора за счет рефракции рассчитаны вклады разных групп электронов в нелинейный инкремент волны и соответственно вычислена скорость и знак обмена энергией между этими группами частиц и волной. Продемонстрировано, что при типичных значениях параметров в магнитосфере Земли на значительной части траектории волнового пакета суммарный инкремент может быть малым, в то время энергообмен частиц каждой группы с волной остается существенным. В этих условиях наиболее очевидна роль волны как промежуточного агента передачи энергии частиц из одной области фазового пространства в другую.

В четвертой главе из исходных волнового и кинетического уравнений выведена оригинальная самосогласованная система уравнений для исследования динамики ленгмюровских волн в неоднородной плазме в одномерном приближении при их резонансном взаимодействии с энергичными электронами, составляющими малую “активную” добавку к тепловой плазме, которая определяет дисперсионные свойства волн. Предложенная система уравнений является эволюционной, что делает ее удобной для исследования пространственно-временной динамики взаимодействия. Реализован оригинальный алгоритм численного решения данной системы. Приведены и обсуждены результаты численных расчетов, детально демонстрирующих изменение этой динамики при переходе от устойчивой плазмы к неустойчивой и от однородной среды к неоднородной. Рассмотрены случаи узкого и широкого начального спектра волн. Показано, что в случае широкого спектра универсальной особенностью развития неустойчивости является формирование пространственно-временной модуляции амплитуды поля.

В пятой главе система уравнений, полученная в главе 4, используется для ана-

лиза спектрально-временной динамики ленгмюровских волн с дискретным спектром при развитии пучковой неустойчивости в однородной и неоднородной плазме. С помощью искусственного увеличения параметра дисперсии ленгмюровских волн достигнуто более высокое разрешение по частоте (за счет более широкого результирующего частотного спектра при заданном интервале между волновыми числами соседних спектральных составляющих). Результатом такого моделирования явилась демонстрация формирования квазипериодических структур с изменяющейся (повышающейся) во времени частотой уже на линейной стадии развития неустойчивости. Проведен детальный анализ полученных структур показал, что их формирование связано с переходом пространственной периодичности амплитуды электрического поля, обусловленной дискретностью спектра волновых чисел, во временную модуляцию за счет распространения волновых структур с групповой скоростью.

Полученные результаты в целом характеризуются **высокой достоверностью**, обусловленной грамотным использованием апробированных методов теоретической физики и численного моделирования. Вместе с тем, постановка задач обеспечивает новизну изложенных в диссертации результатов.

По содержанию диссертации есть ряд замечаний, которые в основном либо относятся к стилю представления результатов, либо могут рассматриваться как пожелания к будущей работе.

Во втором абзаце раздела “Теоретическая и практическая значимость” сформулировано слишком общее утверждение, которое включает не только результаты автора, но и ранее полученные результаты других исследователей.

Утверждение на с. 17 о том, что линейное приближение не является самосогласованным, не подкреплено ни авторским определением самосогласованного подхода, ни ссылками на известные определения. Вместе с тем, ограниченность области применимости линейного приближения не лишает его самосогласованности в смысле учета взаимного влияния всех компонент (в данном случае — частиц и волн) системы.

Замечания по главе 2.

1) Не совсем понятно, почему нельзя было взять в качестве опорного значения амплитуды волны ее величину на экваторе, если все равно на каждой итерации профиль амплитуды определялся по профилю усиления, причем на нулевой итерации усиление вообще не учитывалось.

2) Не объяснен выбор профиля концентрации фоновой плазмы, хотя это было бы уместно, поскольку выбранная зависимость дает заметно более сильное возрастание плотности с удалением от экватора, чем это следует из спутниковых данных (Ozhogin P. et al., J. Geophys. Res. 2012. V.117, A06225, doi:10.1029/2011JA017330). Не обсуждается влияние этого профиля на результат расчетов.

3) Не совсем понятен (и не объяснен в работе) выбор конкретного момента времени из всего массива данных RBSP, тем более, что данные для расчетов все равно

довольно сильно модифицированы по сравнению с исходными.

4) При обсуждении результатов расчетов делается акцент на сильном отличии нелинейного инкремента от линейного. Стоило также указать, насколько сильно различается интегральное усиление волны в линейном и нелинейном случае с учетом немонотонной и знакопеременной разности инкрементов для этих случаев.

В главе 3 было бы целесообразно провести расчеты при двух или трех значениях амплитуды волны, чтобы показать роль нелинейных эффектов в энергообмене между частицами, занимающими разные области в фазовом пространстве.

Замечания по главе 4.

1) Поскольку кинетическое уравнение первого порядка по скорости, то необходимость задания граничных условий на обеих границах области определения по скорости непонятна, и это не объясняется в работе.

2) В таблице 1 было бы лучше указать, как более информативные величины, значения шагов по всем переменным, а не числа точек.

3) Приводимые в тексте цифры точности сохранения полной энергии системы дублируют информацию на графиках, но не имеют большого смысла. Точность в данном случае определяется отношением изменений (по модулю) полной энергии и энергии одной из компонент. Эту реальную точность автор приводит только для двух из 10 вариантов расчета.

В расчетах варианта 7 такая точность сохранения полной энергии составила всего около 50%. Непонятно, почему автор удовлетворился этой точностью и не провел расчеты с другим шагом по времени и пространству, чтобы достичь приемлемой точности.

4) Не пояснено, чем определялся выбор предельного времени расчета. В то же время очевидно, что интересные эффекты в ряде вариантов должны были проявиться как раз после этого времени.

Замечание по главе 5: хотелось бы видеть обоснование выбора спектрального состава волн, включенных в расчет. В частности, мне не кажется оправданным исключение значительной части волн, находящихся в резонансе с частицами на положительном склоне функции распределения, поскольку именно они должны наиболее быстро нарастать из начальных шумов.

Диссертация написана в целом грамотно, хорошо структурирована и легко читается. Однако есть некоторые замечания по стилю изложения, часть которых приведена ниже.

С.23 — “В радиофизике принято различать два подхода к классификации излучений: частотное и физическое.”

С.56 — “Ограничиваясь нерелятивистской теорией, верхний предел. . . выбирается. . .”

С.74 — “уравнение (3.28) интегрируется. . . , считая. . .”

С.105 — “до достижения амплитуды электрического поля достаточно большого значения”

С.105 — “усредненных по пространству функций распределений”

Высказанные замечания не отменяют общей высокой оценки диссертационной работы. Результаты, полученные автором и изложенные в диссертации, оригинальны и значимы. Они получены с применением апробированных методов физики и математики для анализа и интерпретации данных и результатов расчетов. Эти результаты могут быть использованы в научных учреждениях, ведущих исследования по теоретической физике плазмы и физике солнечно-земных связей: ПГИ, ИПФ РАН им. Гапонова-Грехова, ФИАН им. Лебедева, ИСЗФ СО РАН, СПбГУ, НИИЯФ МГУ и др.

Результаты опубликованы в 3 статьях в рецензируемых международных журналах, рекомендованных ВАК и имеющих высокий рейтинг в международных системах цитирования, а также представлены на авторитетных российских конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Артемия Араратовича Лужковского на тему: «Самосогласованное описание нелинейного взаимодействия квазимонохроматических волн с резонансными частицами в неоднородной плазме» выполнена на высоком уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу. Она полностью удовлетворяет требованиям “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор — Лужковский Артемий Араратович — несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический институт» (ПГИ)

доктор физ.-мат. наук, доцент

Демехов Андрей Геннадьевич

 03.12.2025

Контактные данные:

184209, г.Апатиты, Академгородок, 26а

телефон: (81555) 79-475, e-mail: demekhov@pgia.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.08 — физика плазмы, физико-математические науки

Подпись А. Г. Демехова заверяю.

Ученый секретарь ПГИ



 Т. А. Попова