



А.А. Петрукович

«23» сентября 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований
Российской академии наук

Диссертация Лужковского Артемия Араратовича на тему: «Самосогласованное описание нелинейного взаимодействия квазимонохроматических волн с резонансными частицами в неоднородной плазме» выполнена в отделе Физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук. В период подготовки диссертации соискатель Лужковский Артемий Араратович проходил обучение в аспирантуре ИКИ РАН и работал в ИКИ в должности инженера.

В 2021 г. А.А. Лужковский окончил магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 03.04.01 «Прикладные математика и физика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в ИКИ РАН.

Научный руководитель:

- доктор физико-математических наук Шкляр Давид Рувимович, заведующий лабораторией Теории плазменных процессов в космической среде ФГБУН ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Самосогласованное описание нелинейного взаимодействия квазимонохроматических волн с резонансными частицами в неоднородной плазме» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Самосогласованное описание динамики частиц и квазимонохроматических электромагнитных волн в неоднородной плазме, учитывающее их взаимное влияние, является актуальным для понимания сложных нелинейных процессов в космической плазме, особенно в контексте динамики радиационных поясов Земли и прогнозирования

космической погоды. Развитие эффективных методов решения системы уравнений Больцмана-Власова-Максвелла в самосогласованной постановке позволяет оценить роль различных типов волн в динамике высокоэнергичных частиц магнитосферы, что является открытой задачей физики космической плазмы.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Исследования, положенные в основу диссертационной работы, выполнены соискателем лично либо при его непосредственном участии. Текст диссертации основан на 3 научных публикациях, объединенных одной тематикой исследования, в двух из которых соискатель ученой степени является первым автором. Совместно с научным руководителем он принимал участие в постановке и решении исследуемых задач. Все результаты, выносимые на защиту, были получены соискателем самостоятельно либо в сотрудничестве с соавтором публикаций.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Диссертационная работа представляет собой исследование, выполненное на основе самосогласованного решения системы уравнений Максвелла и кинетического уравнения Больцмана-Власова. Надежность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректным решением упомянутых фундаментальных уравнений с учетом используемых физических допущений и ограничений.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается 3 публикациями в международных изданиях, входящих в перечень ВАК, а также докладами на конференциях.

Научная новизна полученных результатов

1) Впервые получен самосогласованный профиль амплитуды квазимонохроматического сигнала наземного ОНЧ передатчика с учетом нелинейного резонансного взаимодействия между волной и энергичными электронами. Рассмотрение выполнено в предположении дактированного распространения сигнала вдоль внешнего магнитного поля, когда взаимодействие происходит только на первом циклотронном резонансе.

2) На примере квазимонохроматического пакета свистовых волн, генерируемого неустойчивым распределением энергичных электронов в экваториальной области магнитосферы и взаимодействующего вдоль траектории своего распространения с частицами на различных циклотронных резонансах, рассмотрен новый механизм передачи

энергии от менее энергичных к более энергичным электронам, опосредованный волной. Обоснована возможность такого процесса в открытой неравновесной среде, которую представляет собой магнитосферная плазма.

3) Предложен новый подход к самосогласованному решению системы уравнений, описывающих динамику ленгмюровских волн в неоднородной плазме. Использование уравнения Ампера-Максвелла для описания волнового электрического поля делает рассматриваемую систему эволюционной и наиболее подходящей для моделирования временной динамики физических процессов. Нерезонансные частицы, которые вносят основной вклад в плотность плазмы, учитываются через диэлектрическую проницаемость среды, а кинетическое уравнение Больцмана-Власова решается только для резонансных частиц. Указанная система впервые решалась с учетом неоднородности плотности плазмы, что дает возможность обобщать полученные результаты на случай резонансного взаимодействия электромагнитных волн и частиц в околоземной плазме.

Научная и практическая значимость результатов исследования

В работе развит самосогласованный подход, основанный на методе последовательных приближений, который использован для поиска самосогласованного профиля амплитуды сигнала ОНЧ передатчика, распространяющегося вдоль силовой линии магнитного поля Земли. Полученный профиль дает возможность исследовать динамику субрелятивистских электронов в поле сигнала передатчика, причем при рассмотрении движения высокоэнергичных электронов, ввиду их малого количества, можно применять приближение заданного поля.

В диссертации исследован механизм передачи энергии между различными группами электронов при их резонансном взаимодействии с квазимонохроматическим пакетом свистовых волн на различных циклотронных резонансах. На примере свистовой волны, возбуждаемой в экваториальной области магнитосферы неустойчивым распределением электронов, установлено, что в неравновесной неустойчивой плазме возможен процесс передачи энергии от менее энергичных частиц к более энергичным. Этот процесс потенциально может служить механизмом ускорения заряженных частиц в радиационных поясах Земли.

Разработан подход для самосогласованного решения эволюционной системы уравнений, состоящей из кинетического уравнения Больцмана-Власова для функции распределения и

уравнения Ампера-Максвелла, описывающего динамику электрического поля. Учет вклада нерезонансных электронов с помощью диэлектрической проницаемости позволяет избежать моделирования большей части электронов, что дает возможность производить необходимые численные расчеты на персональном компьютере. Учитывая известную аналогию в описании динамики резонансных частиц в поле свистовой и ленгмюровской волн, разработанные методы применимы не только для анализа ленгмюровских волн, но и могут быть адаптированы для описания свистовых волн в неоднородной плазме, которые играют важную роль в динамике заряженных частиц в магнитосфере.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. Shklyar D.R., Luzhkovskiy A.A., Self-consistent amplitude profile of ducted VLF transmitter signal due to resonant interaction with energetic electrons in the magnetosphere. *Advances in Space Research*, 2023, 71, 228–243.
2. Luzhkovskiy A.A., Shklyar D.R., Energy Transfer Between Various Electron Populations Via Resonant Interaction With Whistler Mode Wave. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, 128.
3. Luzhkovskiy A.A., Shklyar D.R., Self-consistent description of Langmuir waves in an inhomogeneous plasma. *Physics of Plasmas*, 2025, 32.

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные результаты диссертации опубликованы в указанных статьях.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «1.3.3 – Теоретическая физика»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующему разделу паспорта специальности «1.3.3 – Теоретическая физика»: «Теория неравновесных систем. Теория хаоса и турбулентности».

Самосогласованная система уравнений Больцмана-Власова-Максвелла лежит в основе теории бесстолконовительной плазмы. Эта система уравнений является исходной при решении всех задач в диссертации. В частности, при исследовании ленгмюровских волн эти уравнения сведены к системе уравнений для векторного потенциала электрического поля и функции распределения резонансных частиц, в которую нерезонансные частицы

включены с помощью диэлектрической проницаемости. Разработан и реализован подход, который позволяет получать устойчивые в математическом смысле решения этой системы на достаточно больших временах.

Продвижением в теории космической плазмы является также изученный новый пример передачи энергии от менее энергичных электронов к более энергичным в неравновесной неустойчивой плазме при возбуждении свистовой волны в магнитосфере.

Аналитические методы решения основных уравнений в полной мере использованы при отыскании самосогласованного профиля амплитуды сигнала ОНЧ передатчика в магнитосфере. В частности, получено аналитическое выражение для функции распределения резонансных частиц (включая определение фазового объема захваченных частиц) и нелинейного инкремента свистовой волны. Эти результаты позволили установить, что в случае неустойчивого распределения энергичных электронов амплитуда сигнала в противоположном от передатчика полушарии оказывается существенно выше, чем в соответствующей сопряженной точке.

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Лужковского Артемия Араратовича «Самосогласованное описание нелинейного взаимодействия квазимонохроматических волн с резонансными частицами в неоднородной плазме» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 «Теоретическая физика».

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики космической плазмы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 12 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 12 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «23» сентября 2025г.

Председатель НТС отдела 54 ИКИ РАН
академик РАН

А.А. Петрукович

Секретарь НТС отдела 54 ИКИ РАН

О.В. Сапунова