

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН



А.А. Петрукович

09 / 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований
Российской академии наук

Диссертация Артехи Натальи Сергеевны на тему: «Особенности распространения и резонансного взаимодействия с частицами электромагнитных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности» выполнена на базовой кафедре физики космоса Института космических исследований Российской академии наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и в отделе физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук. В период подготовки диссертации соискатель Артеха Наталья Сергеевна работала в отделе физики космической плазмы ИКИ РАН в должности старшего лаборанта с 11.02.2021 г. по 04.05.2023 г., инженера с 05.05.2023 г. по 31.08.2025 г., ведущего инженера с 01.09.2025 г. по настоящее время.

В 2022 г. Артеха Наталья Сергеевна окончила магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». С 2022 г. по настоящее время является аспирантом очной формы аспирантуры НИУ ВШЭ по научной специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия, образовательная программа «Физика и астрономия».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в НИУ ВШЭ.

Научный руководитель:

- доктор физико-математических наук Шкляр Давид Рувимович, работает в ФГБУН ИКИ РАН в должности заведующего лабораторией.

По результатам рассмотрения диссертации «Особенности распространения и резонансного взаимодействия с частицами электромагнитных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Теоретические исследования процессов распространения и резонансного взаимодействия с энергичными частицами электромагнитных волн в ионосфере и магнитосфере Земли и других планет Солнечной системы получили новый импульс в связи с данными, полученными такими спутниковыми миссиями, как Интербол, Cluster, THEMIS, Van Allen Probes, Arase, MMS и в последние годы Ионосфера-М. Данные с высоким разрешением стали доступны лишь два последних десятилетия. Проект Van Allen Probes был направлен непосредственно на исследование радиационных поясов Земли, в эволюции которых различные волны играют важную роль, проект MMS направлен на изучение процессов, протекающих в хвосте магнитосферы, а четыре аппарата Ионосфера-М – для мониторинга «космической погоды». Космическими миссиями также проводились измерения в межпланетном пространстве и магнитосферах других планет Солнечной системы, включая Юпитер (миссии Voyager, Juno, Cassini) и Сатурн (миссии Voyager, Cassini). Таким образом, имеются данные измерений в различных областях космического пространства. Эти измерения показывают, что параметры плазмы, в частности, отношение плазменной частоты к циклотронной частоте, меняются в очень широком диапазоне, что требует адекватного теоретического описания протекающих там процессов, в то время как выполненные и планируемые космические эксперименты предоставляют возможность для сопоставления проведённых расчётов с данными измерений на космических аппаратах. Таким образом, тема диссертации, которая включает анализ волновых процессов в плазме произвольной плотности, является актуальной для современных исследований волновых явлений в космической плазме.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Все результаты, представленные в настоящей диссертации, получены соискателем лично, либо совместно с соавторами. Автор участвовал в постановке и теоретической разработке научных задач, в проведении численных расчётов, в анализе и интерпретации полученных результатов, в написании текстов публикаций. Положения, выносимые на защиту, основаны на 6 работах из списка публикаций автора по теме диссертации. Результаты, представленные в диссертации, согласованы с соавторами.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием обширного набора данных с различных спутниковых приборов, успешно использовавшихся в целом ряде космических экспериментов. В работе использованы измерения широко известных и проверенных научных инструментов на борту космических аппаратов Van Allen Probes и MMS. Результаты, полученные в настоящей диссертации, опираются на решения фундаментальных уравнений электродинамики и физики плазмы (кинетического уравнения Больцмана – Власова и уравнений Максвелла). Достоверность полученных в работе результатов определяется соответствием теоретических выводов имеющимся экспериментальным данным. При проведении количественных расчётов в диссертационном исследовании использованы программные среды MATLAB и Wolfram Mathematica, с помощью которых реализованы используемые численные методы.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна исследования связана с использованием уникальных данных по измерениям волн и дифференциальных потоков частиц в многоспутниковых миссиях, таких как Van Allen Probes и MMS. В работе получены следующие новые результаты:

- Выполнен расчёт инкремента свистовых волн на основе функций распределения, полученных с помощью спутниковых измерений дифференциальных потоков заряженных частиц в широком диапазоне энергий, без разделения на «холодную» и «горячую» компоненты плазмы, и не ограниченный условием малости инкремента волны по сравнению с её частотой; обнаружены новые моды колебаний при малых значениях плотности холодных частиц.
- Для разреженной плазмы получена формула, определяющая угол Жандрэна. Определена частота волны, ограничивающая область существования такого угла.
- На основе расчёта инкремента квази-электростатических медленных необыкновенных волн в плазме с каппа-распределением при наличии конуса потерь впервые дано объяснение особенности спектра верхнегибридных волн, которая заключается в резком возрастании интенсивности излучения в случае, когда частота волны близка к гармоникам гирочастоты.
- Общая двумерная система уравнений движения релятивистских электронов в поле медленной необыкновенной волны и внешнем магнитном поле сведена в приближении изолированных резонансов к одномерной системе уравнений, и получено выражение для инкремента медленной необыкновенной волны, распространяющейся под произвольным углом к внешнему магнитному полю.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Разработанный метод расчёта инкремента имеет как теоретическое, так и практическое значение, поскольку он не ограничен условием малости инкремента волны по сравнению с частотой и применим для функций распределения, восстановленных численно по спутниковым данным. Предложенные в диссертации выражения для показателей преломления электронных мод в плазме произвольной плотности представляют интерес с точки зрения физики плазмы. Также интерес с точки зрения теории плазмы представляют обнаруженные особенности резонансного взаимодействия электромагнитных волн с релятивистскими частицами в случае, когда продольный показатель преломления равен единице. Теоретический интерес с точки зрения резонансного взаимодействия волн и частиц в плазме представляет полученное выражение для инкремента медленных необыкновенных волн при произвольном угле распространения.

Выполненный в работе анализ движения релятивистских частиц в поле медленной необыкновенной волны является основой для исследования высыпания релятивистских частиц в авроральной области магнитосферы Земли, что важно с точки зрения изучения космической погоды.

Пространственно-временная структура магнитосферы обычно определяется посредством анализа распределения плотности космической плазмы. Нахождение глобальной плотности холодных частиц в магнитосфере с помощью спутников включает анализ верхнегибридной частоты вдоль траектории спутника. Поэтому требуется понимание механизма генерации верхнегибридных волн в магнитосфере, который детально исследован в работе. Проблемы взаимодействия заряженных частиц и волн тесно связаны с проблемой определения наиболее вероятной области возбуждения волн в магнитосфере.

Научная и практическая значимость результатов настоящей диссертации определяется возможностью их использования широким кругом специалистов, занимающихся изучением физических свойств плазмы, в том числе космической.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. Артеха Н.С., Шкляр Д.Р. Кинетическое описание свистовой волны, распространяющейся в плазме вдоль магнитного поля // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 613--627. <https://doi.org/10.31857/S0367292121100413>

2. Артеха Н.С., Шкляр Д.Р. Дисперсионные характеристики низкочастотных электронных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1127--1139. <https://doi.org/10.31857/S0367292123600838>
3. Shklyar D.R., Artekha N.S. Model expressions for refractive indices of electron waves in cold magnetoactive plasma of arbitrary density // Fundamental Plasma Physics. 2024. V. 10. 100053. <https://doi.org/10.1016/j.fpp.2024.100053>
4. Шкляр Д.Р., Артеха Н.С. Генерация квазиэлектростатических медленных необыкновенных волн каппа-распределением с конусом потерь // Физика плазмы. 2024. Т. 50. С. 1205--1221. <https://doi.org/10.31857/S0367292124100063>
5. Shklyar D.R., Titova E.E., Artekha N.S. Generation of UHR Waves as Inferred From Wave and Electron Flux Measurements by Van Allen Probes // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2025. V. 130. No. 6. e2025JA033815. <https://doi.org/10.1029/2025JA033815>
6. Artekha N.S., Shklyar D.R. Relativistic effects in the interaction of electrons with a slow extraordinary wave // Physics of Plasmas 2026. V. 33. No. 6. 062105. <https://doi.org/10.1063/5.0333261>

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

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»

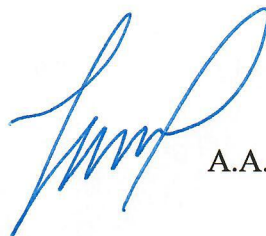
Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»: «Магнитосферы и ионосферы Земли, планет и экзопланет» и «Теоретические и экспериментальные исследования космической плазмы».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Артехи Натальи Сергеевны «Особенности распространения и резонансного взаимодействия с частицами электромагнитных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики космической плазмы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 9 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 9 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «22» сентября 2026 г.

Председатель НТС отдела 54 ИКИ РАН
академик РАН



А.А. Петрукович

Секретарь НТС отдела 54 ИКИ РАН



О.В. Сапунова