УТВЕРЖДАЮ
Проректор Национального
исследовательского университета
«Высшая школа экономики»
_____
к.э.н., доцент Рощин Сергей Юрьевич
«25» сентября 2026 г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**
**федерального государственного автономного**
**образовательного учреждения высшего образования**
**«Национальный исследовательский университет**
**«Высшая школа экономики»**

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» (далее - Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», НИУ ВШЭ).

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 обучается в очной аспирантуре Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» по научной специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия, образовательная программа «Физика и астрономия».

В период обучения в аспирантуре сданы кандидатские экзамены по истории и философии науки, иностранному языку и по специальной дисциплине 1.3.1 - Физика космоса, астрономия, что подтверждается протоколами сдачи кандидатских экзаменов.

В период подготовки диссертации соискатель ученой степени Артеха Наталья Сергеевна работала в отделе физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук в должности инженера с 01.11.2022 г. по 31.08.2025 г., ведущего инженера с 01.09.2025 г. по настоящее время.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Шкляр Давид Рувимович работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук в должности заведующего лабораторией.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

**Актуальность темы**

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 другие. 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, а проект MMS направлен на изучение процессов, протекающих в хвосте магнитосферы. 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, а именно 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 содержит анализ волновых процессов в плазме произвольной плотности, является актуальной для современных исследований волновых явлений в космической плазме.

**Научные положения диссертации**

1. Для случая свистовой волны, распространяющейся в плазме вдоль внешнего магнитного поля, выведено комплексное дисперсионное уравнение, не ограниченное условием малости инкремента волны по сравнению с её частотой. Выполнен численный расчёт инкремента свистовых волн на основе измерений дифференциальных потоков электронов на спутниках Van Allen Probe A и MMS, и при малых значениях плотности холодных частиц обнаружена немонотонная зависимость частоты от волнового числа и связанная с ней неоднозначная зависимость инкремента от частоты.
2. Получены и проанализированы дисперсионное соотношение, поляризационные характеристики и выражение для плотности энергии низкочастотных волн ($\omega_{LH} \ll \omega \ll \omega_c$) для произвольного соотношения между $\omega_p$ и $\omega_c$. Для свистовых волн в разреженной плазме ($\omega_p < \omega_c$) получено выражение для угла Жандрэна, определена максимальная частота волны, для которой такой угол существует, а также исследовано изменение угла Жандрэна и угла Стори в зависимости от параметров плазмы.
3. Получено общее выражение для линейного инкремента медленных необыкновенных волн, с учётом релятивистских эффектов, справедливое на всей плоскости (частота – угол волновой нормали), где существуют МН волны. Выполнены расчёты инкремента для функции распределения энергичных частиц в виде *κ*-функции с конусом потерь. Максимум инкремента отвечает частотам вблизи верхней гибридной частоты и углам волновой нормали вблизи $\pi/2$.
4. Наблюдаемое существенное возрастание спектральной интенсивности

верхнегибридных волн в областях, где частота верхнегибридного резонанса кратна электронной циклотронной частоте, объяснено возбуждением этих волн вследствие развития циклотронной неустойчивости на высоких циклотронных резонансах. Фиксируемые на спутнике спектральные особенности верхнегибридных волн хорошо согласуются с расчётами инкремента вдоль траектории спутников.

**Обоснованность научных положений**

Результаты, полученные в настоящей диссертации, опираются на решения фундаментальных уравнений электродинамики и физики плазмы (кинетического уравнения Больцмана – Власова и уравнений Максвелла). Обоснованность представленных теоретических результатов обеспечивается корректным решением используемых фундаментальных уравнений в рамках обоснованных физических приближений. Достоверность научных положений подтверждается применением различных проверенных математических и физических методов и подходов. Кроме того, обоснованность научных положений подтверждается согласием полученных теоретических результатов с экспериментальными данными.

**Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных 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. В частности, в рамках работы совместно с соавторами был предложен метод вычисления инкремента свистовых волн на основе спутниковых измерений без ограничения малости инкремента по сравнению с частотой волны, разработаны программы для вычисления инкрементов медленных необыкновенных волн, проанализированы дисперсионные характеристики низкочастотных волн в плазме, а также объяснены особенности спектра верхнегибридных волн. Положения, выносимые на защиту, основаны на работах из списка публикаций автора по теме диссертации. Результаты, представленные в диссертации, согласованы с соавторами.

**Степень достоверности результатов проведенных соискателем ученой степени исследований**

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. 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 работы**

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.

**Теоретическая значимость**

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.

**Практическая значимость результатов проведенных соискателем ученой степени исследований**

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.

**Апробация работы**

Основные тезисы работы апробированы на научных конференциях:

1. Шестнадцатая конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 8–12 февраля 2021 г. Тема доклада: «Кинетическое описание свистовых волн, распространяющихся в плазме вдоль магнитного поля».

2. Семнадцатая конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 7–11 февраля 2022 г. Тема доклада: «Волны с частотами ниже электронной гирочастоты и $\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}_0$ в «горячей» плазме».

3. Восемнадцатая конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 6–10 февраля 2023 г. Тема доклада: «Дисперсионные характеристики свистовых волн в разреженной ($\omega_p < \omega_c$) магнитоактивной плазме».

4. 46th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena». Россия, г. Апатиты, 13–17 марта 2023 г. Тема доклада: «Dispersion features of whistler-mode waves in low-density magnetoactive plasma».

5. XXXVth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Japan, Sapporo, 19–26 августа 2023. Тема доклада: «Dispersion and Polarization Features of Whistler-Mode Waves in Low-Density Plasma».

6. Девятнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 5–9 февраля 2024 г. Тема доклада: «Дисперсионные характеристики и поляризационные свойства низкочастотных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности».

7. Девятнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 5–9 февраля 2024 г. Тема доклада: «Приближенные формулы для показателя преломления электронных волн в плотной и разреженной плазме».

8. Двадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 10–14 февраля 2025 г. Тема доклада: «Инкремент медленных необыкновенных волн в плазме с каппа-распределением при наличии конуса потерь».

9. Двадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 10–14 февраля 2025 г. Тема доклада: «Механизм генерации верхнегибридных волн в плазмосфере Земли».

10. Двадцать первая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 9–13 февраля 2026 г. Тема доклада: «Резонансное взаимодействие медленных необыкновенных волн и релятивистских электронов в магнитоактивной плазме».

11. Двадцать первая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Россия, г. Москва, 9–13 февраля 2026 г. Тема доклада: «Особенности спектра верхнегибридных волн в магнитосфере Земли».

12. XXIII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Россия, г. Москва, 22–24 апреля 2026 г. Тема доклада: «Инкремент медленных необыкновенных волн с учетом релятивистских эффектов в магнитоактивной плазме».

13. XXIII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Россия, г. Москва, 22–24 апреля 2026 г. Тема доклада: «Investigation of the resonant interaction of electrons with a slow extraordinary wave at $N_{\parallel} = 1$».

**Полнота изложения материалов диссертации в публикациях**

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 6 работах общим объемом 9,77 п.л.; личный вклад автора составляет 4,57 п.л.

| **Научная публикация** | **Личный вклад** | **Публикация входит в** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК (Перечень), Категория (К 1/К 2/К3) | База данных RSCI | Международные базы данных и системы цитирования (Scopus/ Web of Science и др.) |
| 1. Кинетическое описание свистовой волны, распространяющейся в плазме вдоль магнитного поля / Артеха Н.С., Шкляр Д.Р. // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – С. 613–627. Перевод: Kinetic Description of a Whistler Wave Propagating in Plasma Along the Magnetic Field / Artekha N.S., Shklyar D.R. // Plasma Physics Reports. – 2022. – Vol. 48. – P. 754–767. | С соавт., авторский вклад – 0,94 п.л. | Да, К1 | Да | Scopus, Q2 |
| 2. Дисперсионные характеристики низкочастотных электронных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности / Артеха Н.С., Шкляр Д.Р. // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – С. 1127–1139. Перевод: Dispersion Characteristics of | С соавт., авторский вклад – 0,81 п.л. | Да, К1 | Да | Scopus, Q3 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Low-Frequency Electron Waves in a Magnetoactive Plasma of Arbitrary Density / Artekha N.S., Shklyar D.R. // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49. – P. 1309–1321. | | | | |
| 3. Генерация квазиэлектростатических медленных необыкновенных волн каппа-распределением с конусом потерь / Шкляр Д.Р., Артеха Н.С. // Физика плазмы. – 2024. – Т. 50. – С. 1205–1221.<br>Перевод: Generation of Quasi-Electrostatic Slow Extraordinary Waves by Kappa Distribution with a Loss Cone / Shklyar D.R., Artekha N.S. // Plasma Physics Reports. – 2024. – Vol. 50. – P. 1250–1264. | С соавт., авторский вклад – 1,06 п.л. | Да, К2 | Да | Scopus, Q4 |
| 4. Model expressions for refractive indices of electron waves in cold magnetoactive plasma of arbitrary density / Shklyar D.R., Artekha N.S. // Fundamental Plasma Physics. – 2024. – Vol. 10. – Art. 100053. | С соавт., авторский вклад – 0,25 п.л. | Да, К3 | Нет | Scopus, Q4 |
| 5. Generation of UHR Waves as Inferred From Wave and Electron Flux Measurements by | С соавт., авторский вклад – 0,63 п.л. | Да, К1 | Нет | Scopus, Q2 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Van Allen Probes / Shklyar D.R., Titova E.E., Artekha N.S. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2025. – Vol. 130, No. 6. – Art. e2025JA033815. | | | | |
| 6. Relativistic effects in the interaction of electrons with a slow extraordinary wave / Artekha N.S., Shklyar D.R. // Physics of Plasmas. – 2026. – Vol. 33, No. 6. – Art. 062105. | С соавт., авторский вклад – 0,88 п.л. | Да, К1 | Нет | Scopus, Q2 |

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения.

**Ценность научных работ соискателя ученой степени**

Ценность научных работ соискателя ученой степени заключается в их научной новизне, теоретической и практической значимости в рамках темы диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах. В них изложено логичное и завершённое исследование, подкреплённое содержательным анализом различных источников, а также большого массива спутниковых данных.

Диссертация Артехи Натальи Сергеевны на тему: «Особенности распространения и резонансного взаимодействия с частицами электромагнитных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности» – это законченная научно-квалификационная работа, которая соответствует требованиям пунктов 9, 10, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а также Паспорту научной специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия (отрасль науки – физико-математические), пункты 1, 11, 12.

Диссертация Артехи Натальи Сергеевны на тему: «Особенности распространения и резонансного взаимодействия с частицами электромагнитных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Заключение принято на заседании базовой кафедры физики космоса Института космических исследований Российской академии наук федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», протокол № 1 от «22» сентября 2026 г.

Присутствовало на заседании 22 человека. Участвовало в голосовании 8.

Результаты голосования:

«за» – 8 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек.

Заведующий базовой кафедрой физики космоса
Института космических исследований РАН
Факультета физики НИУ ВШЭ, профессор,
Директор ИКИ РАН, академик РАН Петрукович А.А.

