На правах рукописи



Артеха Наталья Сергеевна

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И РЕЗОНАНСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЧАСТИЦАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

Специальность:
1.3.1 – Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте Космических Исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН) и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальном Исследовательском Университете “Высшая Школа Экономики”

Научный руководитель:	**Шкляр Давид Рувимович** доктор физико-математических наук, профессор МФТИ, заведующий лабораторией отдела физики космической плазмы ИКИ РАН
Официальные оппоненты:	**Беспалов Пётр Алексеевич** доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (ИПФ РАН)
	Борисов Николай Дмитриевич доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится **18 декабря 2026 г. в 11 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 при ИКИ РАН, расположенном по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, подъезд А2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИКИ РАН, http://www.iki.rssi.ru/diss/2026/artekha.htm

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32, учёному секретарю диссертационного совета 24.1.481.01.

Автореферат разослан “_____” _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.481.01,
кандидат физико-математических наук А. Ю. Ткаченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Космическая плазма, представляя собой доминирующую форму видимой материи Вселенной [1], определяет условия распространения электромагнитных волн и их взаимодействия с частицами в космическом пространстве. Некоторые свойства космической плазмы могут быть исследованы прямыми измерениями с использованием космических аппаратов, другие могут быть смоделированы и изучены в лабораторных экспериментах. Кроме того, исследование плазмы может проводиться с помощью численного моделирования. Плазменные процессы в околоземном космическом пространстве регулярно проявляют себя, например, в виде регистрируемых когерентных хоровых волн, широкополосного плазмосферного хисса, а также приводят к наблюдаемым полярным сияниям [2] в ионосфере Земли в области аврорального овала. Последние вызваны взаимодействием заряженных частиц с верхними слоями атмосферы. Открытие важной особенности земной магнитосферы — радиационных поясов — стало возможным благодаря первым прямым измерениям в космосе. Радиационные пояса — это области, в которых магнитное поле Земли удерживает высокоэнергичные заряженные частицы, в первую очередь электроны и протоны. Эти зоны с повышенной радиационной активностью (при их пересечении) могут оказывать негативное влияние на всё живое и на оборудование космических аппаратов. По сути, околоземное космическое пространство представляет собой сложную динамичную систему, где взаимодействуют излучение Солнца, межпланетная среда, магнитное поле Земли и верхние слои её атмосферы. Генерируемые в космической плазме возмущения и волны могут влиять на работу наземных и спутниковых систем связи. Поэтому понимание происходящих плазменных процессов имеет не только фундаментальное научное, но и важнейшее прикладное значение для обеспечения безопасности спутниковых группировок, пилотируемой космонавтики и наземных технологических систем.

Основной набор экспериментальных научных данных о магнитном поле, параметрах космической плазмы и протекающих волновых процессах в Солнечной системе (включая магнитосферы Земли, Юпитера, Сатурна) был получен в многочисленных космических миссиях [3–6], таких как спутники серий Спутник, Explorer, Alouette, Космос, Интеркосмос, аппаратами Луна, Pioneer, Voyager, Araks, Juno, Cassini, Apex, Интербол, Cluster, THEMIS, SWARM, RBSP/Van Allen Probes, ERG/Arase, MMS, Ионосфера-М и других, а также в экспериментах на борту орбитальных станций. Космические миссии не только предоставляют богатый материал для исследований, но и стимулируют дальнейшее развитие теории, численных методов и экспериментальной техники.

Плазму во многих областях магнитосферы Земли и других планет Солнечной системы можно считать бесстолкновительной магнитоактивной средой. Довольно часто плазму можно представить состоящей из двух компонент: относительно плотной “холодной” (“фоновой”) компоненты с плотностью $n^{(c)}$, определяющей дисперсию волн, и “горячей” компоненты малой плотности $n^{(h)}$, определяющей затухание или усиление волн, но мало влияющей на их дисперсию. В

отсутствие последнего предположения, исследование дисперсионных характеристик и инкрементов волн является гораздо более сложной задачей, которая для электростатических электронно-циклотронных волн детально исследована в работах [7; 8]. Аналогичная задача для свистовых волн, распространяющихся вдоль внешнего магнитного поля, рассмотрена во второй главе диссертации.

Как известно, в холодной магнитоактивной плазме существует пять волновых мод, для которых топология показателя преломления N зависит от отношения электронной плазменной частоты ω_p к электронной гирочастоте ω_c. Поскольку ионы не влияют на дисперсию волн в частотном диапазоне много выше нижнегибридной частоты ω_{LH}, то есть, при $\omega \gg \omega_{\text{LH}}$, то волны с такими частотами называются электронными волнами. К ним относятся 4 моды: свистовая, медленная необыкновенная, обыкновенная и быстрая необыкновенная моды, которых и касаются исследования данной диссертации; при этом резонансное взаимодействие рассматривается только для свистов и медленных необыкновенных волн, для которых $N > 1$.

Низкочастотные электронные волны, распространяющиеся в ионосфере и магнитосфере Земли и других планет, являются распространённым волновым явлением в космической плазме [9–13]. Волны свистовой моды оказывают заметное влияние на динамику космической плазмы, в том числе, играют существенную роль в процессах ускорения заряженных частиц в радиационных поясах [14–17]. Вследствие этого, проблема исследования свистовых волн до сих пор сохраняет свою актуальность [18; 19]. Поскольку в большей части плазмосферы Земли плазма является плотной (электронная плазменная частота много больше циклотронной частоты), то большинство результатов по исследованию свистовой моды получено для случая плотной плазмы [9]; среди них: явные выражения для показателя преломления, закона дисперсии, плотности энергии, поляризационных коэффициентов, угла Стори (угла волновой нормали θ, соответствующего максимальному отклонению групповой скорости низкочастотных свистов от направления внешнего магнитного поля $\mathbf{B}_0$) [20], угла Жандрэна (ненулевого угла волновой нормали свистовых волн, при котором групповая скорость направлена вдоль $\mathbf{B}_0$) [21], явления нижнегибридного отражения, приводящего к формированию магнитосферно-отражённых свистов [22].

Тем не менее, также существуют области магнитосферы Земли, например, авроральная область, где плазма является разреженной, т.е. где электронная плазменная частота меньше циклотронной. Подобная ситуация может реализоваться и у других планет. Так, по данным миссий Voyager 1 и 2 [3] такая область была обнаружена у Юпитера на расстояниях $18.5R_{\text{ю}} < R < 22.5R_{\text{ю}}$. Современные данные, полученные космическими миссиями Juno в магнитосфере Юпитера [23; 24] и Cassini в магнитосфере Сатурна [25], подтверждают существование таких областей. Это, например, лобы магнитодиска Юпитера и авроральные области, где присутствуют сильные магнитные поля Юпитера и Сатурна, в то время как плотность плазмы достаточно мала. Таким образом, изучение волн в разреженной плазме, помимо чисто теоретического интереса,

может иметь и свои практические приложения к волновым процессам в космической плазме [16], включая околоземное пространство. В данной диссертации также уделяется внимание изучению этого вопроса.

Помимо свистовых волн значительная часть диссертации посвящена исследованию медленных необыкновенных (МН) волн. МН волны включают верхнегибридные волны, которые являются одним из наиболее часто наблюдаемых волновых явлений в магнитосфере Земли [26; 27]. Верхнегибридные волны наблюдаются также в магнитосферах других планет [28; 29]. Механизмы генерации верхнегибридного излучения до сих пор являются предметом исследований.

Заметную часть настоящей диссертации составляет исследование резонансного взаимодействия волн и частиц – одного из фундаментальных процессов в космической плазме (см. [18] и имеющиеся там ссылки). Упомянем некоторые ключевые моменты в развитии представлений о резонансном взаимодействии волн и частиц в плазме, начиная с классических работ [30; 31], посвящённых ленгмюровским волнам. Система уравнений, включающая кинетическое уравнение Больцмана – Власова с самосогласованным полем и уравнения Максвелла, является нелинейной. Однако в работе [31] система уравнений решалась в линейном приближении по полю. Предложенный линейный подход был позднее обобщён и применён к волновым модам в магнитоактивной плазме, в том числе, к свистовым волнам [32]. Более того, важнейшим результатом дальнейших исследований стало обнаружение кинетических неустойчивостей в случае неравновесного распределения заряженных частиц плазмы по скоростям.

В общем случае резонансные условия можно записать в следующем виде: $v_{\parallel} = (\omega - n\omega_c/\gamma)/k_{\parallel}$, где $v_{\parallel}$ – параллельная составляющая скорости электрона, γ – релятивистский фактор, $k_{\parallel}$ – продольная составляющая волнового вектора $\mathbf{k}$, n – номер циклотронного резонанса. Из данного выражения видно, что резонансные скорости могут быть значительно меньше скорости света c, когда $N = kc/\omega \gg 1$. В результате, в этом случае реализуются более благоприятные условия для резонансного взаимодействия, так как чем меньше резонансные скорости, тем большим окажется количество резонансных частиц (хотя в случае неустойчивых распределений в некоторой области фазового пространства может реализоваться противоположная ситуация). При частотах намного выше нижнегибридной частоты существуют две волновые моды, для которых может выполняться условие $N \gg 1$: свистовая мода и медленная необыкновенная (МН) мода, которую во многих публикациях называют Z-модой.

Исследованию резонансного взаимодействия свистовых волн и частиц в космической плазме посвящено большое число работ. Укажем здесь две обзорные статьи [33; 34], где можно, в том числе, найти ссылки на многие оригинальные исследования. Резонансным эффектам для МН-моды также посвящено достаточно большое количество работ (см., например, [35–37] и имеющиеся там ссылки). Отметим статью [38], где анализируется устойчивость кольцевого распределения электронов по отношению к возбуждению квазиэлектростатических верхнегибридных волн, а также свистовых волн вблизи электронной циклотрон-

ной частоты. В данной диссертации при исследовании квазиэлектростатических МН волн вместо кольцевого распределения используется функция распределения вида каппа-функции с конусом потерь. В случае, когда волна возбуждается в результате взаимодействия с частицами на одном из циклотронных резонансов, а частота волны совпадает с частотой верхнего гибридного резонанса, говорят о двойном плазменном резонансе. Подобный случай тоже рассматривается в настоящей диссертации.

Таким образом, приведённый выше краткий анализ современного состояния проблем, затрагиваемых в настоящей диссертации, свидетельствует, что теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий волн и частиц позволили достичь значительных успехов в понимании динамики магнитосферной плазмы. Тем не менее, ряд вопросов оставался не до конца прояснённым, например, вопросы, связанные с изучением свойств разреженной плазмы, с проблемами нелинейного резонансного взаимодействия заряженных частиц и различных типов волн, а также генерацией волн в условиях неоднородной магнитосферной плазмы. Некоторые из этих вопросов анализируются в данной диссертации.

Актуальность темы 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 другие. В ряде указанных экспериментов проводились и проводятся многокомпонентные волновые измерения в широком диапазоне частот, а также измерения дифференциальных потоков заряженных частиц в широком диапазоне энергий, с учётом зависимости этих потоков от питч-угла частиц. Волновые данные с высоким временным разрешением, а также данные по дифференциальным потокам частиц с высоким разрешением по энергии и питч углу стали доступны лишь в последние 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, 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.

Цели и задачи работы:

1. Получить приближённые аналитические выражения для показателей преломления электронных волновых мод в магнитоактивной плазме, справедливые в широкой области параметров плазмы.

2. В случае свистовой волны, распространяющейся вдоль магнитного поля, вывести общее выражение для дисперсионного уравнения с учётом резонансных частиц, не ограниченное малостью инкремента волны по сравнению с частотой, и разработать численный метод расчёта инкремента неустойчивости по экспериментально измеряемым дифференциальным потокам энергичных частиц.

3. Получить в явном виде дисперсионное соотношение для частоты волны как функции волнового вектора и параметров плазмы в диапазоне частот $\omega_{\text{LH}} \ll \omega \ll \omega_c$ (которое обычно задаётся уравнением 4-го порядка для показателя преломления N), а для случая разреженной плазмы $\omega_p < \omega_c$ исследовать выражения для угла Жандрэна и угла Стори.

4. Получить выражение для инкремента медленной необыкновенной волны, распространяющейся в плазме под произвольным углом к внешнему магнитному полю, с учётом релятивистских эффектов.

5. Объяснить особенности спектра верхнегибридных волн, наблюдаемых на спутниках в магнитосфере Земли, в частности, заметное возрастание интенсивности верхнегибридных волн в областях, где частота верхнегибридного резонанса кратна электронной циклотронной частоте.

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 [5] и MMS [6]. В работе получены следующие новые результаты:

1. 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.

2. Для разреженной плазмы получена формула, определяющая угол Жандрэна. Определена частота волны, ограничивающая область существования такого угла.

3. 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.

4. 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 и практическая значимость

Метод расчёта инкремента, представленный во второй главе, имеет как теоретическое, так и практическое значение, поскольку он не ограничен условием малости инкремента волны по сравнению с частотой и применим для функций распределения, восстанавливаемых численно на основе спутниковых данных по дифференциальным потокам энергичных частиц. Полученные в рамках диссертационного исследования результаты первой и третьей главы, касающиеся дисперсионных свойств плазмы, имеют теоретическое и практическое значение для широкого круга задач, связанных с волновыми явлениями в космической плазме. В четвёртой главе на основе методов гамильтоновой механики изначально двумерная система уравнений движения резонансных частиц в поле квазимонохроматической волны и внешнем магнитном поле сведена к одномерной системе в приближении изолированных резонансов. Это существенно упрощает решение задачи, уменьшает объём численных вычислений и позволяет свести вычисления инкремента волны к исследованным ранее случаям [39]. Использованный подход может быть применён при решении различных задач, связанных с резонансным взаимодействием волн и частиц в магнитоактивной плазме. Пятая глава представляет собой непосредственное практическое приложение результатов четвёртой главы к интерпретации максимумов спектральной интенсивности верхнегибридных волн, обнаруженных по спутниковым измерениям.

Исследование взаимодействия заряженных частиц и волн представляет большой теоретический и практический интерес. Данные вопросы тесно связаны с проблемой определения наиболее вероятной области возбуждения волн в магнитосфере, с проблемой распространения волн, с проблемой объяснения особенностей спектров и т.п. Теоретическая и практическая значимость результатов настоящей диссертации определяется возможностью их использования широким кругом специалистов, занимающихся изучением физических свойств плазмы, в том числе космической. Результаты диссертации могут быть использованы для дальнейшего развития методов исследования космической плазмы, обработки и интерпретации экспериментальных данных, полученных космическими аппаратами, проектирования будущих космических экспериментов.

Методы исследования и достоверность результатов

Результаты, полученные в настоящей диссертации, опираются на решения фундаментальных уравнений электродинамики и физики плазмы (кинетического уравнения Больцмана – Власова и уравнений Максвелла). Исследования носят преимущественно теоретический характер, при этом также используется численное моделирование, а результаты сопоставляются с экспериментальными данными, полученными из измерений на космических аппаратах. Достоверность представленных теоретических результатов обеспечивается корректным решением используемых фундаментальных уравнений в рамках обоснованных физических приближений, а также соответствием теоретических выводов имеющимся экспериментальным данным. Для решения поставленных задач применяются различные методы и подходы. В частности, во второй главе используются метод линеаризации кинетического уравнения, преобразования Фурье – Лапласа и методы теории функции комплексной переменной. Аналитическое продолжение функции, определяющей дисперсионное уравнение, является центральным моментом в данной главе; при этом метод аналитического продолжения основан на принципе непрерывности. В третьей главе при выводе дисперсионного уравнения для низкочастотных волн используется разложение по малому параметру: отношению частоты к электронной гирочастоте. В четвёртой главе используется метод усреднения гамильтоновых уравнений, приводящий к приближению изолированных резонансов. Это позволяет понизить порядок решаемой системы уравнений движения: перейти от двумерной системы к одномерной. В четвёртой главе используется закон сохранения энергии и закон сохранения фазового объёма (теорема Лиувилля) для вычисления инкремента. Во втором параграфе четвёртой главы при решении кинетического уравнения используется метод характеристик, что сводится к решению уравнений движения частиц в заданном поле волны и внешнем магнитном поле. При этом используется дипольная модель внешнего магнитного поля, гиротропная модель плотности холодных частиц, а также моделирование функции распределения каппа-функцией с конусом потерь. В последующих параграфах четвёртой главы используются общие релятивистские уравнения движения электрона в поле медленной необыкновенной волны и приближение заданного поля для расчёта инкремента.

При проведении количественных расчётов в диссертационном исследовании использованы программные среды MATLAB и Wolfram Mathematica, с помощью которых реализованы используемые численные методы.

Основные положения, выносимые на защиту:

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 ($\omega_{\text{LH}} \ll \omega \ll \omega_c$) для произвольного соотношения между ω_p и ω_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.

Апробация результатов исследования

Основные результаты работы докладывались на научных семинарах по физике космической плазмы и на следующих конференциях:
- “Физика плазмы в солнечной системе”, г. Москва, ИКИ РАН, 2021–2026 гг.
- 46th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, г. Апатиты, ПГИ, 2023 г.
- XXXVth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Саппоро, Япония, 2023 г.
- XXIII конференция молодых учёных “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, г. Москва, ИКИ РАН, 2026 г.

Личный вклад автора

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.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 165 наименований. Полный объём диссертации составляет 159 страниц машинописного текста, включая 45 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цели и задачи работы, излагается научная новизна проведённого исследования, его теоретическая и практическая значимость, указываются методы исследования и достоверность результатов, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения о публикациях автора и описываются структура и объём диссертации.

В **главе 1** приводятся сведения, которые используются в последующих главах, в том числе, основные уравнения и теоретические подходы, а также основные соотношения для волн в холодной магнитоактивной бесстолкновительной плазме. Так, в **разделе 1.1** представлена нелинейная система уравнений, включающая кинетическое уравнение Больцмана – Власова с самосогласованным полем и уравнения Максвелла, даётся понятие о способах линеаризации кинетического уравнения (линейное приближение и приближение заданного поля) при расчёте инкремента, а в **разделе 1.2** даются понятия о волновых модах, области их существования, поляризационных характеристиках, плотности энергии, приводятся дисперсионные свойства холодной магнитоактивной бесстолкновительной плазмы. В **разделе 1.3** предложены приближённые аналитические выражения для показателей преломления электронных волновых мод в магнитоактивной плазме, которые не содержат радикалов, применимы в широком диапазоне частот, углов волновой нормали и параметров плазмы и могут быть полезны для оценок и приближённых расчётов.

Вторая глава посвящена кинетическому описанию свистовой волны, распространяющейся в плазме вдоль внешнего магнитного поля. В данной главе исследуется резонансное взаимодействие волны с энергичными электронами. Развит подход, при котором одновременно действительная и мнимая часть частоты может быть вычислена при произвольном соотношении между ними (вектор $\mathbf{k}$ задан). При этом функция распределения электронов не разделяется на

плотную холодную и разреженную энергичную составляющие и может быть задана численно, из спутниковых измерений дифференциальных потоков частиц. Предложенный подход применён к данным измерений потоков электронов на спутниках Van Allen Probe A и MMS. В **разделе 2.1** производится вывод замкнутой системы двух уравнений, позволяющей самосогласованным образом определить электромагнитное поле волны и возмущение функции распределения. В **разделе 2.2**, в результате сведения изначально двумерной задачи к одномерной, получено дисперсионное уравнение для свистовых волн $D(\omega;k)=0$ для комплексной частоты $\omega=a+ib$ как функции волнового числа k:

$$D(\omega;k)=1-\frac{\omega^2-\omega_p^2}{k^2c^2}+\frac{4\pi e^2}{mk^2c^2}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{Q\left(v_\parallel\right)}{v_\parallel-(\omega-\omega_c)/k}dv_\parallel\ ,$$

где $Q\left(v_\parallel\right)=dg/dv_\parallel-(\omega_c/k)f_{0\parallel}$,

$$g(v_\parallel)=\pi\int_0^\infty v_\perp^3 f_0(v_\perp,v_\parallel)dv_\perp\ ,\quad f_{0\parallel}(v_\parallel)=2\pi\int_0^\infty v_\perp f_0(v_\perp,v_\parallel)dv_\perp\ ,$$

$f_0(v_\perp,v_\parallel)$ – невозмущённая функция распределения. Используя принцип непрерывности для аналитического продолжения функции, получено выражение для интеграла, применимое во всей комплексной плоскости и пригодное для численного счёта:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{Q(v_\parallel)dv_\parallel}{v_\parallel-(\omega-\omega_c)/k}=\left(\int_{v_\mathrm{R}-A}^{v_\mathrm{R}-\delta v}+\int_{v_\mathrm{R}+\delta v}^{v_\mathrm{R}+A}\right)\frac{Q(v_\parallel)(v_\parallel-v_\mathrm{R}+ib/k)dv_\parallel}{(v_\parallel-v_\mathrm{R})^2+b^2/k^2}+$$
$$+2iQ(v_\mathrm{R})\mathrm{arctg}\left(\frac{k\delta v}{b}\right)+\pi iQ\left(v_\mathrm{R}+i\frac{b}{k}\right)\left[1-\mathrm{sign}\left(\frac{1}{b}\right)\right],$$

$v_\mathrm{R}=(a-\omega_c)/k$. В **разделе 2.3** развитый подход расчёта инкремента свистовых волн продемонстрирован на двух примерах на основе данных спутников Van Allen Probe A (измерения проводились в экваториальной области внутренней магнитосферы на $L=3.21$) и MMS (измерения проводились в хвосте магнитосферы, на расстоянии $\sim 17\ R_з$). В первом случае предложенный подход даёт результаты, подобные тем, которые получаются при вычислении инкремента в предположении "холодной" дисперсии и малого инкремента. Во втором случае результат сильно зависит от плотности холодных частиц (которая не определяется из данных). Так, при малых значениях плотности "холодной" компоненты плазмы возникает немонотонная зависимость ω от $\mathbf{k}$ и связанная с ней неоднозначная зависимость декремента от ω. Это хорошо видно на Рисунках 1 и 2, которые относятся к результатам расчёта дисперсионных характеристик и декрементов при нулевой плотности холодных частиц. С увеличением числа холодных частиц картина изменяется: начиная с некоторого значения плотности холодной компоненты вторая мода отсутствует. При этом реальная часть ω и k становятся взаимно однозначными функциями, в результате инкремент

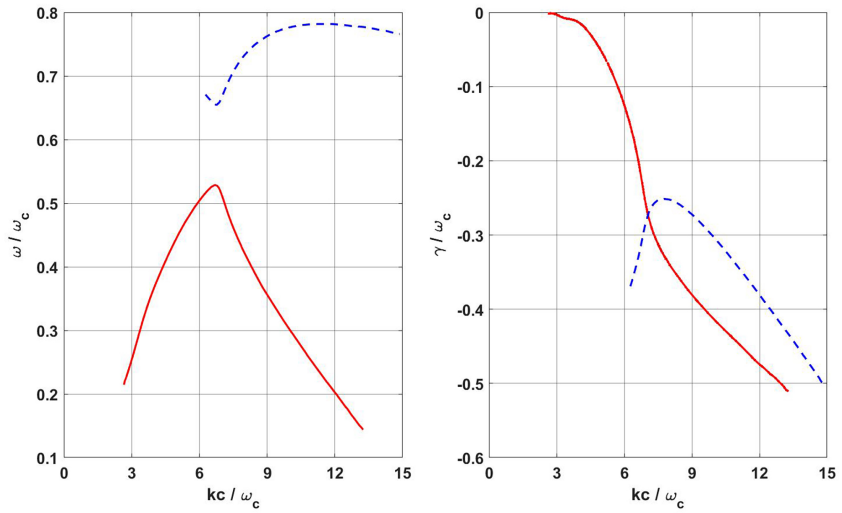


Рисунок 1 – Зависимости частот обеих ветвей колебаний (левый график) и декрементов (правый график) от волнового вектора по данным спутника MMS; низкочастотной и высокочастотной ветвям отвечают соответственно сплошная и штриховая линии

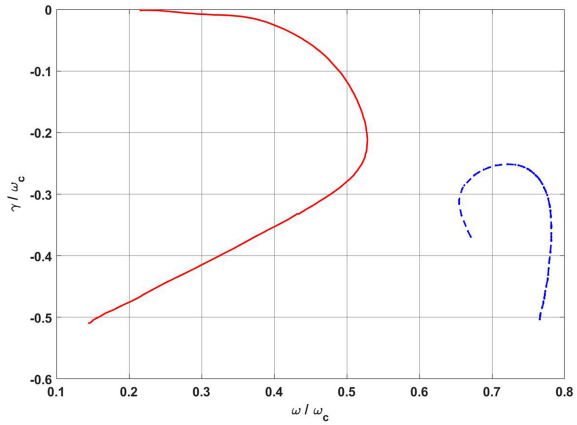


Рисунок 2 – Декременты двух волновых мод как функции частоты, соответствующие Рисунку 1; неоднозначная зависимость $\gamma(\omega)$ для обеих ветвей связана с немонотонной зависимостью $\omega(k)$

становится однозначной функцией частоты. Результаты вычислений для отношений плотности холодных частиц к плотности горячих частиц $n^{(c)}/n^{(h)} = 3$ и $n^{(c)}/n^{(h)} = 5$ приведены на Рисунке 3 сплошной и штриховой линиями, соответственно. В **разделе 2.4** изложены основные выводы Главы 2.

В **третьей главе** анализируются дисперсионные и поляризационные характеристики низкочастотных электронных волн в холодной бесстолкновительной магнитоактивной плазме произвольной плотности. В **разделе 3.1** представлено дисперсионное уравнение в явном виде для ω как функции $\mathbf{k}$ и отношения $p = \omega_p/\omega_c$, справедливое при любом p. Это выражение имеет форму бикубиче-

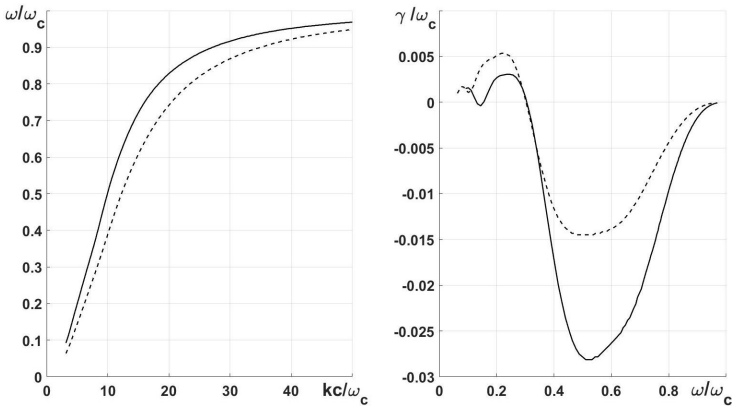


Рисунок 3 – Частота волны как функция волнового числа (левый график) и инкремент как функция частоты (правый график); сплошная линия отвечает $n^{(c)}/n^{(h)} = 3$, а штриховая линия – отношению $n^{(c)}/n^{(h)} = 5$

ского уравнения относительно частоты волны:

$$F^6\left(1+p^2\right)^2 - F^4\left[\left(1+p^2\right)^2 + p^2 + 2\left(q_1+q_2\right)\left(1+p^2\right) + q_1p^2\left(1+p^2\right)\right] + F^2 \times$$
$$\times\left[\left(q_1+q_2\right)^2 + p^2q_1\left(q_1+q_2\right) + \left(q_1+q_2\right)\left(1+2p^2\right) + q_2 + p^2\right] - q_2\left(q_1+q_2\right) = 0,$$

где $F = \omega/\omega_p$, $q_1 = k_\perp^2c^2/\omega_p^2$, $q_2 = k_\parallel^2c^2/\omega_p^2$. Представлен алгоритм, позволяющий соотнести 3 его решения к соответствующим волновым модам. Дисперсионные характеристики низкочастотных электронных волн исследуются в **разделе 3.2**, при этом особое внимание уделяется случаю разреженной плазмы ($\omega_p < \omega_c$). Исследованы поляризация электрического и магнитного поля, плотность энергии. Для свистовых волн исследовано изменение угла Жандрэна и угла Стори в зависимости от параметров плазмы. Получено выражение для квадрата косинуса угла Жандрэна:

$$\cos^2\theta_{\text{G}} = \frac{F^2}{\left(1+p^2F^2\right)\left(F^2p^2 - p^2 + F^4\left(1+p^2-p^6\right) + F^6p^2\left(1+p^2\right)^3\right)} \times$$
$$\times\left[\left(1+p^2\right)\left(F^2\left(1+4p^2\right) + 2F^4p^4 + F^6p^4\left(1+p^2\right)^2 - 2p^2\right) -\right.$$
$$\left. - \left(1+2p^2 - F^2\left(2+3p^2+p^4\right)\right)\sqrt{\left(1-F^2\right)\left(p^2+p^4\right)\left(1+F^2p^2+F^4p^4\right)}\right].$$

На Рисунке 4 представлены зависимости $\cos\theta_{\text{G}}$ от нормированной частоты F для значений $p = 0.1, 0.7$ и 7 (т.е. и для разреженной, и плотной плазмы). Асимптотические зависимости при $p \ll 1$ и $p \gg 1$ изображены соответственно штриховой и штрихпунктирной линиями. Из графика видно, что с увеличением величины p уменьшается область частот, где существует угол Жандрэна. Найдена предельная частота существования угла Жандрэна:

$$\omega_{\max}^2 = \frac{4+3p^2-p\sqrt{8+5p^2}}{2\left(4+4p^2+p^4\right)}\omega_p^2.$$

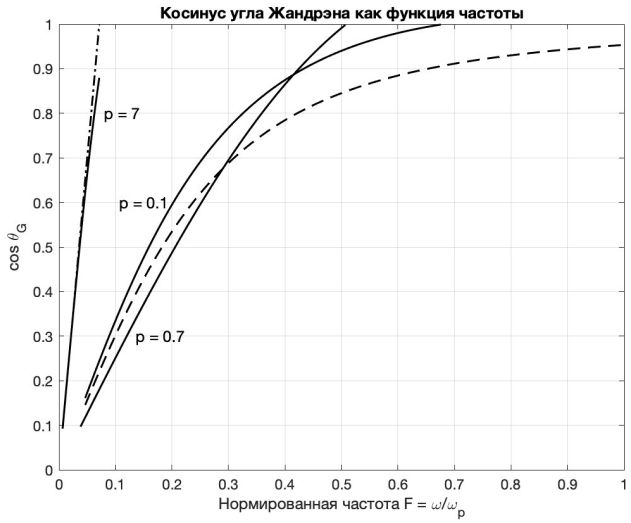


Рисунок 4 – Зависимости косинуса угла Жандрэна от безразмерной частоты при $p = 0.1, 0.7$ и 7 показаны сплошными линиями, а асимптотические зависимости для случая $p \ll 1$ и $p \gg 1$ изображены соответственно штриховой и штрихпунктирной линиями

Наличие угла Жандрэна — это необходимое и достаточное условие существования угла Стори. Выводы к главе излагаются в **разделе 3.3**.

Четвёртая глава посвящена теоретическому анализу процесса генерации медленных необыкновенных волн в магнитосфере Земли. В **разделе 4.1** суммируются основные свойства МН волн, такие как поляризационные характеристики и дисперсионные свойства, включая групповую скорость. В **разделе 4.2** производится вычисление инкремента неустойчивости квазиэлектростатических МН волн в релятивистском случае с учётом неоднородности плазмы и внешнего магнитного поля в предположении, что функция распределения энергичных электронов, выраженная через интегралы движения, имеет вид κ-функции с конусом потерь. Вычисление инкремента опирается на закон сохранения энергии в системе волна – кинетическая энергия резонансных электронов, а энергия волны включает как энергию электромагнитного поля, так и колебательную энергию нерезонансных электронов. В приближении изолированных резонансов выражение для инкремента квази-электростатической МН волны имеет вид ($\gamma_{\text{L}} = \sum \gamma_{\text{L}n}$) :

$$\gamma_{\text{L}n} = \frac{\pi^{1/2}}{4} \frac{(eE_0 m\omega)^2}{|k_\parallel| k^2 U} \frac{n_{eq}}{(mc)^3 P_{\text{T}} M_{\text{T}}} \frac{\Gamma(\kappa + l + 1)}{\kappa^{l+3/2} \Gamma(l+1)\Gamma(\kappa - 1/2)} g_{\text{L}n} \,,$$

$$g_{\text{L}n} = \int_{P_{min}}^{\infty} dP\, \gamma^2 J_n^2(\rho) \left(\frac{M_{rn}}{M_{\text{T}}}\right)^{l-1} \left(1 + \frac{P^2}{\kappa P_{\text{T}}^2} - \frac{M_{rn}}{\kappa M_{\text{T}}} A_{\text{T}}\right)^{-(\kappa+l+2)} \times$$

$$\times \left\{ \frac{nP\omega_{ceq}}{\omega\gamma} \left[\left(1 + \frac{P^2}{\kappa P_{\text{T}}^2} - A_{\text{T}} \frac{M_{rn}}{\kappa + M_{\text{T}}}\right) \frac{l}{M_{\text{T}}} \frac{A_{\text{T}}(\kappa + l + 1) M_{rn}}{\kappa M_{\text{T}}^2} \right] -\right.$$

$$-\frac{2P}{\kappa P_{\text{т}}^2}\frac{(\kappa+l+1)M_{rn}}{M_{\text{т}}}\Bigg\}\ .$$

Здесь $P=p/(mc),\ P_{\text{т}}=p_{\text{т}}/(mc),\ M=\mu\omega_{ceq}/\left(mc^2\right),\ M_{\text{т}}=\mu_{\text{т}}\omega_{ceq}/\left(mc^2\right),$

$$\rho=N\sin\theta\left(\frac{2M\omega^2}{\omega_c\omega_{ceq}}\right)^{1/2},\ \mu_{\text{т}}=\frac{p_{\perp\text{т}}^2}{2m\omega_{ceq}},\ A_{\text{т}}=\frac{p_{\perp\text{т}}^2}{p_{\parallel\text{т}}^2}-1\ ,$$
$$M_{rn}=\mu_{rn}\frac{\omega_{ceq}}{mc^2},\ \mu_{rn}(p)=\frac{p^2-p_{rn}^2}{2m\omega_c},\ p_{rn}\equiv\frac{m(\omega\gamma-n\omega_c)}{k_\parallel},$$

где e – заряд электрона, m – его масса, E_0 – амплитуда волны, $\Gamma(z)$ – Гамма-функция, J_n – функция Бесселя первого рода порядка n, κ – основной параметр каппа-распределения, l – параметр конуса потерь, $\mathbf{p}$ – релятивистский импульс, $p_{\text{т}}\equiv p_{\parallel\text{т}}$, $p_{\parallel\text{т}}, p_{\perp\text{т}}$ – соответствующие характерные "тепловые" значения, μ – магнитный момент, ω_{ceq} – экваториальная циклотронная частота, $A_{\text{т}}$ описывает анизотропию распределения, n_{eq} – плотность частиц на экваторе. Входящая в выражение для $\gamma_{\text{L}n}$ плотность энергии волны U есть

$$U=\frac{E_0^2}{8\pi}\left\{\left[1+\frac{\omega_p^2\omega_c^2}{(\omega_c^2-\omega^2)^2}\right]\sin^2\theta+\cos^2\theta\right\}\ .$$

На Рисунке 5 показаны результаты расчёта инкремента МН волн и приведены

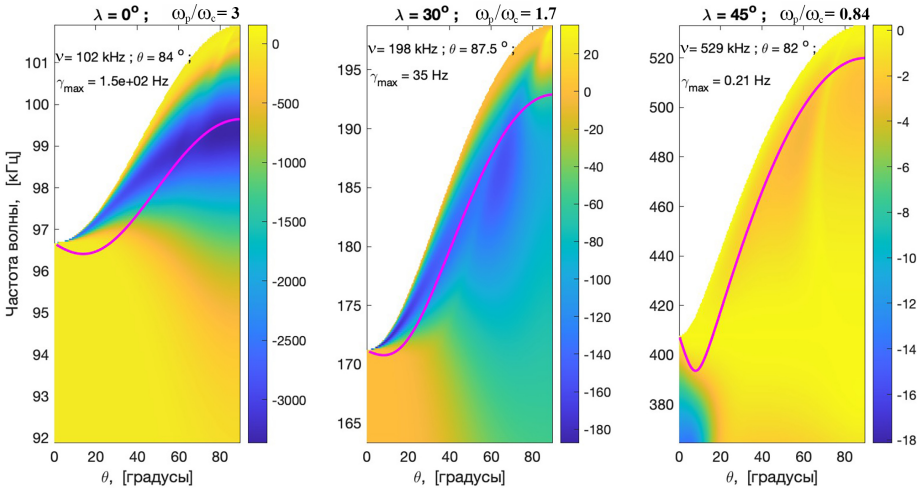


Рисунок 5 – Зависимость инкремента МН волны от частоты и угла распространения на L-оболочке $L=3$ для значений широты $\lambda=0°,\ 30°$ и $45°$

значения частоты и θ, соответствующие максимальному инкременту МН волн на всей плоскости (θ,ω), и величина этого максимума (в данной точке). Далее исследована зависимость полученного инкремента от параметров функции распределения горячих частиц плазмы $(T,\kappa,l,A_{\text{т}})$ и от плотности холодных частиц. Максимум инкремента достигается на частотах вблизи верхнегибридной частоты и при углах волновой нормали, близких 90°. Показано, что зависимость

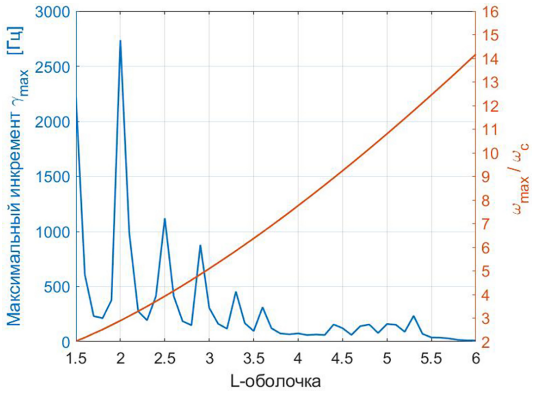


Рисунок 6 – Зависимость максимального инкремента МН волн на экваторе (левая шкала) и отношения частоты максимума инкремента к локальной циклотронной частоте (правая шкала) от L для $l = 1\,;\;\; A_{\text{т}} = 1\,;\;\; n_{eq}^{(h)} = 0.01 \cdot n_{eq}^{(c)}\,;\;\; T = 25$ кэВ

инкремента МН волн от относительной частоты ω/ω_c носит не монотонный, а квазипериодический характер, причём максимумы инкремента наблюдаются вблизи гармоник электронной циклотронной частоты $\omega \simeq n\omega_c$. Этот факт объясняется тем, что в данном случае резонансный импульс, отвечающий n-ому циклотронному резонансу, имеет наименьшее по модулю значение. Так как κ-распределение убывает с увеличением продольного импульса, то число резонансных электронов увеличивается с уменьшением импульса. В результате добавка в инкремент именно от n-го циклотронного резонанса превалирует над вкладами от других циклотронных резонансов. Рисунок 6 демонстрирует, что максимумы инкремента МН волн на оболочках $L \simeq 2, 2.5, 2.8$ и далее связаны с циклотронными резонансами $n = 3, 4, 5$ и так далее. Также обнаружена немонотонная зависимость максимального инкремента МН волны от анизотропии функции распределения. В последующих разделах данной главы излагается более общий подход к вычислению инкремента МН волн. В **разделе 4.3** выведены и проанализированы уравнения движения релятивистских электронов в поле МН волны, распространяющейся под произвольным углом к внешнему магнитному полю. В приближении изолированных резонансов изначально двумерная система уравнений сведена к одномерной:

$$\frac{d\xi_n}{dt} = u_n,\;\; \frac{du_n}{dt} = -\frac{s}{\tau_n^2}\cos\xi_n,\;\; s = \operatorname{sign}\left[\left(\frac{k_\parallel^2 c^2}{\omega^2} - 1\right) V_{rn}\right],$$

$$\frac{1}{\tau_n^2} = \left|\frac{e|E|\omega}{mc\gamma_{rn}}\left(\frac{k_\parallel^2 c^2}{\omega^2} - 1\right) V_{rn}\right|,\;\; V_n = \left(\frac{v_\parallel}{c}a_z + \frac{n\omega_c}{\gamma k_\perp c}\right) J_n(\rho) - \frac{v_\perp}{c}\frac{\varepsilon_2}{N^2 - \varepsilon_1} J_n'(\rho),$$

где ξ_n — резонансная фаза, a_z – z-компонента вектора поляризации, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – компоненты тензора диэлектрической проницаемости. Индекс "rn" в выражении V_{rn} означает, что все входящие туда величины следует заменить на их резонансные значения. Детальный анализ резонансных условий и интегралов движения резонансных частиц проведён в **разделе 4.4**. В **разделе 4.5** определяются

условия применимости одномерной системы уравнений, переход к которой от точных уравнений был сделан на основе двух предположений: о применимости приближения изолированных резонансов и о возможности замены импульсов в правой части уравнения для u_n на их резонансные значения. Эти условия имеют вид:

$$\frac{\gamma_{rn}}{\omega_c \tau_n} \equiv \frac{\gamma_{rn}}{\omega_c \tau_0} \frac{|k_\parallel^2 c^2 - \omega^2|^{1/2}}{\omega} \ll 1 \ , \ \frac{n k_\perp c^2 \sqrt{m}}{\sqrt{2\mu\omega_c}\, |k_\parallel^2 c^2 - \omega^2|^{1/2}} \frac{\gamma_{rn}}{(\omega\tau_0)} \ll 2\pi \ .$$

В **разделе 4.6** проводится непосредственное вычисление линейного инкремента МН волн с учетом релятивистских эффектов. Это вычисление основано на выявленном подобии уравнений движения релятивистских электронов в поле МН волны в приближении изолированных резонансов и уравнений движения электронов в поле электростатической ленгмюровской волны в изотропной плазме.

$$\Gamma_n^{\text{Lin}} = \frac{\pi^2 e^2 |E|^2 mc^2}{2\omega U} \int_{p_{\parallel min}}^{p_{\parallel max}} dp_\parallel \gamma_{rn}^2 V_{rn}^2 \left[\left(\frac{\partial f_0}{\partial \gamma} \right)_{p_\parallel} + mcN_\parallel \left(\frac{\partial f_0}{\partial p_\parallel} \right)_\gamma \right]_{u_n = 0} .$$

(Пределы интегрирования определены в диссертации в зависимости от параметров волны, параметров плазмы и номера резонанса.) Это подобие нарушается, когда продольная компонента волнового вектора и частота МН волны связаны соотношением $k_\parallel c \simeq \omega$. В этом случае задача требует особого рассмотрения. В **разделе 4.7** содержатся выводы.

Исследование **пятой главы** сфокусировано на инкременте верхнегибридных волн, которые относятся к медленной необыкновенной моде, и опирается на экспериментальные данные, полученные спутниками Van Allen Probes, по измерению волн и дифференциальных потоков энергичных частиц. В **разделе 5.1** анализируется ряд спектрограмм, как, например, на Рисунке 7. Особенность верхнегибридных волн заключается в том, что их интенсивность значительно возрастает, когда верхнегибридная частота равна целому кратному электронной гирочастоты. В **разделе 5.2** используются теоретические результаты Главы 4. Предполагая, что возбуждение волн вблизи верхнегибридной частоты происходит за счёт циклотронного взаимодействия с энергичными электронами на циклотронных резонансах высокого порядка, был рассчитан линейный инкремент этих волн вдоль траектории спутника Van Allen Probe. Использовались зарегистрированные параметры плазмы и плотность энергичных электронов, полученная из измерений дифференциальных потоков. Помимо плотности горячей плазмы, используются другие параметры модельной функции распределения, совместимые с измерениями, но не выводимые непосредственно из них. Был рассчитан абсолютный максимум инкремента относительно ω и θ в каждой точке орбиты спутника. Как видно из Рисунка 8, особенности рассчитанного инкремента заключаются в том, что эти максимумы всегда достигаются при частотах волн, близких к частоте верхнего гибридного резонанса (это подразумевает угол волновой нормали, близкий к $\pi/2$), и что величины этих максимумов очень

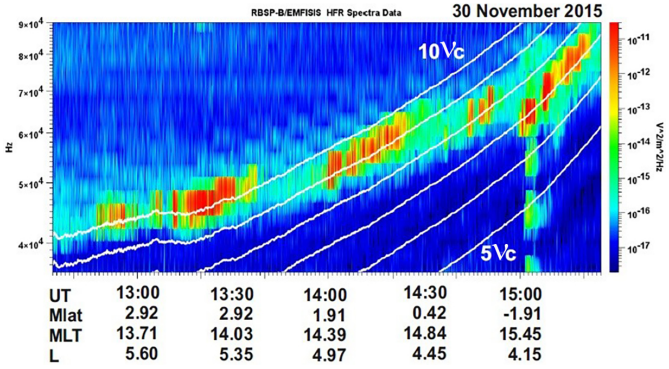


Рисунок 7 – Частотно-временная спектрограмма данных высокочастотного приёмника, включая диапазон вблизи верхнего гибридного резонанса. Спутник перемещался в сторону нижних L-оболочек. Белые линии изображают электронные циклотронные гармоники с 5-й по 10-ю

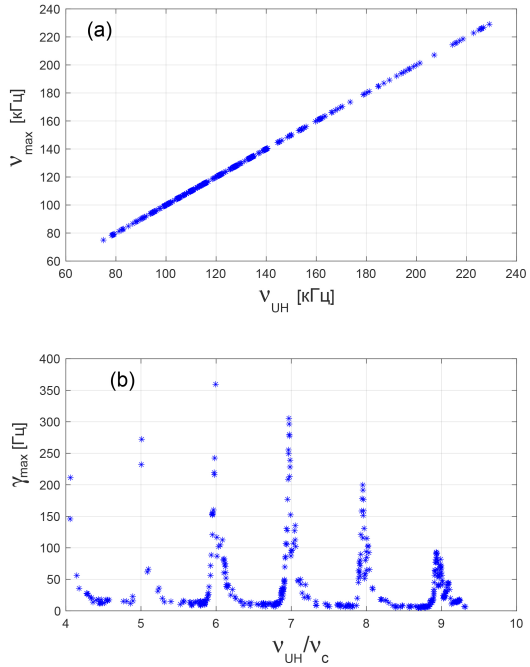


Рисунок 8 – (a) Частота, соответствующая абсолютному максимуму инкремента относительно частоты волны и угла волновой нормали, как функция верхнегибридной частоты ν_{UH}. (b) Максимальный инкремент на орбите спутника, параметризованный величиной ν_{UH}/ν_c

сильно возрастают, когда верхнегибридная частота близка к целому кратному электронной гирочастоты. Соответствующее увеличение спектральной интенсивности верхнегибридных волн является характерной особенностью обзорных спектрограмм, наблюдаемых спутниками Van Allen Probes. Прямая связь между наблюдаемым спектром и локальным инкрементом волн с учётом низкой групповой скорости квазиэлектростатических верхнегибридных волн является веским аргументом в пользу предложенного механизма их генерации.

Заключение

Настоящая работа посвящена исследованию процессов распространения и

резонансного взаимодействия с энергичными частицами электромагнитных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности, в том числе, в ионосфере и магнитосфере Земли и других планет Солнечной системы. В ходе исследования были получены следующие результаты:

1. Предложены приближённые аналитические выражения для показателей преломления электронных волновых мод в магнитоактивной плазме, достаточно хорошо аппроксимирующие данные величины в широком диапазоне частот, углов волновой нормали и параметров плазмы.

2. Для случая свистовой волны, распространяющейся в плазме вдоль магнитного поля, получено дисперсионное уравнение с учётом влияния резонансных частиц, не ограниченное условием малости инкремента волны по сравнению с частотой. Разработан метод расчёта инкремента неустойчивости для функций распределения, полученных численно по спутниковым данным; аналитическое продолжение функции осуществлено с помощью принципа непрерывности. Написана программа в среде MATLAB и выполнен численный расчёт инкрементов (декрементов) свистовых волн на основе измерений дифференциальных потоков электронов на спутниках Van Allen Probe A и MMS. Обнаружена немонотонная зависимость частоты от волнового числа и, как следствие, неоднозначная зависимость инкремента (декремента) от частоты при малых значениях плотности холодных частиц.

3. Выведено и проанализировано дисперсионное соотношение, которое в явном виде задаёт частоту волны как функцию волнового вектора и параметров плазмы в диапазоне частот $\omega_{\text{LH}} \ll \omega \ll \omega_c$ при произвольном соотношении ω_p и ω_c. В случае разреженной плазмы исследованы такие характеристики волн, как поляризация электрического и магнитного поля, плотность энергии, а для свистовых волн исследовано изменение угла Жандрэна и угла Стори в зависимости от параметров плазмы.

4. Рассчитан инкремент медленных необыкновенных волн в плазме с каппа-распределением при наличии конуса потерь и исследована его зависимость от параметров плазмы и параметров функции распределения. Обнаружено, что максимум инкремента достигается на частотах и при углах волновой нормали, близких к резонансным значениям, в частности, вблизи верхней гибридной частоты и для углов волновой нормали, близких 90°. Обнаружено, что зависимость инкремента от относительной частоты имеет не монотонный, а квазипериодический характер, причём максимумы инкремента достигаются вблизи гармоник гирочастоты. Это связано с тем, что в этом случае резонансный импульс, соответствующий n-ому циклотронному резонансу, имеет минимальное по абсолютной величине значение, и вклад в инкремент от этого резонанса доминирует над вкладами от других циклотронных резонансов. Обнаружена немонотонная зависимость максимального инкремента МН волны от анизотропии распределения.

5. Выведены общие уравнения движения релятивистских электронов в поле медленной необыкновенной волны и внешнем магнитном поле и проанализи-

рованы условия применимости приближения изолированных резонансов в этом случае. В этом приближении уравнения движения сведены к одномерной системе уравнений, аналогичной той, которая возникает для ленгмюровских волн и корректно решённой О'Нилом. Получено выражение для инкремента медленной необыкновенной волны, распространяющейся под произвольным углом к внешнему магнитному полю. Выполненные расчёты применимы для всех частот и углов волновой нормали МН волн, за исключением случая, когда $\omega = k_{\|}c$, который требует особого рассмотрения. Это связано с тем, что релятивистские резонансные условия связывают продольный импульс частицы $p_{\|}$ и релятивистский γ-фактор с параметрами волны. При этом существует связь между изменением этих величин. При выполнении условия $\omega = k_{\|}c$ величины $p_{\|}$ и γ изменяются таким образом, что частица "застревает" в резонансе.

6. Объяснены особенности спектров верхнегибридных волн, наблюдаемых на спутниках в магнитосфере Земли, в частности, заметное возрастание спектральной интенсивности верхнегибридных волн в областях, где частота верхнегибридного резонанса кратна электронной циклотронной частоте. Предлагаемое объяснение этих наблюдений основано на предположении, что верхнегибридные волны возбуждаются вследствие развития циклотронной неустойчивости на высоких циклотронных резонансах. Вычисленный инкремент верхнегибридных волн вдоль траектории спутника хорошо согласуется с одновременными наблюдениями спектра.

В дальнейшем планируется более подробное изучение описанных процессов с учётом влияния температуры и неоднородности плазмы, исследование рассеяния волн на неоднородностях плотности и линейной трансформации МН волн в другие волновые моды в неоднородной плазме, а также возможное применение разработанных методов к другим типам волн.

В заключение автор выражает благодарность своему научному руководителю Шкляру Давиду Рувимовичу за плодотворную совместную работу, ценные советы, конструктивные замечания и всестороннюю поддержку на всех этапах проведения исследования. Автор благодарен сотрудникам Отдела физики космической плазмы ИКИ РАН за поддержку во время работы в отделе и выступлений на конференциях и семинарах.

Публикации автора по теме диссертации

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

Список литературы

[1] *Schnider, K.* Physics of Space Plasma Activity / K. Schnider. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 507 p.

[2] The Aurora / Editors: Y. Kamide, A. Chian // Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. – Springer Berlin, Heidelberg, 2007. P. 333–354.

[3] Electron densities in Jupiter's outer magnetosphere determined from Voyager 1 and 2 plasma wave spectra / B.L. Barnhart, W.S. Kurth, J.B. Groene [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 2009. – Vol. 114, No. A5. – Art. A05218.

[4] *Зеленый Л.М.* По следам проекта "ИНТЕРБОЛ" / Л.М. Зеленый, М.М. Могилевский // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2025. – № 1 (67). – С. 17–31.

[5] The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on RBSP / C.A. Kletzing, W.S. Kurth, M. Acuna [et al.] // Space Science Reviews. – 2013. – Vol. 179. – P. 127–181.

[6] Magnetospheric Multiscale Overview and Science Objectives / J.L. Burch, T.E. Moore, R.B. Torbert, B.L. Giles // Space Science Reviews. – 2016. – Vol. 199. – P. 5–21.

[7] Electrostatic electron-cyclotron waves in multi-temperature plasma / V.I. Karpman, Ju.K. Alekhin, N.D. Borisov, N.A. Rjabova // Plasma Physics. 1975. Vol. 17. P. 937–949.

[8] Electrostatic electron-cyclotron waves in plasma with a loss-cone distribution / V.I. Karpman, Ju.K. Alekhin, N.D. Borisov, N.A. Rjabova // Plasma Physics. 1975. Vol. 17. P. 361–372.

[9] *Helliwell, R.A.* Whistlers and related ionospheric phenomena / R.A. Helliwell. – Stanford : Stanford University Press, 1965.

[10] *Bespalov, P.A.* Synchronized oscillations in whistler wave intensity and energetic electron fluxes in Jupiter's middle magnetosphere / P.A. Bespalov, O.N. Savina, S.W.H. Cowley // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2005. – Vol. 110. – Art. A09209.

[11] *Mizonova, V.G.* Whistler waves produced by monochromatic currents in the low nighttime ionosphere / V.G. Mizonova, P.A. Bespalov // Annales Geophysicae. – 2021. – Vol. 39. – P. 479–486.

[12] Некоторые аспекты магнитосферно-ионосферных связей / А.А. Петрукович, М.М. Могилевский, А.А. Чернышов, Д.Р. Шкляр // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185, № 6. – С. 649–654.

[13] *Сажин, С.С.* Естественные радиоизлучения в магнитосфере Земли. М: Наука, 1982.

[14] *Matsumoto, H.* Wave instabilities in space plasmas / H. Matsumoto ; Eds.: Palmadesso P.J., Papadopoulos K. – Hingham: D. Reidel, 1979. 163 p.

[15] Horne, R.B., Thorne, R.M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. P. 3011–3014.

[16] Gyroresonant interactions between the radiation belt electrons and whistler mode chorus waves in the radiation environments of Earth, Jupiter, and Saturn: A comparative study / Y.Y. Shprits, J.D. Menietti, X. Gu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2012. – Vol. 117. – Art. A11216.

[17] Electron precipitation driven by whistler-mode waves: effects of wave-packet variability / V.S. Grach, A.V. Artemyev, A.G. Demekhov [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2026. – Vol. 131, No. 6. – Art. e2025JA034958.

[18] *Трахтенгерц, В.Ю.* Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе / В.Ю. Трахтенгерц, М.Дж. Райкрофт. – М. : Физматлит, 2011. – 344 с.

[19] Nonlinear Resonant Interactions of Radiation Belt Electrons with Intense Whistler-Mode Waves / A.V. Artemyev, D. Mourenas, X.-J. Zhang [et al.] // Space Science Reviews. – 2025. – Vol. 221. – Art. 18.

[20] *Storey, L.R.O.* An Investigation of Whistling Atmospherics // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1953. – Vol. A246, No. 908. – P. 113–141.

[21] *Gendrin, R.* Le guidage des whistlers par le champ magnetique // Planetary and Space Science. – 1961. – Vol. 5, No. 4. – P. 274–278.

[22] *Kimura, I.* Whistler mode propagation in the earth and planetary magnetospheres and ray tracing techniques // Space Science Reviews. – 1985. – Vol. 42, No. 3-4. – P. 449–466.

[23] Plasma sheet boundary layer in Jupiter's magnetodisk as observed by Juno / X.-J. Zhang, Q. Ma, A.V. Artemyev [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2020. – Vol. 125, No. 8. – Art. e2020JA027957.

[24] Jupiter's low-altitude auroral zones: Fields, particles, plasma waves, and density depletions / A.H. Sulaiman, B.H. Mauk, J.R. Szalay [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2022. – Vol. 127, No. 8. – Art. e2022JA030334.

[25] Electron density distributions in Saturn's ionosphere / A.M. Persoon, W.S. Kurth, D.A. Gurnett [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2019. – V. 46, No. 6. – P. 3061–3068.

[26] Generation mechanism of Z-mode waves in the equatorial plasmasphere / Y. Nishimura, T. Ono, M. Iizima [et al.] // Earth, Planets and Space. – 2007. – Vol. 59, No. 9. – P. 1027–1034.

[27] *Albert, J.M.* Refractive index and wavenumber properties for cyclotron resonant quasilinear diffusion by cold plasma waves // Physics of Plasmas. – 2007. – Vol. 14. – Art. 072901.

[28] The role of intense upper hybrid resonance emissions in the generation of Saturn narrowband emission / J.D. Menietti, P.H. Yoon, D. Pisa [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 124, No. 7. – P. 5709–5718.

[29] Survey and analysis of whistler- and Z-mode emission in the Juno extended mission / J.D. Menietti, T.F. Averkamp, W.S. Kurth [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2023. – Vol. 128, No. 12. – Art. e2023JA032037.

[30] *Власов, А.А.* О вибрационных свойствах электронного газа // ЖЭТФ. – 1938. – Т. 8. – С. 291–318.

[31] *Ландау, Л.Д.* О колебаниях электронной плазмы // ЖЭТФ. – 1946. – Т. 16. – С. 574–593.

[32] *Сагдеев, Р.З.* О неустойчивости плазмы с анизотропным распределением скоростей в магнитном поле / Р.З. Сагдеев, В.Д. Шафранов // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 39. – С. 181–184.

[33] *Trakhtengerts, V.Y.* Whistler–electron interactions in the magnetosphere: new results and novel approaches / V.Y. Trakhtengerts, M.J. Rycroft // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – Vol. 62, No. 17-18. – P. 1719–1733.

[34] Shklyar, D.R. Oblique whistler-mode waves in the inhomogeneous magnetospheric plasma: Resonant interactions with energetic charged particles / D.R. Shklyar, H. Matsumoto // Surveys in Geophysics. – 2009. – Vol. 30, No. 2. – P. 55–104.

[35] Propagation of Z-mode and whistler-mode emissions observed by Interball 2 in the nightside auroral region / O. Santolik, F. Lefeuvre, M. Parrot, J.-L. Rauch // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2001. – Vol. 106, No. A10. – P. 21137–21146.

[36] *LaBelle, J.* Auroral radio emissions, 1. Hisses, roars, and bursts / J. LaBelle, R.A. Treumann // Space Science Reviews. – 2002. – Vol. 101. – P. 295–440.

[37] *Shklyar, D.R.* Relativistic electron scattering by electrostatic upper hybrid waves in the radiation belt / D.R. Shklyar, B. Kliem // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2006. – Vol. 111, No. A6. – Art. A06204.

[38] *Lee, S.-Y.* Excitation of upper-hybrid and whistler-mode waves by electron velocity ring distribution / S.-Y. Lee, P.H. Yoon // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2025. – Vol. 130. – Art. e2024JA033285.

[39] *O'Neil, T.M.* Collisionless damping of nonlinear plasma oscillations // Physics of Fluids. – 1965. – Vol. 8. – P. 2255–2262.

Оглавление

Общая характеристика работы **1**
Актуальность темы исследования 4
Цели и задачи работы 5
Научная новизна работы 5
Теоретическая и практическая значимость 6
Методы исследования и достоверность результатов 7
Основные положения, выносимые на защиту 7
Апробация результатов исследования 8
Личный вклад автора 8
Структура и объём диссертации 9

Основное содержание работы **9**

Заключение **17**

Публикации автора по теме диссертации **19**

Список литературы **20**