

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертацию Зудина Ильи Юрьевича «Лабораторное и численное моделирование распространения волн свистового диапазона в нестационарной и неоднородной магнитоактивной плазме», представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»**

Темой диссертации Зудина И.Ю. является исследование распространения свистовых волн в нестационарной и неоднородной магнитоактивной плазме методами лабораторного и численного моделирования. Диссертационная работа выстроена вокруг двух проблем: влияние возмущений плазмы, производимых интенсивными электромагнитными волнами с модулированной амплитудой, на спектр пробных свистовых волн, распространяющихся через возмущенную область; специфические режимы волноводного распространения свистовых волн вдоль систем неоднородностей концентрации плазмы, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля.

**Актуальность темы.** Интерес к свистовым волнам в околоземной плазме обусловлен возможностью их эффективного использования для диагностики околоземной плазмы и активного воздействия на неё, включая контролируемое воздействие на электроны радиационных поясов Земли. Интерпретация результатов натурных наблюдений, в которых регистрируются эффекты преобразования спектра свистовых волн в ионосфере и магнитосфере, зачастую носит неоднозначный характер. Диссертация Зудина И.Ю. актуальна в свете указанной проблемы. Другой круг вопросов, для решения которых могут быть полезны полученные в диссертации результаты, связан с особенностями распространения свистовых волн при наличии вытянутых вдоль внешнего магнитного поля неоднородностей концентрации со сложной поперечной структурой.

**Обоснованность и достоверность результатов и выводов, сформулированных в диссертации.** В основе диссертации лежит лабораторное и численное моделирование. Лабораторные эксперименты выполнены на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», который позволяет проводить подробные измерения в частотном режиме с высокой повторяемостью. В экспериментах используются надежные методы диагностики плазменных процессов. Описанные в диссертации схемы измерений предусматривают защиту от возникновения артефактов, связанных с наводками и нелинейными искажениями сигналов в измерительных цепях. Всё это обеспечивает высокую достоверность получаемых результатов.

Численное моделирование выполнено с использованием метода конечных разностей во временной области, который позволяет явным образом решать уравнения Максвелла, и находить поляризационный отклик плазмы с использованием минимального набора предположений. Корректность использованной в расчетах численной схемы подтверждается изложенными в диссертации проверками. Полученные в ходе численного моделирования результаты имеют ясный физический смысл.

Всё вышеизложенное позволяет сделать вывод о высокой степени достоверности результатов лабораторного и численного моделирования. Интерпретация полученных результатов была выполнена на основе ясных представлений, с использованием количественных оценок.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 5 статьях в зарубежных и российских рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, и трудах 4 конференций, прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Таким образом, представленные в работе результаты и сформулированные на их основе выводы отвечают критериям научной обоснованности и достоверности.

**Научная новизна исследования.** Результаты, приведенные в диссертации Зудина И.Ю., оригинальны и новы. Во-первых, экспериментально продемонстрирован режим нерезонансного параметрического взаимодействия между интенсивной свистовой волной с амплитудной модуляцией и пробной свистовой волной, в результате которого у пробной волны возникает специфическая амплитудно-фазовая модуляция. Показано, что возникновение модуляции пробной волны связано с возмущениями концентрации либо магнитного поля под действием интенсивной волны. Во-вторых, изучены режимы волноводного распространения свистовых волн вдоль вытянутых вдоль внешнего магнитного поля, выявлены два режима, в которых волны распространяются вдоль системы неоднородностей как вдоль единой волноводной структуры. В первом случае волноводные свойства отдельных неоднородностей никак не проявляются. Второй случай соответствует режиму постоянной перекачки волновой энергии между соседними неоднородностями (т.н. режим «связанных волноводов»). Определены поляризационные характеристики направляемых волн, диапазоны их продольных волновых чисел, особенности структур полей и их пространственных спектров, характерные для каждого из режимов, определены критерии реализации этих режимов. Для условий реального ионосферного эксперимента, выполненного на нагревном стенде СУРА, наземного СДВ передатчика и ИСЗ DEMETER, определен критический масштаб неоднородностей, соответствующий переходу из одного режима в другой.

**Структура диссертации.** В *первую главу* включены сведения, необходимые для понимания материала диссертации. В разделе 1.1 приведены основные свойства свистовых волн, распространяющихся в однородной плазме, а также вдоль плазменных волноводов – дактов с пониженной, либо с повышенной концентрацией плазмы. Раздел 1.2 посвящен постановке экспериментов: описанию крупномасштабного плазменного стенда «Крот», методов диагностики плазмы и исследования волновых процессов. Раздел 1.3 посвящен численной модели и методике расчета, лежащих в основе численного эксперимента.

*Вторая глава* посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия интенсивных свистовых волн на общей трассе распространения. В главе описана постановка эксперимента, приводятся и обсуждаются его результаты. В ходе эксперимента установлено, что воздействие интенсивной амплитудно-модулированной волны, излучаемой непосредственно в плазму, приводит к возбуждению возмущений концентрации и магнитно поля. Производимые возмущения, в свою очередь, вызывают возникновение амплитудно-фазовой модуляции у пробных волн, распространяющихся через возмущенную область – кроссмодуляцию.

*Третья глава* посвящена численному моделированию распространения свистовых волн вдоль систем случайных неоднородностей с повышенной концентрацией. Глава содержит подробное описание постановки численного эксперимента и его результаты, включая поляризационные особенности и особенности пространственного спектра волн, распространяющихся вдоль неоднородностей. Показано, что в предельном случае «узких»

неоднородностей вся система выступает в роли единого волновода, структура мод которого определяется «сглаженным» профилем системы. В другом предельном случае, при наличии «широких» неоднородностей, излучение распространяется вдоль каждой из них как вдоль отдельного волновода. Автор также выделяет промежуточный режим «связанных волноводов», в котором происходит непрерывный обмен волновой энергией между неоднородностями, составляющими систему. В главе приводится качественная интерпретация полученных результатов, подкрепляемая сопоставлением с результатом решения модельной задачи о распространении излучения вдоль отдельной неоднородности.

*Четвертая глава* посвящена численному и лабораторному моделированию распространения свистовых волн вдоль систем неоднородностей с пониженной концентрацией плазмы. Представленные результаты численных экспериментов соответствуют режиму связанных волноводов. Результаты лабораторного эксперимента соответствуют выводам, сделанным по результатам численного моделирования.

**Общая оценка и замечания по диссертации.** Положения, выносимые на защиту, в полной мере соответствуют результатам работы. Автореферат отражает содержание диссертации. Результаты полностью опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК, были представлены на всероссийских и международных конференциях.

По работе и качеству изложения материала можно высказать ряд **замечаний**.

- 1) В диссертации не всегда четко обозначена связь получаемых результатов с результатами ионосферных исследований, особенно – в главе, посвященной кроссмодуляции свистовых волн. Хотелось бы знать условия, в которых эффект, обнаруженный на лабораторной установке, может наблюдаться в ионосфере или магнитосфере Земли. Желательно было бы указать, какие критерии подобия используются при сопоставлении процессов в ионосферной и лабораторной плазме.
- 2) В главе 3 установленные по результатам численного моделирования волноводные свойства системы неоднородностей с повышенной концентрацией плазмы обсуждаются с использованием аналитической модели на основе решения дисперсионных уравнений. В главе 4 волноводные свойства неоднородностей с пониженной концентрацией обсуждаются без обращения к аналитическим моделям.
- 3) В главе 4 описана система антенн, используемая для создания группы неоднородностей с пониженной концентрацией замагниченной плазмы в модельных экспериментах на стенде «Крот». Каков уровень возмущений плазмы, создаваемых этой достаточно громоздкой конструкцией (см. рис. 4.10), и как решетка антенн, установленная на трассе распространения пробных свистовых волн, влияет на их характеристики?
- 4) В формуле (4.14) пропущен знак квадратного корня.
- 5) В тексте диссертации имеются повторы слов, ошибки и опечатки.

Сделанные замечания не затрагивают основных результатов работы Зудина И.Ю. Результаты исследования получены автором самостоятельно, или при его непосредственном участии.

**Заключение.** Диссертация Зудина Ильи Юрьевича полностью удовлетворяет критериям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание учёной

степени кандидата наук, согласно требованиям постановления правительства РФ от 24 сентября 2013 г №842 «О порядке присуждения ученых степеней». Тема, содержание работы и её результаты соответствуют специальности ВАК 01.04.08 – «Физика плазмы», а её автор – Зудин Илья Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского радиофизического института Нижегородского государственного университет им. Н.И. Лобачевского, кандидат физ.-мат. наук



Д.С. Котик

Подпись Д.С. Котика заверяю,  
Директор НИРФИ, профессор



С.В. Оболенский  
«25» декабря, 2020

Контактная информация:

Котик Дмитрий Самойлович,  
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательского радиофизического института,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
603950, г.Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23  
Тел.: (831) 432-57-81, e-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru