


**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Полярный геофизический институт»**



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ПГИ  
Д.Ф.-м.н. Б.В. Козелов

  
« 27 » ноября 2020 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**Федерального государственного бюджетного научного учреждения**

**«Полярный геофизический институт» на диссертацию**

**Зудина Ильи Юрьевича**

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

Диссертация И.Ю. Зудина посвящена особенностям распространения свистовых волн в нестационарной и неоднородной плазме. Используя методы лабораторного и численного моделирования, автор исследует ряд эффектов, возникающих при распространении свистовых волн в магнитоактивной плазме с нестационарными возмущениями параметров и при наличии групп вытянутых вдоль магнитного поля неоднородностей концентрации.

В околоземной плазме циклотронное взаимодействие волн свистовой моды с энергичными электронами играет важную роль, обеспечивая ускорение частиц и регулируя энергетический баланс в магнитосферно-ионосферной системе. Параметры околоземной плазмы характеризуются различными временными и пространственными вариациями, которые могут существенно влиять на распространение свистовых волн в магнитосфере и ионосфере. Однако в настоящее время вопросы распространения свистовых волн в околоземной нестационарной и неоднородной плазме исследованы явно недостаточно, и актуальность выбранной И.Ю. Зудиным тематики не вызывает сомнений.

Очевидно, что исследования распространения свистовых волн через магнитосферно-ионосферную систему требуют контроля плазменных параметров в большом объеме околоземной плазмы, а также сложных многокомпонентных измерений спектрально-фазовых вариаций сигналов, их модового состава и других. Проведение таких экспериментов в околоземной плазме не представляется возможным, даже координированные одновременные наземно-спутниковые наблюдения не могут обеспечить контроль необходимых плазменных параметров и измерения характеристик волновых сигналов во всем объеме. Для решения поставленных задач И.Ю. Зудин, во-первых, провел оригинальные эксперименты по лабораторному моделированию волновых процессов на



специализированных крупномасштабных плазменных стендах, имеющих широкие возможности контроля и вариаций плазменных параметров. Во-вторых, автор выполнил численное моделирование ряда задач по взаимодействию низкочастотного излучения с неоднородными плазменными структурами. Сочетание лабораторного и численного моделирования представляется весьма эффективным подходом для решения задач распространения свистовых волн в нестационарной и неоднородной плазме и без сомнения являясь большим достоинством рассматриваемой работы и заслугой автора.

Диссертация И.Ю. Зудина состоит из четырех глав, введения и заключения.

В первой главе рассмотрены методы лабораторного и численного моделирования, которые использовались в диссертации, а также кратко основные свойства свистовых волн. Раздел 1.2 диссертации посвящен лабораторному эксперименту, который проводился на крупномасштабном плазменном стенде «Крот». Описана техника измерения волновых полей и возмущений магнитного поля с помощью одно- и многовитковых рамочных антенн. Обсуждаются вопросы расчета фактической величины переменного магнитного поля, детали методики измерения возмущений концентрации и точности измерений. В разделе 1.3 представлена методика численного моделирования распространения свистовых волн в неоднородной магнитоактивной плазме. Описаны математическая модель и поиск приближенного решения системы уравнений, который осуществлялся методом FDTD. Эта глава носит в значительной степени вводный и методический характер, она необходима для понимания дальнейшего изложения, свидетельствует о способности автора ставить и решать столь разноплановые и сложные задачи, связанные с лабораторным и численным моделированием.

Вторая глава посвящена результатам лабораторных экспериментов, выполненных на крупномасштабном плазменном стенде, в которых обнаружена амплитудно-фазовая модуляция пробных волн малой интенсивности, проходящих через область плазмы, модифицированную волной накачки с глубокой модуляцией огибающей. Показано, что в спектре пробной волны при распространении через возмущенную область, наблюдаются, эквидистантные узкополосные сателлиты, отстоящие от несущей на интервалы, кратные частоте модуляции волны накачки. При больших периодах модуляции волны накачки обогащение спектра пробных волн происходит преимущественно за счет возмущений плотности плазмы. При малых периодах модуляция пробных волн обусловлена возмущениями внешнего магнитного поля. Использование надежных методов диагностики плазмы и излучения, многократное воспроизведение опытов и варьирование параметров в лабораторном эксперименте свидетельствует, на наш взгляд, о достоверности представленных результатов.

В главе 3 выполнено численное моделирование распространения свистовых волн в магнитоактивной плазме, содержащей группы мелкомасштабных неоднородностей с повышенной концентрацией и вытянутых вдоль магнитного поля. Исследованы различные режимы волноводного распространения свистовых волн в зависимости от поперечных размеров неоднородностей и перепадов концентрации в них. Показано, что для параметров моделирования, соответствующих активному эксперименту с нагревным стендом «Сура», существует характерный поперечный размер неоднородностей  $\approx 1$  км, для которых реализуется режим «связанных волноводов». При больших масштабах неоднородности являются независимыми плазменными волноводами, при меньших масштабах волноводные свойства отдельных неоднородностей не проявляются. Отметим, что результаты главы 3 представляют большой интерес для исследований проводимых в настоящее время в



околоземной плазме в области радиационных поясов, и надеемся, они найдут приложение при интерпретации наблюдений ОНЧ волн на магнитосферных спутниках.

Глава 4 посвящена исследованию возможности волноводного распространения косых свистовых волн в замагниченной плазме с системой неоднородностей с пониженной относительно фонового значения концентрацией. Сначала в разделе 4.1 методами численного моделирования показано, что в системе неоднородностей с пониженной концентрации реализуется режим связанных волноводов. А затем этот вывод поддержан экспериментальными исследованиями, выполненными на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», что свидетельствует о достоверности выполненных расчетов и существенно повышает значимость полученных результатов. Необходимо отметить, что сопоставление результатов численного моделирования с лабораторными и натурными экспериментами является несомненным достоинством диссертации и свидетельствует о высокой квалификации И.Ю. Зудина как в проведении экспериментов, так и в численном моделировании.

Однако, следует сделать некоторые замечания.

(1) В выводах ко второй главе И.Ю. Зудин пишет, что обнаруженный режим кросс-модуляции низкочастотных волн может реализоваться в слабостолкновительной околоземной плазме. К сожалению, эта возможность практически не обсуждается в диссертации. И.Ю. Зудин не проводит сопоставление параметров экспериментов на установке «Крот» и в магнитосфере, не приводит параметры их масштабирования. Автор также пишет, что механизм кросс-модуляции свистовых волн, обсуждаемый в главе 2, может объяснить результаты экспериментов с наземными передатчиками и свистами, полученные в работах [25, 26]. Однако в этих экспериментах свистовые волны распространяются каналированным способом, то есть преимущественно с малыми углами волнового вектора к магнитному полю, в то время как И.Ю. Зудин утверждает, что в рассмотренном на установке «Крот» эксперименте возбуждались волны конической рефракции, волновой вектор которых направлен под углом  $70^\circ$ .

(2) В третьей главе И.Ю. Зудин пишет, что амплитуды свистовых волн выбирались таким образом, чтобы интенсивность возбуждаемых волн оказывалась близка к наблюдавшейся в активном эксперименте с использованием нагревного стенда «Сура», наземного низкочастотного передатчика и спутника DEMETER. Известно, что над областью нагрева сигналы ОНЧ передатчика на спутнике DEMETER уширялись до 1 кГц и амплитуда их электрической компоненты существенно усиливалась. Это происходит из-за трансформации электромагнитного свистового сигнала в квазиэлектростатические волны с углами волновых нормалей вблизи резонансного конуса на мелкомасштабных неоднородностях плотности, генерируемых в области нагрева. При этом амплитуда сигнала ОНЧ передатчика на спутнике есть сумма набора волн с различными волновыми векторами вблизи резонансного конуса и длинами волн близкими к размерам неоднородностей. Остается не ясным, как автор выбирает из уширенного сигнала ОНЧ передатчика амплитуды волн, рассеянных именно на тех неоднородностях (достаточно крупномасштабных от 100 м до 2 км), для которых проводился расчет.

Высказанные замечания не в коей мере не умаляют достоинств работы, а решающий личный вклад И.Ю. Зудина в полученные результаты очевиден как из самой диссертации, так и из приведенного списка литературы. Результаты, представленные в диссертации, широко известны научной общественности, опубликованы в ведущих изданиях, докладывались на международных и отечественных конференциях. О высоком



