

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации ЗУДИНА Ильи Юрьевича «Лабораторное и численное моделирование распространения волн свистового диапазона в нестационарной и неоднородной магнитоактивной плазме», представленной на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.04.08 -- физика плазмы.

Свистовые волны, которые в терминах параметров плазмы определяются условиями $f_{ci} \ll f < \min(f_{ce}, f_{pe})$ (f - частота волны, f_{ci} , f_{ce} - циклотронная ионная и электронная частоты, соответственно, и f_{pe} - электронная плазменная частота), в околоземной плазме, как правило, отвечают КНЧ или ОНЧ диапазонам. Эти волны имеют показатель преломления $N \gg 1$, так что соответствующие резонансные скорости оказываются много меньше скорости света, что обеспечивает возможность резонансного взаимодействия этих волн с энергичными частицами плазмы. Это в конечном итоге и определяет важную роль свистовых волн в динамике частиц в магнитосфере, в частности, в радиационных поясах Земли.

Независимо от источника этих волн - будь то плазменные неустойчивости, молниевые разряды либо сигналы наземных ОНЧ передатчиков - особенности распространения этих волн в околоземной плазме играют важную роль для исследования их резонансного взаимодействия с энергичными заряженными частицами. Исследования в этом направлении получили новый импульс после запуска на магнитосферные орбиты двух спутников Van Allen Probes A, B и спутниковой системы MMS, состоящей из четырех спутников. Все это делает исследования - лабораторные и численные - распространения волн в нестационарной и неоднородной магнитоактивной плазме, которые составляют предмет диссертации, важными и актуальными.

Диссертация И. Ю. Зудина содержит Введение, четыре главы и список литературы. Во Введении приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели исследования, его новизна, личный вклад автора в работу, а также основные положения, выносимые на защиту. Введение содержит также описание структуры диссертации, одним словом, всю необходимую информацию, которую должно содержать Введение в диссертации.

В первой главе приводится дисперсионное уравнение и поляризация свистовых волн, поверхность показателя преломления для случая $f < f_{ce}/2$ и $f > f_{ce}/2$ в предположении $f_{pe}^2 \gg f_{ce}^2$, обсуждаются такие моменты как направление групповой скорости при распространении волны под углом $\theta = \arccos(2f/f_{ce})$ ($f < f_{ce}/2$), называемым углом

Жандрена, а также групповая скорость при распространении волны вблизи резонансного конуса. Здесь же иллюстрируются условия захвата свистовых волн с частотами $f < f_{ce}/2$ в дакты повышенной и пониженной плотности. Хотя приведенные здесь сведения хорошо известны, они являются полезными для последующих рассмотрений и вполне уместны в контексте данной диссертации. Описание экспериментальной установки "Крот", которое также содержится в первой главе диссертации, включает сведения о рамочных антеннах, используемых для регистрации переменных магнитных полей, о зонде с СВЧ резонатором, резонансная частота которого зависит от электронной плазменной частоты, и который служит для измерения плотности плазмы. Также в первой главе на основе уравнений Максвелла и уравнения для плотности тока получена система уравнений, описывающая распространение свистовых волн в двумерном случае, и представлена численная схема ее решения. Здесь же обсуждаются граничные условия для данной системы уравнений, выбор которых обеспечивает отсутствие влияния границ, которые неизбежно присутствуют в численных расчетах, на поле в интересующей области.

Вторая глава диссертации посвящена лабораторному исследованию нелинейного параметрического взаимодействия волн на трассе их распространения. В выполненных экспериментах область плазмы, модифицированная амплитудно-модулированной волной накачки, просвечивалась пробной волной и исследовались характеристики последней с целью определения параметров плазмы, влияющих на характеристики пробной волны. Было подтверждено обогащение спектра пробной волны сателлитами, частоты которых отстоят от несущей частоты на частоты модуляции волны накачки. Показано, что амплитудно-фазовая модуляция пробной волны может быть обусловлена возмущениями волной накачки как концентрации плазмы, так и магнитного поля.

Распространение свистовых волн в магнитоактивной плазме в присутствие неоднородностей различных масштабов и конфигураций является актуальной задачей с точки зрения эффектов свистовых волн в динамике энергичных частиц в верхней ионосфере и магнитосфере, в частности, радиационных поясов Земли. Эта задача в случае, когда масштаб неоднородности плотности существенно превышает характерные длины волн, может быть исследована методами геометрической оптики, а в противоположном случае сводится к задаче о рассеянии волн на мелкомасштабных неоднородностях. Если же характерные масштабы неоднородностей соизмеримы с длиной волны и/или неоднородности имеют сложную структуру, то для анализа распространения волн в этом случае адекватными являются численные методы. В результате проведения численных экспериментов, представленных в третьей главе диссертации, показано, что волноводные свойства неоднородностей зависят от соотношения между ее размером, и некоторым

критическим масштабом d_0 , который определяется параметрами фоновой плазмы, ходом концентрации внутри неоднородности и частотой волны. Следует отметить, что в работе нет четкого определения и выражения для критического масштаба, хотя его величина для различных случаев определяется результатами моделирования. Думаю, что в дальнейших работах автора диссертации такое выражение для критического масштаба будет получено.

Результаты третьей главы относятся к исследованиям неоднородностей с повышенной концентрацией плазмы. Численному и лабораторному моделированию распространения свистовых волн в дактах с пониженной плотностью посвящена четвертая глава диссертации. Такие неоднородности могут возникать как в естественных условиях в авроральной области магнитосферы, так и в нагревных экспериментах. Выполнены как двумерные численные расчеты, так и лабораторные исследования распространения свистовых волн вдоль групп неоднородностей с пониженной концентрацией плазмы, и показано соответствие экспериментальных результатов и численных расчетов.

Отмечу, что в диссертации многократно используется неудачное, на мой взгляд, выражение: «Волны свистового диапазона частот», поскольку волны свистового диапазона могут иметь совершенно различные частоты в зависимости от параметров плазмы. В тексте также имеется ряд опечаток, например в уравнении (1.34), в комментариях к уравнению (1.37), или в уравнении (1.38), хотя этих опечаток действительно не много. Однако, среди них есть две, которые в контексте темы диссертации следует уже считать недочетом. Это небрежная ссылка на классическую и, наверное, наиболее цитируемую из всех работ, посвященных распространению свистовых волн – работу L. R. O. Storey (1953), у которой вдруг появился новый первый автор. При этом в автореферате эта ссылка дана правильно. Вторая серьезная небрежность – это неправильное определение свистового диапазона в соотношении (1.1).

Однако я никак не хочу заострять внимание на этих недостатках работы. В основном диссертация И. Ю. Зудина написана грамотно и добросовестно. Каждая глава диссертации содержит содержательное введение и в конце основные результаты, что очень помогает при ее чтении.

Переходя к оценке содержания работы в целом отмечу, что рассматриваемые в ней вопросы лабораторного и численного исследования распространения свистовых волн в плазме с пространственными неоднородностями являются актуальными в контексте как спутниковых наблюдений, так и активных экспериментов, и, кроме того, представляют несомненный научный интерес для физики плазмы. К наиболее важным результатам работы относятся следующие.

