

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

На правах рукописи

Яшин Александр Юрьевич

**Исследование геодезической акустической моды
на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы
(физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель кандидат физико-математических наук
доцент
Буланин В.В.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник, НИЦ "Курчатовский институт"
Мельников А.В.

кандидат физико-математических наук
доцент, Санкт-Петербургский государственный университет
Кудрявцев А.А.

Ведущая организация ФГБУН Институт общей физики
им. А.М. Прохорова российской академии наук

Защита состоится « » 2016 г. в на заседании
диссертационного совета Д 002.205.03 при Федеральном
государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом
институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021,
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.205.03
кандидат физико-математических наук _____ Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы диссертации.

Программа управляемого термоядерного синтеза в настоящее время ориентирована на использование замкнутых магнитных систем типа токамак и стелларатор. В этих тороидальных установках доминируют аномальные процессы переноса энергии и частиц плазмы, которые обусловлены развитием дрейфовых неустойчивостей. Проблема контроля и подавления аномальных переносов связана с задачей выяснения механизмов стабилизации и насыщения дрейфовой турбулентности. Помимо линейных механизмов насыщения сейчас рассматриваются механизмы декорреляции флуктуаций, обусловленные широм скорости дрейфа в радиальном электрическом поле в тороидальных ловушках. Согласно современным представлениям, появление шира может быть связано с возникновением зональных потоков, которые являются результатом нелинейного развития самой неустойчивости [1]. Во многих известных сейчас модельных расчетах и в экспериментах имеются свидетельства взаимного влияния зональных потоков и турбулентных возмущений [2]. Описание такого взаимодействия постоянно видоизменяется и совершенствуется в различных моделях [3], [4], но общепризнанной модели до сих пор не существует.

Более сложная картина наблюдается в динамике взаимодействия плазменной турбулентности с высокочастотной разновидностью зональных потоков, которой является геодезическая акустическая мода (ГАМ) [2]. Несмотря на значительное количество экспериментов, не удается найти прямого соответствия между взаимодействием ГАМ с плазменной турбулентностью и аналогичного взаимного влияния низкочастотных зональных потоков и флуктуаций плазмы, которые, в конечном счете, влияют на аномальный перенос. Поэтому получение новых сведений о параметрах ГАМ и их взаимодействии с фоновой турбулентностью представляет собой не только актуальную фундаментальную задачу, но и прикладную проблему – проблему контроля аномальных переносов. Новым направлением в

исследованиях представляется изучение ГАМ в сферических токамаках, которые рассматриваются в качестве одного из возможных вариантов компактных источников нейтронов. Такие исследования являются актуальными и с точки зрения развития теории зональных потоков, поскольку они позволяют сопоставить данные о ГАМ, полученные в токамаках с существенно различной геометрией магнитного поля.

Целью данной работы является проведение сравнительного исследования ГАМ в токамаках с различной магнитной конфигурацией. Основной акцент исследования сделан на выявлении специфики возникновения и развития ГАМ в токамаке с малым аспектным отношением, в котором ГАМ ранее детально не изучалась. Для достижения поставленной цели был использован комплексный подход в исследовании ГАМ ориентированный на одновременное использование различных диагностических методов. Основным методом регистрации ГАМ являлся метод доплеровского обратного рассеяния (ДОР) или доплеровская рефлектометрия (ДР). В ходе работы были поставлены следующие конкретные задачи:

1. Разработать двухчастотный доплеровский рефлектометр (ДР) для токамака ТУМАН-3М с лимитерным разрядом.
2. Провести исследование ГАМ на токамаке ТУМАН-3М и определить влияние низкочастотного шира скорости вращения на развитие ГАМ.
3. Разработать комплекс диагностик для исследования ГАМ на сферическом токамаке Глобус-М.
4. Провести исследования ГАМ на токамаке Глобус-М с использованием комплекса диагностик с целью определения локализации, спектрального и модового состава ГАМ.
5. Исследовать колебания магнитного поля на частоте ГАМ.

Новизна работы

1. Впервые определена связь между низкочастотным колебанием шира скорости, уровнем турбулентности и амплитудой ГАМ.

2. Для подтверждения модового состава ГАМ по полоидальному числу m впервые была использована версия диагностики доплеровского обратного рассеяния с полоидально разнесенными антеннами.
3. На сферическом токамаке впервые была определена локализация ГАМ и исследованы магнитные колебания на частоте ГАМ.
4. Были зарегистрированы колебания излучения на линии $D\alpha$ на частоте ГАМ, которые ранее не наблюдались.
5. Впервые обнаружена мода $m = 0$ колебаний плотности, связанных с ГАМ, и дана возможная интерпретация этого явления.
6. Впервые проведено сравнение параметров ГАМ в токамаках с различными аспектными отношениями и магнитной геометрией.

Достоверность научных результатов

Полученные в ходе работы результаты статистически достоверны. Их достоверность обеспечена сопоставлением с данными измерений, выполненных различными диагностическими средствами и построенных на других физических принципах. По ряду параметров ГАМ, которые можно сопоставить, полученные данные не противоречат результатам измерений на других токамаках.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

Разработана диагностика доплеровского рассеяния для сферического токамака, обоснована возможность ее использования и определены рекомендации по ее применению.

Определены условия, в которых возбуждение ГАМ непосредственно не приводит к переходу в режим с улучшенным удержанием.

Полученные результаты важны для развития теоретических моделей «жертва-хищник» для зональных потоков. Результаты, полученные в экспериментах на сферическом токамаке, указывают на необходимость учета при построении таких моделей динамики процессов переноса и связанных с ними изменений профиля давления плазмы при развитии ГАМ.

Разработанная методика обработки данных, включающая биспектральный анализ с использованием данных доплеровской рефлектометрии, может быть использована при изучении нелинейных процессов, протекающих в турбулентной плазме токамаков.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в развитии и совершенствовании схем доплеровских рефлектометров, в том числе, с применением многочастотного зондирования плазмы.

Полученные результаты могут также использоваться при разработке новых образцов диагностической аппаратуры для зондирования плазмы современных термоядерных установок и будущих токамаков-реакторов.

Личное участие автора

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Лично автором сформулированы основные требования к СВЧ аппаратуре; разработаны, собраны и протестированы системы доплеровских рефлектометров для токамаков Глобус-М и ТУМАН-3М.

Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении многочисленных экспериментов по исследованию режимов с развитием ГАМ на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. Автором были определены такие параметры ГАМ, как локализация и модовый состав. При непосредственном участии автора было изучено взаимодействие ГАМ с фоновой турбулентностью на различных временных масштабах.

Автором проведено сравнение результатов исследования ГАМ в токамаках с различными аспектными отношениями и вытянутостями магнитной конфигурации.

Автор непосредственно принимал участие в подготовке публикаций по результатам проведенных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Комплексное исследование ГАМ на сферическом токамаке Глобус-М с одновременным использованием доплеровского обратного рассеяния, электростатических и магнитных зондов и регистрации излучения на линии D_α .
2. Измерение локализации ГАМ на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М.
3. Восстановление модового состава радиального электрического поля, плотности и магнитного поля ГАМ на токамаке Глобус-М.
4. Определение взаимосвязи между низкочастотным широм скорости вращения, уровнем турбулентности и амплитудой ГАМ на токамаке ТУМАН-3М.
5. Сравнение свойств ГАМ в токамаках различной геометрии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** кратко сформулированы основные проблемы, на решение которых направлены представленные в диссертации исследования. Отмечена актуальность и новизна исследований.

В **Главе 1** диссертации представлен обзор основных теоретических работ по описанию зональных потоков и ГАМ, а также их взаимосвязи с плазменной турбулентностью. Рассмотрены основные методы исследования ГАМ с акцентом на описание доплеровского обратного рассеяния, как основного инструмента данного исследования. Представлены основные результаты экспериментальных исследований ГАМ на других установках (ASDEX Upgrade, DIII-D, T-10, ФТ-2 и др.) и на их основе сформулированы основные задачи диссертации.

В **главе 2** представлены диагностические методы, использованные для исследования ГАМ на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. В разделе 2.1 представлена реализация метода доплеровского обратного рассеяния (ДОР) [A1], [A2] на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. В разделе 2.1.1 представлены принципы ДОР и его реализация в виде двойного гомодинного приема и гетеродинного приема. В разделе 2.1.2 дано описание СВЧ схем

диагностик ДОР на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. Раздел 2.1.3 посвящен проблеме расчета лучевых траекторий в токамаках для определения волновых чисел рассеивающих флуктуаций и радиусов отсечек. Продемонстрированы методы таких расчетов в случае трехмерной геометрии токамака Глобус-М, а также даны простые оценки для токамака ТУМАН-3М. В разделе 2.1.4 описаны антенные системы рефлектометров на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. Приведены оценки пространственного разрешения и разрешения по волновым числам. В разделе 2.2 описаны методы регистрации колебаний плотности и магнитного поля на частоте ГАМ, приведены параметры электростатических и магнитных зондов. Также в этом разделе обосновано использование диагностики, основанной на регистрации свечения на линии D_{α} , для исследования колебаний плотности плазмы на частоте ГАМ и их пространственной структуры. Раздел 2.3 посвящен системам сбора и обработки данных: первичной обработки данных с аналогово-цифрового преобразователя, а также таким методам выявления ГАМ и их взаимодействия с фоновой турбулентностью, как спектральный, корреляционный, когерентный и бикогерентный анализ. Выводы к главе 2 о выборе диагностик для исследования ГАМ на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М и их применимости для решения поставленных в диссертации задач приведены в разделе 2.4.

Глава 3 посвящена результатам исследований геодезической акустической моды на сферическом токамаке Глобус-М [А3], [А4]. В разделе 3.1 представлены параметры разряда токамака, при которых были обнаружены ГАМ. Были исследованы разряды с относительно низкой плотностью электронов ($\langle n \rangle \approx (2-3) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$) с обращенной X-точкой, когда ионный тороидальный дрейф был направлен в сторону от нее, и переход в H-моду был затруднен или вообще не происходил. В разделе 3.2 приведен качественный анализ амплитуды ГАМ, которая изменялась в течении разряда. Отмечено отсутствие прямых воздействий ГАМ на переход в H-моду. Значительная часть раздела 3.2 посвящена исследованию спектров

колебаний сигналов различных диагностик на частоте ГАМ. Показано, что амплитуда колебаний радиального электрического поля ГАМ имела значение порядка 3 кВ/м [A5], что превышает среднее значение радиального электрического поля. Амплитуда колебаний магнитного поля достигала значений $2 \cdot 10^{-4}$ Тл. Также были зафиксированы колебания сигналов тока насыщения электростатического зонда и интенсивности свечения на линии D_α , которые соответствуют колебаниям плотности плазмы с частотой ГАМ. В разделе 3.2 проведено сравнение определенной в экспериментах частоты ГАМ с теоретическими предсказаниями. Показано, что измеренная частота ГАМ увеличивается с 22 кГц до 38 кГц при переходе с дейтериевой плазмы на водородную, что качественно согласуется с теорией [A6]. Количественная оценка частоты дает совпадение с экспериментом только при учете аспектного отношения и вытянутости плазменного шнура (в пределах больших дрейфовых орбит), в то время как для квазицилиндрических токамаков оценка частоты ГАМ оказывается значительно выше. Раздел 3.3 посвящен исследованию радиальной локализации ГАМ. Экспериментально показано, что ГАМ развиваются в узком слое порядка 2 см вблизи сепаратрисы внутри нее [A7]. При этом частота ГАМ не меняется внутри области локализации. Показано, что ширина области локализации одного порядка с предсказанным размером собственной

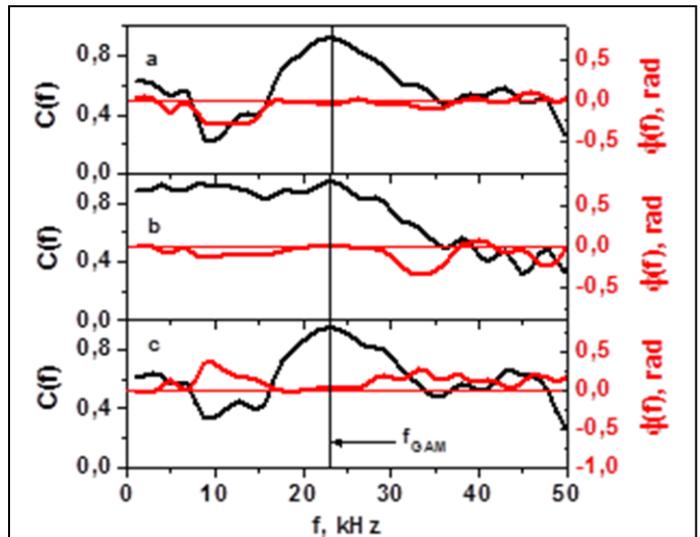


Рис.1. Взаимная когерентность $C(f)$ и фаза взаимного спектра $\varphi(f)$ сигналов D_α для линий наблюдения: (a) двух вертикальных со стороны слабого и сильного магнитного поля, (b) двух горизонтальных в экваториальной плоскости и в верхней части камеры токамака, (c) вертикальной и горизонтальной (разряд #36124, усреднение по 15 временным выборкам длительностью 128 мкс каждая).

геодезической моды для токамака Глобус-М. В разделе 3.4 приведены результаты исследования пространственной модовой структуры ГАМ. В экспериментах с использованием двух полоидально разнесенных доплеровских рефлектометров показано, что колебания $E \times B$ скорости вращения плазмы, связанные с ГАМ, проявляются в виде полоидальной моды $m = 0$, что согласуется с теоретическими предсказаниями [A10]. В экспериментах, где в качестве инструмента для регистрации колебаний плотности использовалось шесть детекторов излучения на линии D_{α} , было показано, что колебания плотности плазмы, связанные с ГАМ, имеют полоидальный и тороидальный номера мод $m/n = 0/0$ (Рис.1). Полоидальный номер $m = 0$ не соответствует хорошо известным теоретическим предсказаниям малых возмущений плотности плазмы со структурой $m/n = 1/0$ [A8]. Было высказано предположение, что такая структура возмущений плотности может возникать из-за быстрого локального изменения удержания частиц вблизи сепаратрисы, вызванного подавлением турбулентности широм $E \times B$ скорости, периодически меняющимся с частотой ГАМ. Оценка характерного времени изменения плотности плазмы в узкой области δ из-за изменения турбулентной диффузии $\tau \approx \delta^2 / D_{\perp}$ для условий токамака Глобус-М дает 25 мкс, что близко к периоду колебания ГАМ. Если наблюдаемые колебания плотности обусловлены подавлением турбулентного переноса, то следовало бы ожидать корреляции между колебаниями сигнала D_{α} , пропорционального плотности плазмы, и уровня турбулентности с частотой ГАМ. Ожидаемая корреляция была обнаружена между колебаниями свечения D_{α} и амплитудой обратно рассеянного сигнала (Рис.2.a). Корреляция наблюдается также между колебаниями свечения D_{α} и колебаниями $E \times B$ скорости на частоте ГАМ (Рис.2.b). Следовательно, существует корреляция также между колебаниями амплитуды сигналов обратного рассеяния и $E \times B$ скорости. Раздел 3.5 посвящен исследованиям колебаний магнитного поля на частоте ГАМ, которые ранее были зарегистрированы только на токамаках с большим аспектным отношением [5]. Эти колебания были изучены с

использованием полоидального массива магнитных зондов. Было продемонстрировано, что амплитуда колебаний магнитного поля на частоте ГАМ резко уменьшается со стороны слабого магнитного поля. Определение фазовой задержки колебаний полоидально разнесенных магнитных зондов позволило определить модовую структуру магнитных колебаний ГАМ: полоидальный номер моды

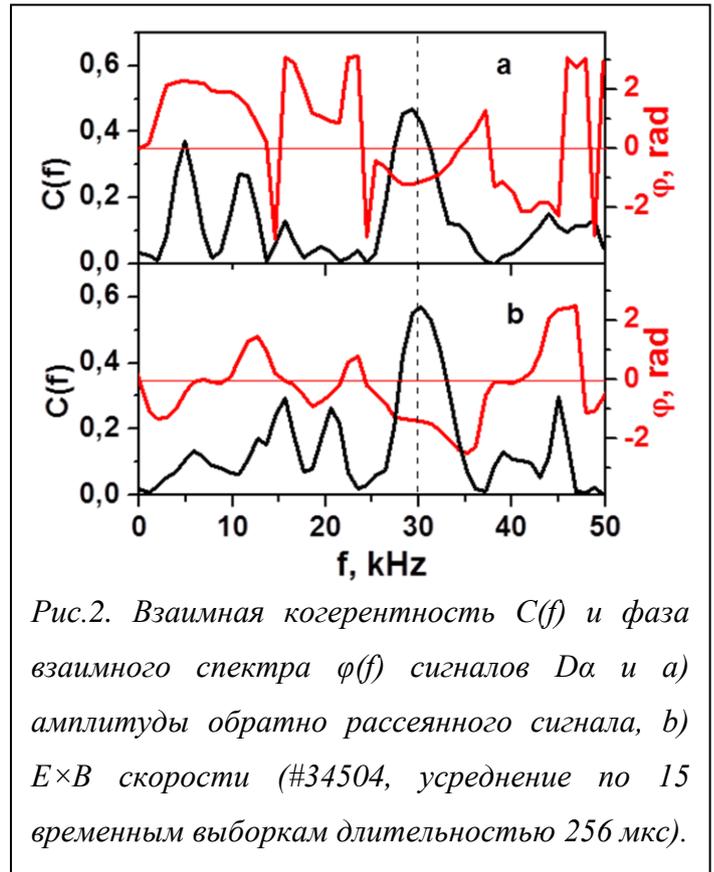


Рис.2. Взаимная когерентность $C(f)$ и фаза взаимного спектра $\varphi(f)$ сигналов D_a и a) амплитуды обратно рассеянного сигнала, b) $E \times B$ скорости (#34504, усреднение по 15 временным выборкам длительностью 256 мкс).

таких колебаний оказался равным $m = 2$ [A9], что соответствует теоретическим представлениям, развитым в работе [6]. В разделе 3.6 представлены результаты исследования временной эволюции ГАМ. В сигналах различных диагностик обнаружена сильная модуляция амплитуды колебаний ГАМ. Было обнаружено два характерных временных масштаба: 3 мс и 0.4 мс. Низкочастотные колебания интенсивности ГАМ аналогичны ранее наблюдавшимся на токамаке ASDEX Upgrade [7]. Второй временной масштаб отвечает периодичности возникновения всплесков квази-когерентных ГАМ и близок к характерным периодам колебаний зональных потоков, которые наблюдались в режиме LCO [8] и описываются моделью «хищник-жертва» [1]. В разделе 3.7 описаны результаты автобикогерентного анализа колебаний скорости вращения плазмы [A10]. Такой анализ позволил определить наличие нелинейного взаимодействия между колебаниями ГАМ и турбулентностью плазмы. В разделе 3.8 приведены основные выводы из главы 3 о результатах исследования ГАМ на токамаке Глобус-М.

В Главе 4 описаны результаты исследования ГАМ на токамаке

ТУМАН-3М методом доплеровской рефлектометрии. Отличительной особенностью таких исследований является использование двух частот зондирования и, соответственно, возможность регистрации ширины скорости вращения плазмы. Раздел 4.1 посвящен исследованию ГАМ в спектрах доплеровского частотного сдвига. Продемонстрировано, что в случае дейтериевой плазмы ГАМ проявляются в виде колебаний скорости с частотой 27-35 кГц. Исследование временного поведения ГАМ показало, что они имеют прерывистый характер и появляются в виде квазикогерентных вспышек средней длительностью около 200 мкс. В разделе 4.2 приведены результаты исследования частоты наблюдаемых ГАМ в зависимости от области их локализации и изотопного состава плазмы. Показано, что в согласии с теоретическими предсказаниями частота ГАМ увеличивается при смене рабочего газа с дейтерия на водород. Также было обнаружено, что частота ГАМ увеличивается с уменьшением малого радиуса, когда температура электронов возрастает. Оценка температуры электронов, сделанная с помощью формулы для частоты ГАМ [2], согласуется с данными о температуре, полученными с помощью электростатического зонда на границе области существования ГАМ. В разделе 4.3 описаны результаты исследования области существования ГАМ в зависимости от параметров разряда. Показано, что существует пороговое значение плотности $\langle n_c \rangle = 1.4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, выше которого ГАМ не развивается. Также показано, что при сильном уменьшении коэффициента запаса устойчивости ($q = a/R \cdot B_\phi/B_\theta$, где a и R - малый и большой радиусы токамака, B_ϕ и B_θ - тороидальное и полоидальное магнитное поле) от $q = 3.6$ до $q = 2.6$ ГАМ пропадают даже при сохранении всех остальных параметров плазмы, что, видимо, связано с затуханием ГАМ по механизму Ландау. Продемонстрировано полное отсутствие ГАМ в H-режиме на всех доступных для измерения радиусах, включая те радиусы, на которых ГАМ наблюдались в L-моду. Развитие сильных МГД колебаний также приводит к исчезновению ГАМ. Раздел 4.4 посвящен определению локализации ГАМ. Показано, что область

локализации имеет размер порядка 1 см, что близко к оценкам характерного пространственного масштаба собственной моды ГАМ [2]. Более того, проведенный корреляционный анализ показывает, что внутри области локализации ГАМ колебания происходят в фазе, что свидетельствует о проявлении ГАМ в виде стоячей радиальной волны. В разделе 4.5 приведены результаты исследования временного поведения амплитуды ГАМ. Эти исследования показали, что существует два характерных масштаба изменения амплитуды ГАМ: 0.2 мс и 5 мс. Также было продемонстрировано, что уровень турбулентности также колеблется на этих временных масштабах и эти колебания имеют определенные фазовые соотношения с ГАМ. На масштабах 5 мс временное поведение амплитуды ГАМ и амплитуды турбулентных флуктуаций являются подобными (Рис.3 - а), что, по-видимому, связано с напряжениями Рейнольдса, посредством которых контролируется ГАМ [2]. В свою очередь, амплитуда турбулентности уменьшается с увеличением шира скорости, который был измерен с

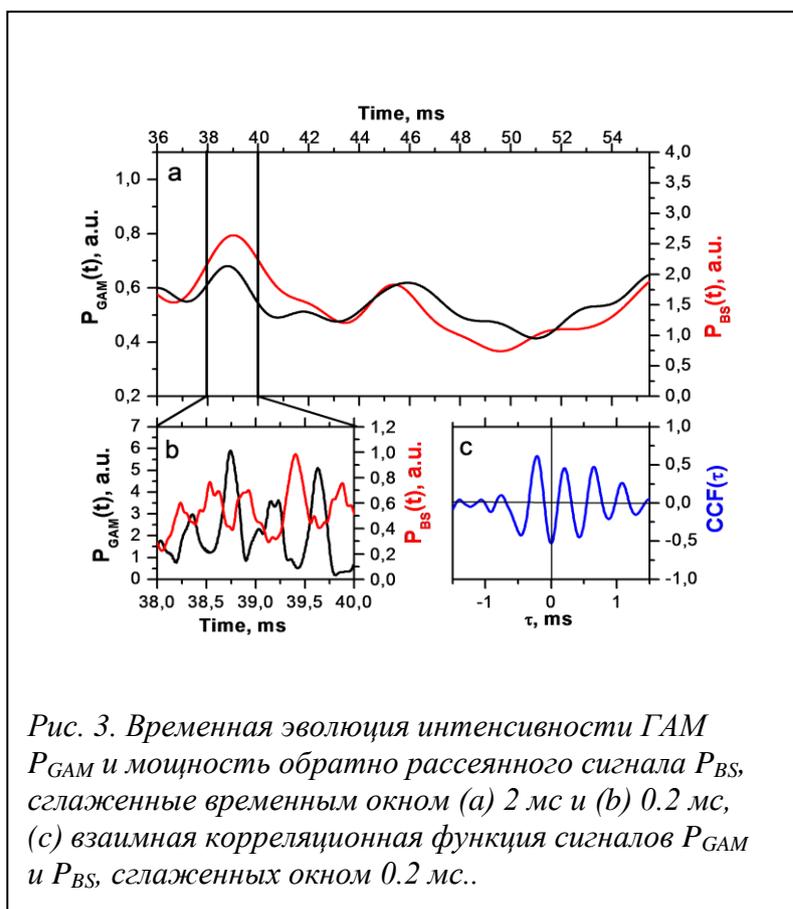


Рис. 3. Временная эволюция интенсивности ГАМ P_{GAM} и мощность обратно рассеянного сигнала P_{BS} , сглаженные временным окном (а) 2 мс и (б) 0.2 мс, (с) взаимная корреляционная функция сигналов P_{GAM} и P_{BS} , сглаженных окном 0.2 мс..

помощью двухчастотного доплеровского рефлектометра. На меньших временных масштабах порядка отдельных вспышек ГАМ (0.2 мс) уровень турбулентности находится в противофазе с амплитудой ГАМ (Рис.3 - b,c), что, скорее всего, объясняется моделью «хищник-жертва» [1]. В разделе 4.6 приведены

результаты автобикогерентного анализа сигналов доплеровского частотного сдвига [A11]. На частоте ГАМ обнаружены значения автобикогерентности, превышающие уровень шума.

В заключении Главы 4 приводятся результаты сравнения исследования ГАМ на токамаках с различными геометрическими параметрами.

В **Заключении** диссертации перечислены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы сводятся к следующим:

1. Разработана диагностика ГАМ на токамаке ТУМАН-3М методом доплеровского обратного рассеяния, ориентированная на исследование шире скорости вращения. Создана адекватная схема доплеровского двухчастотного рефлектометра. Определена оптимальная с точки зрения пространственного разрешения и разрешения по волновым числам анализируемых флуктуаций геометрия рупорно-параболических антенн.
2. Проведен расчет углов ориентации антенн в методе доплеровского обратного рассеяния для реальной трехмерной геометрии сферического токамака. На основе проведенных расчетов выбрана геометрия ввода пучка СВЧ излучения в камеру токамака Глобус-М.
3. Разработан комплексный подход в исследовании ГАМ на токамаке Глобус-М, основанный на одновременном использовании диагностик ДОР, излучения на линии D_{α} , электростатических и магнитных зондов. Обосновано использование сигналов интенсивности излучения на линии D_{α} для регистрации колебаний плотности.
4. Обнаружены ГАМ на сферическом токамаке Глобус-М в спектрах сигналов всех использованных диагностик. Проведено сопоставление экспериментально определенной частоты ГАМ с теоретическими оценками с учетом аспектного отношения и вытянутости. Определено влияние изотопного состава плазмы на наблюдаемую частоту ГАМ.

Установлено, что перемежаемость ГАМ одинаковым образом проявляется для сигналов всех диагностик.

5. Определен модовый состав для колебаний плотности ($n = 0$ и $m = 0$) и магнитного поля ($m = 2$), связанных с ГАМ.
6. Методом доплеровской рефлектометрии обнаружены ГАМ на токамаке ТУМАН-3М. Отмечено отсутствие таких колебаний в сигналах рефлектометра и токах насыщения электростатического зонда, расположенных в экваториальной плоскости камеры токамака. Определены области существования ГАМ по плотности плазмы и коэффициенту запаса устойчивости. Определена роль МГД возмущений в развитии ГАМ.
7. Определена периферийная локализация ГАМ на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М, трактуемая как собственная мода. Разные ширины областей локализации на этих токамаках находятся в соответствии с теоретически предсказанным размером собственной моды ГАМ.
8. Определена взаимосвязь между низкочастотными колебаниями ширины скорости и интенсивностью ГАМ. Установлено, что этот шир контролирует усреднённую амплитуду турбулентности, а амплитуда ГАМ на временах порядка 5 мс синфазна с уровнем турбулентности.
9. Установлено, что на масштабах длительности всплеск ГАМ наблюдается антикорреляция интенсивности ГАМ с амплитудой флуктуаций плотности, что качественно соответствует модели «хищник-жертва».
10. Посредством вычисления автобикогерентности показано наличие фазовой связи между колебаниями $E \times B$ скорости на частоте ГАМ с турбулентными колебаниями скорости в ограниченной полосе частот.
11. Проведено сравнение свойств ГАМ на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. Обнаружены общие для двух токамаков свойства ГАМ, такие как перемежаемость, отсутствие непосредственного влияния на переход в H-режим, периферийная область локализации. Отличия в свойствах ГАМ

проявляются в значении частоты ГАМ, а также в отсутствии колебаний в сигналах интенсивности излучения на линии D_{α} и магнитных зондов.

Диссертация состоит из 120 страниц и содержит 56 рисунков. Список литературы содержит 80 печатных работ.

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись на 26-и российских и международных совещаниях и конференциях, таких как Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, EPS Conference on Plasma Phys., Int. Conf. on Fusion Energy (конференция МАГАТЭ), International Reflectometry Workshop for fusion plasma diagnostics, EPS Conference on Plasma Diagnostics и др.,

и опубликованы в 11-и статьях:

- A1. В.В. Буланин, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, ... **А.Ю. Яшин**, и др. Наблюдение филаментов на токамаке Глобус-М методом доплеровской рефлектометрии // Письма в ЖТФ, 2011, т. 37, вып. 7, с. 103-110
- A2. Г.С. Курскиева, В.К. Гусев, С.Ю. Толстяков, ... **А.Ю.Яшин**, и др. Формирование внутренних транспортных барьеров в токамаке Глобус-М в режиме с ранним включением нейтрального пучка // Письма в ЖТФ, 2011, т. 37, вып. 23, с. 82-90
- A3. V.K. Gusev, R.M. Aminov, A.A. Berezutskiy, ... **A.Yu. Yashin** et al. Investigation of beam- and wave-plasma interactions in spherical tokamak Globus-M // Nucl. Fusion 51 (2011) 103019 (12pp)
- A4. V.K. Gusev, E.A. Azizov, A.B. Alekseev, ... **A.Yu. Yashin**, et al. Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2 // Nucl. Fusion 53 (2013) 093013 (14pp)
- A5. В.В. Буланин, Ф. Вагнер, В.И. Варфоломеев, ... **А.Ю.Яшин**, и др. Наблюдение геодезических акустических мод в сферическом токамаке Глобус-М // Письма в ЖТФ, 2014, т. 40, вып. 9, с. 24-31
- A6. **A.Yu. Yashin**, V.V. Bulanin, V.K. Gusev, et al. Geodesic acoustic mode observations in the Globus-M spherical tokamak // Nucl. Fusion 54 (2014) 114015 (6pp)

- A7. L.G. Askinazi, V.I. Afanasyev, A.B. Altukhov, ... **A.Yu. Yashin** et al. Fusion Research in Ioffe Institute // Nucl. Fusion 55 (2015) 104013
- A8. V.K. Gusev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, ... **A.Yu. Yashin**, et al. Review of Globus-M spherical tokamak results // Nucl. Fusion 55 (2015) 104016
- A9. V.K. Gusev, N.N. Bakharev, B.Ya. Ber, ... **A.Yu. Yashin**, et al. Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development // Plasma Phys. Control. Fusion 58 (2015) 014032
- A10. **A.Y. Yashin**, V.V. Bulanin, A.V. Petrov, et al. Multi-diagnostic approach to geodesic acoustic mode study // JINST 10 (2015) P10023
- A11. В.В. Буланин, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, ... **А.Ю. Яшин**, и др. Результаты бикогерентного анализа геодезической акустической моды в токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М // Письма в ЖТФ, 2015, т. 41, вып. 8, с. 18-25

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Diamond P. H., et al., Plasma Phys. Control. Fusion 47 (2005) R35–R161
2. Fujisawa A., Nucl. Fusion 49 (2009) 013001
3. Kim E. and Diamond P. H., Phys. Rev. Letters 90 (2003) 185006
4. Miki K., et al., Physics of Plasma 19 (2012) 092306
5. Melnikov A. V., et al., Plasma Phys. Control. Fusion 48 (2006) S87–S110
6. Wahlberg C., Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 085006
7. Conway G. D., et al., Plasma Phys. Control. Fusion 47 (2005) 1165–1185
8. Tynan G.R., et al., Nucl. Fusion 53 (2013) 073053