

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»
Факультет физико-математических и естественных наук
Институт физических исследований и технологий

«Допустить к защите»

Директор ИФИТ
д.ф.-м.н., проф.

_____ О.Т. Лоза

« ____ » _____ 20__ Г.

**Выпускная квалификационная работа
бакалавра**

Направление 03.03.02 «Физика»

ТЕМА «ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИКОГЕРЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАЗМЫ
ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ T-10»

Выполнил студент _____ **Аммосов Ярослав Максимович**
(Фамилия, имя, отчество)

Группа НФ3бд-01-18

Руководитель выпускной
квалификационной работы

Студ. билет № 1032182613

Лоза О. Т., д.ф.-м.н., профессор,
Директор института физических
исследований и технологий (ИФИТ)
(Ф.И.О., степень, звание, должность)

(Подпись)

Автор

(Подпись)

г. Москва

2022 г.

Список обозначений

УТС – управляемый термоядерный синтез

ГАМ (GAM) – геодезическая акустическая мода (geodesic acoustic mode)

ККМ (QCM) – квазикогерентная мода (quasi-coherent mode)

ЗПТИ (HIBP) – зондирование пучком тяжелых ионов (heavy ion beam probe)

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

СПМ (PSD) – спектральная плотность мощности (power spectral density)

B_t – тороидальное магнитное поле установки

n_e – среднехордовая электронная плотность

I_{tot} – полный ток с пластин энергетического анализатора диагностики

I_{pl} – ток плазмы

ϕ – потенциал плазмы

ρ – величина, характеризующая область измерений. Равна отношению текущего малого радиуса к величине малого радиуса установки r/a .

Содержание

Введение.....	4
Управляемый термоядерный синтез	4
Проблемы удержания и аномальных потоков.....	5
Зональные течения и геодезическая акустическая мода	7
Дрейфовая турбулентность и квазикогерентная мода.....	9
Цель и задачи.....	11
Глава 1.....	12
Токамак Т-10.....	12
Диагностика зондирования плазмы пучком тяжелых ионов.....	13
Методология проведения исследования.....	16
Глава 2.....	19
Измерение радиальных характеристик геодезической акустической моды	19
Общие закономерности	26
Результаты.....	27
Глава 3.....	28
Измерение радиальных характеристик квазикогерентной моды.....	28
Общие закономерности	36
Результаты.....	37
Выводы	38
Список использованной литературы.....	40
Приложение	43

Введение

В физике высокотемпературной плазмы одной из главных проблем является существенная разница между теоретически предсказываемыми и получаемыми в эксперименте потоками тепла и частиц из плазмы на стенку [1].

Работа посвящена радиальным характеристикам квазикогерентной моды (ККМ) геодезической акустической моды (ГАМ) в омической плазме токамака Т - 10. ККМ соответствует основная часть турбулентного потока частиц [2], ГАМ как высокочастотная ветвь зональных течений участвует в регуляции турбулентности [3], что делает эти объекты весьма важными для физики плазмы.

Управляемый термоядерный синтез

Впервые идею об использовании энергии слияния атомов в мирных целях предложили ученые, занимающиеся разработкой атомных бомб, в 50-е годы 20 века. Проблема управляемого термоядерного синтеза привлекла внимание ученых всего мира. Был дан толчок в развитии нового раздела физики – физики плазмы [4].

Энергия, производимая в результате реакции термоядерного синтеза, является чистой и безопасной, т. е. исключены инциденты с выбросом в окружающую среду большого количества радиоактивных материалов. Поскольку любой вариант термоядерной реакции не может поддерживаться без определенных условий. Происходит срыв плазмы и прекращение реакции [5].

Первый токамак (ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками) был построен в 1954 г. в СССР на базе Института атомной энергии им. И.В. Курчатова под руководством академика Л.А. Арцимовича. А в 1968 г. на реакторе Т-3 были достигнуты рекордные значения температуры плазмы 11,6 млн градусов по Цельсию [6].

С тех пор было построено около 300 токамаков и других термоядерных установок. Однако, несмотря на колоссальные успехи в данной области, проблема УТС еще не решена [5].

Термоядерная реакция – процесс слияния двух легких атомных ядер, в результате которого образуется более тяжелое ядро и высвобождается разность энергии связи в виде кинетической энергии продуктов реакции ядерного синтеза.

Существует несколько типов реакций термоядерного синтеза. Наиболее перспективной является реакция слияния дейтерия и трития:



В результате данной реакции образуются ядро гелия и нейтрон с кинетическими энергиями 3,5 МэВ и 14,1 МэВ соответственно. Данная реакция синтеза дает значительный выход энергии.

Поскольку атомные ядра имеют положительный электрический заряд, необходима высокая энергия для преодоления кулоновского барьера и реакции синтеза. Например, для реакции дейтерий-тритий величина этого барьера составляет около 0,1 МэВ.

Проблемы удержания и аномальных потоков

Магнитное удержание базируется на идее ограничения движения заряженной частицы в магнитном поле по двум координатам ларморовским радиусом. А по третьей координате – вдоль направления магнитного поля. Таким образом, чтобы частица была удержана необходимо создание магнитной конфигурации с замкнутыми силовыми линиями. Магнитные ловушки типа токамак и стелларатор основаны на данной идее [4]. Создание такой конфигурации на практике требует огромных усилий.

Одной из основных проблем является проблема устойчивости плазмы. А именно поиск условий, при котором стационарное состояние плазмы устойчиво относительно малых вариаций параметров и характеристик плазмы.

Различают множество видов плазменных неустойчивостей – явлений, приводящих к нестабильности равновесного состояния плазмы [7].

Так же одной из основных проблем физике высокотемпературной плазмы является значительное различие между теоретически предсказанными и экспериментально полученными потоками тепла и частиц из плазмы на стенку.

Потоки, которые не описываются существующей физической теорией, называются аномальными. Природу данной проблемы можно отнести к дрейфовой неустойчивости плазмы [2, 4, 8].

Зональные течения и геодезическая акустическая мода

Зональными течениями обычно называют полоидальные потоки сильно намагниченной плазмы. Этот термин происходит из аналогии между движением воздушных масс в атмосфере и вод в океане, поскольку их меридиональные потоки иначе называют зональными [9, 10].

Пример зональных потоков в природе приведен на

Рис. 1.

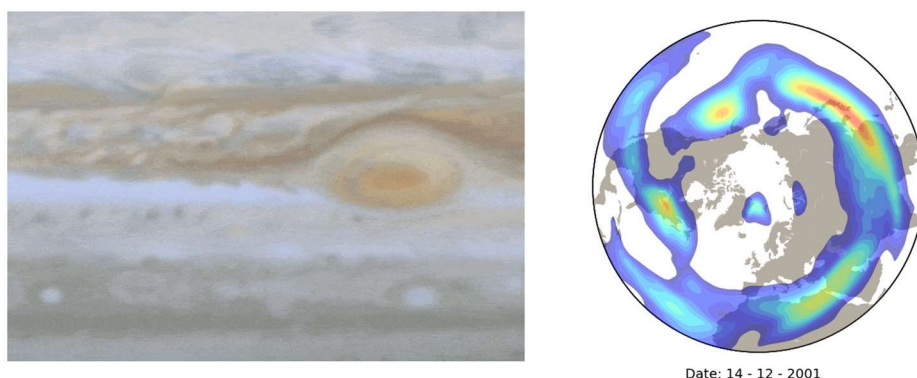


Рис. 1 Пример зональных потоков в атмосфере Юпитера и Земли.

Зональные потоки в плазме создаются скрещенными магнитным и электрическим полями $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Магнитные тороидальные поверхности плазмы осциллируют в полоидальной плоскости из-за флуктуаций электрического поля. При этом каждая поверхность движется в полоидальном с определенной скоростью v . Это скорость, с которой движутся зональные потоки [11]. Схема возникновения таких течений показана на

Рис. 2.

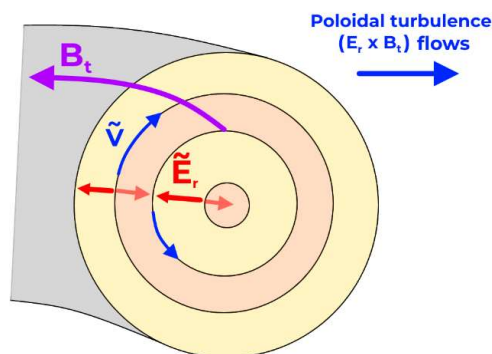


Рис. 2 Процесс возникновения зональных потоков.

Считается, что зональные течения регулируют дрейфовую турбулентность в плазме. Основная идея заключается в том, что течения заставляют турбулентный вихрь растягиваться и удлиняться, что увеличивает вероятность его распада на более мелкие турбулентные вихри, которые в свою очередь рассеиваются сильнее при столкновении друг с другом [12]. Этот процесс проиллюстрирован на

Рис. 3.

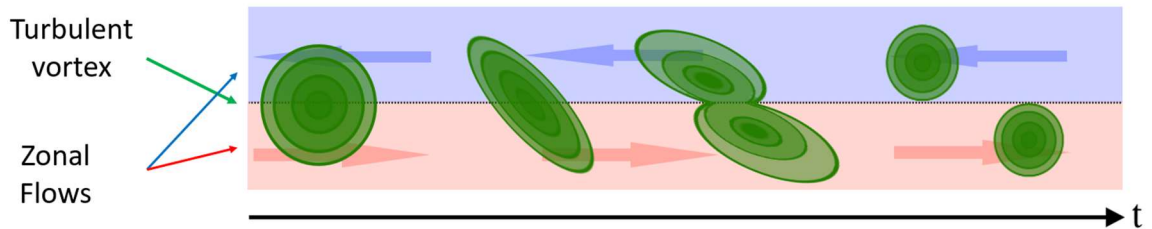


Рис. 3 Механизм регулирования турбулентности в плазме. Зеленым – турбулентный вихрь, Красным и синим – зональные течения.

Таким образом, зональные течения можно рассматривать как механизм саморегуляции турбулентности в плазме [13]. В связи с этим ученые всего мира обратили внимание на данное явление.

Геодезическая акустическая мода (ГАМ) является высокочастотной ветвью зональных течений [14]. Впервые эта мода была теоретически предсказана в 1968 году для стелларатора в надежде объяснить флуктуации потенциала большой амплитуды на периферии плазмы. Через некоторое время ГАМ была обнаружен экспериментально на токамаке TEXT с помощью диагностики зондирования пучком тяжелых ионов и зондами Ленгмюра. На токамаке T-10 данная мода была впервые обнаружена в 2003 году с помощью измерений флуктуаций полоидальной скорости вращения плазмы [15].

В настоящее время в токамаке T-10 для обнаружения ГАМ используется диагностика с помощью зонда пучка тяжелых ионов [16, 17].

Дрейфовая турбулентность и квазикогерентная мода

В настоящее время наиболее распространенный подход связывает аномальные потоки плазмы в токамаке с дрейфовой турбулентностью [18]. Этот тип турбулентности вызывается градиентом плотности и температуры в плазме [8]. Различают три типа дрейфовой турбулентности:

1) Ионная температурная градиентная мода (режим ITG). Неустойчивость возникает, когда нормированный градиент температуры ионов превышает некоторое критическое значение. При превышении критического градиента температуры перенос по ионному тепловому каналу резко возрастает. Это приводит к так называемой жесткости профиля ионной температуры, когда дальнейшее увеличение мощности нагрева не приводит к увеличению градиента температуры.

2) Мода на запертых электронах (ТЕМ) возникает при превышении градиента температуры критического электрона. Инкремент этой моды зависит от доли захваченных частиц.

3) Электронная температурная градиентная мода (режим ETG) возникает при превышении градиента критической температуры электронов. Рост коэффициентов переноса, связанных с этим режимом, аналогичен случаю режима ITG.

Первые две моды являются длинноволновыми, и их характерный масштаб сопоставим с величиной ларморовского ионного радиуса. Электронная температурная градиентная мода является коротковолновой, и ее характерный масштаб порядка ларморовского радиуса электрона. Хотя до сих пор не существует общепризнанных выражений для записи критических градиентов неустойчивости, они обычно зависят от соотношения ионной и электронной температур, величины магнитного сдвига, эффективного заряда плазмы, доли захваченных частиц и геометрических параметров установки.

Предполагается, что на тепловой перенос электронов могут влиять все три неустойчивости, в то время как ионный тепловой перенос и перенос частиц

"реагируют" в основном на развитие длинноволновых неустойчивостей (ITG и TEM) [19].

На токамаке T-10 было показано, что большая часть турбулентного потока частиц в омической стадии разряда связана с **квазикогерентной модой** (ККМ, $f \approx \Delta f$) - широкополосными колебаниями с полушириной порядка собственной частоты в диапазоне 50 - 150 кГц [2]. Радиальные характеристики данной моды на токамаке T-10 ранее были получены с помощью диагностики зондирования плазмы пучком тяжелых ионов для разных режимов плазменного разряда [1, 20].

Цель и задачи

Целью данной работы является измерение радиальных (по радиусу сечения плазменного шнура) зависимостей параметров квазикогерентной и геодезической акустической мод для омической стадии разряда при различных режимах работы токамака Т-10.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Рассмотреть принцип работы диагностики НВР и методику измерения необходимых параметров.
2. Выбрать режимы работы токамака Т-10 и соответствующие им импульсы плазменного разряда.
3. Выбрать временные диапазоны на сигналах потенциала и плотности плазмы, соответствующие определенным значениям тока и среднехордовой плотности плазмы – «нарезать» сигналы на временные сканы.
4. Провести расчет спектральной плотности мощности (СПМ) для сканов с различными энергиями пучка ионов в зависимости от величины текущего малого радиуса установки и объединить полученные спектрограммы воедино.
5. Используя полученные спектрограммы, измерить частоту и интенсивность колебаний плотности и потенциала плазмы.
6. Провести анализ полученных результатов.

Глава 1 Токамак Т-10

Токамак — это устройство для удержания высокотемпературной плазмы с помощью магнитного поля. В настоящее время это самый перспективный объект для управляемого термоядерного синтеза.



Рис. 4 Токамак Т-10 и диагностический комплекс.

Токамак Т-10 (

Рис. 4) был построен в Курчатовском институте в 1975 году и использовался для проведения исследований по программе термоядерной энергетики, а также экспериментов в поддержку ИТЭР вплоть до 2018 года. Уникальность установки обусловлена наличием двухчастотного гиротронного комплекса, используемого в экспериментах по СВЧ-нагреву плазмы. Основные параметры установки приведены в Таблица 1.

Таблица 1 Параметры токамака Т-10.

Параметр	Величина
Большой радиус	1.5 м
Малый радиус	0.3 м
Магнитное поле на оси	до 2.5 Тл
Ток плазмы	до 330 кА
Среднехордовая плотность n_e	до $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
Электронная температура T_e	до 1 кэВ в омическом режиме до 3.5 кэВ в режиме ЭЦР-нагрева

Диагностика зондирования плазмы пучком тяжелых ионов

Зонд пучка тяжелых ионов (ЗПТИ) - это уникальный диагностический инструмент, позволяющий одновременно проводить независимые измерения среднего электрического потенциала и плотности плазмы, а также флуктуаций потенциала, плотности и тока плазмы [16].

На данный момент не существует завершённой физической теории магнитного удержания высокотемпературной плазмы. В экспериментах, направленных на создание такой теории, требуется всестороннее изучение параметров термоядерной плазмы. Для этого используется большое количество различных диагностик. Одной из таких диагностик является Зондирование Плазмы Пучком Тяжелых Ионов (Heavy Ion Beam Probe) [15, 21].

Данная диагностика является уникальной и позволяет проводить измерения электрического потенциала, электронной плотности и температуры, величины полоидального магнитного поля. Физические принципы измерений с помощью диагностики ЗПТИ изображены на

Рис. 5.

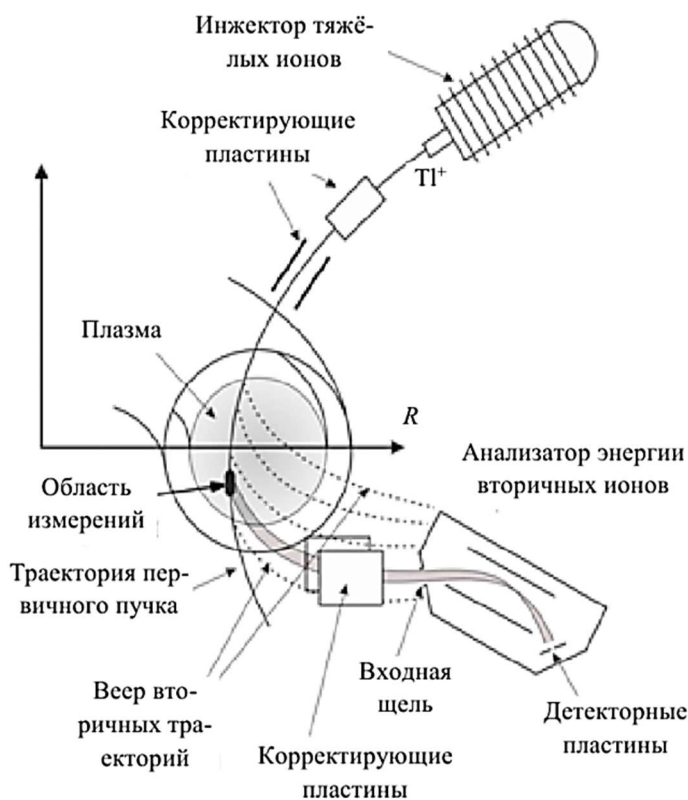


Рис. 5 Принципиальная схема диагностики ЗПТИ.

Пучок тяжелых ионов Pt^{+} формируется и ускоряется в инжекторе, значения энергии пучка при этом $E_{beam} \leq 330$ кэВ, затем попадает в плазму и движется по ларморовской окружности под действием магнитного поля установки. При прохождении частиц пучка через плазму частицы плазмы выбивают один или несколько электронов из ионов. В результате образуется веер вторично ионизированных частиц. Ионы пучка в точке вторичной ионизации получают дополнительную энергию, равную потенциалу плазмы в этой точке $-ej$. Полная энергия вторичных ионов, выходящих из плазмы $E_d = E_{beam} + -ej$. Поэтому локальный потенциал в области измерений равен разнице энергий

$$\varphi_{pl} = (E_d - E_b)/e \quad (2)$$

Далее корректирующие пластины направляют пучок ионов в анализатор, а затем на детекторные пластины. Область вторичной ионизации является областью измерений. Положение измерительного объёма можно передвигать по сечению плазменного шнура, меняя энергию зондирующего пучка или угол входа пучка в плазму. Таким образом, совокупность точек, регистрируемых детектором, формирует двухкоординатную сетку, называемую детекторной сеткой. Область измерений при этом $0.3 \leq r/a \leq 1$.

Детектор состоит из четырех пластин

Рис. 6. Суммарный ток пластин является полным током пучка ионов. Электрический потенциал плазмы пропорционален вертикальному смещению следа ионного пучка, оцениваемому по нормализованной разности токов на детекторных пластинах. Величина тороидального смещения пучка оценивается по нормализованному горизонтальному смещению следа пучка на детекторных пластинах. По тороидальному смещению пучка можно вычислить полоидальное магнитное поле, создаваемое током плазмы токамака. Концентрацию электронов в области наблюдения можно определить из ее пропорциональности полному току пластин.

Высокое временное разрешение измерений в токовом режиме позволяет проводить измерения флуктуаций всех перечисленных величин.

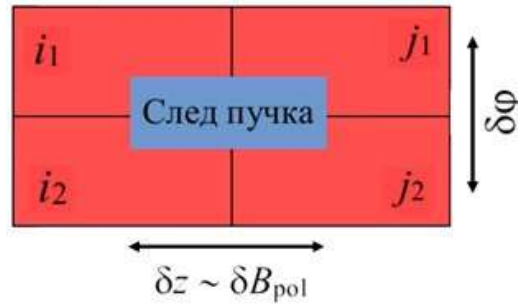


Рис. 6 Принципиальная схема измерений позиционно-чувствительным датчиком тока пучка. С указанием токов пластин и геометрическим соответствием величин.

Сигналы с пластин (Рис. 6) усиливаются и передаются на АЦП для дальнейшего анализа. Полный ток с пластин $I_{tot} = i_1 + i_2 + j_1 + j_2$ пропорционален плотности плазмы [23]

$$\tilde{I}_{tot}(t) = 2I_b \sigma^{12} \lambda \tilde{n}_e^{SV}(t) \quad (3)$$

где I_b – интенсивность первичного пучка, а σ^{12} – эффективное сечение ионизации электронным ударом, λ – длина измерительного объёма. Эта формула даёт линейное соотношение между искомой величиной $\tilde{n}_e^{SV}(t)$ (SV – в точке измерений – вторичной ионизации пучка ионов) и измеряемой $\tilde{I}_{tot}(t)$, если σ^{12} слабо зависит от электронной температуры, что выполняется при $T_e > 50$ эВ. Именно на спектрограмме сигнала полного тока можно увидеть квазикогерентные колебания (см. далее).

С использованием диагностического комплекса ЗПТИ успешно проводятся исследования на токамаке Т-10, расположенном в Курчатовском институте, а также на стеллараторе ТЖ-II, который расположен в научном центре CIEMAT (Мадрид, Испания) [15].

Методология проведения исследования

При проведении экспериментов на токамаке Т-10 собирается большое количество данных, которые необходимо обработать. Для этих целей используется программный комплекс Sigview разработанный сотрудником НИЦ «Курчатовский институт» Л. Г. Елисеевым [22].

При обработке сигналов с диагностики ЗПТИ использовалось быстрое Фурье-преобразование (FFT). Конкретно рассматривалась такая характеристика сигнала как спектральная плотность мощности (СПМ). Результат представляет собой спектрограмму, на которой изображены зависимости трех величин: времени (горизонтальная ось), частоты (вертикальная ось) и интенсивности сигнала (цветовая шкала). СПМ рассчитывалась по следующей формуле:

$$PSD_{xx}(f, t) = \mathcal{F}_x(f, t)\mathcal{F}_x^*(f, t), \quad (3)$$

где \mathcal{F} - быстрое Фурье-преобразование, \mathcal{F}^* - комплексно-сопряженное преобразование.

При построении СПМ использовались сигналы полного тока I_{tot} с пластин энергетического анализатора диагностики и потенциала плазмы j . Вид данных сигналов приведен на

Рис. 7.

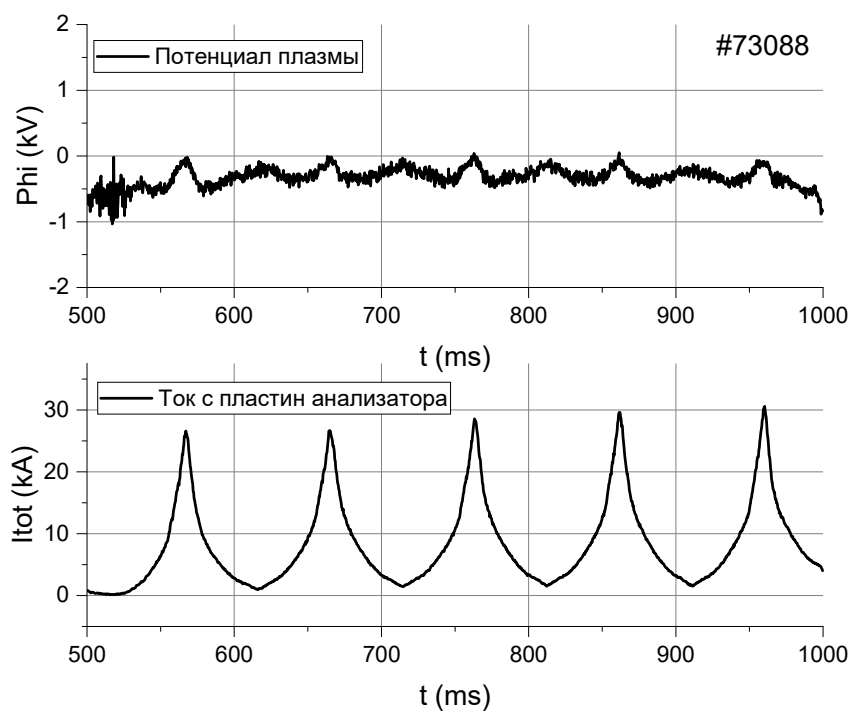


Рис. 7 Сигналы полученные с диагностики ЗПТИ для импульса #73088. Сверху – потенциал плазмы, снизу – полный ток с пластин энергетического анализатора.

Пучок ионов в зависимости от их начальной энергии достигает различных областей плазмы. Для построения временного распределения характеристик в широком диапазоне необходимо построить СПМ для различных значений начальных энергий пучка ионов и объединить полученные спектрограммы. Важно заметить, что параметры плазмы и установки остаются неизменными для всех импульсов, изменяется лишь глубина проникновения сканирующего пучка.

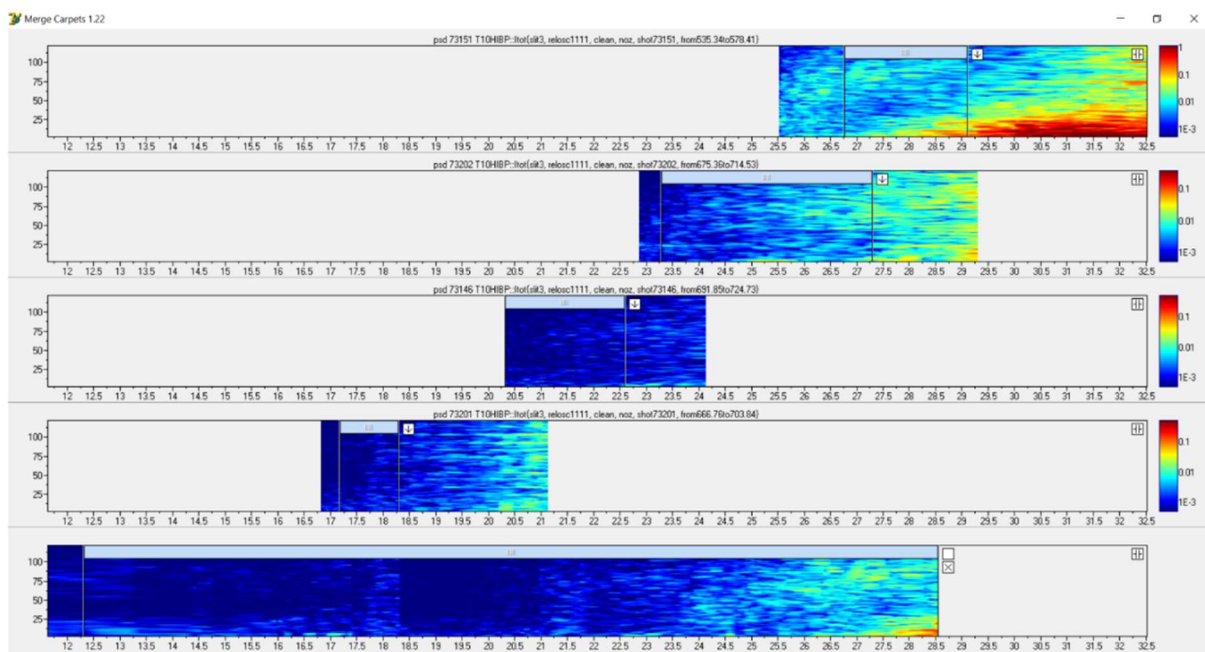


Рис. 8 Интерфейс программного комплекса Sigview в процессе объединения спектрограмм.

Для построения радиальных характеристик выполняется численный расчет положения области измерений используя такие параметры как начальная энергия пучка ионов, напряжение на корректирующих пластинах, магнитное поле установки. Далее при построении СПМ в качестве основной оси используется не шкала времени, а положение области измерений (величина текущего малого радиуса установки).

В данной работе были построены спектрограммы для сигналов потенциала плазмы и полного тока с пластин анализатора. Для этого были выбраны 5 режимов работы токамака, три из которых отличаются среднечордовой электронной плотностью плазмы. Оставшиеся два режима отличаются всеми параметрами плазмы и установки. Полный список режимов и использованных номеров импульсов приведен в приложении (Таблица 4).

Глава 2

Измерение радиальных характеристик геодезической акустической моды

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 1,7$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 200$ кА и плотностью $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение геодезической акустической моды в широком диапазоне $0,2 \leq \rho \leq 0,8$ для омической стадии плазменного разряда. Сценарий данного плазменного разряда для одного из выбранных импульсов приведен на

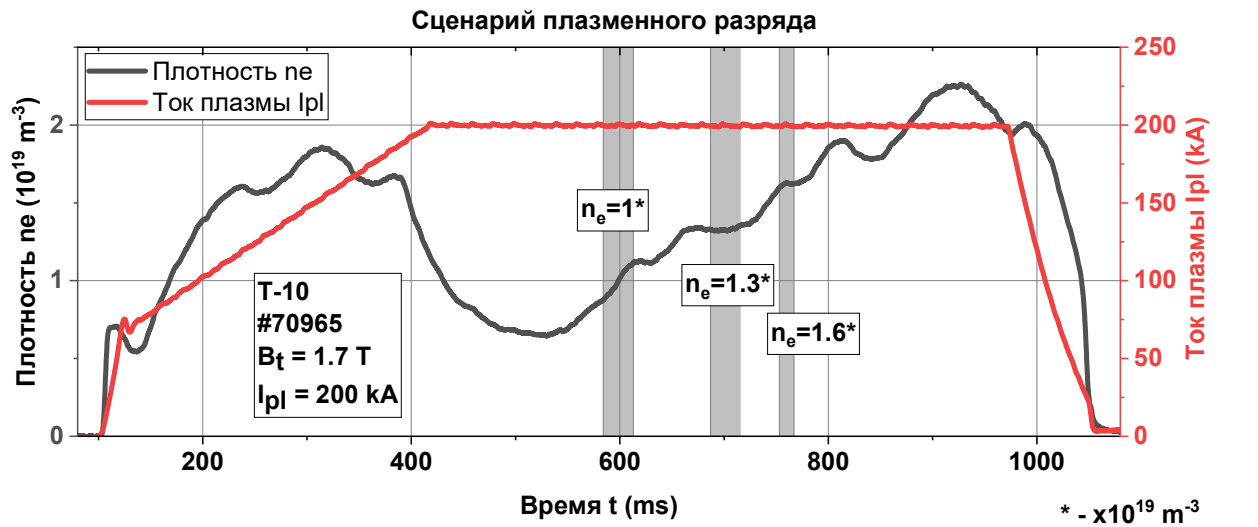


Рис. 9.

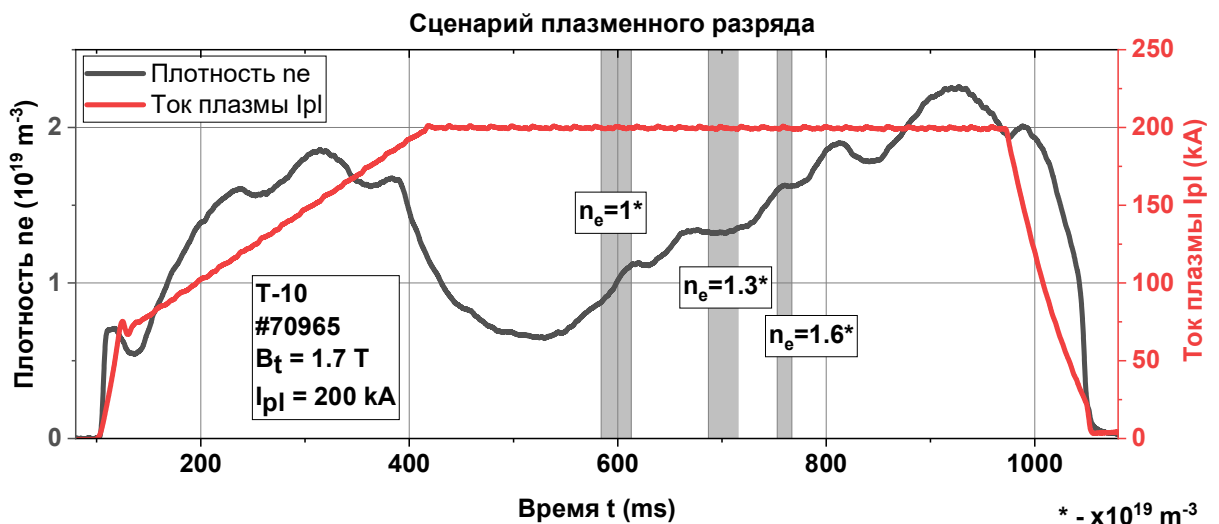


Рис. 9 Сценарий плазменного разряда #70965 на токамаке Т-10. Магнитное поле на оси $B_t = 1,7$ Тл; ток плазмы $I_{pl} = 200$ кА; черная линия – среднечордовая электронная плотность n_e ; красная линия – ток плазмы I_{pl} . Серым выделены три временных диапазона плотности плазмы, которые были рассмотрены при построении спектрограмм.

На

Рис. 10 изображена спектральная плотность мощности потенциала плазмы. Цветом показана амплитуда колебаний потенциала плазмы - геодезической акустической моды и ее сателлита. По вертикальной оси - частота колебаний, по горизонтальной оси – радиус вакуумной камеры токамака.

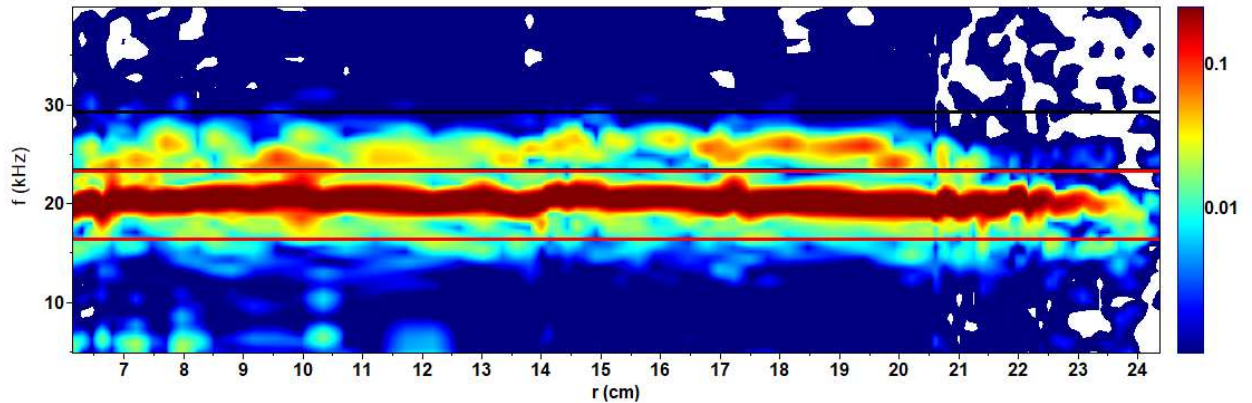


Рис. 10 Спектрограмма колебаний потенциала плазмы. Радиальное распределение геодезической акустической моды. Логарифмическая цветовая шкала. Красной рамкой выделена ГАМ. Черной рамкой выделен сателлит ГАМ. Условия: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

С использованием данной спектрограммы были построены графики частоты (Рис. 11) и амплитуды (Рис. 12) колебаний ГАМ и ее сателлита. На спектрограмме изображены черный и красные регионы, по которым рассматривались данные радиальные характеристики.

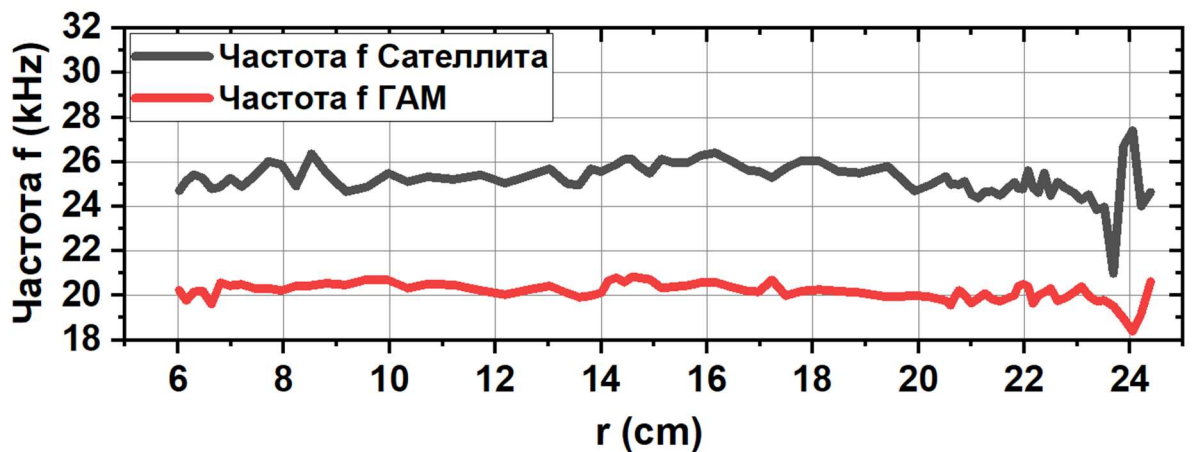


Рис. 11 График зависимости частот ГАМ и сателлита ГАМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10. Красная линия – частота ГАМ; серая линия – частота сателлита ГАМ. Условия: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

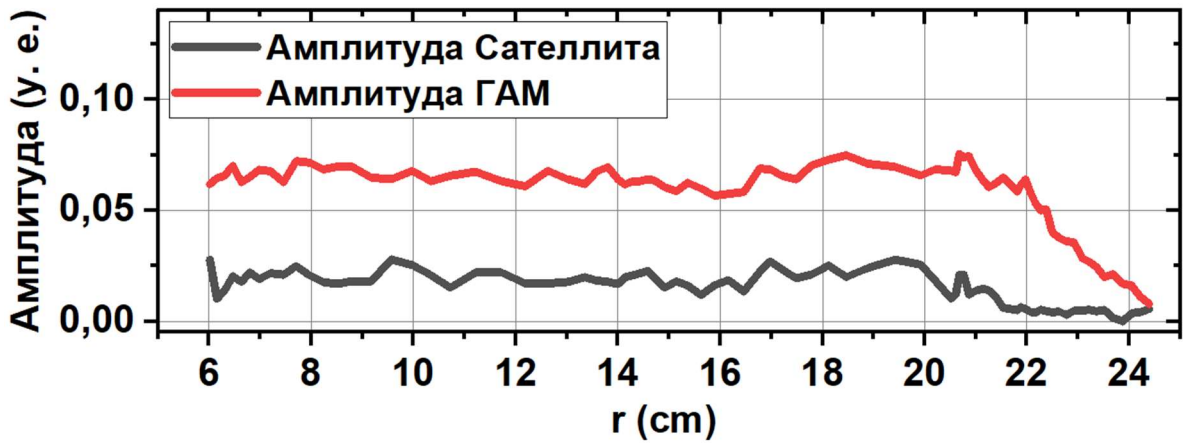


Рис. 12 График зависимости амплитуд ГАМ и сателлита ГАМ от величины текущего малого радиуса токамака T-10; Красная линия – амплитуда ГАМ; Серая линия – амплитуда сателлита ГАМ; у.е. = $\text{кВт}^2/\text{кГц}$; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 2,3$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 180$ – 230 кА и плотностью $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение концентрации плазмы в условиях геодезической акустической моды в диапазоне $0,6 \leq \rho \leq 0,8$ для омической стадии плазменного разряда. Сценарий данного плазменного разряда для одного из выбранных импульсов приведен на Рис. 13.

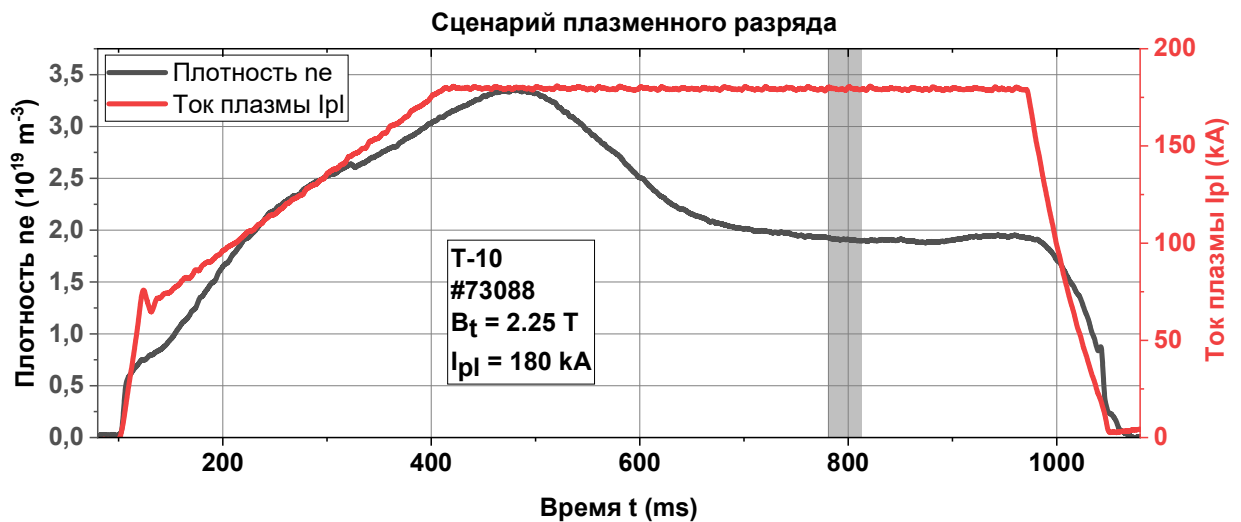


Рис. 13 Сценарий плазменного разряда #73088 на токамаке T-10; Магнитное поле на оси $B_t = 2,25$ Тл; Ток плазмы $I_{pl} = 180$ кА; Серая линия – среднехордовая электронная плотность n_e ; Красная линия – ток плазмы I_{pl} ; Серый временной диапазон выделяет участок плотности плазмы, который был рассмотрен при построении спектрограммы.

На Рис. 14 изображена спектральная плотность мощности потенциала плазмы для данного режима. Стоит отметить, что спектрограмма состоит из четырех сканов один из которых отличается величиной тока плазмы. Также между

сканами возможны пропуски без данных, это связано с возможностями диагностики.

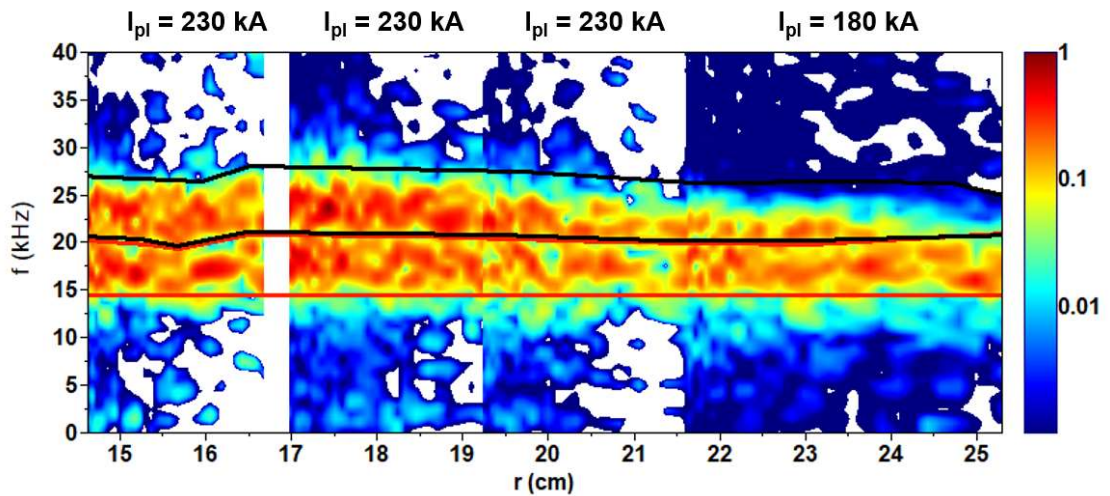


Рис. 14 Спектрограмма потенциала плазмы. Радиальное распределение геодезической акустической моды. Логарифмическая цветовая шкала. Красной рамкой выделена ГАМ. Черной рамкой выделен спутник ГАМ; Спектрограмма состоит из 4-х сканов с различной величиной тока плазмы (значение токов плазмы указаны над спектрограммой); Режим: $B_t = 2,25$ Тл; $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

На Рис. 15 представлен спектр 4-х сканов спектрограммы изображённой на Рис. 14. На нем отчетливо видны два пика – ГАМ и спутник ГАМ. Можно заметить, что амплитуда колебаний убывает на периферии плазмы.

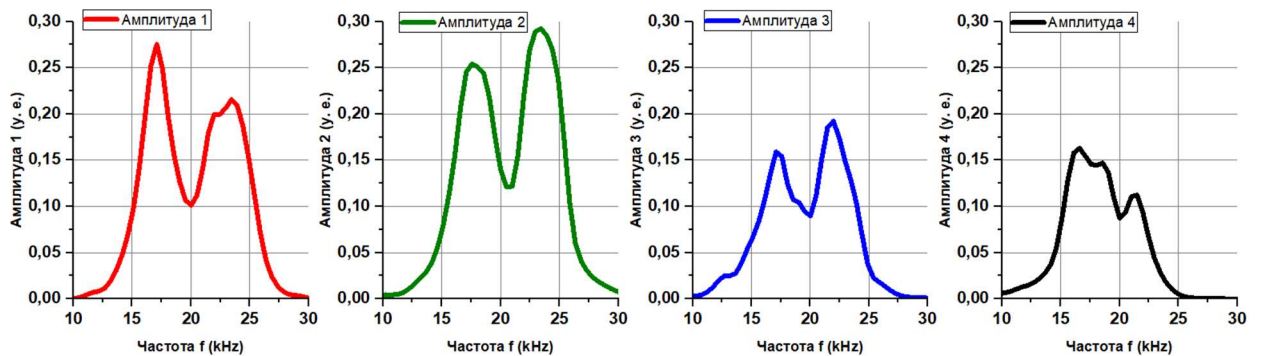


Рис. 15 Спектр 4-х сканов спектрограммы на Рис. 14. Режим: $B_t = 2,25$ Тл; $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Таким же образом, были построены графики частоты (Рис. 16) и амплитуды (Рис. 17) колебаний ГАМ и ее спутника.

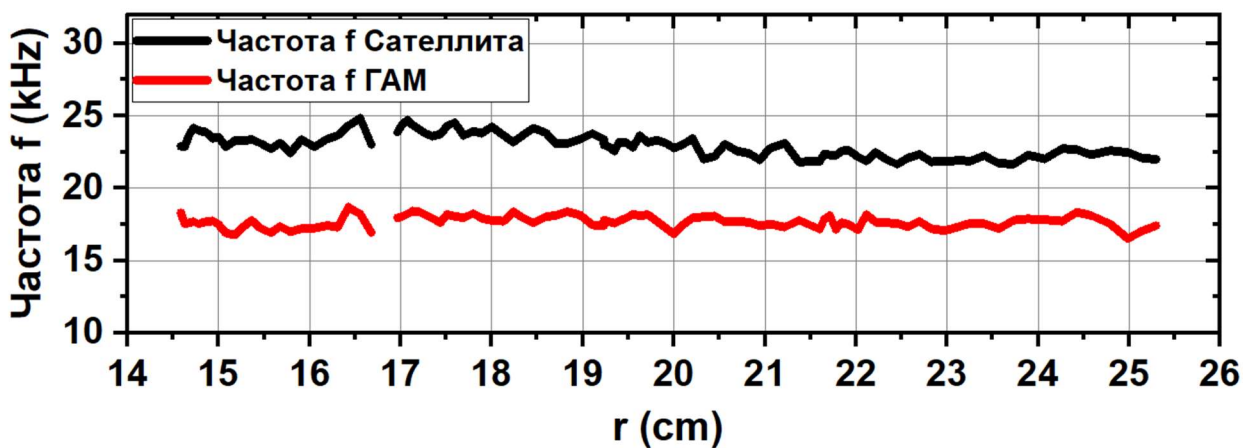


Рис. 16 График зависимости частот ГАМ и сателлита ГАМ от величины текущего малого радиуса токамака T-10; Красная линия – частота ГАМ; Серая линия – частота сателлита ГАМ; Режим: $B_t = 2,25$ Тл; $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

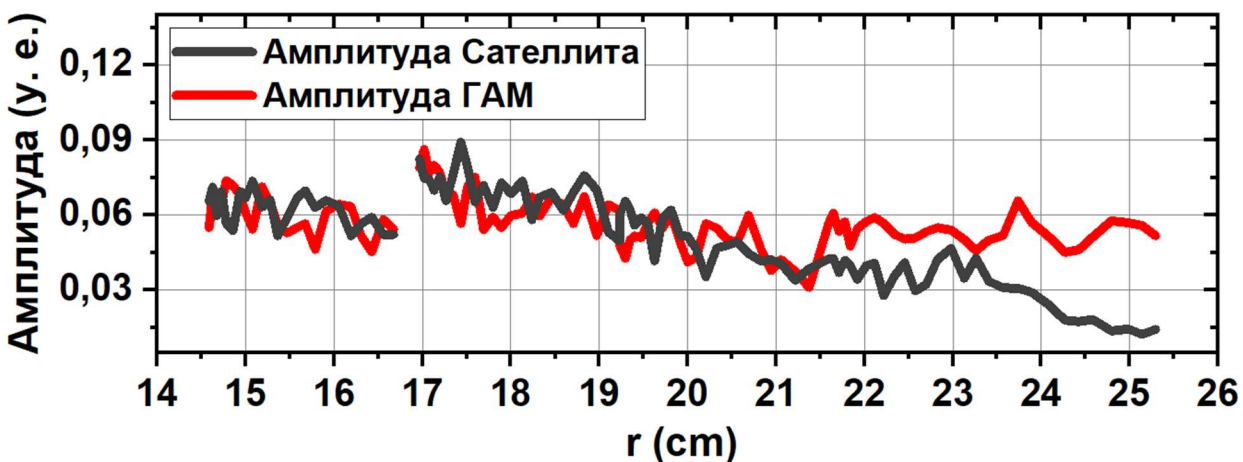


Рис. 17 График зависимости амплитуд ГАМ и сателлита ГАМ от величины текущего малого радиуса токамака T-10; Красная линия – амплитуда ГАМ; Серая линия – амплитуда сателлита ГАМ; у.е. = $\text{кВт}^2/\text{кГц}$; Режим: $B_t = 2,25$ Тл; $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 2,4$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 250$ кА и плотностью $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение геодезической акустической моды в диапазоне $0,7 \leq \rho \leq 0,9$ для омической стадии плазменного разряда. Сценарий данного плазменного разряда для одного из выбранных импульсов приведен на Рис. 18.

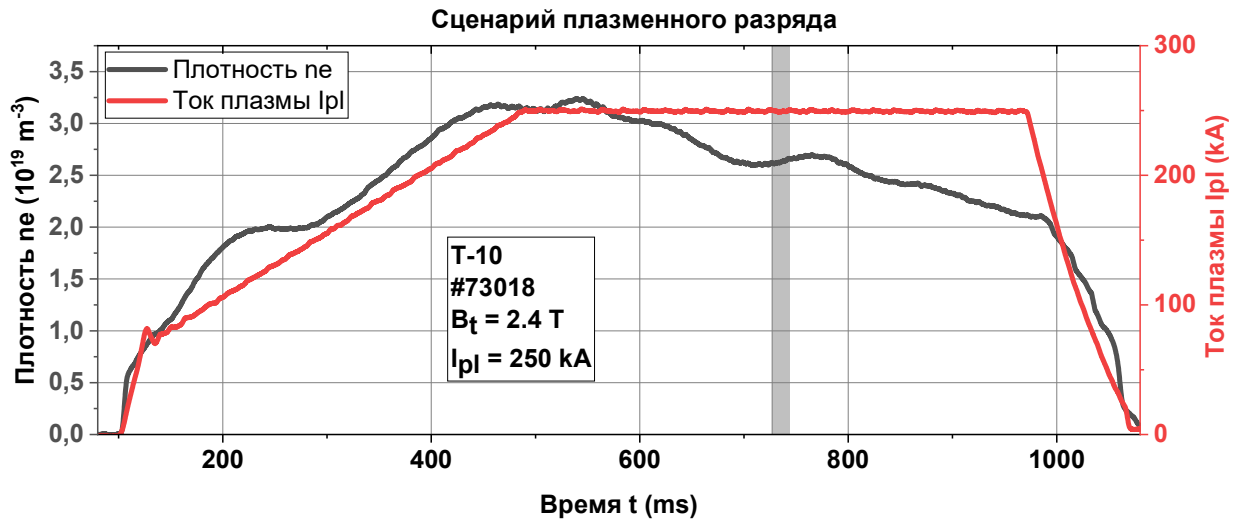


Рис. 18 Сценарий плазменного разряда #73018 на токамаке Т-10; Магнитное поле на оси $B_t = 2,4$ Тл; Ток плазмы $I_{pl} = 250$ кА; Серая линия – среднечордовая электронная плотность n_e ; Красная линия – ток плазмы I_{pl} ; Серый временной диапазон выделяет участок плотности плазмы, который был рассмотрен при построении спектрограммы.

На Рис. 19 изображено радиальное распределение спектральной плотности мощности потенциала плазмы для данного режима.

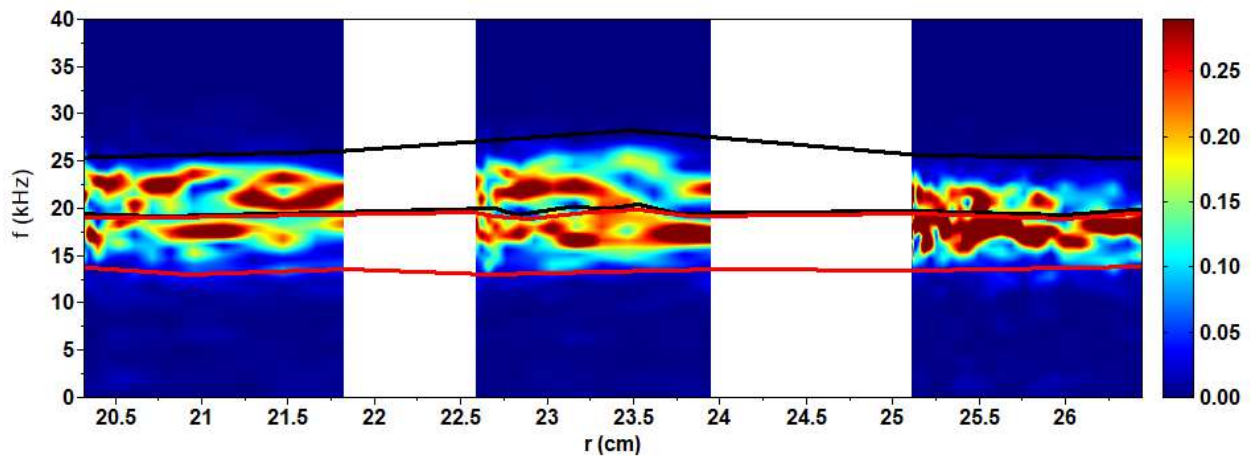


Рис. 19 Спектрограмма потенциала плазмы. Радиальное распределение геодезической акустической моды. Логарифмическая цветовая шкала. Красной рамкой выделен ГАМ. Черной рамкой выделен сателлит ГАМ; Режим: $B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

На Рис. 20 представлен спектр 4-х сканов спектрограммы. На нем видны два пика – ГАМ и сателлит ГАМ. На периферии плазмы амплитуда колебаний ГАМ возросла, в то время как амплитуда сателлита ГАМ уменьшилась.

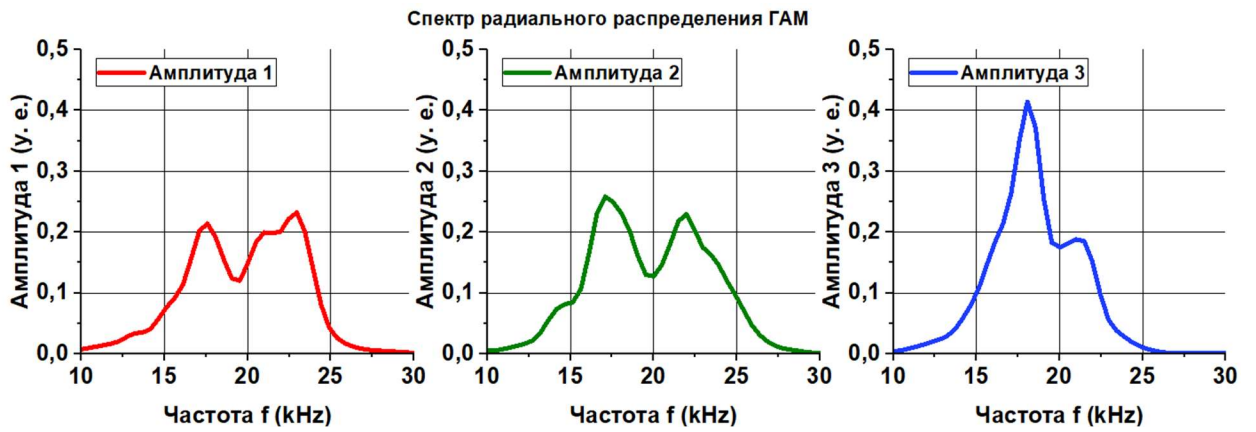


Рис. 20 Спектр 3-х сканов спектрограммы Рис. 19; Режим: $B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Были построены графики частоты (Рис. 21) и амплитуды (Рис. 22) колебаний ГАМ и ее сателлита.

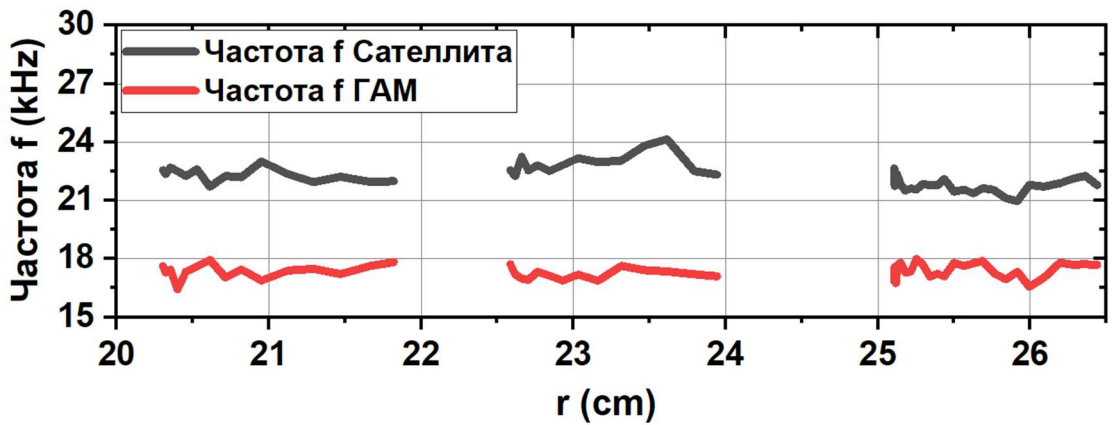


Рис. 21 График зависимости частот ГАМ и сателлита ГАМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Красная линия – частота ГАМ; Серая линия – частота сателлита ГАМ; Режим: $B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

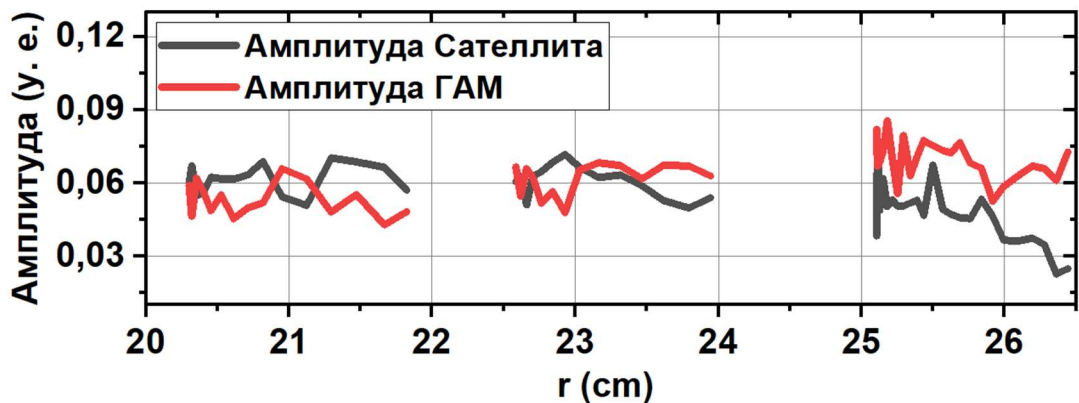


Рис. 22 График зависимости амплитуд ГАМ и сателлита ГАМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Красная линия – амплитуда ГАМ; Серая линия – амплитуда сателлита ГАМ; у.е. = $\text{кВт}^2/\text{кГц}$; Режим: $B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Общие закономерности

На основании проведенного исследования радиальных характеристик ГАМ можно сделать следующие заключения:

- На колебаниях потенциала плазмы наблюдается ГАМ и ее сателлит.
- ГАМ и ее сателлит имеют однородную структуру по всему малому радиусу.
- Амплитуды колебаний ГАМ и ее сателлита постоянна и убывает лишь на периферии плазмы.
- Амплитуды колебаний сателлита ГАМ на периферии убывает быстрее чем амплитуда колебаний ГАМ.
- Частоты колебаний ГАМ и ее сателлита постоянны по всему малому радиусу.

Полученные результаты совпадают с результатами полученными ранее в других режимах работы токамака Т-10 [3, 17].

Результаты

Были измерены радиальные зависимости параметров геодезической акустической моды, а именно частоты и интенсивности колебаний потенциала плазмы при различных параметрах плазмы.

Результаты измерений приведены в Таблица 2. Рассматривалась область постоянных амплитуд, без периферии.

Таблица 2 Радиальные характеристики ГАМ и ее сателлита.

Режим T-10	Амплитуда колебаний ГАМ, кВт ² /кГц	Частота колебаний ГАМ, кГц	Амплитуда колебаний сателлита ГАМ, кВт ² /кГц	Частота колебаний сателлита ГАМ, кГц
$B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19}$ м ⁻³	0,07	20,0	0,02	25
$B_t = 2,25$ Тл; $I_{pl} = 180$ – 230 кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19}$ м ⁻³	0,06	17,5	0,06	24
$B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19}$ м ⁻³	0,06	17,9	0,06	22,5

Глава 3

Измерение радиальных характеристик квазикогерентной моды

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 1,7$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 200$ кА и плотностью $n_e = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение квазикогерентной моды в широком диапазоне $0,2 \leq \rho \leq 0,8$ для омической стадии плазменного разряда. Сценарий данного плазменного разряда для одного из выбранных импульсов приведен на

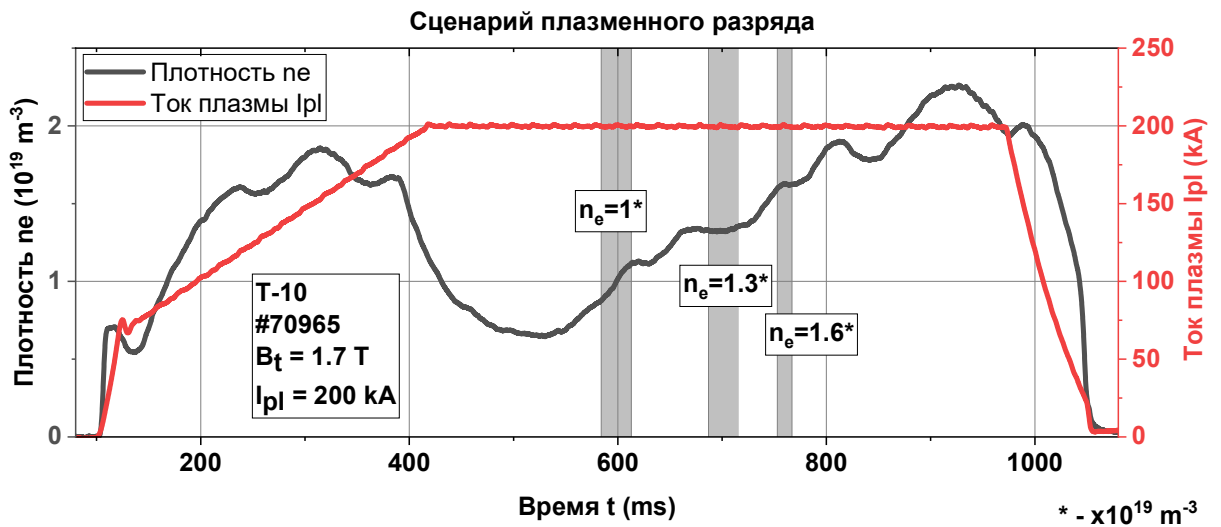


Рис. 9.

На Рис. 23 изображена спектральная плотность мощности плотности плазмы (спектрограмма полного тока). Цвет спектрограммы зависит от интенсивности колебаний, чем их амплитуда больше, тем краснее участок изображения. Колебания квазикогерентной моды можно наблюдать на диапазоне частот от 50 до 150 кГц. В радиальном диапазоне от 6,5 см до 18,7 см амплитуда колебаний ККМ изображена бирюзовым цветом, на периферии плазмы — желто-красным пятном. Возмущения в диапазоне частот от 0 до 25 кГц не являются ККМ.

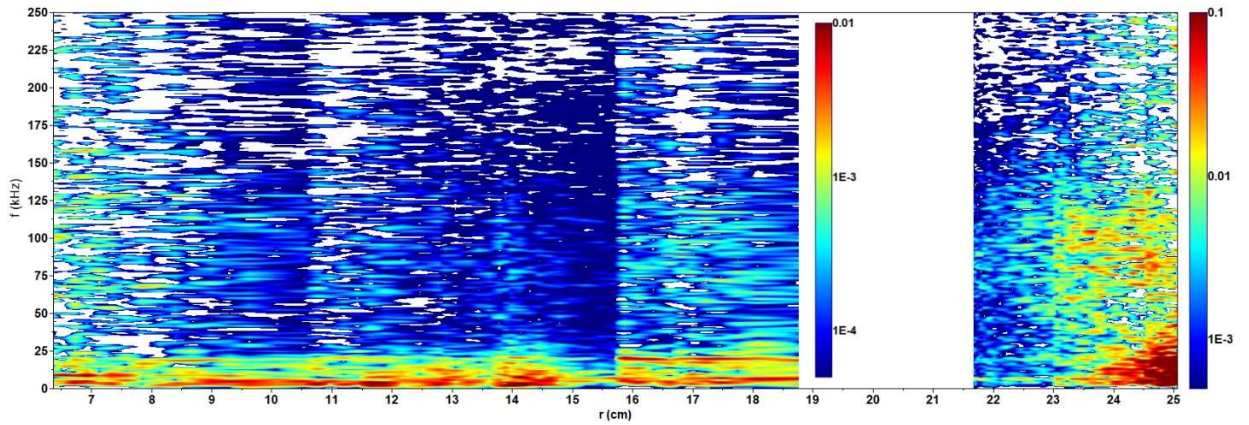


Рис. 23 Спектрограмма плотности плазмы. Радиальное распределение квазикогерентной моды; Логарифмическая цветовая шкала; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

По данной спектрограмме были построены графики частоты (Рис. 24) и амплитуды (Рис. 25) колебаний квазикогерентной моды.

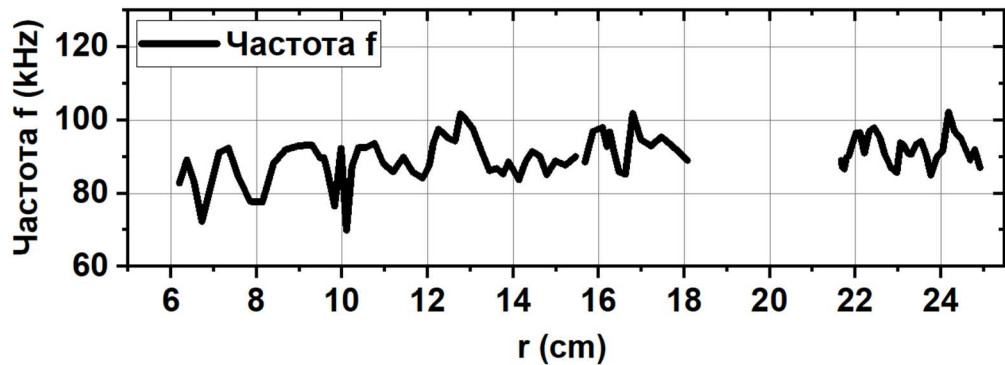


Рис. 24 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

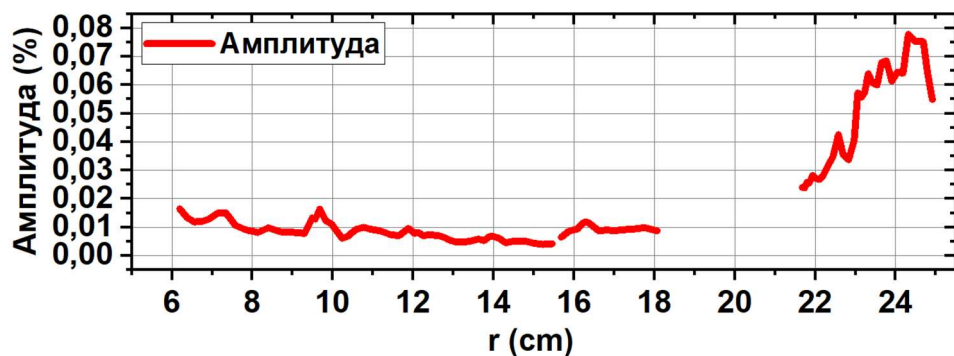


Рис. 25 График зависимости амплитуды ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для похожего режима, но с другой плотностью плазмы $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение квазикогерентной моды.

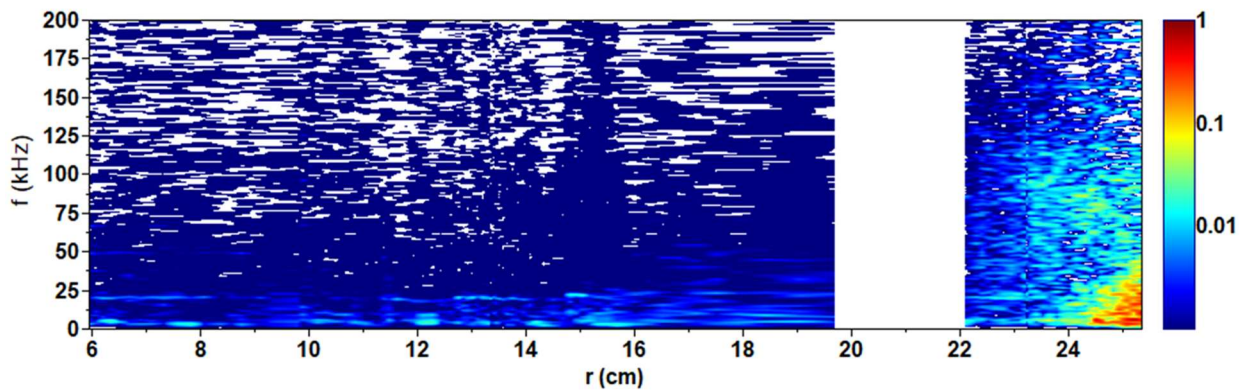


Рис. 26 Спектрограмма плотности плазмы. Радиальное распределение геодезической акустической моды. Логарифмическая цветовая шкала; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Ближе к центру плазмы на спектрограмме практически невозможно различить колебания ККМ. Измерение частоты (Рис. 27) и амплитуды (Рис. 28) в данной области произведено на пороге возможностей диагностики.

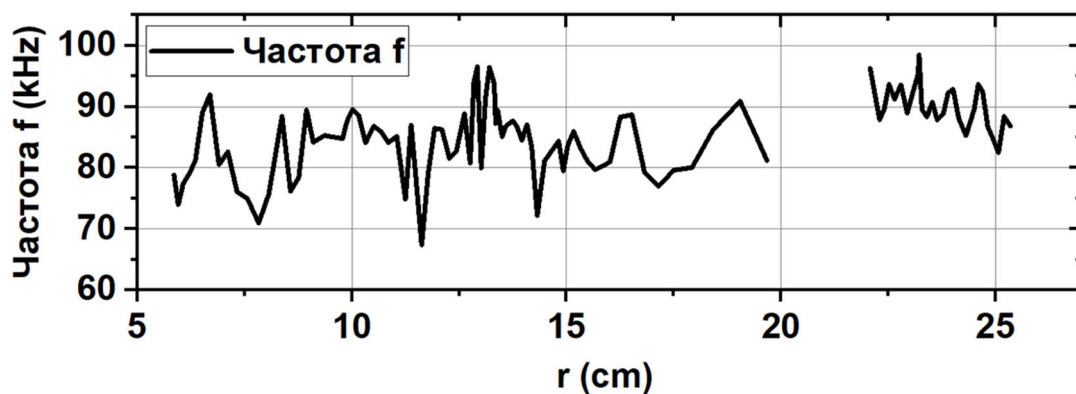


Рис. 27 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

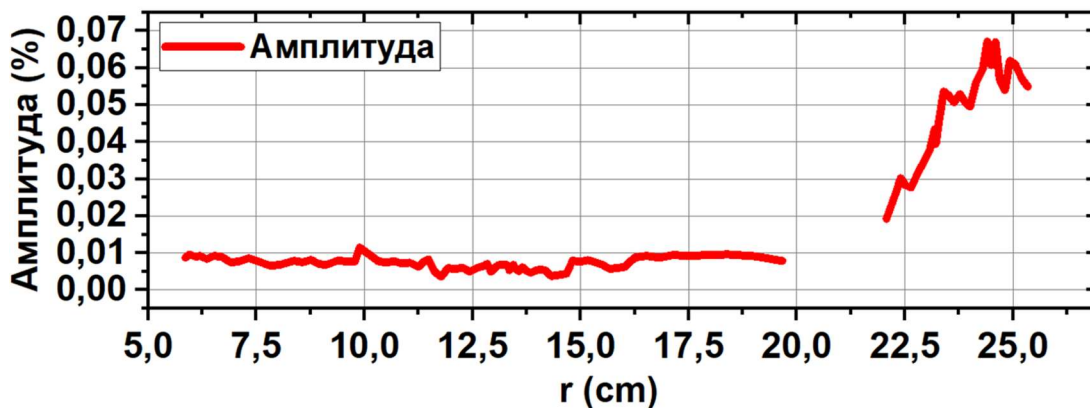


Рис. 28 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для идентичного режима, но с другой плотностью плазмы $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ также было построено радиальное распределение квазикогерентной моды.

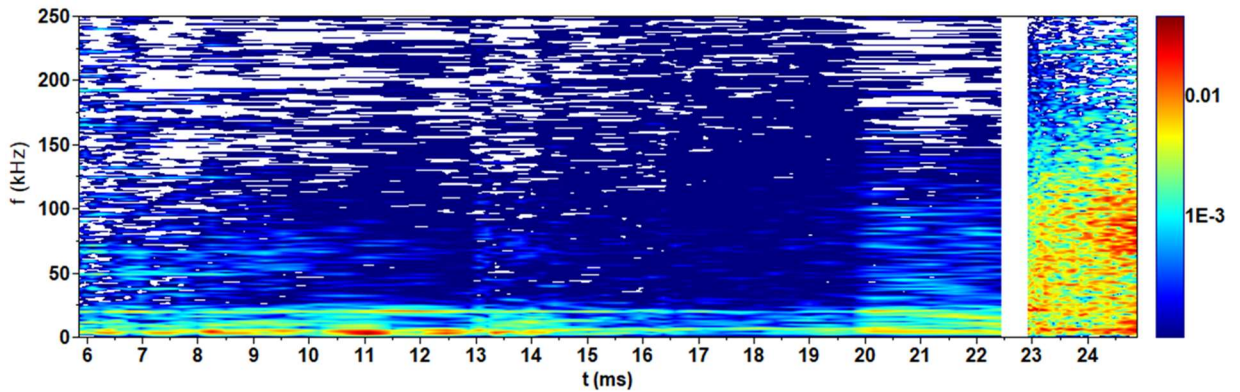


Рис. 29 Спектрограмма плотности плазмы. Радиальное распределение геодезической акустической моды. Логарифмическая цветовая шкала; Режим: $B_t = 1,7 \text{ Тл}$; $I_{pl} = 200 \text{ кА}$; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Ближе к центру плазмы на спектрограмме в частотном диапазоне от 40 до 120 кГц уже можно различить колебания ККМ. По данной спектрограмме были построены графики частоты (Рис. 30) и амплитуды (Рис. 31) колебаний квазикогерентной моды.

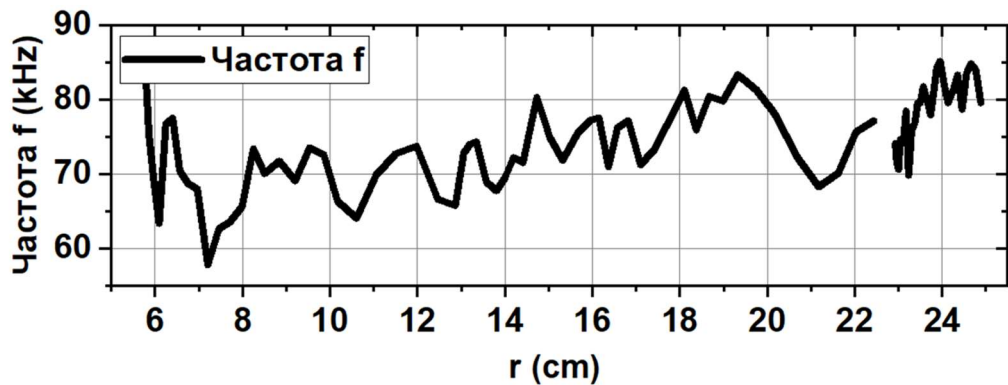


Рис. 30 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 1,7 \text{ Тл}$; $I_{pl} = 200 \text{ кА}$; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

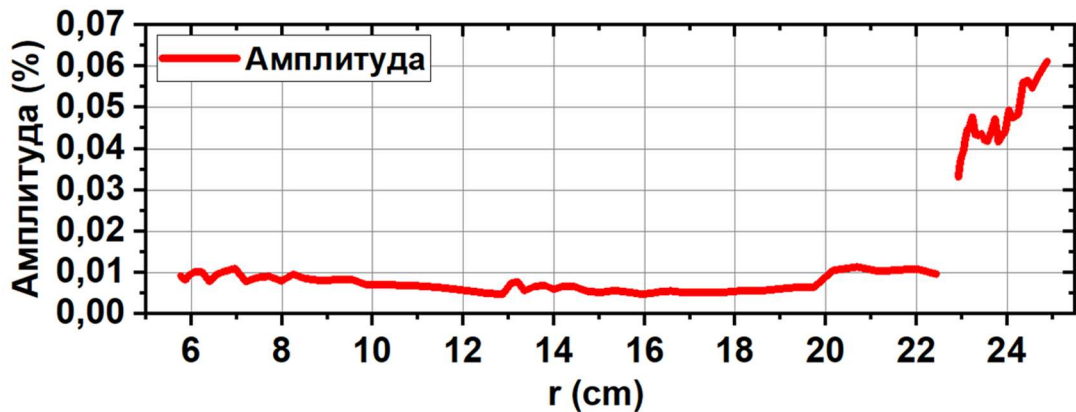


Рис. 31 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19}$ м⁻³.

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 2,3$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 180$ – 230 кА и плотностью $n_e = 2 \cdot 10^{19}$ м⁻³ было построено радиальное распределение квазикогерентной моды в широком диапазоне $0,6 \leq \rho \leq 0,8$ для омической стадии плазменного разряда. Сценарий данного плазменного разряда для одного из выбранных импульсов приведен на Рис. 13.

На Рис. 32 изображена спектральная плотность мощности плотности плазмы (спектрограмма полного тока). Колебания квазикогерентной моды можно наблюдать на диапазоне частот от 50 до 150 кГц. Изображены бирюзово-желто-красным цветом.

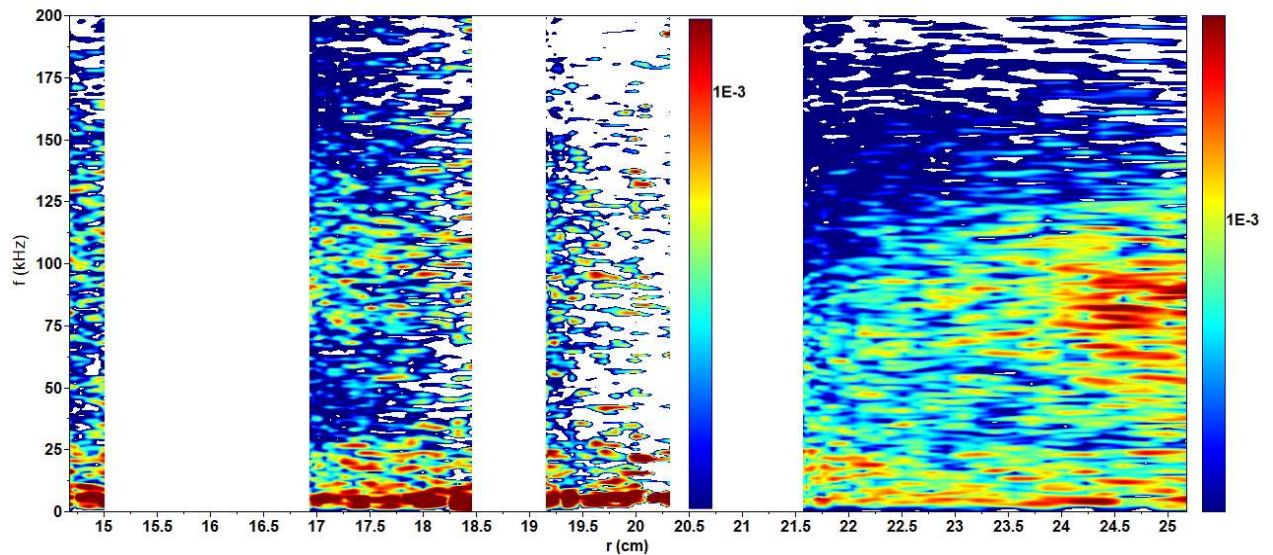


Рис. 32 Спектрограмма плотности плазмы. Радиальное распределение геодезической акустической моды. Логарифмическая цветовая шкала; Режим: $B_t = 2,3$ Тл; $I_{pl} = 180$ – 230 кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19}$ м⁻³.

По данной спектрограмме были построены графики частоты (Рис. 33) и амплитуды (Рис. 34) колебаний квазикогерентной моды.

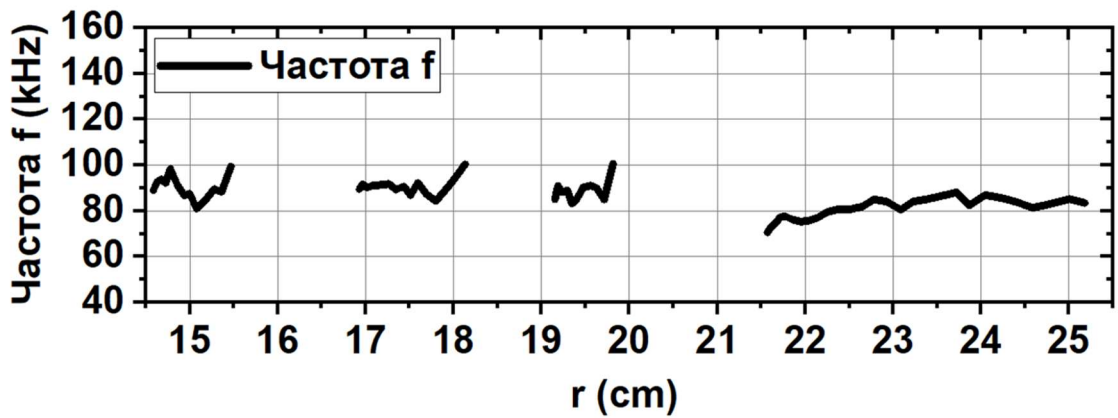


Рис. 33 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 2,3$ Тл; $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

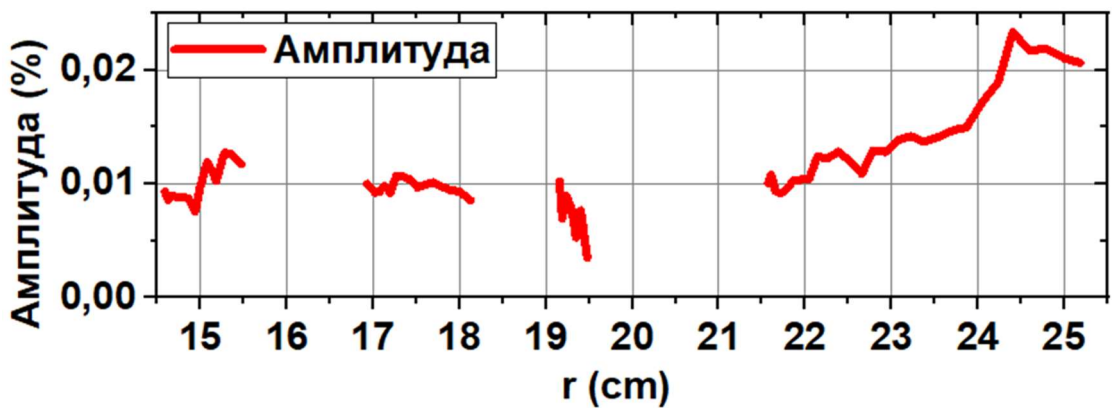


Рис. 34 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 2,3$ Тл; $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 2,4$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 250$ кА и плотностью $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение квазиогерентной моды в широком диапазоне $0,7 \leq \rho \leq 0,9$ для омической стадии плазменного разряда. Сценарий данного плазменного разряда для одного из выбранных импульсов приведен на Рис. 13.

На Рис. 32 изображена спектральная плотность мощности плотности плазмы (спектрограмма полного тока). Колебания квазиогерентной моды можно наблюдать на диапазоне частот от 50 до 150 кГц. Изображены бирюзово-желто-красным цветом.

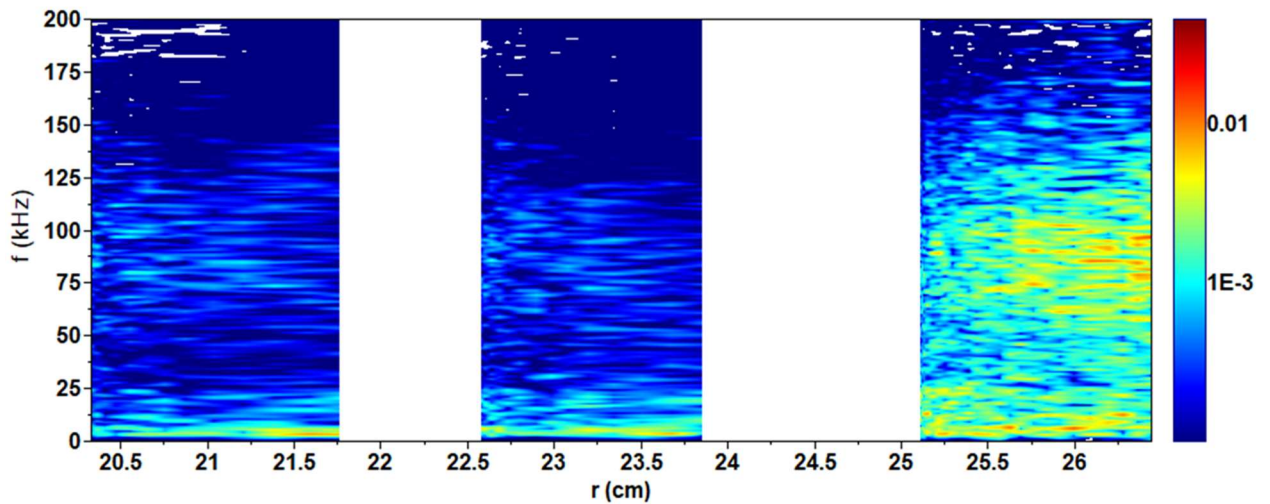


Рис. 35 Спектрограмма плотности плазмы. Радиальное распределение геодезической акустической моды. Логарифмическая цветовая шкала; Режим: $B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

По данной спектрограмме так же были построены графики частоты (Рис. 36) и амплитуды (Рис. 37) колебаний квазикогерентной моды.

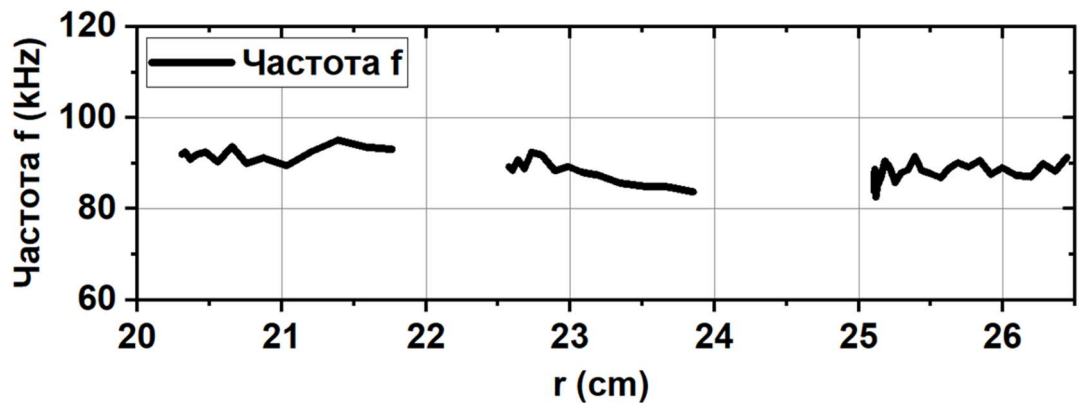


Рис. 36 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

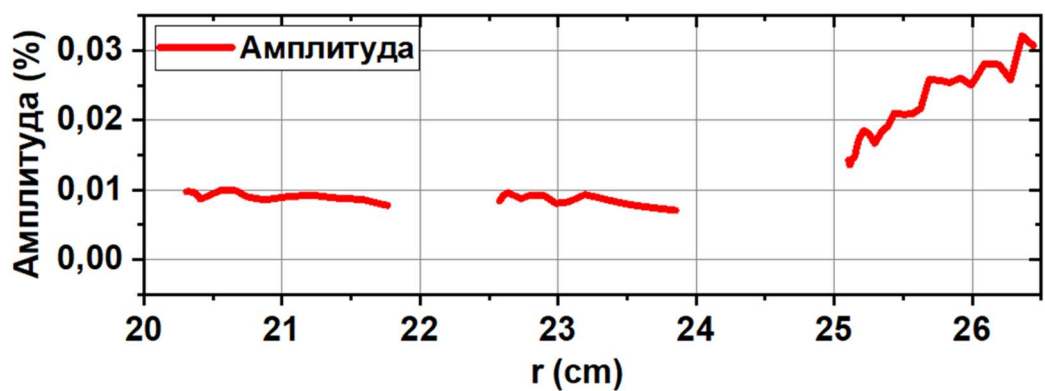


Рис. 37 График зависимости частоты ККМ от величины текущего малого радиуса токамака Т-10; Режим: $B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Общие закономерности

На основании проведенного исследования радиальных характеристик ККМ можно сделать следующие заключения:

- Амплитуда колебаний ККМ больше на периферии плазмы и убывает ближе к ее центру.
- Частота колебаний ККМ остается постоянной вдоль всего малого радиуса.

Результаты полученные в данном исследовании совпадают с результатами полученными ранее при изучении ККМ на токамаке Т-10 [1, 20].

Результаты

Были измерены радиальные характеристики геодезической акустической моды, а именно частота и интенсивность колебаний потенциала плазмы при различных параметрах плазмы. Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 1,7$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 200$ кА и тремя различными плотностями измерения частоты и амплитуды колебаний ККМ были произведены на пределе возможностей диагностики.

Результаты измерений приведены в Таблица 3.

Таблица 3 Радиальные характеристики ККМ.

Режим Т-10	Частота колебаний ККМ, кГц	Мин. амплитуда колебаний ККМ, %	Макс. амплитуда колебаний ККМ, %
$B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$	90	1	8,0
$B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$	85	1	7,0
$B_t = 1,7$ Тл; $I_{pl} = 200$ кА; $0,2 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$	75	1	6,0
$B_t = 2,3$ Тл; $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА; $0,6 \leq \rho \leq 0,8$; $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$	90	1	2,2
$B_t = 2,4$ Тл; $I_{pl} = 250$ кА; $0,7 \leq \rho \leq 0,9$; $n_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$	87	1	3,1

Выводы

Одним из методов, позволяющих изучать турбулентность и зональные потоки в периферийных и горячих областях плазмы токамака, является зонд пучка тяжелых ионов (ЗПТИ). Это единственный метод измерения потенциала плазмы тороидальных магнитных устройств непосредственно в центральных областях плазмы. Помимо среднего потенциала, он позволяет одновременно и независимо измерять вариации электрического потенциала, плотности плазмы и полоидального магнитного поля [16].

В ходе работы были рассмотрены физические принципы измерений с помощью диагностики ЗПТИ и методика измерения колебаний потенциала и плотности плазмы.

Для достижения главной цели были выбраны режимы работы установки и соответствующие им импульсы плазменного разряда. Сигналы, полученные с диагностики, были обработаны и подготовлены для построения спектрограмм потенциала и плотности плазмы.

В данной работе представлены радиальные распределения частоты и интенсивности квазикогерентной и геодезической акустической мод (ККМ и ГАМ соответственно), полученные с помощью диагностики ЗПТИ в омической плазме (без дополнительного нагрева плазмы) в различных режимах работы токамака Т-10.

Для режима $B_t = 1,7$ Тл, $I_{pl} = 200$ кА, для плотностей $n_e = 1 \cdot 10^{19}$ м⁻³ и $n_e = 1,6 \cdot 10^{19}$ м⁻³ радиальные распределения частоты и интенсивности ККМ были измерены в радиальном диапазоне $0,2 \leq r/a \leq 0,8$ для омической стадии разряда.

Для режима с магнитным полем $B_t = 1,7$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 200$ кА, плотностью $n_e = 1,3 \cdot 10^{19}$ м⁻³ проведено исследование радиальной структуры ГАМ, его сателлита и ККМ в широком пространственном диапазоне плазменного шнура ($0,2 < r/a < 0,8$) токамака Т-10.

Для режима $B_t = 2,4$ Тл, $I_{pl} = 250$ кА, $n_e = 2,7 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $0,7 \leq r/a \leq 0,9$ были получены радиальные распределения ГАМ и ККМ. В этом режиме можно отметить присутствие ККМ в спектрограмме потенциала плазмы.

Для режима $B_t = 2,25$ Тл, $I_{pl} = 180\text{--}230$ кА, $n_e = 2 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $0,6 \leq r/a \leq 0,8$ были измерены радиальные распределения ГАМ и ККМ. В этом режиме можно отметить, что спектральная плотность мощности полного тока пластины и потенциала плазмы были рассчитаны для различных значений тока плазмы. Это позволяет увидеть зависимость частоты плазменных колебаний от тока плазмы.

Для вышеперечисленных режимов были построены графики зависимости частоты и интенсивности колебаний потенциала и плотности плазмы. Используя данные графики были установлены основные закономерности данных колебаний.

Для данных режимов работы токамака Т-10 подобные измерения ранее не проводились. Чем больше экспериментальных данных удастся обработать, тем быстрее мы сможем понять свойства плазмы, необходимые для лучшего удержания плазмы.

В дальнейшем планируется провести измерения радиальных распределений ККМ и ГАМ в других режимах работы токамака Т-10. Также изучение зависимости частот этих мод от тока плазмы и электронного циклотронного нагрева позволит лучше изучить свойства турбулентного потока в плазме.

Преодолев все трудности удержания плазмы, человечество придет к управляемому термоядерному синтезу, который даст экологически чистый источник неисчерпаемой энергии, по аналогии с Солнцем, что решит проблемы человечества с нехваткой ресурсов и энергии.

Список использованной литературы

1. Drabinskiy, M.A., Eliseev, L.G., Khabanov, P.O., Melnikov, A. V., Kharchev, N.K., Sergeev, N.S., Grashin, S.A.: Radial structure of quasi-coherent mode in ohmic plasma of the T-10 tokamak. In: Journal of Physics: Conference Series (2019)
2. ELISEEV, L.G., MELNIKOV, A. V., LYSENKO, S.E., KHABANOV, P.O., ZENIN, V.N., DRABINSKIY, M.A., KHARCHEV, N.K., KOZACHEK, A.S., KRUPNIK, L.I.: Evaluation of Turbulent Particle Flux by Heavy Ion Beam Probe in the T-10 Tokamak. Plasma Fusion Res. 13, 3402106–3402106 (2018). <https://doi.org/10.1585/pfr.13.3402106>
3. Melnikov, A. V., Eliseev, L.G., Lysenko, S.E., Ufimtsev, M. V., Zenin, V.N.: Study of interactions between GAMs and broadband turbulence in the T-10 tokamak. Nucl. Fusion. 57, (2017). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa796c>
4. Стрелков, С.В., Лысенко, Е.С.: Основы техники термоядерного эксперимента в токамаке. НИЯУ МИФИ, Москва (2015)
5. Котельников, И.А.: Лекции по физике плазмы. Том 1. Основы физики плазмы: учебное пособие для вузов : в 2 томах. Лань, Санкт-Петербург (2021)
6. Peacock, N.J., Robinson, D.C., Forrest, M.J., Wilcock, P.D., Sannikov, V. V.: Measurement of the electron temperature by Thomson scattering in Tokamak T3. Nature. 224, 488–490 (1969). <https://doi.org/10.1038/224488a0>
7. Котельников, И.А.: Лекции по физике плазмы. Том 2. Магнитная гидродинамика: Учебное пособие для вузов. Лань, Санкт-Петербург (2022)
8. Арцимович, Л.А., Сагдеев, Р.З.: Физика плазмы для физиков. Ленанд, Москва (2018)
9. INGERSOLL AP, CUZZI JN: DYNAMICS OF JUPITER’S CLOUD BANDS. J. Atmos. Sci. 26, (1969). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)026<0981:dojcb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)026<0981:dojcb>2.0.co;2)
10. Vasavada, A.R., Showman, A.P.: Jovian atmospheric dynamics: An update after

- Galileo and Cassini. Reports Prog. Phys. 68, (2005).
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R06>
11. Itoh, K., Itoh, S.I., Diamond, P.H., Hahm, T.S., Fujisawa, A., Tynan, G.R., Yagi, M., Nagashima, Y.: Physics of zonal flows. In: Physics of Plasmas (2006)
 12. Biglari, H., Diamond, P.H., Terry, P.W.: Influence of sheared poloidal rotation on edge turbulence. Phys. Fluids B. 2, (1990). <https://doi.org/10.1063/1.859529>
 13. Fujisawa, A., Ido, T., Shimizu, A., Okamura, S., Matsuoka, K., Iguchi, H., Hamada, Y., Nakano, H., Ohshima, S., Itoh, K., Hoshino, K., Shinohara, K., Miura, Y., Nagashima, Y., Itoh, S.I., Shats, M., Xia, H., Dong, J.Q., Yan, L.W., Zhao, K.J., Conway, G.D., Stroth, U., Melnikov, A. V., Eliseev, L.G., Lysenko, S.E., Perfilov, S. V., Hidalgo, C., Tynan, G.R., Holland, C., Diamond, P.H., McKee, G.R., Fonck, R.J., Gupta, D.K., Schoch, P.M.: Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas. Nucl. Fusion. 47, (2007). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/10/S19>
 14. Winsor, N., Johnson, J.L., Dawson, J.M.: Geodesic acoustic waves in hydromagnetic systems. Phys. Fluids. 11, (1968). <https://doi.org/10.1063/1.1691835>
 15. Мельников, А.В.: Электрический потенциал в плазме тороидальных установок. Монография. НИЯУ МИФИ, Москва (2015)
 16. Melnikov, A. V., Krupnik, L.I., Eliseev, L.G., Barcala, J.M., Bravo, A., Chmyga, A.A., Deshko, G.N., Drabinskij, M.A., Hidalgo, C., Khabanov, P.O., Khrebtov, S.M., Kharchev, N.K., Komarov, A.D., Kozachek, A.S., Lopez, J., Lysenko, S.E., Martin, G., Molinero, A., De Pablos, J.L., Soleto, A., Ufimtsev, M. V., Zenin, V.N., Zhezhera, A.I.: Heavy ion beam probing - Diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas. Nucl. Fusion. 57, (2017). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5382>
 17. Melnikov, A. V., Eliseev, L.G., Grashin, S.A., Drabinskij, M.A., Khabanov, P.O., Kharchev, N.K., Krupnik, L.I., Kozachek, A.S., Lysenko, S.E., Zenin, V.N., HIBP Team: GAM and broadband turbulence structure in OH and ECRH plasmas in

- the T-10 tokamak. *Plasma Fusion Res.* 13, (2018).
<https://doi.org/10.1585/PFR.13.3402109>
18. Walton, S.G., Fernsler, R.F., Leonhardt, D.: Measurement of ion energy distributions using a combined energy and mass analyzer. *Rev. Sci. Instrum.* 78, (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2769352>
 19. Кирнева, Н.А., Кукушкин, А.Б., Лисица, В.С., Кукушкин, А.С., Мартыненко, Ю.В., Алимов, В.Х., Тараканов, В.П., Шустин, Е.Г.: Избранные вопросы физики плазмы и её применения. Вып. 1: Учебное пособие. НИЯУ МИФИ, Москва (2017)
 20. Drabinskiy, M.A., Melnikov, A. V., Eliseev, L.G., Khabanov, P.O., Kharchev, N.K., Lysenko, S.E.: Quasi-coherent mode evolution in discharges with positive radial electric field at the T-10 tokamak. In: *Journal of Physics: Conference Series* (2021)
 21. Drabinskii, M.A., Khabanov, F.O., Melnikov, A. V., Krupnik, L.I., Kozachek, A.S., Komarov, A.D., Zhezhera, A.I.: Engineering aspects of modernisation of heavy ion beam probe diagnostics on the T-10 tokamak. *Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion.* 39, (2016). <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2016-39-2-81-90>
 22. Елисеев, Л.Г.: Патент РФ №2015617233 T-10 HIBP SIGNAL VIEWER, (2015)
 23. Dnestrovskij, Y.N., Melnikov, A. V., Krupnik, L.I., Nedzelskij, I.S.: Development of Heavy Ion Beam Probe Diagnostics. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 22, (1994). <https://doi.org/10.1109/27.310637>

Приложение

Таблица 4 Список номеров использованных импульсов плазменного разряда

Режим	№ импульса	Среднехордовая электронная плотность n_e , 10^{19} м^{-3}	Энергия пучка ионов E_b , КэВ	Использованный временной диапазон сигналов I_{tot} и φ (3-я щель анализатора), мс
$B_t = 1.7 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 200 \text{ кА}$, $n_e = 1.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $0.2 \leq r/a \leq 0.8$	70940	1.31	125	784.62-807.55
	70940	1.18	125	425.09-453.98
	70938	1.31	130	707.03-729.59
	70936	1.31	140	747.10-760.83
	70960	1.22	155	663.39-678.99
	70965	1.33	170	687.40-716.42
	70990	1.24	180	691.77-723.32
	71127	1.33	210	670.69-698.14
$B_t = 1.7 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 200 \text{ кА}$, $n_e = 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $0.2 \leq r/a \leq 0.8$	70943	1.05	115	680.67-704.89
	70942	1.03	120	703.92-724.09
	70941	1.08	125	735.00-762.29
	70938	1.07	130	642.55-663.14
	70961	1.05	160	580.90-594.56
	70963	0.96	165	578.13-596.30
	70965	1.00	170	584.45-612.55
	70989	0.93	175	604.65-628.85
	70991	0.97	185	596.48-631.47
	71123	1.08	190	575.25-614.25
	71126	1.00	200	596.48-613.20
	71127	0.98	210	574.02-595.81
$B_t = 1.7 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 200 \text{ кА}$, $n_e = 1.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $0.2 \leq r/a \leq 0.8$	70942	1.59	120	851.16-872.44
	70941	1.68	125	885.10-911.52
	70936	1.60	140	827.45-844.10
	70961	1.60	160	742.08-755.93
	70960	1.59	155	763.64-777.76
	70990	1.61	180	797.47-823.12
	71123	1.62	190	740.43-771.06
	71127	1.71	210	778.73-798.07
$B_t = 2.25 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 180 - 230 \text{ кА}$, $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $0.6 \leq r/a \leq 0.8$	73088 ($I_{pl}=180$ кА)	1.91	220	781.41-812.66
	73095	1.91	240	650.15-686.92
	73100	2.07	260	546.35-584.81
	73101	2.03	280	555.79-581.09
$B_t = 2.4 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 250 \text{ кА}$, $n_e = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $0.7 \leq r/a \leq 0.9$	73016	2.82	220	735.81-764.53
	73018	2.63	240	726.87-743.88
	73021	2.80	260	760.08-776.19