

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.
Отделение физики плазмы.

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

**Исследование режимов удержания плазмы сферического токамака
Глобус-М2 методом томсоновского рассеяния лазерного излучения.**

по направлению подготовки 03.06.01 физика и астрономия

профиль 01.03.09 физика плазмы

Выполнил:

Аспирант лаб. высокотемпературной плазмы

Н.С. Жильцов

Санкт-Петербург

2024

Руководитель:

к.ф.-м.н., с.н.с. лаб. высокотемпературной плазмы
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Г.С. Курский

Рецензент:

к.ф.-м.н., с.н.с.
лаб. высокотемпературной плазмы
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Куприенко Денис Васильевич

Рецензент:

к.ф.-м.н., доцент,

Сениченков Илья Юрьевич

Высшая школа фундаментальных физических исследований,
Физико-механический институт, СПбПУ.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ	4
Научная новизна работы.....	6
Практическая значимость работы	7
Личный вклад автора	8
ГЛАВА 1. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	9
1.1 Системы зондирования и сбора рассеянного излучения.....	11
1.2 Комплекс анализа спектров рассеяния.....	17
1.3 Обработка данных диагностики ТР в реальном времени.....	23
1.4 Выводы по главе 1.....	33
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2	34
2.1 Динамика температуры и концентрации электронов в плазме токамака Глобус-М2.	34
2.2 Динамика перехода в режим улучшенного удержания, периферийные измерения.	41
2.3 Совместный анализ данных ТР и магнитной диагностики.	46
2.4 Сравнительный анализ переноса тепла на основе данных диагностики ТР.....	50
2.5 Выводы по главе 2.....	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	62

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В настоящий момент перспективными источниками энергии являются: чистый энергетический термоядерный реактор и гибридный реактор типа синтез-деление на базе компактного источника термоядерных нейтронов. Оба этих подхода могут быть реализованы на установках типа токамак. Токамаки с малым аспектным отношением ($<1,8$), названные сферическими токамаками, позволяют достичь высоких параметров плазмы в компактной установке [1]. Удержание энергии в сферических токамаках благоприятно отличается от классических токамаков [2], что позволило на компактных установках достигнуть близких к термоядерным температур ионов плазмы [3] [4]. Для проектирования сферических токамаков следующего поколения (Глобус-3 [5]) необходимо уточнение транспортной модели плазмы в сферическом токамаке, полученной на установках первого поколения (величина тороидального магнитного поля $B_T \sim 0.5$ Тл: START [6], MAST [7], Глобус-М [8], NSTX) и установках второго поколения ($B_T \sim 1$ Тл: Глобус-М2 [9], ST-40 [4], MAST-U, NSTX-U).

Цель данной работы – исследование электронного компонента плазмы сферического токамака Глобус-М2 при высоких значениях тороидального магнитного поля B_T до 0,8 (Тл).

Для проведения исследования необходима информация о пространственном распределении температуры электронов $T_e(R)$ и их концентрации $n_e(R)$ в плазме токамака. Диагностика томсоновского рассеяния (ТР) лазерного излучения является одним из самых достоверных методов измерения этих параметров [10] [11]. Для компактных сферических токамаков диагностика ТР – единственный метод измерения $T_e(R)$. При этом величина n_e в плазме токамака меняется на 2 порядка в разных режимах работы токамака и пространственных точках, а интенсивность сигнала ТР линейно пропорциональна измеряемой величине n_e . Таким образом, первой задачей

данной работы являлась модернизация диагностики ТР для обеспечения измерений n_e в динамическом диапазоне двух порядков величины.

Диагностика ТР токамака Глобус-М2 предоставляет информацию о положении сепаратрисы в экваториальной плоскости на стороне слабого магнитного поля, положении магнитной оси плазмы, радиусе инверсии пилообразных колебаний, пространственных распределениях $T_e(R)$ и $n_e(R)$ в области от магнитной оси и до обдирочного слоя на стороне слабого магнитного поля. Для проведения запланированных экспериментов на токамаке Глобус-М2 требуется оперативный контроль параметров плазмы, включая данные диагностики ТР, непосредственно после разряда токамака. Данные диагностики ТР требуют достаточно сложной обработки и традиционно обрабатываются длительное время после разряда токамака. Второй задачей данной работы является обеспечение обработки данных диагностики ТР в режиме реального времени, т.е. с задержкой между измерением состояния плазмы и передачей рассчитанных значений $n_e(R)$, не превышающей время между измерениями – 3 мс. Готовые данные диагностики ТР должны поступать в общую систему сбора данных токамака Глобус-М2 для возможности удобного контроля вместе с остальными параметрами плазмы непосредственно во время проведения эксперимента.

Выполнение этих задач позволит провести измерения пространственных распределений $T_e(R)$ и $n_e(R)$ в сериях разрядов с омическим нагревом плазмы и разрядов с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции. На основе полученных данных будет проанализирован энергобаланс плазмы при помощи кода ASTRA.

Целью работы является исследование электронного компонента плазмы токамака Глобус-М2 при высоких значениях тороидального магнитного поля B_T

в различных режимах работы как в сценариях с омическим нагревом, так и сценариях с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции.

Для достижения этой цели поставлены задачи:

- Модернизировать диагностический комплекс ТР для обеспечения измерений T_e и n_e во всём диапазоне изменения этих величин в токамаке Глобус-М2;
- Обеспечить обработку данных диагностики ТР в режиме реального времени с задержкой менее 3 мс после измерения. Организовать передачу данных диагностики ТР в общую систему сбора данных токамака Глобус-М2;
- провести измерения пространственных распределений $T_e(R)$ и $n_e(R)$ в сериях разрядов с омическим нагревом плазмы и разрядов с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции;
- на основе измеренных диагностикой ТР распределений $T_e(R)$ и $n_e(R)$ провести сравнительный анализ удержания энергии и термоизоляции в электронном компоненте плазмы токамака Глобус-М2 в сценариях омического нагрева и сценариях с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции.

Научная новизна работы

Впервые продемонстрирована возможность управления параметрами плазмы токамака по данным диагностики ТР в режиме реального времени. Достигнутое время обработки данных диагностики ТР составило <2.4 мс, что соответствует требованиям к диагностике ТР центральной плазмы ИТЭР [12] [13].

Впервые на сферическом токамаке с высоким значением B_T с помощью диагностики ТР проведено измерение возмущения пространственных

распределений T_e и n_e во время пилообразных колебаний плазмы и определён радиус инверсии.

Впервые на сферическом токамаке с высоким значением B_T с помощью диагностики ТР проведено измерение пространственное распределение T_e в обдирочном слое и определена постоянная спада для температуры электронов.

Впервые на компактном сферическом токамаке в условиях высоких B_T проведена верификация магнитной реконструкции равновесия плазмы с помощью диагностики ТР.

Впервые на сферическом токамаке с сильным магнитным полем было проведено систематическое исследование пространственных распределений T_e и n_e в широком диапазоне основных параметров плазмы: I_p , n_e , B_T как в сценарии омического нагрева, так и в сценарии с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции.

Впервые на компактном сферическом токамаке при высоком магнитном поле было проведено исследование термоизоляции плазмы в сценарии омического нагрева и проведено сравнение температуропроводности электронов в сценариях омического нагрева и с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции.

Практическая значимость работы

Динамический диапазон модернизированной диагностики ТР позволяет одновременно проводить измерения во всём диапазоне достигнутых на сегодняшний момент параметров электронов плазмы $0,005 \leq T_e \leq 1,8$ (кэВ) и $0,2 \leq n_e \leq 20$ (10^{19} м^{-3}) на токамаке Глобус-М2 на протяжении всего разряда токамака, начиная с ранней стадии разряда, в том числе и в обдирочном слое плазмы на стороне слабого магнитного поля.

Модернизированная диагностика ТР является ключевой диагностикой для любого рода исследований, проводимых на токамаке Глобус-М2. С её помощью

были получены уникальные результаты исследования нагрева и термоизоляции плазмы сферического токамака Глобус-М2 в условиях высокого магнитного поля.

Реализована обработка данных диагностики ТР в режиме реального времени, которая позволяет использовать созданный диагностический комплекс в цепи обратной связи для управления параметрами плазмы.

Проведённые исследования процессов переноса тепла на токамаке Глобус-М2 необходимы для создания транспортной модели в области увеличенных значений тороидального поля и тока плазмы сферического токамака и разработки сценариев работы сферического токамака следующего поколения, например Глобус-3 [5], проектирование которого ведётся в настоящее время.

Личный вклад автора

Представленные в работе результаты получены при непосредственном активном участии автора. При этом его роль была определяющей при модернизации комплекса экваториальной диагностики ТР токамака Глобус-М2. Автором разработан и запатентован программный комплекс управления диагностикой, введена в рутинную работу программа обработки данных диагностики ТР в реальном времени. Автор принимал активное участие в подготовке плазменного эксперимента на токамаке Глобус-М2, а также проводил измерения температуры и концентрации электронов методом томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М2. При определяющем участии автора разработана схема эксперимента по использованию сигналов диагностики ТР в цепи обратной связи токамака Глобус-М2 и проведены соответствующие эксперименты. Непосредственно автором проведены численные расчёты для сравнения теплопереноса в режиме омического нагрева и режиме с дополнительным нагревом плазмы методом нейтральной инжекции.

ГЛАВА 1. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Информация о пространственном распределении температуры T_e и концентрации n_e электронов необходима для исследования удержания плазмы в замкнутых магнитных ловушках. Для сферического токамака единственным достоверным методом измерения T_e и n_e является диагностика томсоновского рассеяния (ТР) лазерного излучения. Метод основан на упругом рассеянии лазерного излучения на свободных электронах, при котором доплеровское уширение рассеянного спектра несёт информацию о T_e , а интенсивность рассеянного излучения пропорциональна n_e [14] [15] [16]. Основная сложность метода заключается в малой величине сечения ТР $\approx 6,65 \cdot 10^{-29} \text{ м}^2$ одновременно с интенсивным фоновым излучением самой плазмы. Для увеличения отношения полезного сигнала к накопленному шуму от фоновой засветки применяют зондирование короткими (порядка 10 нс) импульсами с высокой энергией (порядка 1 Дж).

Развитие токамаков приближает их к термоядерным реакторам, существенно повышая требования к диагностическому оборудованию, в частности, к диагностике ТР. В настоящий момент наиболее строгие требования выдвигает проект ИТЭР, где диагностика ТР должна работать в непрерывном режиме с частотой зондирования плазмы 100 Гц [13]. Диагностический комплекс ТР диверторной области ИТЭР предполагает зондирование Nd:YAG лазером (1064 нм). Такая схема обеспечивает сигналы ТР в ближней инфракрасной области, в которой собственное излучение плазмы значительно слабее, чем в видимой части спектра. Требование высокой точности единичного измерения ($<10\%$ для T_e и $<5\%$ для n_e) при наличии интенсивного фонового излучения [17] [18] [19] вынуждает минимизировать время накопления сигнала, используя лазерные импульсы малой длительности ≤ 4 нс (на полувысоте) с острым передним фронтом. Все три комплекса диагностик ТР токамака ИТЭР

предполагают для записи сигналов рассеяния использовать высокоскоростные (ГГц) оцифровщики, позволяющие сохранять детальную форму сигнала с высокой полосой пропускания.

В данной главе приводится описание разработанного и введённого в эксплуатацию комплекса экваториальной диагностики ТР [20] [21] токамака Глобус-М2, заменившего предыдущий диагностический комплекс [22]. Экспериментальная программа токамака Глобус-М2 [9] в основном направлена на исследование методов нагрева плазмы и безындукционного поддержания тока плазмы в компактном сферическом токамаке с высокой (для сферических токамаков) величиной тороидального магнитного поля B_T до 1 Тл и током плазмы I_p до 0,5 МА. Диапазон изменения n_e составляет от $5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ в обдирочном слое (Scrape Off Layer, SOL) до $\sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ в центре плазменного шнура. Соответствующий диапазон T_e составляет от единиц эВ до нескольких кэВ. Для выполнения экспериментальной программы токамака необходимо обеспечить рутинное измерение динамики пространственного распределения T_e и n_e во всём диапазоне изменения этих величин. Измерения должны проводиться в экваториальной плоскости во всей области от SOL на стороне слабого магнитного поля и до магнитной оси плазмы. При этом пространственное разрешение должно составлять 10-20 мм вдоль большого радиуса тора R . Измерения в экваториальной плоскости упрощают интерпретацию экспериментальных данных, так как сильное радиальное движение плазменного шнура не мешает измерению сигналов ТР на магнитной оси плазмы, в отличие от вертикальной геометрии измерения. Напротив, выбор экваториальной схемы измерения позволяет использовать данные ТР для уточнения положения магнитной оси плазмы по максимуму давления электронов, а также положения последней замкнутой магнитной поверхности. Дополнительные области измерения на стороне сильного магнитного поля позволяют оценить

пространственное распределение скорости тороидального вращения плазмы, основываясь на асимметрии пространственного распределения n_e [23].

Разработанный и введённый в эксплуатацию комплекс диагностики ТР выполняет поставленные требования к диагностике на токамаке Глобус-М2 и удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к диагностике ТР термоядерного реактора [24]. К ним относятся: высокая надёжность и достоверность единичного измерения, стационарный режим работы и обработка данных в режиме реального времени, необходимая для управления реактором в цепи обратной связи. Данный комплекс ТР служит прототипом диагностики ТР диверторной области токамака ИТЭР [13].

1.1 Системы зондирования и сбора рассеянного излучения

Разработанный комплекс ТР состоит из трёх основных частей (Рисунок 1.1): системы ввода зондирующего лазера, системы сбора рассеянного излучения и комплекса анализа спектров рассеяния.

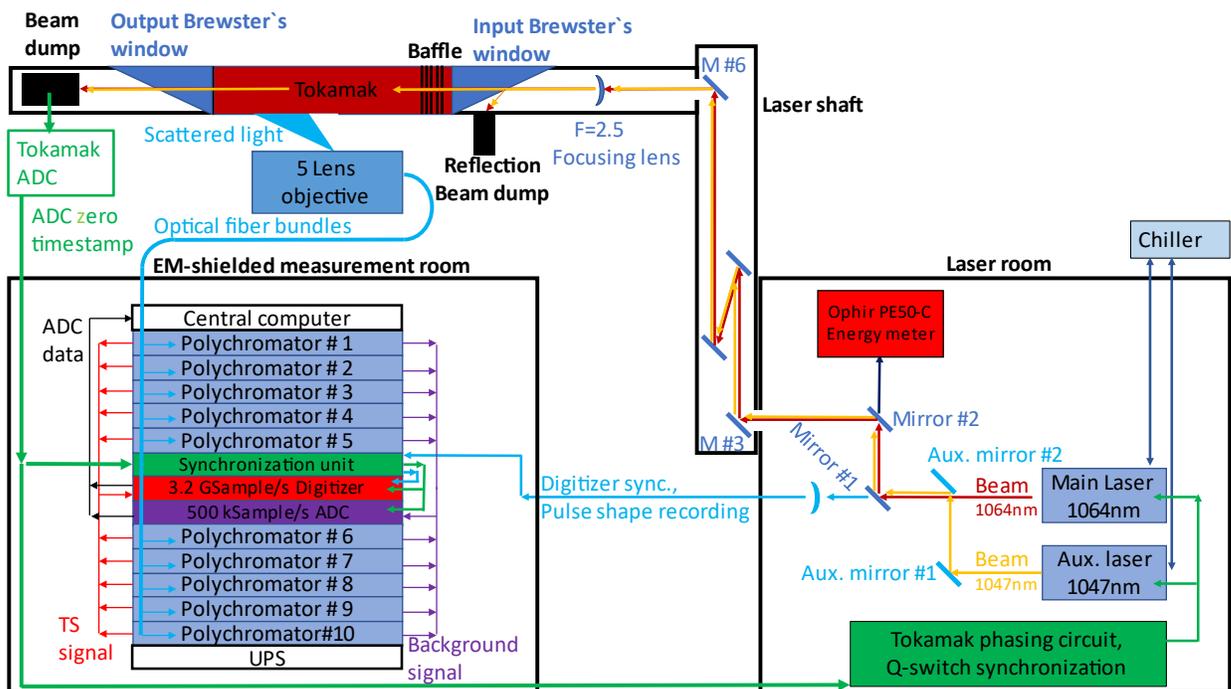


Рисунок 1.1 Схема расположения диагностики ТР на токамаке Глобус-М2. Зондирующие лазеры расположены в отдельном помещении, показанном справа на схеме. Оптические пути лазеров совмещаются и направляются перископом в токамак, показанному сверху. Рассеянное излучение собирается объективом и передаётся при помощи оптоволоконных жгутов в отдельное помещение комплекса анализа спектров рассеяния, показанном слева. Излучение из каждой области наблюдения направляется на отдельный полихроматор с внешним оцифровщиком.

Система зондирования состоит из двух лазеров производства ООО «Лазеры и Оптические Системы» [25] (Рисунок 1.2). Основной лазер на кристалле Nd:YAG генерирует излучение на длине волны 1064,5 нм в виде 10 нс импульсов с энергией до 3 Дж в каждом с частотой 330 Гц. Лазер построен по схеме задающий генератор + усилитель мощности (МОРА) с накачкой лазерными диодами и модуляцией добротности [26]. Расходимость лазера 0,1 мрад всего в 1,3 раза превосходит дифракционный предел расходимости для использованной выходной диафрагмы с диаметром 15 мм. Энергия каждого лазерного импульса измеряется при помощи пироэлектрического датчика Ophir PE50-C, а осциллограмма импульса регистрируется быстрым фотодиодом. За счёт учёта тепловых линз в оптической схеме, лазер может стабильно генерировать импульсы в стационарном режиме, обеспечивая непрерывный режим работы диагностики ТР. Вспомогательный Nd:YLF 1047 нм лазер используется для калибровки диагностики ТР методом одновременного зондирования плазмы несколькими длинами волн [20], что не вошло в состав данной работы. Лучи обоих зондирующих лазеров из отдельного помещения направляются в плазму токамака при помощи 6-ти диэлектрических зеркал и проходят путь ~11 м. Доля излучения, не отразившаяся от первого зеркала, при помощи оптоволоконна передаётся на систему регистрации. Этот сигнал используется для синхронизации, контроля формы осциллограммы лазерного импульса и вспомогательного контроля энергии лазерного импульса.

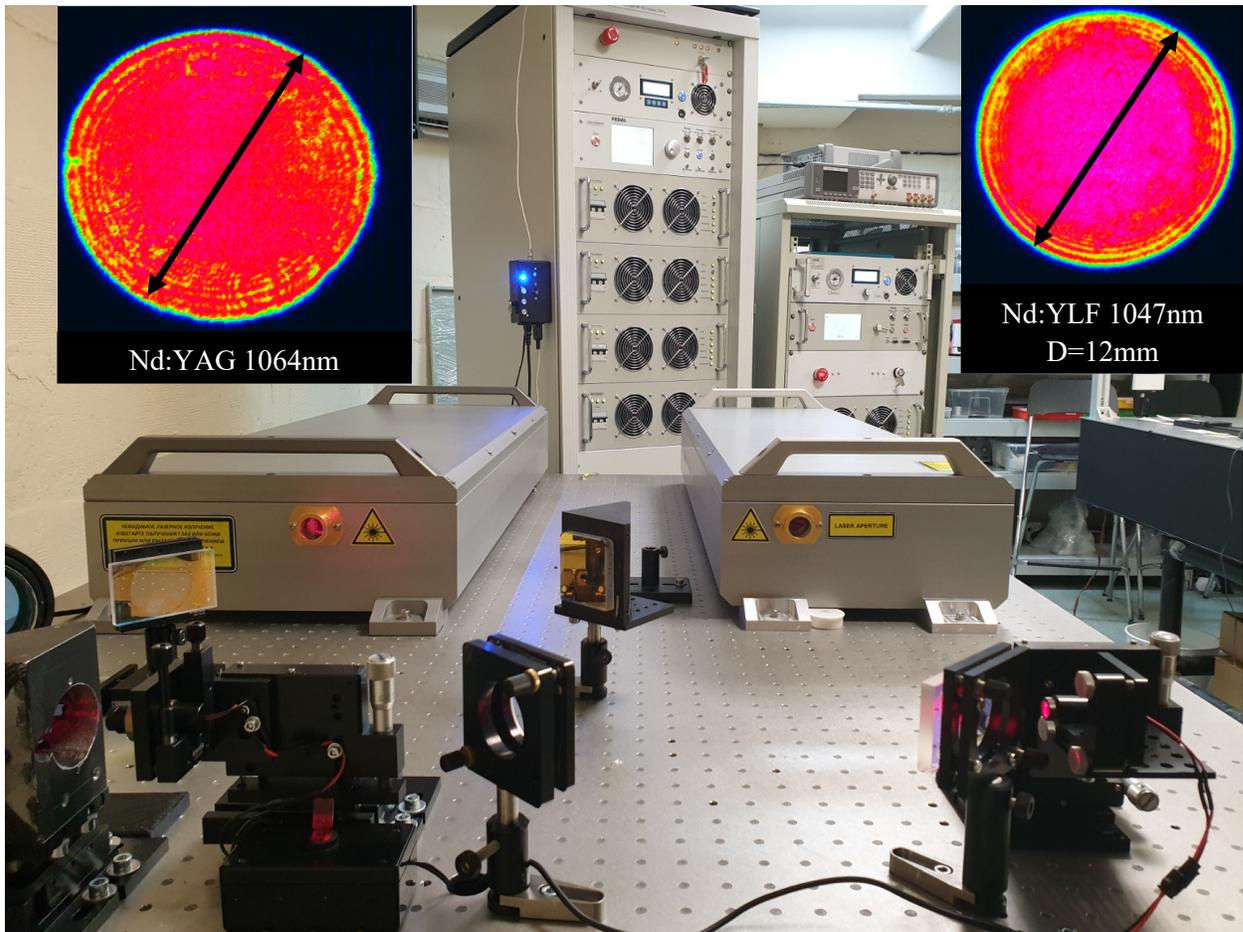


Рисунок 1.2 Система зондирования. Слева – основной лазер Nd:YAG 1064.5 нм 330 Гц 3 Дж 10 нс. Справа – вспомогательный лазер Nd:YLF 1047.3 нм 50 Гц 2 Дж 3 нс. На переднем плане показана система зеркал для сведения оптических путей лазеров. Блоки управления и система охлаждения помещены в 19” стойки на заднем плане. В верхних углах приведены распределения энергии в ближнем поле.

Зондирование плазмы проводится в экваториальной плоскости. После одного прохода через плазму излучение выводится из вакуумной камеры и направляется в ловушку. Схема расположения собирающей оптики показана на экваториальном сечении токамака Глобус-М2 (Рисунок 1.3). Лазерное излучение фокусируется в вакуумном объёме при помощи одной просветлённой линзы с фокусным расстоянием 2,5 м и диаметром 65 мм. Внутри вакуумной камеры на пути луча расположены диафрагмы для снижения интенсивности паразитно-рассеянного излучения. Область наблюдения соответствует диапазону по

большому радиусу R от 23 до 56 см (соответствующие нормированные малые радиусы r/a от -0,5 до 0,8).

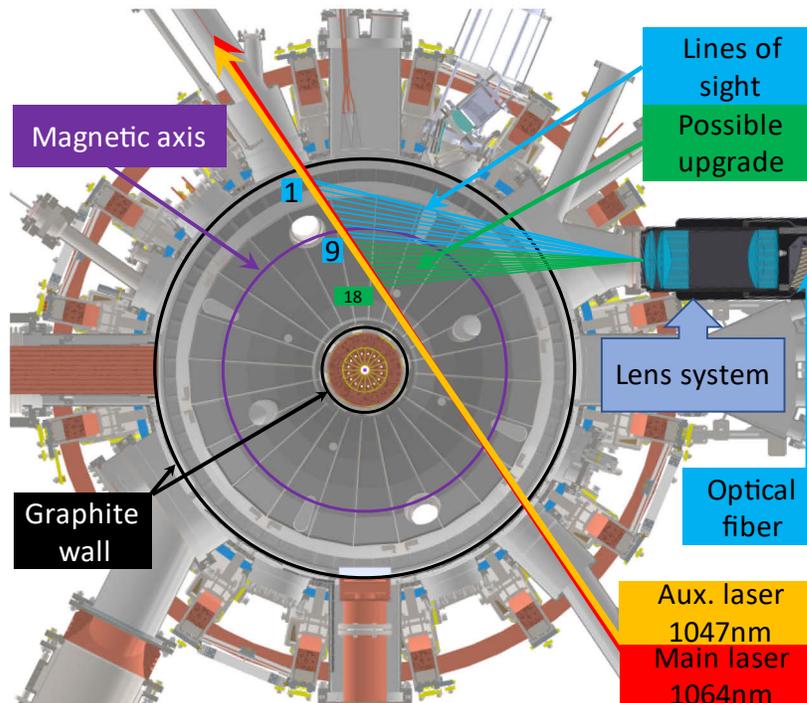


Рисунок 1.3 Схема зондирования на экваториальном сечении токамака Глобус-М2. Красная и оранжевая стрелки изображают ход зондирующих импульсов основного и вспомогательного лазеров. Синими линиями обозначены хорды наблюдения диагностики ТР, использованные на первом этапе работы. Зелёными линиями показаны хорды наблюдения, которые будут использоваться после доукомплектации диагностики. Числа соответствуют номерам хорд наблюдения, приведённым в таблице 1.1. Фиолетовым показано характерное положение магнитной оси плазмы, чёрным – положение обращённой к плазме поверхности токамака.

Объектив из пяти линз фокусирует рассеянное излучение на торцы оптоволоконных сборок. Коэффициент увеличения объектива меняется от 4,1 на стороне слабого магнитного поля до 2,8 на стороне сильного магнитного поля (Таблица 1.1, Рисунок 1.5). Оптическая схема объектива близка к телецентрической, т.е. лучи, формирующие изображение, близки к параллельным оптической оси. Это значительно упрощает юстировку оптических сборок. Объектив оснащён 18-ю гнёздами для оптоволоконных

сборок, используемых для передачи рассеянного излучения к спектрометрам. На первом этапе работы было использовано 8 обычных оптоволоконныхборок и одна с двукратным увеличением пространственного разрешения для более детального исследования краевой плазмы (Рисунок 1.4 и Рисунок 1.5). Каждая оптоволоконная сборка (CeramOptec GmbH [27]) состоит из 188 оптических волокон из плавленного кварца с диаметром 196/220 μm и числовой апертурой $NA = 0,22$.

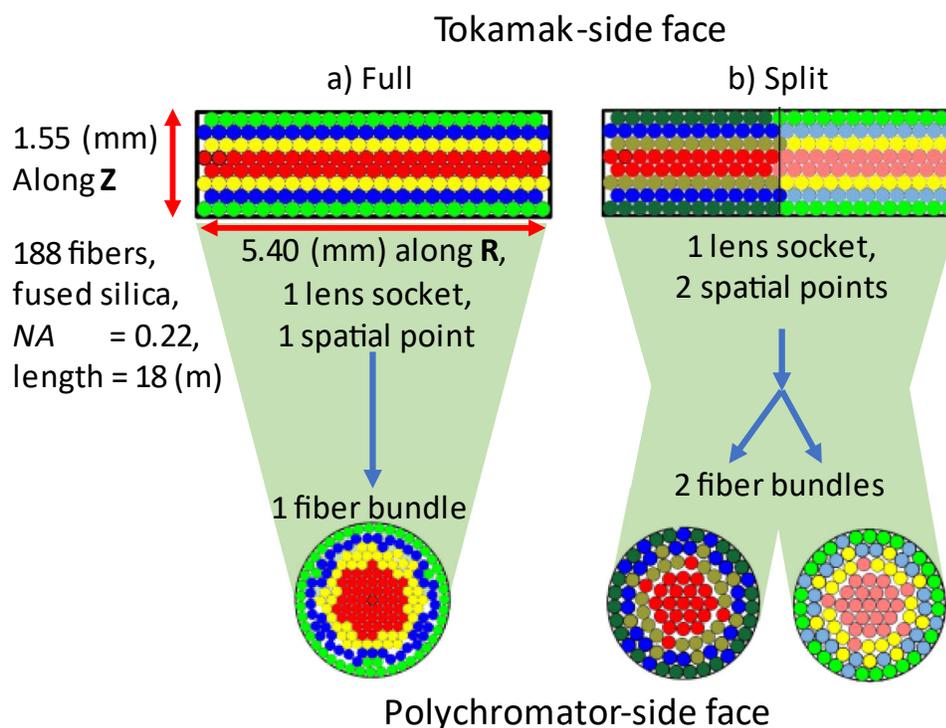


Рисунок 1.4 Схема оптоволоконной сборки. Сверху – со стороны токамака. Снизу – со стороны спектрометра. Упаковка волокон регулярна: изображение экваториальной плоскости токамака передаётся в центральные волокна со стороны спектрометра. а) обычная оптоволоконная сборка. б) оптоволоконная сборка с двукратным увеличением пространственного разрешения.

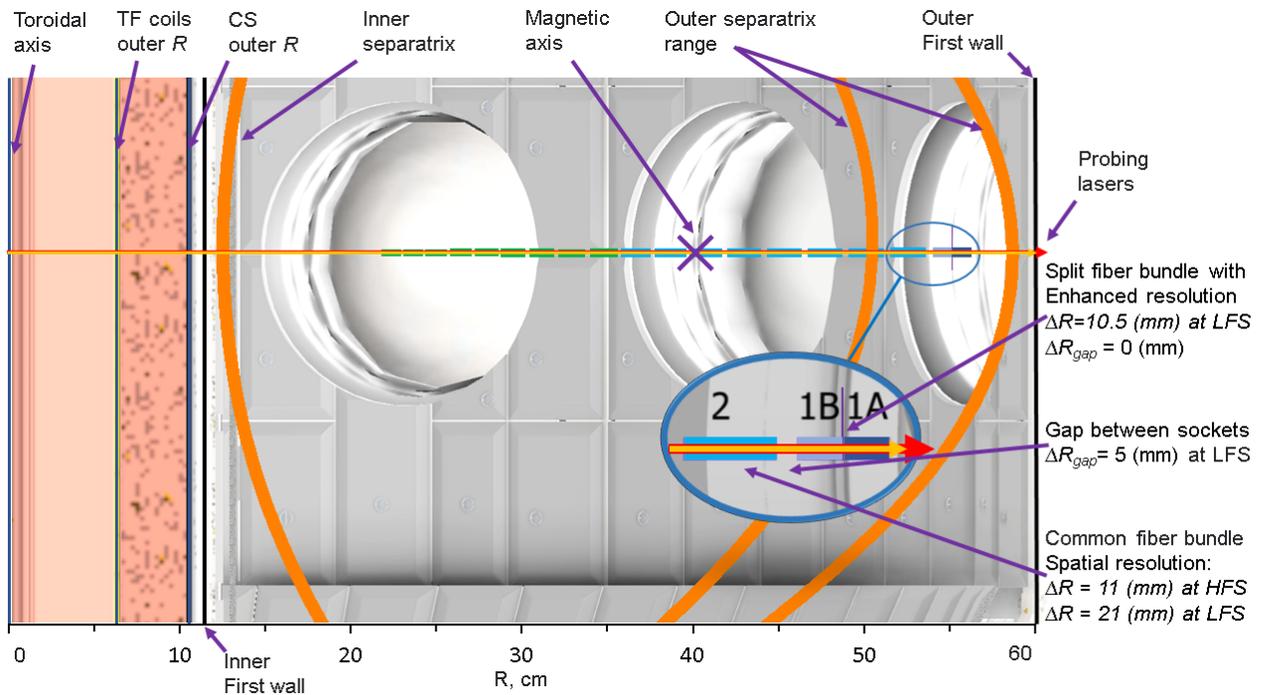


Рисунок 1.5 Полоидальное сечение токамака Глобус-М2, по горизонтальной оси отложен большой радиус R . Горизонтальные красная и оранжевая линии соответствуют хорде зондирования двумя лазерами. Прямоугольниками на хорде зондирования обозначены проекции торцов оптоволоконных сборок на полоидальную плоскость.

Оптические волокна на стороне токамака упакованы в прямоугольник со сторонами $5,40 \times 1,55$ мм (Рисунок 1.4). Этот размер и коэффициент увеличения объектива определяют размер области наблюдения на хорде зондирования, т.е. пространственное разрешение вдоль хорды зондирования. На рисунке 1.5 изображены области наблюдения, спроецированные на полоидальную плоскость, а также характерные положения последней замкнутой магнитной поверхности в плазме токамака Глобус-М2 с нижней диверторной конфигурацией. Положение последней замкнутой магнитной поверхности в экваториальной плоскости на стороне слабого магнитного поля можно варьировать в диапазоне $R_{lfs} = 51-60$ см. Для исследования резких градиентов T_e и n_e пространственное разрешение вблизи границы плазмы было удвоено, используя разделение оптоволоконной сборки на две вдоль хорды зондирования (Рисунок 1.4, Рисунок 1.5).

На первом этапе работы измерения проводились в 10 пространственных точках, расположенных на стороне слабого магнитного поля от края плазмы до магнитной оси. Неиспользованные гнезда в объективе будут использованы при доукомплектации диагностического комплекса. Основные оптические параметры для хорд наблюдения приведены в Таблице 1.1. Выбранная геометрия измерения обеспечивает увеличение угла рассеяния для точек на краю плазмы, что повышает точность измерения низких температур на краю плазмы за счёт уширения спектра ТР при рассеянии назад.

№	R, см	r/a ₀	f-number	Угол рассеяния, °	увеличение	Длина рассеяния, мм	Пространственное разрешение, мм
1	55.5	0.81	f/7.4	137	4.1	22(11*)	21(10*)
5	45.8	0.41	f/6.8	132	3.9	21	19.5
9	37.1	0.05	f/6.4	127	3.4	18.5	16.5
14	28.5	0.31	f/6.0	123	3.0	16.2	13.5
18	22.9	0.55	f/5.7	118	2.8	15	11.0

Таблица 1.1 Оптические параметры хорд наблюдения.

Оценка общего коэффициента пропускания системы сбора излучения составляет 0,3 и включает в себя френелевские отражения на линзах без просветления, потери на упаковке в оптоволоконной сборке, внутренние потери в материале линз и оптического волокна.

1.2 Комплекс анализа спектров рассеяния

На первом этапе работы комплекс анализа спектров рассеяния состоял из 10 полихроматоров. Каждый из них – прибор с шестью спектральными каналами, оснащёнными интерференционными фильтрами [28]. Оптическая схема использованного фильтрового полихроматора приведена на рисунке 1.6.

Фильтровый набор (Таблица 1.2) оптимизирован для измерения T_e в диапазоне 5-5000 эВ и одинаковый во всех 10 полихроматорах. Спектральная чувствительность каналов полихроматора и характерные спектры ТР для разных T_e приведены на рисунке 1.7

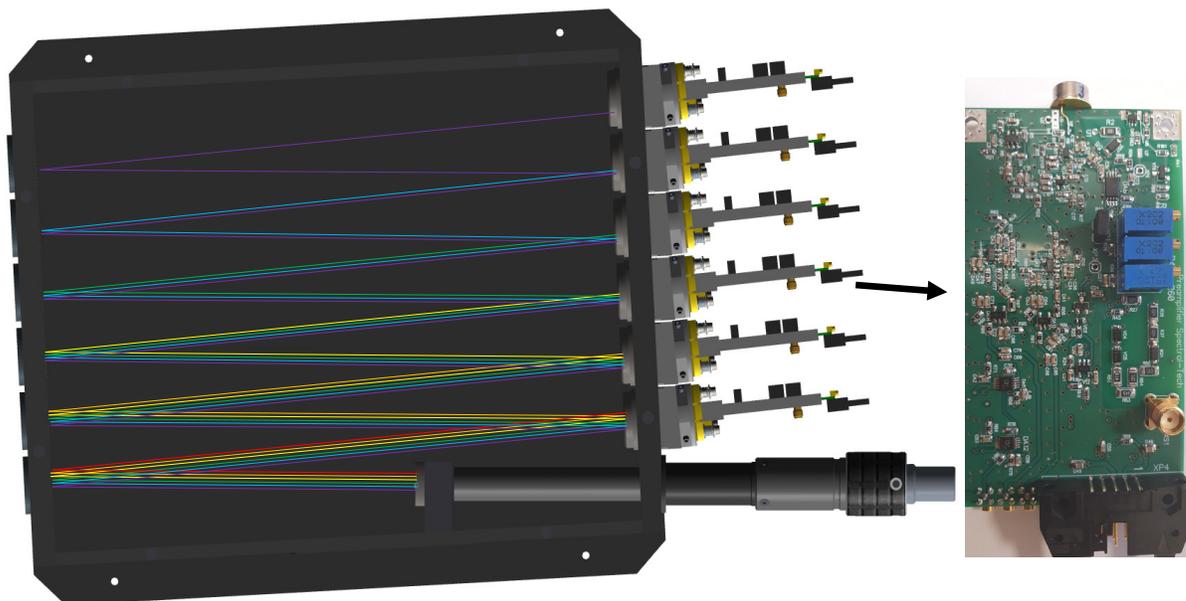


Рисунок 1.6 Оптический модуль фильтрового полихроматора с 6-ю спектральными каналами. Цветные линии отражают ход лучей от оптического волокна (снизу справа) к зеркалам на левой стороне прибора и интерференционным фильтрам на правой стороне. За фильтрами расположены детекторы, смонтированные на платах усилителей.

№	Центральная длина волны, нм	Ширина канала FWHM, нм
1	1056.3	12.5
2	1039.3	21.5
3	1007.3	42.5
4	944.0	84.0
5	818.3	167.5

Таблица 1.2 Характеристики спектральных каналов полихроматора.

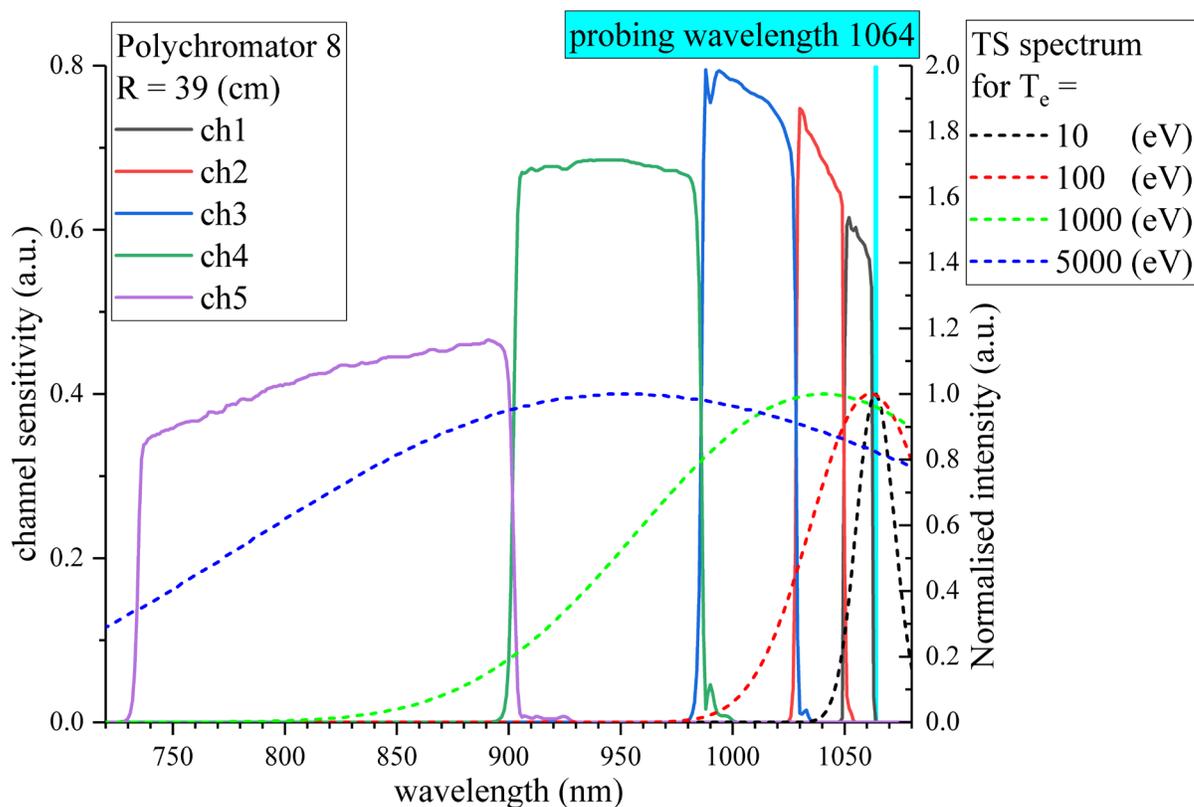


Рисунок 1.7 Спектральная чувствительность каналов полихроматора показана сплошными линиями и левой шкалой. Спектральная чувствительность включает в себя пропускание интерференционного фильтра, чувствительность детектора и коэффициент передачи от канала к каналу. Нормированный на максимум спектр ТР (зондирование на длине волны 1064,5 нм) показан штриховыми линиями по правой шкале, цвет соответствует разным значениям T_e .

Каждый спектральный канал оснащён лавинным фотодиодом (ЛФД) Hamamatsu S11519-15 [29] с рабочей точкой при внутреннем усилении $M = 100$. Изменение коэффициента внутреннего усиления в зависимости от температуры скомпенсировано подстройкой напряжения смещения индивидуально для каждого ЛФД. Разработанная схема подстройки обеспечивает стабилизацию коэффициента усиления в рамках $\pm 0.5\%$ для широкого температурного диапазона от 17.5 до 35 °C [30]. Диаметр активной области ЛФД 1,5 мм выбран по принципу максимизации рабочей площади детектора без ограничения полосы пропускания из-за роста паразитной ёмкости. ЛФД размещён непосредственно на плате

усилителя. Разработанный усилитель обеспечивает с одной стороны высокую полосу пропускания >250 МГц, согласованную с детектором, а с другой – низкий уровень собственных шумов, сопоставимый с собственными шумами оцифровщика. Фильтр нижних частот с отсечкой 2 МГц используется для подавления сигнала сильного, но медленно меняющегося фонового излучения плазмы и нагретой стенки. Для выполнения требования измерения сигналов ТР, 600 кратно меняющихся по амплитуде при изменении n_e от $5 \cdot 10^{17}$ к $3 \cdot 10^{20}$ м⁻³, каждый спектральный канал оснащён двумя выходами сигнала ТР с усилениями, отличающимися в 5 раз. Одновременная оцифровка обоих выходов обеспечивает измерения с необходимой точностью во всём диапазоне, что особенно важно при исследовании области плазмы с резким градиентом n_e .

Сигналы ТР после усилителя регистрируются оцифровщиком CAEN V1743, который построен на микросхемах аналоговой памяти (Switched-Capacitor Array) SAMLONG и обеспечивает оцифровку с частотой 3,2 ГГц и разрешением 12 бит. Кольцевой буфер аналоговой памяти обеспечивает запись одного кадра из 1024 выборок с высокой частотой и последующей относительно долгой (~100 мкс) оцифровкой. Данный тип оцифровщиков подходит для задач диагностики ТР с импульсным режимом работы лазера и позволяет снизить стоимость системы регистрации относительно решений с непрерывной высокоскоростной оцифровкой. Оцифрованные данные передаются на центральный компьютер в режиме реального времени (непосредственно после измерения сигналов ТР). Достигнутая максимальная частота кадров составляет 1,4 кГц в полнокадровом режиме, что обеспечивает надёжную работу с имеющимся лазером 330 Гц и оставляет возможность увеличения частоты зондирования. Оцифровщик также оснащён внутренней памятью, что позволяет реализовать вариант зондирования плазмы короткими сериями с частотой зондирования до 8 кГц для исследования быстрых процессов.

Высокая частота оцифровки значительно повышает соотношение сигнал/шум [28] и достоверность данных [31] в сравнении с зарядочувствительными интеграторами, применяемыми в диагностиках ТР в прошлом [32]. Широкая полоса пропускания детектора и усилителя вместе с коротким лазерным импульсом позволяют использовать информацию о форме осциллограммы лазерного импульса при обработке сигналов ТР [33]. Таким образом удаётся разделять сигнал ТР от других источников, таких как паразитное рассеяние, рассеяние на пыли или попадания кванта высокой энергии в детектор, которые могут быть ошибочно приняты за сигнал ТР. Выбранные оцифровщики обеспечивают запись с шагом 0,3125 нс, что достаточно для записи осциллограммы короткого импульса вспомогательного лазера с длительностью 3 нс на полувысоте.

Также каждый спектральный канал оснащён низкочастотным выходом для регистрации интенсивности фонового излучения, который записывается 500 кГц 16 бит АЦП. Эта информация используется для оценки погрешности измерения сигналов ТР [30] и во время проведения спектральной калибровки диагностического комплекса. Сигналы низкочастотных выходов аналогичны сигналам пассивной широкополосной спектроскопии и могут быть использованы для расчёта пространственного распределения эффективного заряда ионов плазмы [34].

Комплекс анализа спектров рассеяния расположен в отдельном помещении с электромагнитным экранированием. Все 10 полихроматоров помещены в единую 19” стойку (Рисунок 1.8), включающую также VME корзину для 8 оцифровщиков CAEN V1743 (суммарно 128 высокочастотных каналов) и 4 АЦП собственной разработки (суммарно 64 низкочастотных канала). Остальная часть VME корзины занята системой синхронизации и записи осциллограммы лазерного импульса. Также в стойке размещён центральный компьютер

диагностики ТР и источник бесперебойного питания. Такой модульно-стоечный подход обеспечивает компактность системы анализа спектров рассеяния, удобство обслуживания, масштабируемость и высокую защищённость системы от электромагнитных помех.

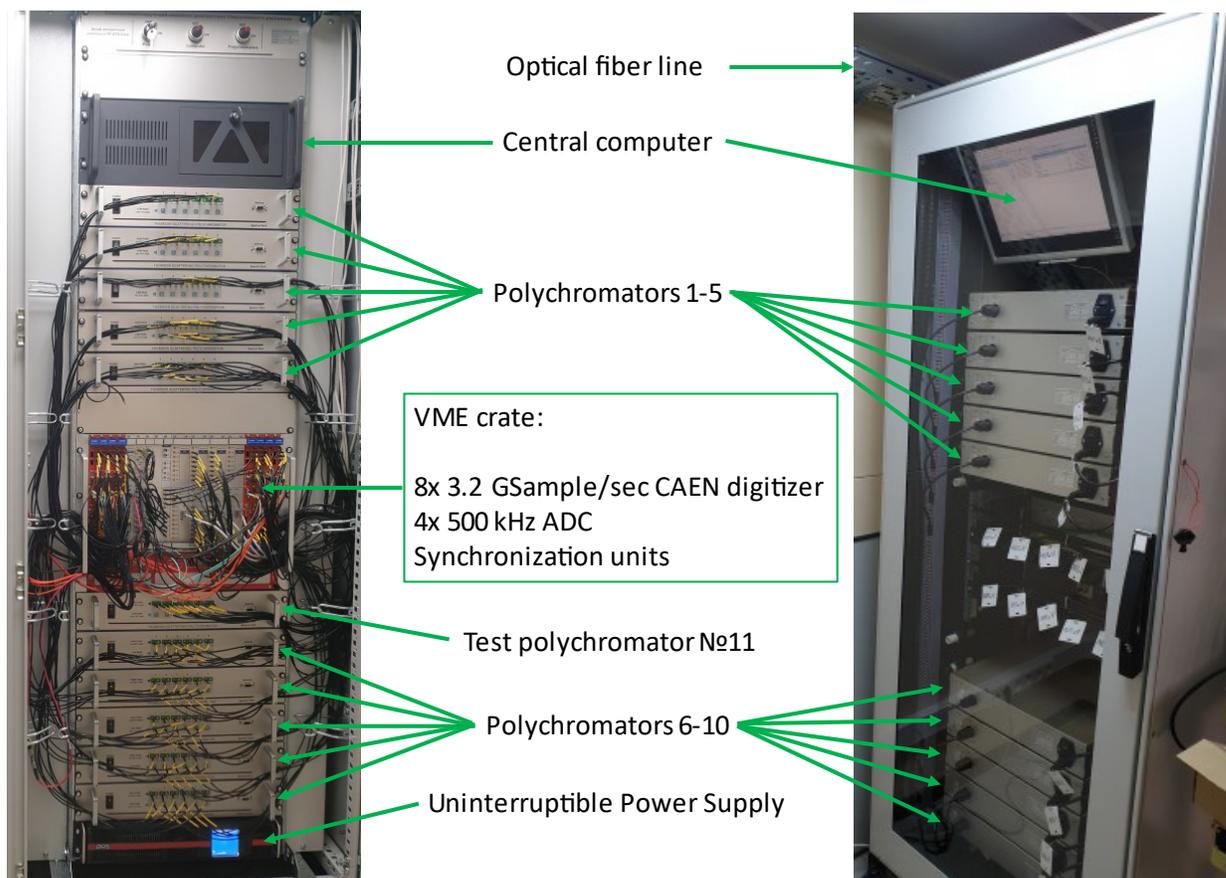


Рисунок 1.8 Комплекс анализа спектров рассеяния. Лицевая сторона стойки показана слева, тыльная – справа. В стойке сверху вниз расположены: центральный компьютер, 5 полихроматоров, VME корзина, 5+1 полихроматор, ИБП. В корзине расположены слева направо: 4 платы высокоскоростных оцифровщиков CAEN V1743, 4 платы синхронизации, 4 платы низкочастотных АЦП, ещё 4 платы CAEN V1743.

Модернизированный таким образом комплекс экваториальной диагностики ТР токамака Глобус-М2 введён в эксплуатацию в 2020 году. Возможности комплекса были проверены в экспериментах на плазме. Во всём диапазоне достигнутых на сегодняшний момент параметров электронов плазмы

(рисунок 1.9) $0,005 \leq T_e \leq 1,8$ (кэВ) и $0,2 \leq n_e \leq 20$ (10^{19} м^{-3}) диагностика ТР обеспечивает достоверные измерения.

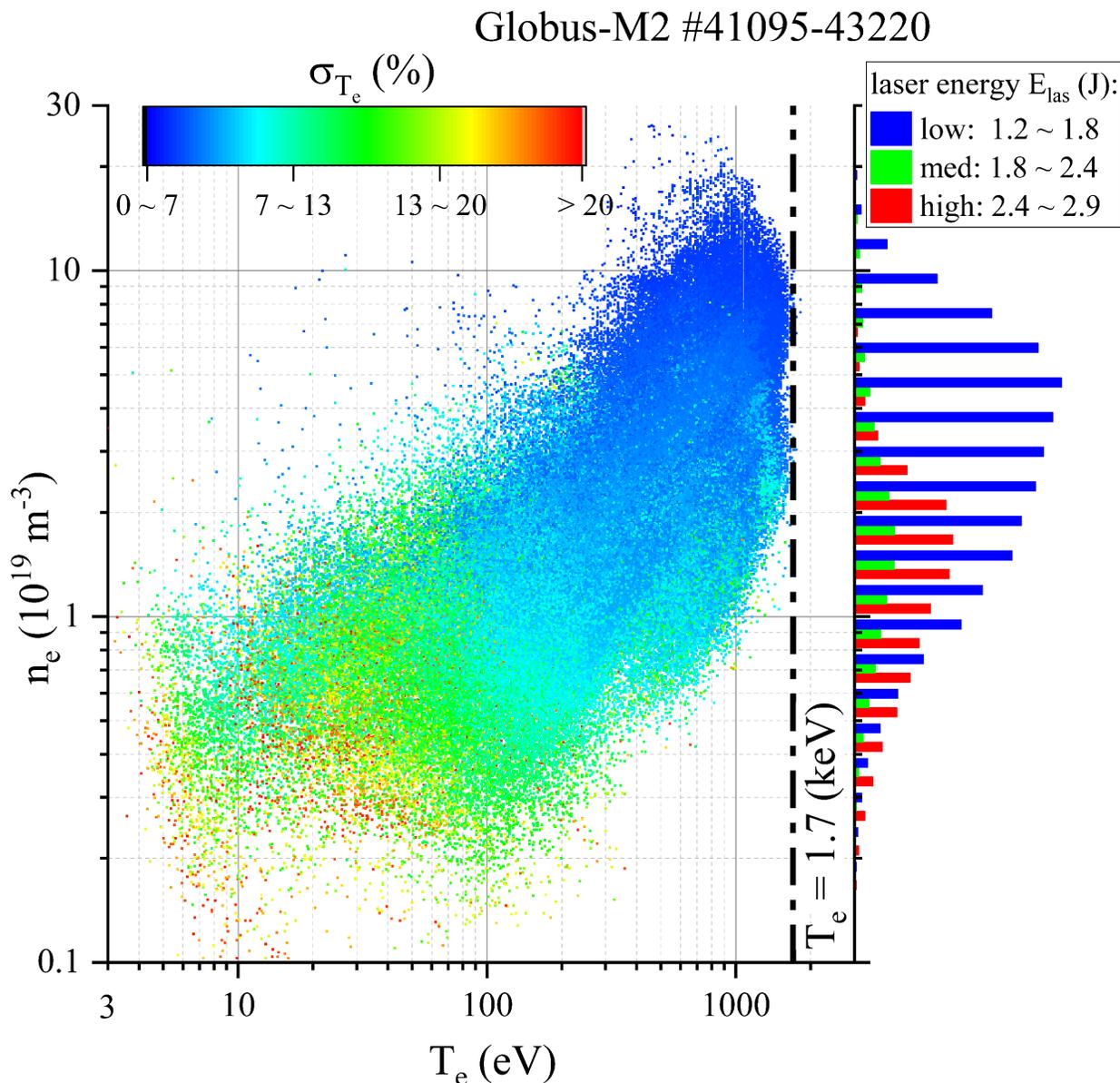


Рисунок 1.9 Зарегистрированные в плазме токамака Глобус-М2 локальные значения температуры электронов T_e по горизонтали и их концентрации n_e по вертикали. Цвет точек соответствует оценке относительной погрешности измерения T_e , шкала приведена сверху. Справа приведена гистограмма количества проведённых измерений в диапазоне n_e , цветом показан диапазон рабочих энергий зондирующего лазера.

1.3 Обработка данных диагностики ТР в реальном времени

Диагностика плазмы методом томсоновского рассеяния (ТР) лазерного излучения – общепризнанный способ [35] [36] [10] надёжного измерения динамики пространственных распределений электронной температуры $T_e(R, t)$ и концентрации $n_e(R, t)$ в плазме токамаков и стеллараторов. При реконструкции магнитной конфигурации плазменного шнура с помощью таких равновесных кодов как EFIT [37], PET [38] и др. применение данных диагностики ТР позволяет уточнить положение границ плазмы и магнитной оси. Используя данные ТР, можно определить энергию, запасённую электронным компонентом плазмы W_e и отношение давления электронов к давлению магнитного поля β_e . Получение этой информации в режиме реального времени (RT) необходимо для предотвращения аварийных ситуаций, связанных со срывом тока плазмы [12]. Диагностика ТР в режиме реального времени [39] также требуется для реализации перспективных схем управления профилями концентрации, тока, электронной и ионной температур плазмы для оптимизации выхода реакции термоядерного синтеза в токамаках-реакторах [40] [41]. На токамаке ИТЭР именно диагностика ТР призвана обеспечить обратную связь для управления гибридными режимами [12]. Одной из приоритетных задач российского проекта TRT (токамак с реакторными технологиями) [42] [43] также является реализация управления профилями различных параметров плазмы, для решения которой перспективно использование диагностики ТР [44].

На рисунке 1.10 приведены характерные сигналы ТР, зарегистрированные одним полихроматором. Каждая осциллограмма получена из своего спектрального канала за один импульс зондирующего лазера. Сигнал ТР отчётливо виден около 230 нс кадра оцифровщика. Остальная часть кадра используется для оценки интенсивности фонового излучения и связанной с ним погрешности измерения сигнала ТР [30]. Приведённые осциллограммы получены при умеренной концентрации электронов $n_e = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и существенно сниженной энергии зондирующего лазера: 0,7 Дж из максимальных

3 Дж. Даже в таких условиях сигнал ТР виден без дополнительной обработки и соотношение сигнал/шум остаётся высоким. Для расчёта T_e используется классический алгоритм взвешенной линейной регрессии [45]. На рисунке 1.11 показан результат такой обработки осциллограмм, приведённых на рисунке 1.10. Измеренные сигналы ТР отложены в виде столбцов, ширина и положение которых соответствует характеристикам спектральных каналов полихроматора. Сплошной зелёной линией показан модельный спектр ТР для найденных значений T_e и n_e . Модельный и измеренный спектр ТР находятся в хорошем соответствии.

Globus-M2 #39627: $I_p = 210$ (kA), $B_t = 0.7$ (T)
time = 203.6 (ms), $R = 39$ (cm), $E_{\text{las}} = 0.7$ (J), $G = 2$

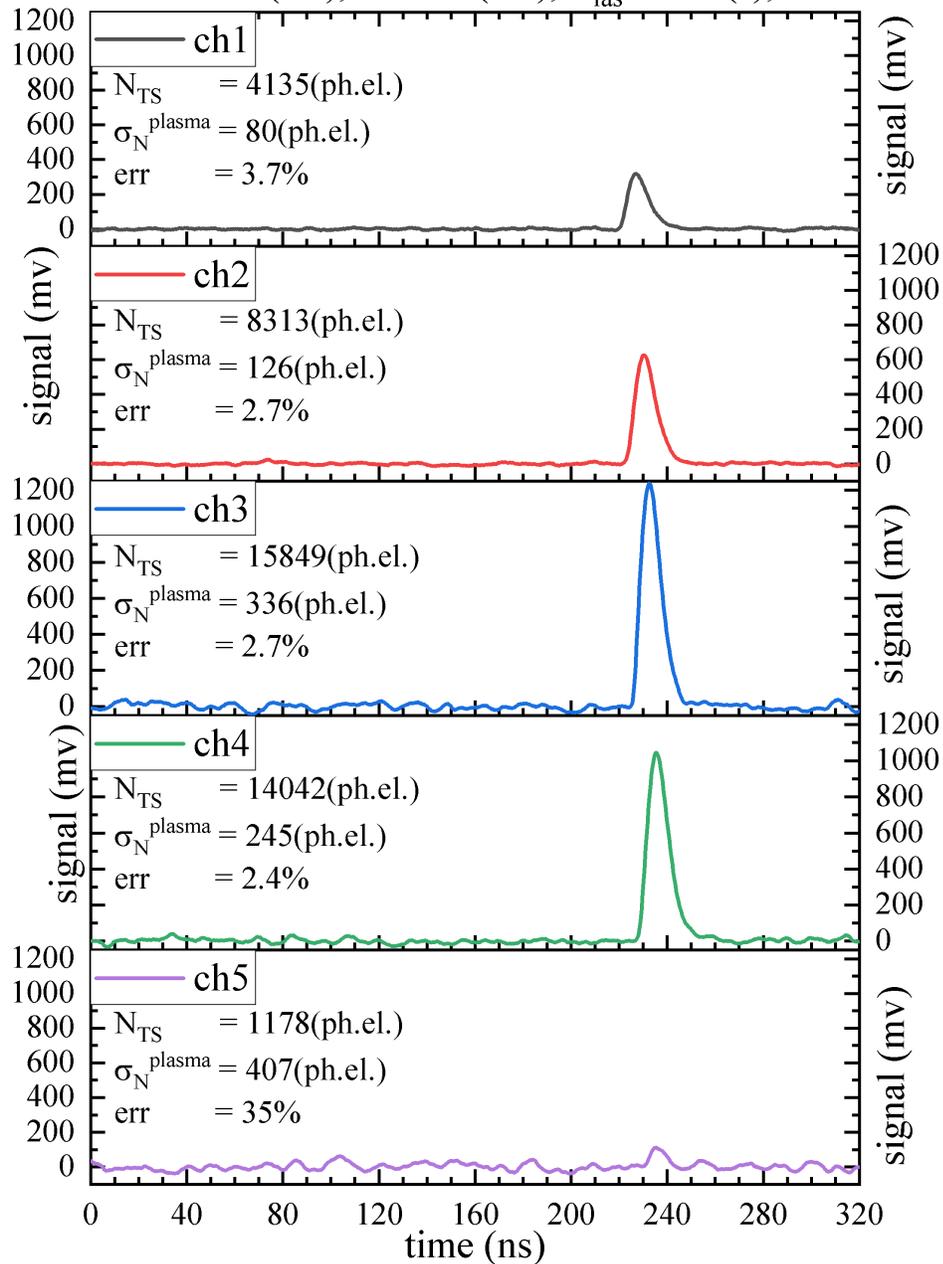


Рисунок 1.10 Кадр оцифровщика с сигналами TR в пяти спектральных каналах одного полихроматора в момент времени 203,6 мс разряда №39627 токамака Глобус-М2. Для каждого канала приведены рассчитанные значения числа фотоэлектронов TR N_{TS} , оценка интенсивности фонового излучения σ_N^{plasma} и оценка относительной погрешности сигнала TR err .

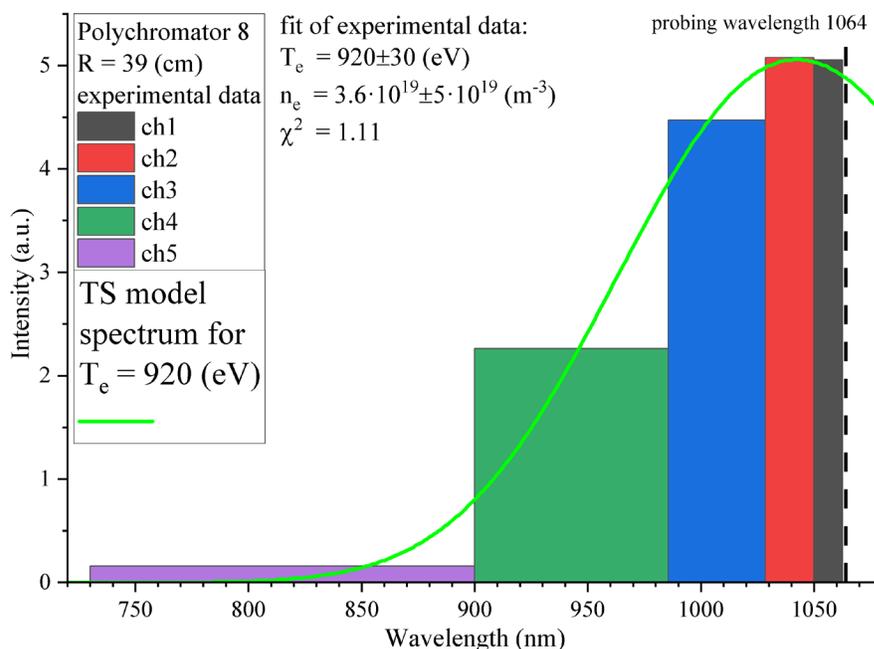


Рисунок 1.11 Пример расчёта T_e из измеренных сигналов ТР в каналах полихроматора, приведённых на рисунке 1.10. Сплошные столбцы – измеренные сигналы. Сплошная светло-зелёная линия – модельный спектр ТР, соответствующий температуре электронов $T_e = 920$ эВ.

Комплекс экваториальной диагностики ТР токамака Глобус-М2 позволяет проводить измерения в стационарном режиме с частотой 330 Гц. В настоящий момент для анализа спектра рассеянного излучения используется 11 пятиканальных полихроматоров на основе интерференционных светофильтров. Для регистрации интенсивности лазерного рассеяния в зависимости от времени используются 8 VME модулей дигитайзера CAEN V1743 по 16 каналов с разрешением 12 бит и частотой дискретизации 3.2 ГГц. Все 8 дигитайзеров попарно подключены к одному 4-х каналному PCI-е контроллеру CAEN A3818C компьютера системы сбора. Каждый спектральный канал имеет два высокочастотных выхода, отличающихся коэффициентами усиления, предназначенных для увеличения динамического диапазона измеряемых сигналов. За импульс лазера (одну временную точку) регистрируются 110 осциллограмм сигналов ТР, а также 8 осциллограмм временной формы зондирующего лазерного импульса (по одной для каждого модуля V1743).

Компьютер находится под управлением ОС общего назначения Windows 10 и оснащён 6 ядерным центральным процессором AMD Ryzen 5 3600X. Программа сбора и обработки данных написана на языке C++ и выполняется с наивысшим приоритетом в планировщике задач ОС. Для переноса данных из буфера дигитайзеров в оперативную память компьютера выделено по одному потоку на каждую из четырёх линий связи с дигитайзерами. Пятый вычислительный поток выделен на обработку и определение числа зарегистрированных фотоэлектронов в каждой из 128 записанных осциллограмм (11·5·2 сигналов ТР + 8 сигналов синхронизации + 10 холостых каналов). После обработки всех каналов формируется управляющий сигнал обратной связи, который в виде UDP пакета передаётся по сети Ethernet. После прохождения через два коммутатора, управляющий сигнал попадает на одноплатный компьютер Raspberry Pi 4В и конвертируется в команду для 12-бит ЦАП МСР4725, подключённого к последовательной шине I2С. ЦАП выводит сигнал в общую систему сбора данных токамака и в систему управления токамака. Для демонстрации применения диагностики ТР в системе управления токамака в качестве управляемого параметра была выбрана средняя концентрация электронов, а в качестве исполняющего устройства использован пьезо-клапан MaxTec MV-112, регулирующий поток водорода в камеру.

Для расчёта профиля n_e в режиме реального времени разработан упрощённый алгоритм обработки данных ТР. На рисунке 1.12а) приведена гистограмма времени работы цикла расчёта в серии разрядов токамака. Измерялось время обработки с учётом оцифровки данных, передачи их в память компьютера, расчёта профиля n_e и передачи управляющего сигнала на ЦАП. Среднее время составило 2.0 мс, а максимальное не превышало 2.4 мс, при интервале между лазерными импульсами 3.03 мс. На передачу данных из дигитайзера в компьютер тратится 1.2 мс, а из компьютера в исполняющий ЦАП – 0.5 мс, что в сумме составляет 85% от времени цикла. На рисунке 1.12б)

приведено сравнение результатов расчёта локальных значений n_e , с использованием стандартного алгоритма обработки экспериментальных данных (постобработка), и упрощённого алгоритма обработки данных ТР. Показано, что результаты двух алгоритмов обработки находятся в хорошем соответствии друг с другом, а величина MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах) составляет 3.2%. Поскольку в настоящее время на токамаке Глобус-М2 данные о магнитном равновесии в режиме реального времени недоступны, для формирования управляющего параметра использовалось локальное значение концентрации $n_e^{R=49}$, измеренное в точке с большим радиусом $R = 49$ см (близко к середине малого радиуса). Линейная зависимость $n_e^{R=49}$ от n_e^{ITS} (см. рисунок 1.12c) позволяет использовать локальную концентрацию $n_e^{R=49}$ в качестве входного сигнала для пропорционального регулятора средней концентрации в выбранном режиме работы токамака.

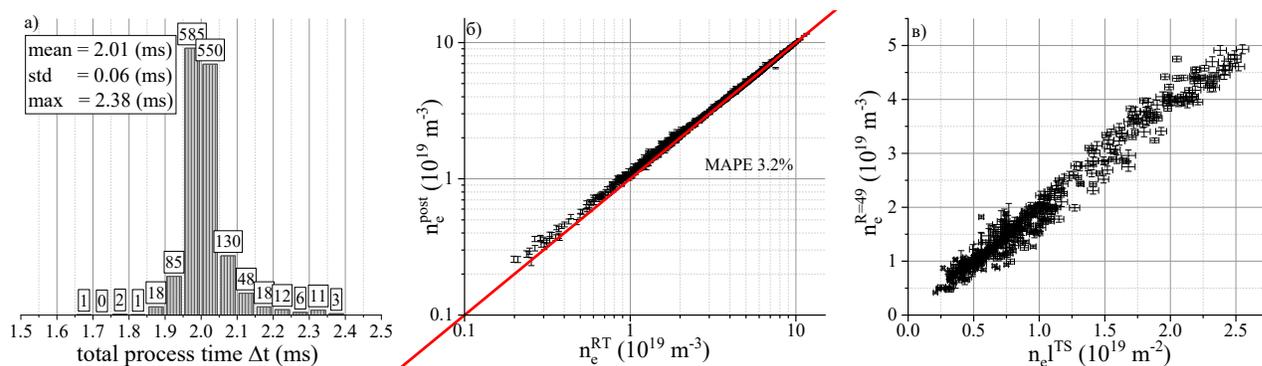


Рисунок 1.12 а) Гистограмма времени обработки сигнала ТР от момента зондирования плазмы до обновления регистров на исполняющем ЦАП. б) Локальная n_e , полученная в результате пост-обработки (Y). n_e , полученная в результате обработки упрощённым кодом в реальном времени (X). в) локальное значение концентрации в точке с большим радиусом $R = 49$ см в зависимости от линейной концентрации.

Для демонстрации возможности управления средней концентрацией в токамаке на основании данных диагностики ТР был выбран омический режим с низкой средней концентрацией электронов $< 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и предварительной

боронизацией первой стенки. Для данного режима работы токамака Глобус-М2 не ожидается переход в режим улучшенного удержания, сопровождающийся резким изменением коэффициента диффузии частиц, что позволяет использовать простую модель управления n_e пропорциональным регулятором. В сценарии использовался короткий импульс напуска дейтерия через отдельный клапан за 50 мс до старта разряда для формирования условий пробоя. На рисунке 1.13 приведены основные параметры плазмы для двух разрядов токамака Глобус-М2 №42613 с включённой системой управления концентрацией и контрольный №42611 без управления. Все программы управления электромагнитной системой в данных разрядах были идентичны. Начиная со 145 мс, на динамике n_{el} (рисунок 1.13a) наблюдается монотонное снижение, величина n_{el} измерялась двумя независимыми диагностиками: ТР [46] и СВЧ интерферометром (характерная длина хорды $l \approx 0.6$ м). В разряде №42613 при снижении n_e , измеренной ТР, до заданной величины $n_e^{R=49} = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (рисунок 1.13b) на клапан напуска рабочего газа подаётся управляющий сигнал (рисунок 1.13c), пропорциональный разнице заданной и измеренной n_e . Таким образом в разряде с включённой системой управления n_e по сигналу обратной связи от диагностики ТР монотонное снижение n_{el} было подавлено.

Globus-M2 #42611, OH without feedback
 #42613, TS feedback by H gas puff

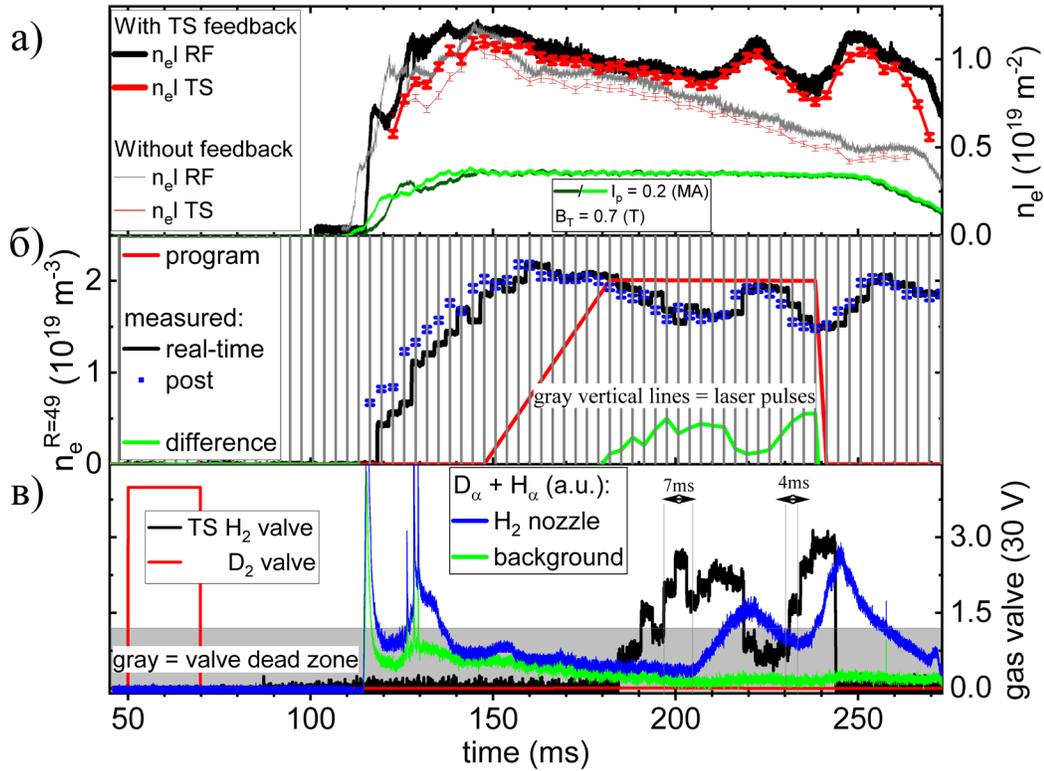


Рисунок 1.13а) интегральная концентрация по данным ТР (красный) и СВЧ интерферометра (чёрный). Зелёный – ток плазмы. б) локальная концентрация $n_e^{R=49}$: постобработка – синие точки, выход ЦАП в режиме реального времени – чёрный. Заданная программа управления концентрацией – красная. Разность заданного и измеренного значений – зелёная. Серыми вертикальными линиями показаны моменты зондирования. с) напряжение на пьезоклапане: в цепи обратной связи – чёрный, вспомогательный клапан – красный. Суммарная интенсивность излучения линий H_α и D_α в разряде №42613 – синий для хорды наблюдения, направленной на капилляр газонапуска, и зелёный для фонового сигнала.

Использование простого пропорционального контроллера вызвало колебания управляемой величины в окрестности заданного значения из-за инерции системы управления и объекта управления. Клапан, использованный в работе, имеет мёртвую зону (рисунок 1.13с) и гистерезис, неучтённые при построении контроллера. Оценка задержки между открытием клапана и

ионизацией газа на границе плазмы, сделанная по сигналу суммарной интенсивности излучения линий H_{α} и D_{α} (рисунок 1.13с), составила 4–7 мс.

Таким образом, на токамаке Глобус-М2 профиль концентрации, измеренный диагностикой томсоновского рассеяния, обрабатывается в режиме реального времени для каждого плазменного разряда, начиная с декабря 2022 года [39]. Время от момента измерения до готовности полного профиля не превышает 2.4 мс, из которых 1.2 мс расходуется на передачу данных из дигитайзеров, и 0.5 мс на передачу данных на исполняющий ЦАП. Достигнутое время быстрогодействия находится на мировом уровне [47] [48] [49] и удовлетворяет требованию 2.5 мс для включения диагностики ТР в систему управления параметрами плазмы ИТЭР [12]. Время обработки возможно сократить до ~ 1 мс за счёт оптимизации системы передачи данных. Дополнительное увеличение быстрогодействия возможно при использовании ОС реального времени и высокопроизводительного процессора. Показано соответствие между данными, измеряемыми в режиме реального времени и результатами стандартной пост-обработки.

Обработка данных диагностики ТР в режиме реального времени реализована на ряде установок: KSTAR [50], NSTX-U [49] [48], LHD [51] [52], MAST [53] [54], TCV [55] и DIII-D [56] [57]. Использование данных диагностики ТР для управления параметрами плазмы упоминается только в работе с токамака DIII-D [58] в рамках интегральной системы без каких-либо подробностей. Вместе с тем, доступное в открытой печати описание диагностического комплекса ТР DIII-D [57] [59] не содержит информацию о возможности работы в реальном времени, а более ранняя работа [56] упоминает обработку в реальном времени только как возможный апгрейд. В представленной работе [39] продемонстрировано управление средней концентрацией в токамаке на основании данных диагностики ТР в омическом режиме с низкой средней

концентрацией электронов $< 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Возможно качественное улучшение точности поддержания средней концентрации за счёт оптимизации алгоритма контроллера и управления пьезо-клапаном напуска рабочего газа. Возможности диагностики ТР, созданной для токамака Глобус-М2, достаточны для реконструкции профиля тока плазмы равновесными кодами в режиме реального времени, для систем управления пространственными распределениями параметров плазмы в токамаке-реакторе и источнике нейтронов.

1.4 Выводы по главе 1

Проведена модернизация диагностического комплекса ТР на токамаке Глобус-М2. Диагностика томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М2 обеспечивает мониторные измерения локальных значений температуры и концентрации электронов. Диагностика обладает широким динамическим диапазоном и обеспечивает надёжные измерения во всём диапазоне достигнутых на сегодняшний момент параметров электронов плазмы $0,005 \leq T_e \leq 1,8$ (кэВ) и $0,2 \leq n_e \leq 20$ (10^{19} м^{-3}) на токамаке Глобус-М2. Диагностика работает на протяжении всего разряда токамака с интервалом между измерениями 3.03 мс. Обработанные данные диагностики поступают в систему управления токамаком в режиме реального времени. В данной работе продемонстрировано управление средней концентрацией в токамаке на основании данных диагностики ТР. Возможности диагностики ТР, созданной для токамака Глобус-М2, могут быть использованы для уточнения реконструкции равновесными кодами, в том числе в режиме реального времени с задержкой $\leq 2,4$ мс.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

2.1 Динамика температуры и концентрации электронов в плазме токамака Глобус-М2.

На рисунке 2.1 приведены осциллограммы основных параметров разряда №41114 токамака Глобус-М2 с нейтральной инжекцией (Neutral Beam Injection – NBI) на стадии роста тока плазмы (рисунок 2.1.a)). На рисунке 2.1.b) приведена осциллограмма интенсивности мягкого рентгеновского излучения (Soft X-Ray – SXR), хорда наблюдения детектора лежит близко к экваториальной плоскости и проходит через магнитную ось плазменного шнура. Интенсивность SXR связана с n_e и T_e в центральной области [60], которой соответствуют измерения диагностики ТР в точке с $R=41$ см (рисунок 2.1.c)). На стадии роста тока до 185 мс сигнал SXR монотонно растёт, концентрация в центре линейно увеличивается и профиль плотности обостряется. На рисунке 2.2 приведён пример динамики пространственного распределения $T_e(R)$ и $n_e(R)$ на начальной стадии рассматриваемого разряда токамака, где R – большой радиус. Пробой газа происходит на 110-й мс программы разряда. Диагностика ТР позволяет проводить достоверные измерения пространственного распределения концентрации $n_e(R)$ при $I_p=11$ кА на ранней стадии разряда плазмы.

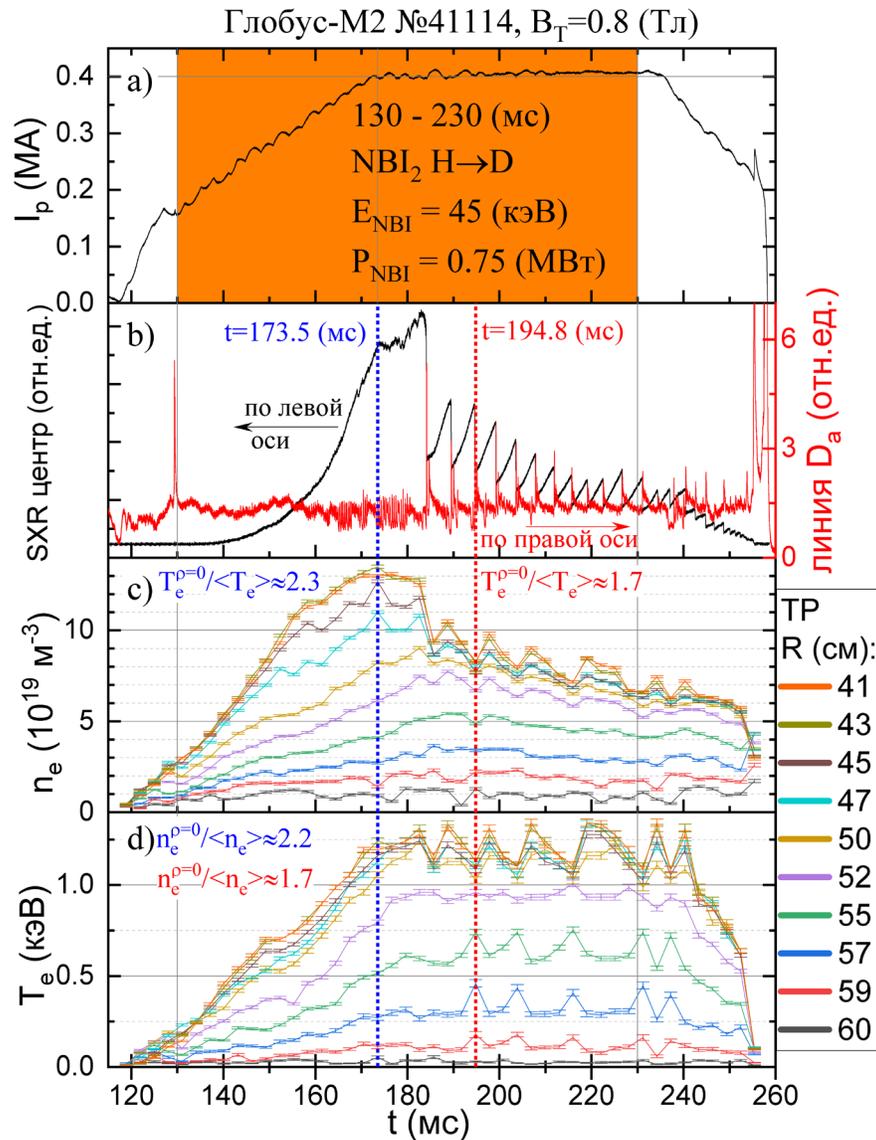


Рисунок 2.1 Разряд №41114 токамака Глобус-М2 при тороидальном магнитном поле $B_T=0.8$ Тл, рабочий газ – дейтерий. а) ток плазмы, оранжевым выделено время работы инжектора атомов водорода с энергией $E_{NBI}=45$ кэВ и мощностью $P_{NBI}=0.75$ МВт. б) сигнал мягкого рентгеновского излучения по левой шкале, детектором служит фотодиод за фильтром из бериллиевой фольги толщиной 50 мкм. Интенсивность излучения линии D_α по правой. в) локальная концентрация электронов, большой радиус точки измерения приведён в легенде справа. д) температура электронов.

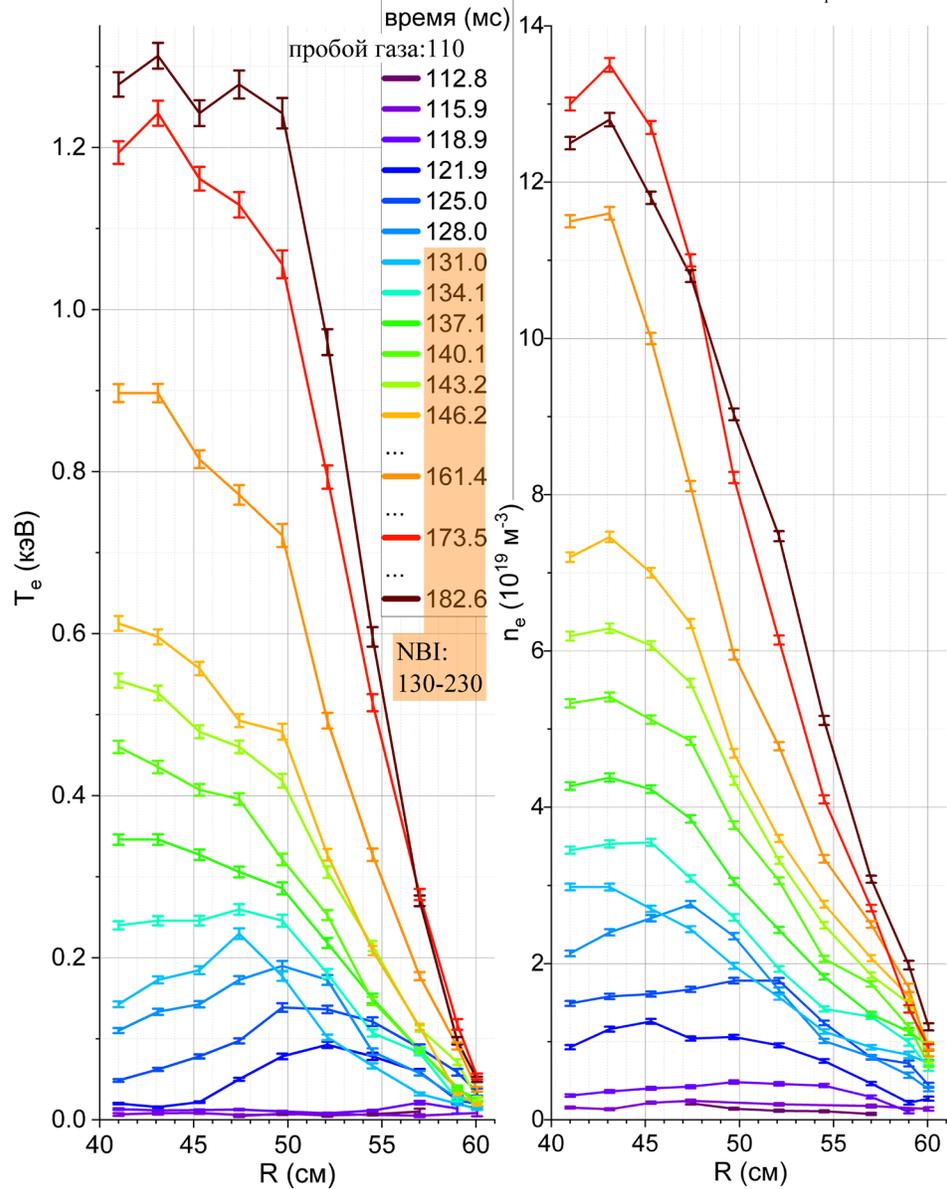


Рисунок 2.2 Динамика пространственных распределений температуры (слева) и концентрации (справа) электронов на стадии роста тока в разряде №41114 токамака Глобус-М2. Цветом обозначены разные моменты времени зондирования плазмы лазером диагностики томсоновского рассеяния: более ранние моменты времени ближе к фиолетовому, поздние – к красному.

На начальной стадии основная доля тока плазмы протекает по периферийному слою [61]. Соответственно омический нагрев локализован на периферии, максимум $T_e(R)$ – не на магнитной оси. На 130 мс разряда начата инжекция пучка атомов [62] в плазму токамака, которая приводит к росту n_e и

дополнительному нагреву электронов пучком. По мере диффузии тока плазмы к центру увеличивается $T_e^{\rho=0}$, где $\rho=0$ – обозначение магнитной оси плазмы. Увеличение градиентов $T_e(R)$ и $n_e(R)$ говорит об улучшении удержания тепла и частиц. Пространственное распределение $n_e(R)$ монотонно меняется от магнитной оси до периферии. Однако распределение $T_e(R)$ уплощено в центральной части плазменного шнура ($R \leq 50$ см, $r/a \leq 0.45$, где r – малый радиус точки измерения, a – малый радиус плазменного шнура). Это свидетельствует об ухудшении удержания тепла в центральной части ещё до развития пилообразных колебаний плазмы [63].

На 185 мс происходит резкое падение интенсивности сигнала SXR (рисунок 2.1) и величины центральной n_e , начинаются пилообразные колебания. Начало пилообразных колебаний вызвано появлением в плазме резонансной поверхности $q=1$ [64], наличие которой может приводить к развитию кинк неустойчивости. Срывы пилообразных колебаний сопровождаются вспышками интенсивности излучения линии D_α (рисунок 2.1.b)), свидетельствующими о возникновении краевых неустойчивостей [65]. При возникновении пилообразных колебаний происходит резкое снижение $n_e^{\rho=0}$, уплощение распределения $n_e(R)$ и падение сигнала SXR. Последующий разброс n_e в центральной области обусловлен пилообразными колебаниями. Период пилообразных колебаний около 4.2 мс близок к периоду измерения диагностики $TR = 3.03$ мс, что приводит к стробоскопическому эффекту на данных диагностики TR и затрудняет их анализ. Пилообразные колебания модулируют значения локальной T_e (рисунок 2.1.c)) во всём объёме плазменного шнура. Внутри области с $R \leq 50$ см колебания T_e совпадают по фазе с колебаниями сигнала SXR из центральной области, для наружной области с $R \geq 55$ см колебания T_e происходят в противофазе. Перемешивание в центральной области во время пилообразных колебаний приводит к уширению пространственного распределения T_e . Отношение центральной температуры к средней по объёму

$T_e^{p=0}/\langle T_e \rangle$ до начала пилообразных колебаний (173,5 мс) составляет 2.2, во время колебаний (194,8 мс) снижается до значения 1.7.

На рисунке 2.3 детально рассмотрен стационарный участок разряда №41114, на котором происходят пилообразные колебания. Измерения диагностики TP попадают на разные фазы колебания, моменты зондирования и фазы пилообразных колебаний показаны на рисунке 2.3.a). Между этими моментами динамика $T_e^{p=0}$ (рисунок 2.3.b)) дополнена при помощи совместного анализа измерений SXR спектрометра и данных диагностики TP [60]. Температура в центральной области линейно возрастает между срывами пилообразного колебания. Для анализа пространственных распределений $T_e(R)$ и $n_e(R)$ во время пилообразных колебаний измерения разделены на две группы: до срыва пилообразного колебания (синие) и после (красные).

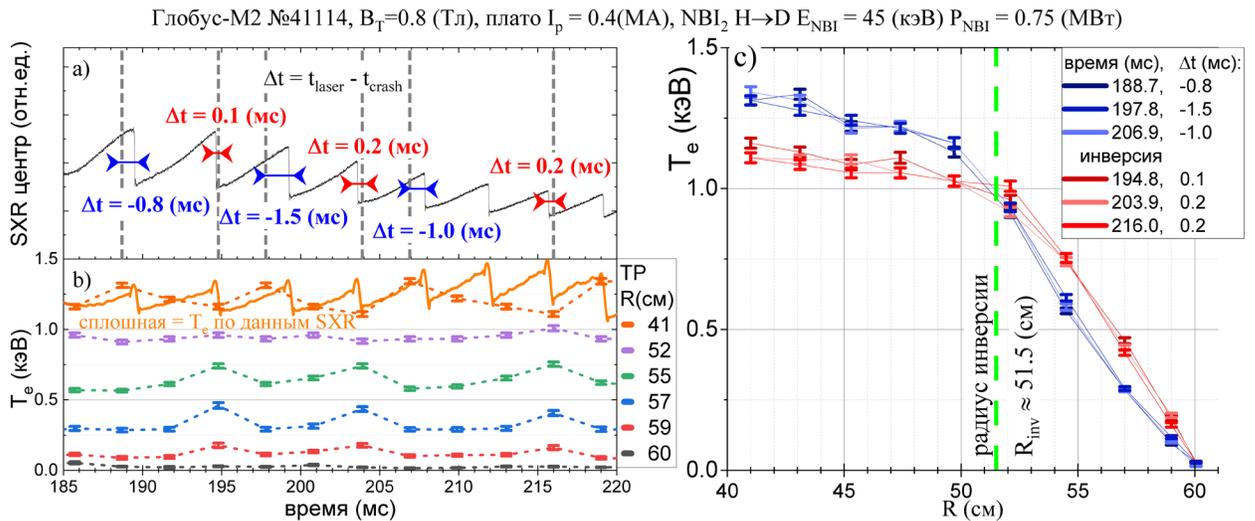


Рисунок 2.3 Пилообразные колебания на стационарной стадии разряда №41114 токамака Глобус-М2. а) сигнал мягкого рентгеновского излучения. Вертикальными линиями показаны моменты времени измерения диагностики TP. Горизонтальными стрелками показана задержка между измерением диагностики TP и ближайшим срывом пилообразного колебания: синие при измерении перед срывом, красные – после. б) Динамика температуры электронов. Точки – данные диагностики TP, сплошная линия – оценка центральной температуры совместно с данными фольгового полихроматора

мягкого рентгеновского излучения. Цвет соответствует пространственной точке, указанной в легенде. с) Профили температуры электронов, измеренные перед срывом пилообразного колебания (синие) и после (красные). Зелёная штриховая вертикаль соответствует положению радиуса инверсии.

Распределение $T_e(R)$ на одинаковой фазе колебания хорошо воспроизводится в пределах оценки погрешности измерения (рисунок 2.3.с)). Перед срывом температура электронов в центральной области возрастает, распределение $T_e(R)$ обостряется. В момент срыва пилообразного колебания происходит нарушение вложенной структуры магнитных поверхностей в центре и перенос частиц из центральной области плазмы наружу за радиус инверсии R_{inv} . Это вызывает рост T_e снаружи R_{inv} и уплощение распределения $T_e(R)$ внутри R_{inv} . Путём сравнения $T_e(R)$ до и после срыва можно определить $R_{inv} = 51.5$ см в данном разряде токамака. Ему соответствует значение нормированного малого радиуса r/a около 0.58, т.е. более половины плазменного шнура. Такой масштабный процесс приводит к потере энергии из зоны удержания плазмы, что выражается в снижении энергозапаса электронов $W_e = 1.5 \cdot \int_V (T_e \cdot n_e) dV$ на 10% при каждом срыве пилообразных колебаний.

Временное разрешение диагностики ТР (10 нс) позволяет проводить измерения распределения $T_e(R)$ и $n_e(R)$ во время глобальных срывов плазмы [66] и во время развития внутренних перезамыканий магнитных силовых линий (Internal Reconnection Event – IRE). На сферических токамаках, в отличие от токамаков с большим аспектным отношением, IRE обычно не приводит к глобальному срыву разряда [1]. Однако, аналогично срыву пилообразного колебания, при IRE происходит нарушение вложенной структуры магнитных поверхностей, но оно затрагивает всю область удержания [67]. Это приводит к резкому изменению внутренней индуктивности плазменного шнура и характерному резкому увеличению тока плазмы. В разряде Глобус-М2 №41114 IRE происходит на 255 мс при выводе тока плазмы (рисунок 2.4.а)).

Интенсивность излучения линии D_α при IRE (рисунок 2.4.b)) в 5 раз выше, чем во время пилообразных колебаний и сравнима с интенсивностью во время окончательного срыва разряда. Также наблюдаются сильные вспышки излучения углерода и железа. Существенный прирост интенсивности тормозного излучения сохраняется и после IRE, что свидетельствует о повышении эффективного заряда плазмы [68] из-за проникновения примеси в область удержания. Результаты измерений диагностики TP показывают, что при IRE средняя по объёму температура электронов $\langle T_e \rangle_V$ снижается на 75%. Распределение $T_e(R)$ уплощается во время IRE (рисунок 2.4.c) вплоть до $R < 55$ см ($r/a > 0.75$). Таким образом, плато $T_e(R)$ шире, чем R_{inv} при срыве пилообразных колебаний: R_{inv} около 51.5 см (r/a около 0.58). Из-за взаимодействия со стенкой средняя по объёму концентрация электронов $\langle n_e \rangle_V$ возрастает, несмотря на значительное падение центральной концентрации (рисунок 2.4.d)). Распределение $n_e(R)$ имеет максимум на периферии $R_{max} \geq 55$ см из-за поступления примеси в плазму. Итого, в результате IRE за короткое время около 0.2 мс теряется более 70% запасённой в электронах энергии, что создаёт высокую нагрузку на обращённую к плазме поверхность.

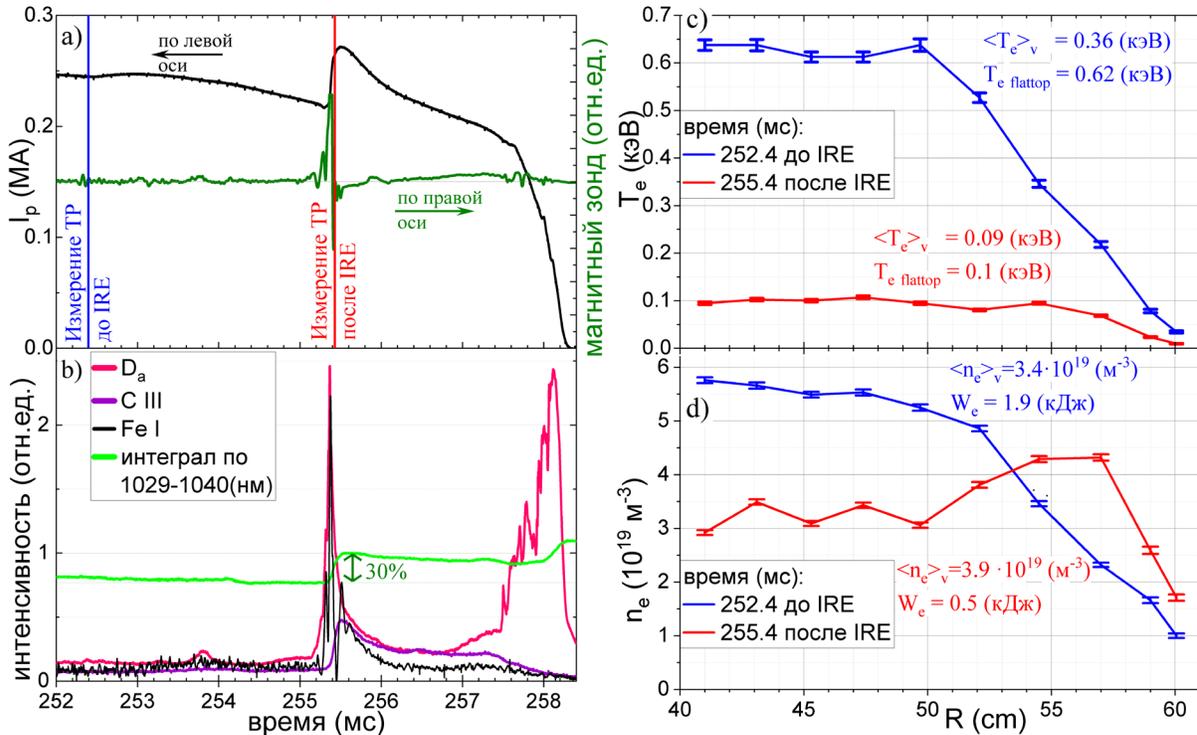


Рисунок 2.4 Перезамыкание магнитных линий (IRE) на 255 мс в завершающей стадии разряда №41114 токамака Глобус-М2. а) осциллограмма тока плазмы по левой шкале. Синяя и красная вертикали – моменты зондирования диагностики ТР. По правой шкале зелёным отложен сигнал наружного МГД зонда. б) интенсивность излучения линий D_α , C III, Fe I и в диапазоне 1029-1040 нм. в) профили температуры электронов до перезамыкания (синий) и непосредственно после (красный). д) профили концентрации электронов.

2.2 Динамика перехода в режим улучшенного удержания, периферийные измерения.

На токамаке Глобус-М2 во время нейтральной инжекции плазма, как правило, переходит из режима плохого удержания (Low confinement или **L-mode**) в режим улучшенного удержания (**H-mode**) [2]. В качестве примера, на рисунке 5 приведены параметры разряда №40975, где переход в режим улучшенного удержания происходит на 172.3 мс разряда, практически сразу после начала инжекции на 170 мс разряда. О переходе в режим улучшенного удержания свидетельствуют [69]: излом (скачкообразное изменение производной) на

осциллограмме среднехордовой концентрации и энергозапаса электронов (рисунок 2.5.b)), падение интенсивности излучения линии D_α (рисунок 2.5.c)), падение интегральной амплитуды флуктуаций концентрации в периферийной области плазмы (мощность сигнала доплеровского обратного рассеяния (ДОР) [70]) (рисунок 2.5.c)). Мощность сигнала ДОР снижается на 60% в каналах с отсечками $1.0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (вблизи последней замкнутой магнитной поверхности) и $3.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (2-10 см внутри LCFS). Спектрограмма сигнала ДОР для отсечки $1.0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (рисунок 2.5.d) демонстрирует падение турбулентности в диапазоне частот от 100 до 500 кГц, низкочастотные флуктуации сохраняются.

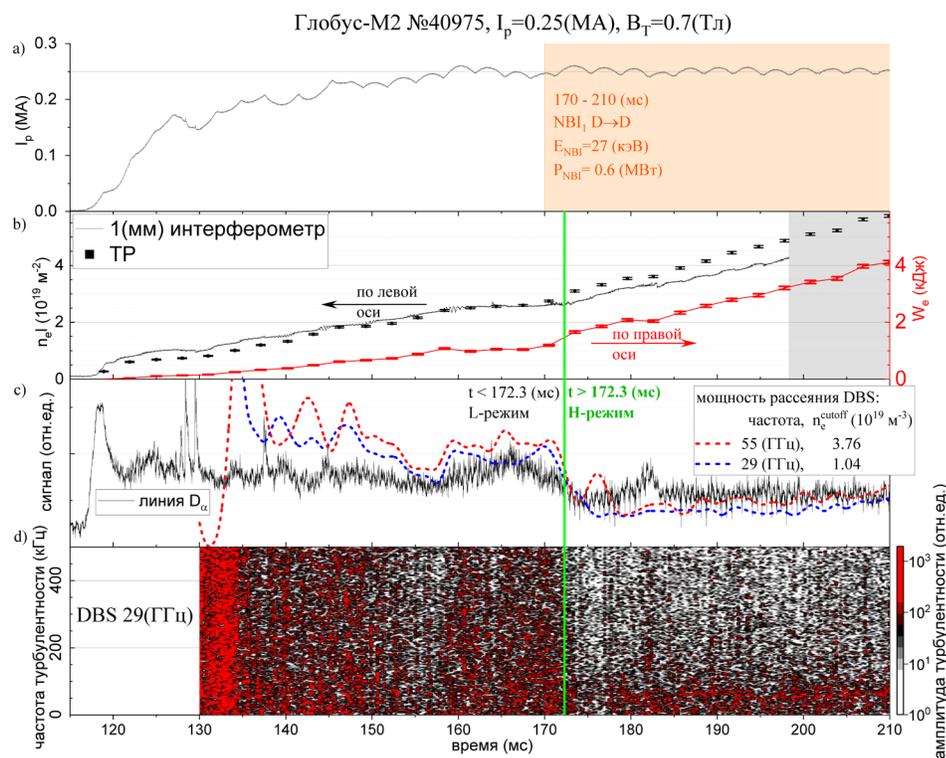


Рисунок 2.5 Динамика разряда №40975 токамака Глобус-М2 при токе плазмы 0.25 МА и тороидальном магнитном поле 0.7 Тл с переходом в режим улучшенного удержания. а) Ток плазмы. Выделено время работы инжектора НИ-1: дейтерий, момент включения 170 мс, энергия 27 кэВ, мощность 0.6 МВт. б) Черным по левой шкале – динамика линейной концентрации электронов вдоль вертикальной хорды $R=42$ см. Точки – данные диагностики ТР, сплошная линия – измерения микроволнового интерферометра. Красным по правой шкале показан энергозапас электронного компонента. Зелёная вертикаль обозначает момент L-H перехода. в) Чёрный – осциллограмма интенсивности излучения

линии D_α . Красная и синяя штриховые линии – мощность сигнала доплеровского рассеяния на частотах 55 и 29 ГГц соответственно. d) Спектрограмма турбулентности периферийной плазмы, измеренная методом доплеровского рассеяния волны с частотой 29 ГГц. По вертикали отложена частота турбулентности, цветом – интенсивность.

Промежутка времени в 3.03 мс между зондирующими импульсами диагностики ТР достаточно для разрешения динамики профилей $T_e(R)$ и $n_e(R)$ во время L-H перехода (рисунок 2.6). В режиме улучшенного удержания особый интерес представляет область на периферии плазменного шнура, где формируется транспортный барьер. Для удобства интерпретации, пространственные распределения на рисунке 2.6 построены относительно величины $R-R_{LCFS}$. Величина R_{LCFS} соответствует точке пересечения последней замкнутой магнитной поверхности (LCFS) и экваториальной плоскости на наружном обходе и рассчитывается с помощью алгоритма подвижных токовых колец [71]. Первые три профиля (синие) измерены до перехода в режим улучшенного удержания и демонстрируют хорошую воспроизводимость измерений. После начала инъекции температура электронов в центральной области возрастает [72]. При этом в области последней замкнутой магнитной поверхности профили $T_e(R)$ сохраняются неизменными и после L-H перехода.

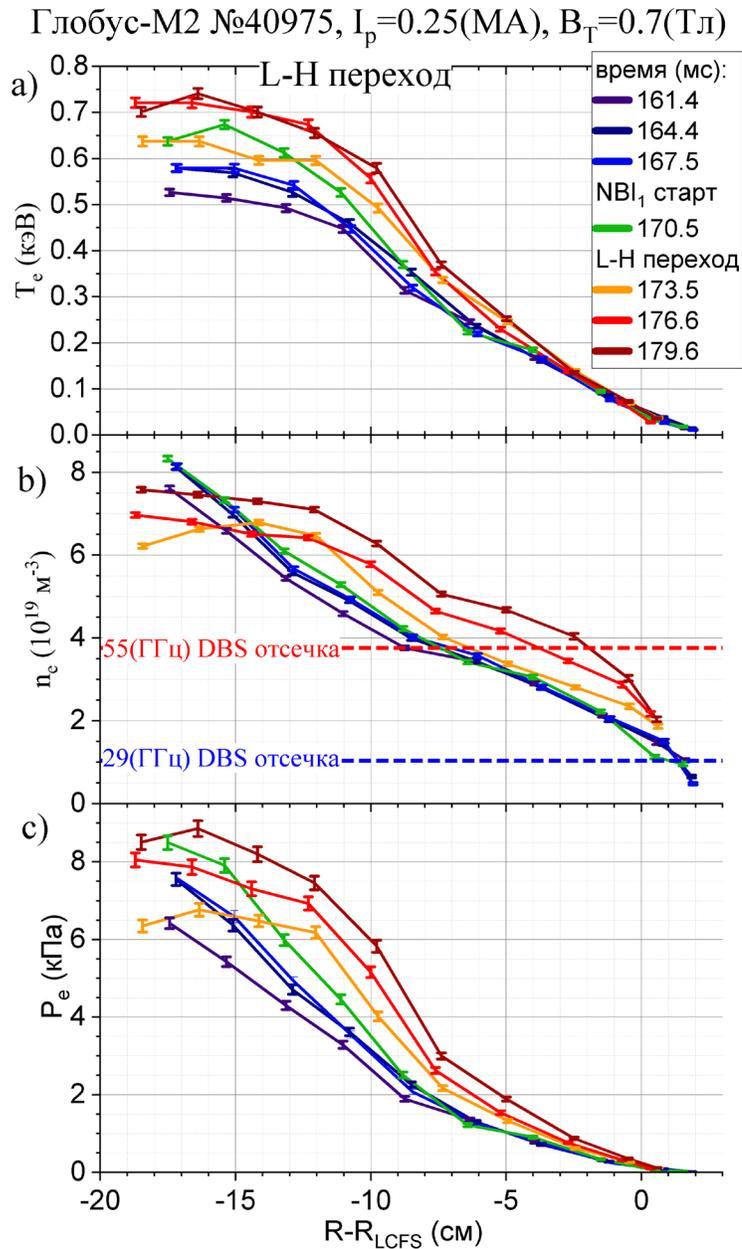


Рисунок 2.6 Динамика L-H перехода в разряде №40975 токамака Глобус-М2 при токе плазмы 0.25 МА и тороидальном магнитном поле 0.7 Тл. Цветом обозначен момент зондирования от более ранних (синих) к поздним (красным). Пространственные распределения параметров электронов отложены относительно расстояния до последней замкнутой магнитной поверхности. а) Температура электронов. б) Концентрация электронов. Штриховые горизонтальные линии соответствуют отсечкам для зондирующих волн доплеровской рефлектометрии: $3.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для 55 ГГц и $1.0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для 29 ГГц с) Давление электронов.

После перехода в режим улучшенного удержания на профиле $n_e(R)$ (рисунок 2.6.b)) наблюдается увеличение градиента концентрации в области последней замкнутой магнитной поверхности. Величина $n_e(R_{LCFS})$ при L-H переходе возрастает с $1.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $2.1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, профили $n_e(R)$ уплощаются. Соответственно давление электронов в центральной точке $P_e^{\rho=0}$ (Рисунок 2.6 с)) возрастает на 20% из-за увеличения центральной T_e . Одновременно происходит существенное уширение пространственного распределения $P_e(R)$ за счёт уплощения профиля $n_e(R)$: параметр $P_e^{\rho=0}/\langle P_e \rangle_V$ спадает от 6.1 до 3.7, где $\langle P_e \rangle_V$ – среднее по объёму давление. Проявление периферийного транспортного барьера на профилях концентрации, но не на профилях температуры характерно для установок Глобус-М [8], Глобус-М2, MAST [7] и др.

Одной из проблем работы токамака с диверторной конфигурацией плазмы является высокая плотность тепловой мощности в области выхода LCFS на диверторные пластины – самую нагруженную часть обращённой к плазме поверхности. Измерение плотности мощности, поступающей в дивертор, необходимо для обеспечения безопасности токамака. Плотность тепловой мощности на диверторных пластинах зависит в том числе от T_e , n_e и ширины их распределений за последней замкнутой магнитной поверхностью. Диагностический комплекс TP на токамаке Глобус-М2 позволяет проводить измерения с высоким пространственным разрешением в том числе снаружи от LCFS – в обдирочном слое (Scrape-Off Layer – SOL). На рисунке 2.7 приведены измерения T_e в трёх омических разрядах, в которых на стадии плато тока плазменный шнур в соответствии с программой управления прижимался к центральному столбу. Такая схема эксперимента обеспечила существенное движение последней замкнутой магнитной поверхности относительно неподвижных точек наблюдения диагностики TP. При умеренной величине n_e около 10^{19} м^{-3} и существенно сниженной энергии зондирования $E_{las} = 0.7 \text{ Дж}$

(максимальная $E_{las} = 3.0$ Дж) были проведены достоверные измерения ТР в SOL вплоть до 4 см за пределы LCFS.

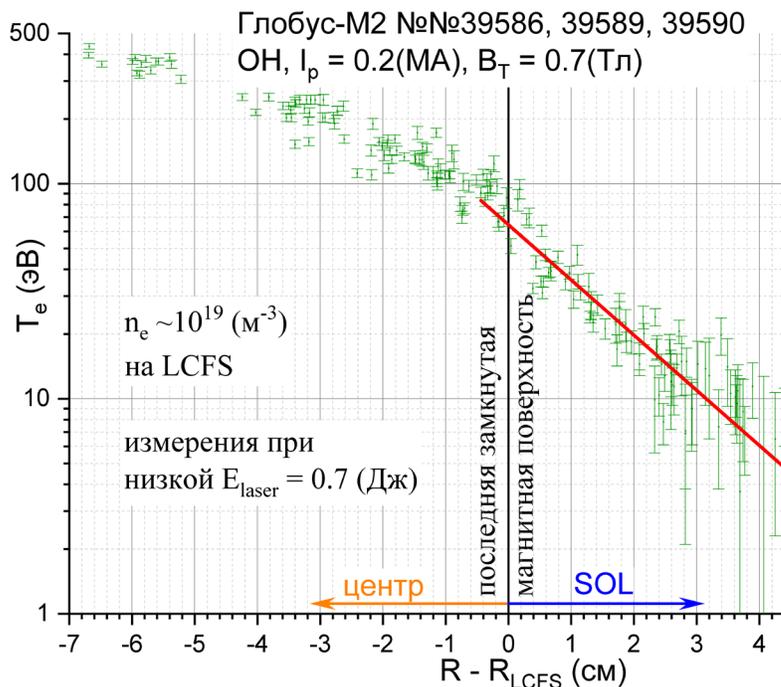


Рисунок 2.7 Пространственное распределение температуры электронов в области последней замкнутой магнитной поверхности (LCFS). По горизонтальной оси отложено расстояние от точки измерения до LCFS на внешнем обходе в экваториальной плоскости. Красным показана экспоненциальная аппроксимация всех экспериментальных точек снаружи LCFS.

2.3 Совместный анализ данных ТР и магнитной диагностики.

Для интерпретации экспериментальных данных диагностик плазмы необходима информация о магнитной структуре плазменного шнура во время измерений. Требуется знать координаты магнитной оси R_0 и Z_0 , положение LCFS и структуру поверхностей равного магнитного потока. Положение и форму LCFS на токамаке Глобус-М2 рассчитывают с помощью алгоритма подвижных токовых колец [71] на основе данных магнитной диагностики [73], модели расположения обмоток токамака и модели проводимости вакуумной камеры.

Диагностика ТР позволяет определять положение последней замкнутой магнитной поверхности на внешней стороне тора в экваториальной плоскости R_{LCFS} ($Z=0$). На рисунке 2.7 приведены результаты измерений ТР, точка перегиба профиля $T_e(R)$ при $R=R_{LCFS}$ обусловлена различием в переносе тепла на замкнутых и разомкнутых магнитных поверхностях. Положение точки перегиба, измеренное диагностикой ТР, совпадает с R_{LCFS} , рассчитанным алгоритмом подвижных токовых колец на стационарной фазе разряда токамака.

Однако в определённых режимах работы токамака достоверность данных магнитной диагностики снижается [74], например, на начальной стадии разряда I_p мал, присутствуют большие наведённые токи по вакуумной камере, и плазменный шнур удалён от датчиков магнитного потока. На рисунке 2.8 приводится пример стадии роста тока плазмы со скоростью 8 МА/с до 0.2 МА в разряде №43220 токамака Глобус-М2, пробой газа в разряде произведён на 110 мс. Для четырёх моментов времени на (рисунок 2.8.а)) приведены положения LCFS, определённые алгоритмом подвижных токовых колец. На 137 мс разряда плазменный шнур с полным током $I_p = 78$ кА пересекает экваториальную плоскость на расстоянии $R_{LCFS}=43.3$ см. При этом зазоры до вакуумной камеры составляют более 20 см от наружной стенки по большому радиусу и более 30 см по вертикали. По мере роста тока плазменный шнур расширяется по большому радиусу, достигая $R_{LCFS}=59.2$ см на 152.1 мс разряда. Пространственное разрешение диагностики ТР не зависит от параметров разряда, а положение точек наблюдения проверяется прямыми измерениями расстояния внутри вакуумной камеры. Таким образом, диагностика ТР позволяет достоверно отслеживать положение плазменного шнура по измеренному пространственному распределению давления электронов $P_e(R)$ (Рисунок 2.8 б). Для 137 мс разряда (рисунок 2.8.б) фиолетовый) три точки наблюдения ТР попадают внутрь расчётного значения $R_{LCFS}=43,3$ см. Однако по данным диагностики ТР для 137 мс точка $R=29$ см находится внутри LCFS, а точки $R=40$ см и $R=42$ см –

снаружи (рисунок 2.8.b)). Критериями, по которым проводится оценка попадания точки измерения ТР внутрь LCFS являются величина градиента P_e и значение T_e . Для примера на рисунке 2.8.b) фиолетовым штрих-пунктиром приведено распределение $P_e(R)$, ожидаемое для $R_{LCFS}=43.3$ см. Т.е. в данных условиях алгоритм подвижных токовых колец завышает значение R_{LCFS} более чем на 3 см. На 143 мс ток плазмы составляет 129 кА и $R_{LCFS}=50.4$ см, соответствующее ожидаемое пространственное распределение $P_e(R)$ ближе к экспериментальному: различие составляет менее 1 см. Начиная со 146.1 мс разряда ток плазмы превышает 148 кА, плазменный шнур приближается к наружной стенке и положение LCFS по данным диагностики ТР совпадает с расчётным значением алгоритма подвижных токовых колец.

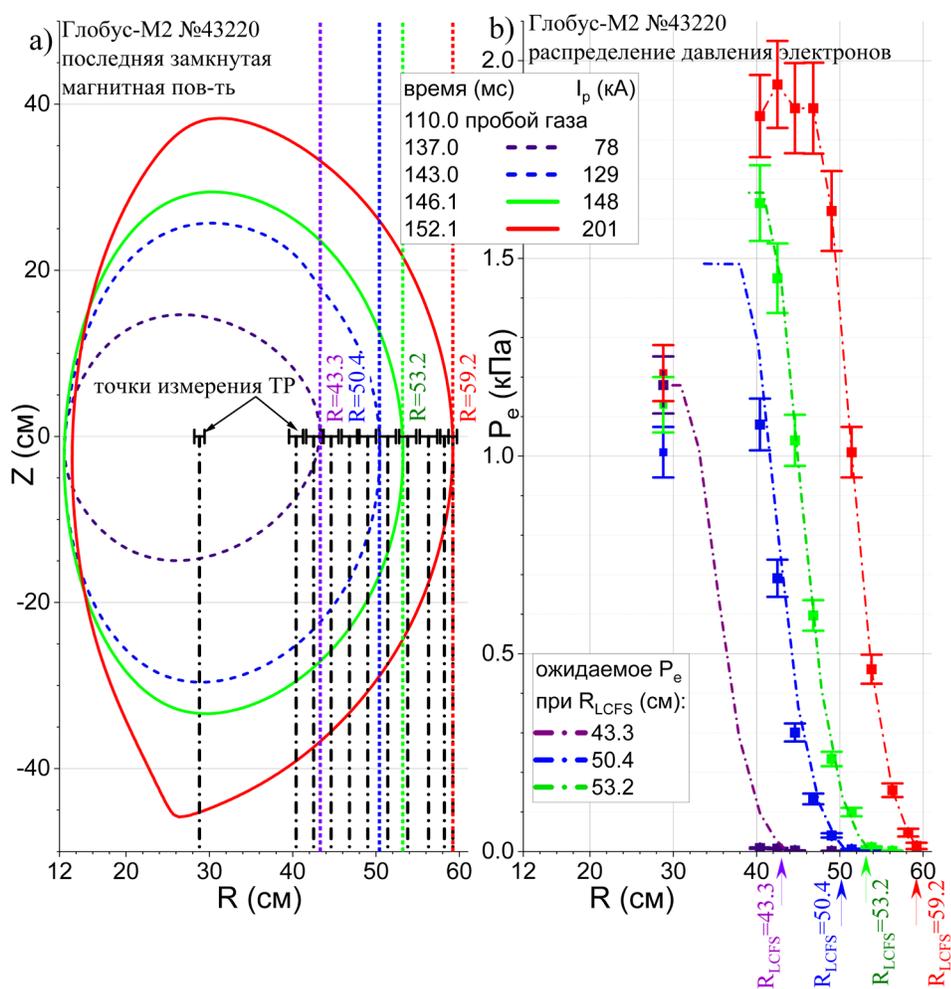


Рисунок 2.8 Динамика положения плазменного шнура в разряде №43220

токамака Глобус-М2. а) последняя замкнутая магнитная поверхность в соответствующие моменты времени, определённая алгоритмом подвижных токовых колец. Чёрным показано положение и размер областей наблюдения диагностики ТР в экваторе. б) Пространственное распределение давления электронов для разных моментов времени: точки – экспериментальное значение, штрих-пунктир – ожидаемое значение для R_{LCFS} согласно алгоритму подвижных токовых колец.

Зная положение последней замкнутой магнитной поверхности, с помощью кодов ruGSS [74] и PET [75] производится реконструкция структуры внутренних магнитных поверхностей. Диагностика ТР позволяет верифицировать полученную карту магнитного потока в предположении сохранения величины P_e на поверхности равного магнитного потока. Для верификации используются точки измерения ТР на стороне сильного магнитного поля (HFS). На рисунке 2.9.а) приведена реконструкция магнитных поверхностей, выполненная при помощи кода PET для момента измерения ТР. Через центр каждой области наблюдения диагностики ТР проводится поверхность равного магнитного потока. Каждой поверхности присваивается значение P_e , измеренное в экваториальной плоскости. Так измерения ТР по обе стороны от магнитной оси проецируются в координаты магнитных поверхностей

$$\rho = \sqrt{(\Psi_p - \Psi_p^{axis}) / (\Psi_p^{LCFS} - \Psi_p^{axis})} \quad (\text{рисунок 2.9.б)), \text{ где } \Psi_p - \text{ расчётный}$$

полоидальный магнитный поток, а Ψ_p^{axis} и Ψ_p^{LCFS} – его значения в центре и на границе плазменного шнура соответственно. Контрольная точка измерения $R=29$ см на HFS ложится между точками $R=49$ см и $R=51$ см на LFS. Расположение контрольной точки в области сильного градиента повышает чувствительность проекции к погрешности определения структуры магнитных поверхностей. Монотонность совокупного распределения $P_e(\rho)$ свидетельствует о корректной реконструкции магнитных поверхностей и положения магнитной

оси. Измерение распределения $P_e(R)$ по обе стороны магнитной оси также позволяет определять R_0 по максимуму на $P_e(R)$.

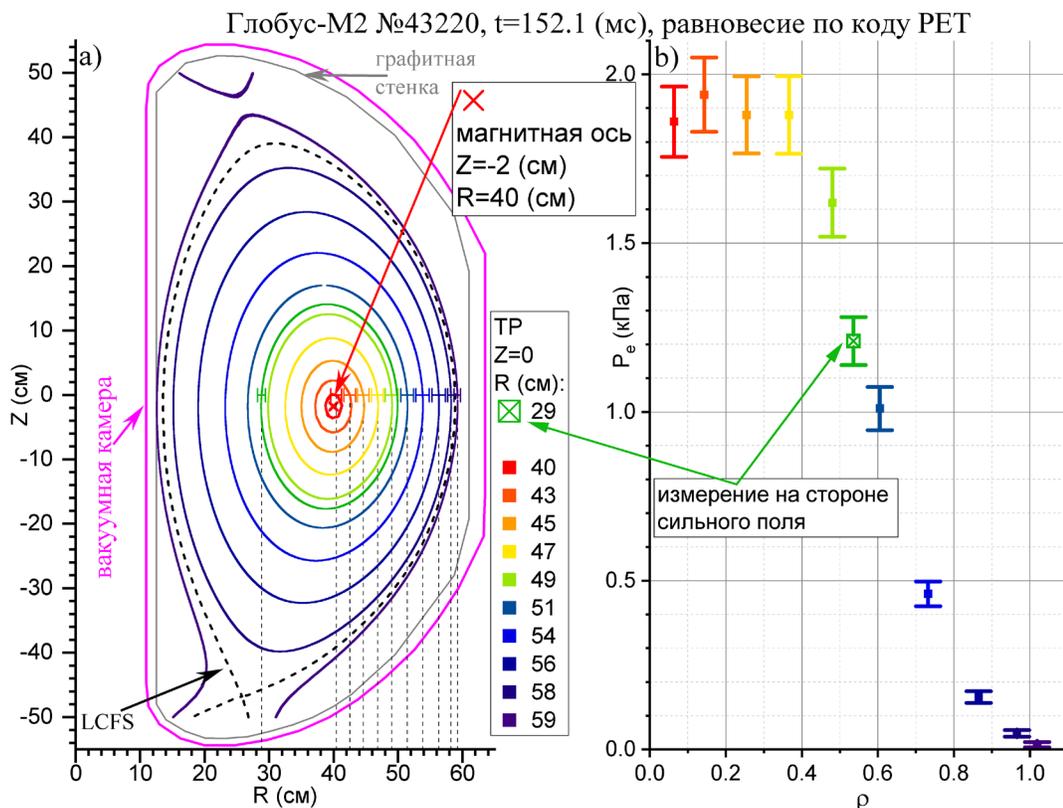


Рисунок 2.9 Реконструкция магнитного равновесия на 152.1 мс разряда №43220 токамака Глобус-М2. а) Сплошной фиолетовой линией показана вакуумная камера токамака в полоидальном сечении. Сплошной серой линией – обращённая к плазме графитовая поверхность. Пунктирной линией показана последняя замкнутая магнитная поверхность. Красный крест соответствует положению магнитной оси. Через центр каждой области наблюдения TP проведена магнитная поверхность своего цвета. Координаты центров областей наблюдения TP приведены в легенде. б) Профиль давления электронов в зависимости от нормированного полоидального магнитного потока. Закрашенные точки соответствуют измерениям на стороне слабого поля, поля – на стороне сильного поля.

2.4 Сравнительный анализ переноса тепла на основе данных диагностики TP.

Путём интегрирования $P_e(R)$ по объёму плазмы внутри LCFS вычисляется величина запасённой в электронном компоненте энергии W_e . Анализ W_e

совместно с электротехническими измерениями плазменного диамагнитного потока $W_{dia} = W_e + W_i + W_{fast}$ позволяет оценить энергозапас в ионном компоненте $W_i + W_{fast}$, основываясь на данных ТР [72]. Если доступны измерения ионного энергозапаса W_i , можно оценить величину вклада надтепловых поперечных частиц W_{fast} в энергобаланс.

На рисунке 2.10 приведены центральная температура электронов $T_e^{\rho=0}$ и W_e в зависимости от среднехордовой концентрации электронов $\langle n_e \rangle_l$ для разрядов с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции (NBI) и режима омического нагрева (ОН). Наличие пилообразных колебаний в разрядах токамака Глобус-М2 приводит к сильному разбросу значений $T_e^{\rho=0}$.

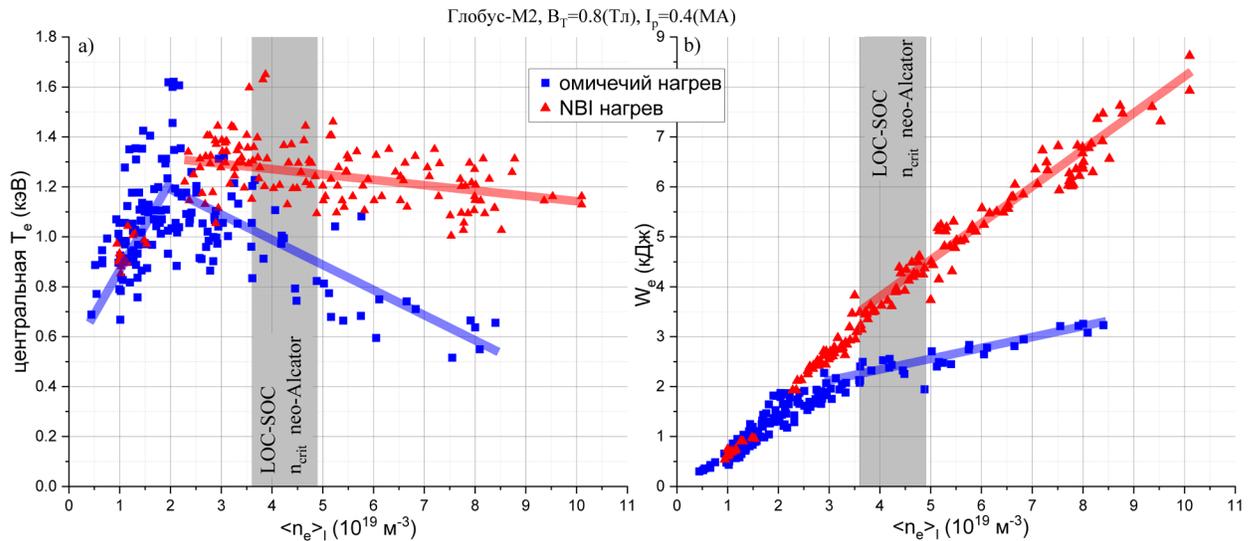


Рисунок 2.10 а) Зависимость температуры электронов в центральной области плазмы и б) энергозапаса электронов от средней концентрации электронов. Синие квадратные точки соответствуют разрядам с омическим нагревом, красные треугольники – разрядам с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции. По абсциссе отложена средняя концентрация электронов $\langle n_e \rangle_l$ на вертикальной хорде $R=42$ см с характерной длиной $l \approx 0.7$ м. Серым выделена оценка положения перехода LOC-SOC согласно эмпирическому выражению (neo-Alcator scaling).

В омическом режиме при низких концентрациях $T_e^{\rho=0}$ возрастает с увеличением концентрации до $2\text{-}3\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$. При концентрациях $>3\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$ в омическом режиме $T_e^{\rho=0}$ монотонно снижается. Интегральная величина энергозапаса в электронах W_e демонстрирует два участка линейного роста с изломом также в области $\langle n_e \rangle_l = 2\text{-}3\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$. W_e круче возрастает на первом участке до величины 2.5 кДж. Более пологий второй участок достигает 3.2 кДж при $\langle n_e \rangle_l = 8\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$. При концентрациях $<2\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$, по всей видимости, плазма находится в режиме линейного омического удержания энергии (Linear Ohmic Confinement – LOC), где основные потери тепловой энергии определяются неустойчивостью на запертых электронах (Trapped Electron Mode – TEM) [76]. С ростом $\langle n_e \rangle_l$ увеличивается столкновительность, TEM стабилизируется, и $T_e^{\rho=0}$ возрастает. При дальнейшем повышении концентрации увеличивается теплообмен электронов с ионами, ионный канал потерь энергии начинает давать существенный вклад в энергобаланс [8], и $T_e^{\rho=0}$ вновь убывает. Излом на зависимости W_e от концентрации может быть косвенным свидетельством перехода из LOC в режим насыщенного омического удержания энергии (Saturated Ohmic Confinement – SOC). Положение излома можно сравнить с эмпирическим выражением (neo-Alcator scaling) для LOC-SOC перехода [77]. Оценка критической концентрация перехода LOC-SOC составляет $3.6\text{-}4.9\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$, что превышает концентрацию, при которой происходит излом на зависимости W_e на рисунке 2.10.b).

Дополнительный нагрев плазмы методом нейтральной инжекции позволяет достичь двукратного повышения $T_e^{\rho=0}$ в области высоких концентраций: при $\langle n_e \rangle_l = 8\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$ $T_e^{\rho=0}$ составляет 1.2 кэВ. При низких концентрациях $\langle n_e \rangle_l = 1\cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$ температура и энергозапас электронов совпадает для омического режима и режима с NBI. Но в отличие от режима

омического нагрева, участок линейного роста W_e с увеличением концентрации продолжается вплоть до $\langle n_e \rangle_l = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, где W_e достигает 9 кДж.

На основе измеренных диагностикой ТР распределений $T_e(R)$ и $n_e(R)$ готовится подробный анализ энергобаланса плазмы токамака Глобус-М2 в режимах омического нагрева (ОН) и с нейтральной инжекцией (NBI), включая исследование зависимости времени удержания энергии, поглощённой мощности и мощности передачи энергии между электронами и ионами. Для решения системы транспортных уравнений применён [78] код ASTRA. Использована модель с неоклассической ионной температуропроводностью в омическом режиме и аномальной в режиме с нейтральной инжекцией. В исследуемом NBI сценарии в центре плазменного шнура мощность дополнительного нагрева не приводит к увеличению T_i , что говорит об ухудшении удержания ионов. В ОН и NBI режимах оценка значений T_i в центре плазменного шнура одинакова. Таким образом запас энергии в ионном компоненте W_i (рисунок 2.11) также одинаков для режимов ОН и NBI. Основная доля энергии заключена в электронном компоненте. При этом в NBI сценарии W_e возрастает монотонно с увеличением n_e , не достигая насыщения. Суммарный энергозапас хорошо соответствует диамагнитным измерениям W_p , что говорит о верной оценке T_i .

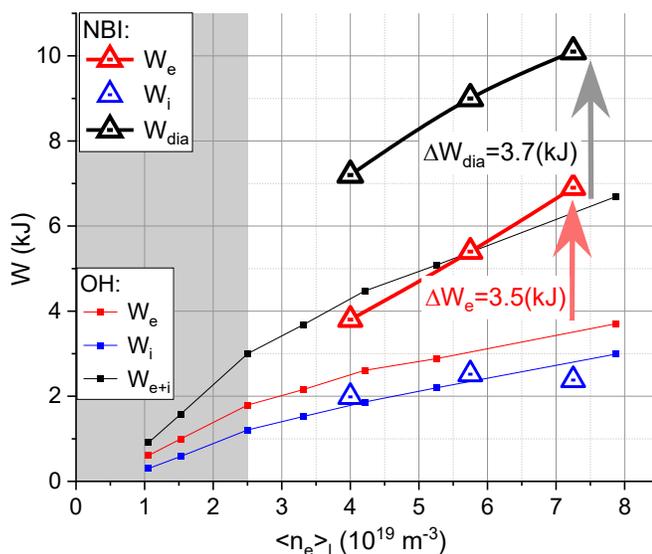


Рисунок 2.11 Зависимость энергозапаса от среднечордовой концентрации электронов в плазме токамака Глобус-М2 при $I_p = 0,4(\text{МА})$ и $V_T = 0,8$ (Тл). Красный – измеренный энергозапас электронов, синий – расчётный энергозапас ионов, чёрным показан суммарный энергозапас электронов и тепловых ионов. Сплошными точками показан режим омического нагрева плазмы. Полыми точками показан режим с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции.

Температуропроводность ионов в омическом сценарии соответствует неоклассическим значениям и линейно возрастает с увеличением n_e (рисунок 2.12). В NBI сценарии температуропроводность ионов значительно больше. Чтобы добиться совпадения расчётных значений T_i с оценкой из экспериментальных данных в NBI сценарии, ионная температуропроводность в модели пятикратно увеличена [72]. При этом электронная температуропроводность в сценариях ОН и NBI сохраняется на одном уровне. Это приводит к дополнительному нагреву электронного компонента в NBI сценарии с одним пучком с энергией $E_{NBI}=45$ кэВ.

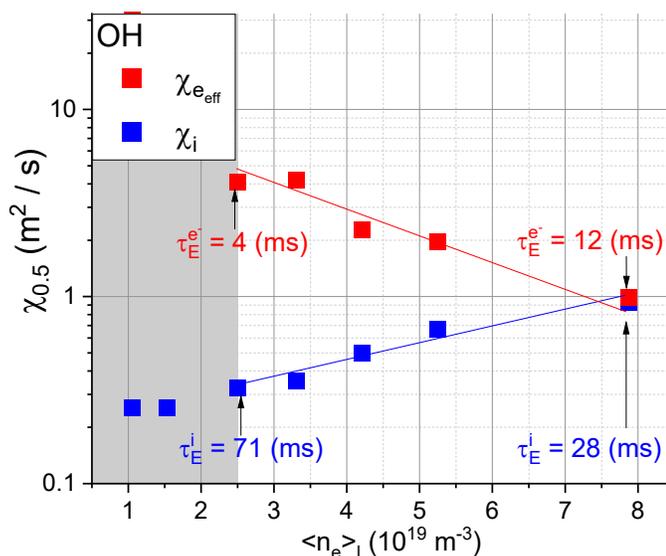


Рисунок 2.12 Зависимость температуропроводности электронов (красный) и ионов (синий) в режиме омического нагрева на токамаке Глобус-М2 при $I_p = 0,4(\text{МА})$ и $V_T = 0,8$ (Тл).

В режиме омического нагрева время удержания энергии линейно возрастает с ростом n_e (рисунок 2.13). В исследованном диапазоне $\langle n_e \rangle_l$ $2,5 - 8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ не происходит насыщения. Для токамака Глобус-М2 данный диапазон n_e находится выше критической концентрации по скейлингу выхода из режима линейной зависимости времени удержания энергии (LOC neo-Alcator scaling) [76]. Насыщение τ_E^{OH} не происходит в исследуемом диапазоне n_e , несмотря на возрастающую мощность нагрева ионов электронами, вследствие хорошего удержания в ионном компоненте $\chi_i \sim \chi_i^{\text{neo}}$. В NBI сценарии из-за увеличения температуропроводности ионного компонента общее время удержания энергии снижается по сравнению с OH сценарием $\tau_E^{\text{NBI}} \approx 0,75 \tau_E^{\text{OH}}$.

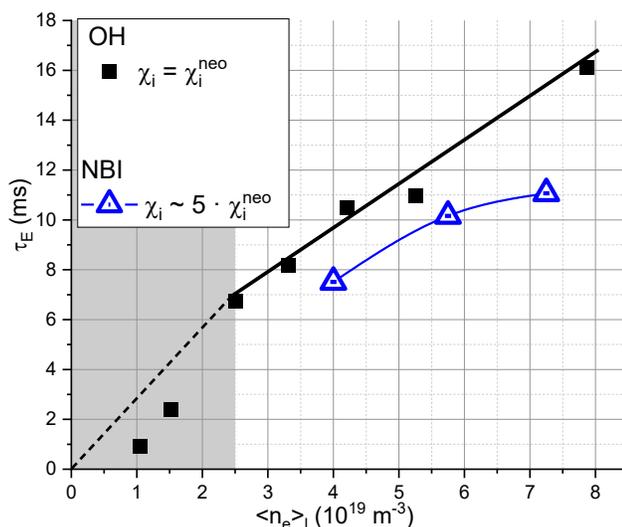


Рисунок 2.13 Зависимость времени удержания энергии от среднехордовой концентрации электронов в плазме токамака Глобус-М2 при $I_p = 0,4 (MA)$ и $B_T = 0,8 (Tл)$. Чёрный – режим омического нагрева. Синий – режим с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции.

2.5 Выводы по главе 2

Диагностика томсоновского рассеяния обеспечивает достоверные измерения при токе плазмы от 11 кА, позволяя определять положения пробоя. Высокое временное разрешение диагностики ($\sim 10 \text{ нс}$) делает возможным исследование быстрых процессов, включая срывы пилообразных колебаний,

срывы разряда и краевые неустойчивости плазмы. Измерена динамика профилей $T_e(R)$, $n_e(R)$ и $P_e(R)$ при переходе плазмы токамака Глобус-М2 в режим улучшенного удержания. Диагностика обеспечивает измерения T_e и n_e в обдирочном слое вплоть до 4 см за последней замкнутой магнитной поверхностью. Экваториальная геометрия измерения диагностики томсоновского рассеяния даёт возможность верифицировать положение границы плазмы и её магнитной оси. От работоспособности диагностики томсоновского рассеяния зависят основные направления исследований на установке Глобус-М2: нагрев и генерация тока пучком/пучками атомов, безындукционное поддержание тока плазмы волнами в нижне-гибридном диапазоне частот, исследования мелкомасштабных неустойчивостей плазмы.

Проведён анализ удержания энергии в омическом режиме при $I_p = 0,4$ (МА) и $B_T = 0,8$ (Тл). Показано, что запасённая в плазме энергия распределена практически одинаково между электронным и ионным компонентами. Ионная температуропроводность находится на неоклассическом уровне, время удержания энергии определяется в основном электронным компонентом. В исследованном диапазоне концентраций $\langle n_e \rangle_l$ $2,5 - 8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ наблюдается линейный рост τ_E от n_e .

Начат сравнительный анализ разрядов в режиме омического нагрева и режиме с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции водорода NBI₂ с энергией $E = 45$ (кэВ). При $I_p = 0,4$ (МА) и $B_T = 0,8$ (Тл) в омическом сценарии на токамаке Глобус-М2 с ростом $\langle n_e \rangle_l$ температура электронов в центре плазменного шнура снижается от 1 до 0,7 (кэВ). При $\langle n_e \rangle_l \geq 2,5$ (10^{19} м^{-3}) пространственное распределение T_e постоянно, а температура электронов в центре плазменного шнура превышает 1,2 (кэВ), что в 2 раза больше значения в омическом сценарии при высоких $\langle n_e \rangle_l$. Электронная температуропроводность в сценариях ОН и NBI находятся на одном уровне. Таким образом, инжекция

водорода с энергией 45 (кэВ) приводит к значительному нагреву электронов при высоких концентрациях, перспективных для УТС. Температуропроводность ионов существенно возрастает, что приводит к росту потерь в ионном канале и снижению времени удержания энергии на 25% относительно режима омического нагрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы являлось исследование электронного компонента плазмы токамака Глобус-М2 при высоких значениях тороидального магнитного поля B_T в различных режимах работы в сценариях с омическим нагревом и сценариях с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции. Для достижения этой цели решены задачи:

- Проведена модернизация диагностического комплекса ТР на токамаке Глобус-М2. Диагностика томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М2 обеспечивает мониторинговые измерения локальных значений температуры и концентрации электронов. Диагностика обладает широким динамическим диапазоном и обеспечивает надёжные измерения во всём диапазоне достигнутых на сегодняшний момент параметров электронов плазмы $0,005 < T_e < 1,8$ (кэВ) и $0,2 < n_e < 20$ (10^{19} м⁻³) на токамаке Глобус-М2. Измерения проводятся на протяжении всего разряда токамака с интервалом 3.03 мс. Диагностика обеспечивает измерения T_e и n_e в том числе и в обдирочном слое плазмы вплоть до 4 см за последней замкнутой магнитной поверхностью. Экваториальная геометрия измерения диагностики томсоновского рассеяния даёт возможность верифицировать положение границы плазмы и её магнитной оси.
- Организована рутинная передача обработанных данных ТР в общую систему сбора данных токамака Глобус-М2. Обработанные данные диагностики ТР также поступают в систему управления токамаком в режиме реального времени. Продемонстрировано управление средней концентрацией в токамаке на основании данных диагностики ТР.
- Проведены измерения пространственных распределений $T_e(R)$ и $n_e(R)$ в сериях разрядов с омическим нагревом плазмы и разрядов с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции. Измерена

динамика профилей $T_e(R)$, $n_e(R)$ и $P_e(R)$ при переходе плазмы токамака Глобус-М2 в режим улучшенного удержания.

На основе измеренных диагностикой ТР распределений $T_e(R)$ и $n_e(R)$ проведён анализ удержания энергии в омическом режиме при $I_p = 0,4$ (МА) и $B_T = 0,8$ (Тл). Совместный анализ данных диагностики ТР, диамагнитных измерений и магнитной реконструкции показал, что запасённая в плазме энергия распределена практически одинаково между электронным и ионным компонентами. Ионная температуропроводность находится на неоклассическом уровне, время удержания энергии определяется в основном электронным компонентом. В исследованном диапазоне концентраций $\langle n_e \rangle_1 2,5 - 8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ наблюдается линейный рост τ_E от n_e .

Проведено сравнение запасённой энергии, температуропроводности и времени удержания энергии в омическом сценарии (ОН) со сценарием с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции водорода (NBI) с энергией $E = 45$ кэВ. Значения электронной температуропроводности в сценариях ОН и NBI близки по величине. Инжекция атомов водорода с энергией 45 (кэВ) значительно нагревает электроны при высоких концентрациях, перспективных для УТС. Температуропроводность ионов существенно возрастает в NBI сценарии, что приводит к росту потерь в ионном канале и снижению времени удержания энергии на 25% относительно сценария омического нагрева.

В ближайшее время запланирован транспортный анализ плазмы в режиме с нагревом нейтральной инжекцией, подготовка статьи «Сравнительный анализ энергобаланса плазмы токамака Глобус-М2 в режиме с омическим нагревом и в режиме с нейтральной инжекцией» и завершение работы над диссертацией.

Эксперименты выполнены на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

1. **Zhiltsov N.S.** et.al., A note on measurement accuracy and thermal stability of filter polychromators for Thomson scattering diagnostics. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., v.976, 2020, DOI: [10.1016/j.nima.2020.164289](https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164289)
2. Kurskiev G.S. et.al., Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field reaching 0.8 T. Nucl. Fusion, v.62, 1, 2022, ArtNo: #016011 <http://dx.doi.org/10.1088/1741-4326/ac38c9>
3. **Zhiltsov N.S.** et al. Thomson scattering diagnostics at the Globus M2 tokamak, Подана в редакцию Nuclear Fusion (IOP Publishing) в августе 2022. Пройдено рецензирование, статья принята к публикации, но не опубликована из-за санкций Великобритании. [arXiv:2311.18723](https://arxiv.org/abs/2311.18723)
4. **Жильцов Н.С.** и др., Диагностика плазмы токамака Глобус-М2 методом томсоновского рассеяния в режиме реального времени, Письма в ЖТФ, 2023, том 49, вып. 16, DOI: [10.21883/PJTF.2023.16.55961.19625](https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.16.55961.19625)
5. Курскиев Г.С. и др., Режим с горячими ионами в сферическом токамаке Глобус-М2. Физ. плазмы, т.49, 4, 2023, с. 305 – 321 <https://doi.org/10.31857/S0367292122601497>
6. **Zhiltsov N.S.** et.al., Distinctive Features of Measuring T_e and n_e Spatial Distributions in the Globus-M2 Spherical Tokamak Using Method of Thomson Scattering of Laser Radiation, Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 3, pp. 310–321. DOI: [10.1134/S1063780X24600099](https://doi.org/10.1134/S1063780X24600099)
7. **Жильцов Н.С.** и др., Сравнительный анализ энергобаланса плазмы токамака Глобус-М2 в режиме с омическим нагревом и в режиме с нейтральной инжекцией. 51 международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 18-22 марта 2024.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алан Сайкс, "Физика сферических токамаков," Журнал технической физики, vol. 69, no. 9, 1999.
- [2] G.S. Kurskiev et.al., "Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field reaching 0.8 T. 2022 Nucl. Fusion 62 016011".
- [3] G.S. Kurskiev et.al., "The first observation of the hot ion mode at the Globus-M2 spherical tokamak".Nucl. Fusion 62 (2022) 104002, <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac881d>.
- [4] S.A.M. McNamara et.al., "Achievement of ion temperatures in excess of 100 million degrees Kelvin in the compact high-field spherical tokamak ST40. 2023 Nucl. Fusion 63 054002. DOI 10.1088/1741-4326/acbec8".
- [5] В.Б. Минаев и др., "РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ. ТОКАМАК ГЛОБУС-3." ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2023, том 49, No 12, с. 1375–1384, <https://doi.org/10.31857/S0367292123600851>.
- [6] A Sykes et al , "High-B performance of the START spherical tokamak."1997 Plasma Phys. Control. Fusion 39 B247DOI 10.1088/0741-3335/39/12B/019.
- [7] A. Sykes; J.-W. Ahn; R. Akers; E. Arends; P. G. Carolan; G. F. Counsell; S. J. Fielding; M. Gryaznevich; R. Martin; M. Price; C. Roach; V. Shevchenko; M. Tournianski; M. Valovic; M. J. Walsh; H. R. Wilson; MAST Team, "First physics results from the MAST Mega-Amp Spherical Tokamak, Phys. Plasmas 8, 2101–2106 (2001), <https://doi.org/10.1063/1.1352595>".
- [8] G. S. Kurskiev et.al., "Scaling of energy confinement time in the Globus-M spherical tokamak".Plasma Phys. Control. Fusion 59 (2017) 045010 (7pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa5cd5>.
- [9] Minaev V.B. et.al., "Spherical tokamak Globus-M2: design, integration, construction," Nuclear Fusion, vol. 57, 2017.
- [10] Meiden van der H. J., J. W. M. Vernimmen, J. van den Berg & I. G. J. Classen , Plasma. J Fusion Energ 39, 251–260 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10894-020-00262-5>.
- [11] N.J.Peacock et.al., "Measurement of the Electron Temperature by Thomson Scattering in Tokamak T3".Nature vol.224, 1969.
- [12] "ITER System Requirements Documents for diagnostics (SRD-55) from DOORS: 28B39L".
- [13] M. Bassan, P. Andrew, G. Kurskiev, E. Mukhin, T. Hatae, G. Vayakis, E. Yatsuka and M. Walsh, "Thomson scattering diagnostic systems in ITER," JINST, vol. 11, 2016.
- [14] N. J. PEACOCK, D. C. ROBINSON, M. J. FORREST, P. D. WILCOCK and V. V. SANNIKOV, "Measurement of the electron temperature by Thomson scattering in tokamak T3".Nature vol. 224 (1969).
- [15] А.Б.Кукушкин, А.Е. Ленева and В.И. Пергамент, "Особенности измерения температуры горячей плазмы по спектру некогерентного рассеяния лазерного излучения".Вопросы атомной науки и техники. Сер.Термоядерный синтез, 1983, вып. 2(12), с. 88-96.

- [16] S. L. Prunty, "A primer on the theory of Thomson scattering for high-temperature fusion plasmas".Phys. Scr. 89 (2014) 128001.
- [17] R. Scannell et al, "Design advances of the Core Plasma Thomson," JINST, vol. 12, no. C11010, 2017.
- [18] E. Yatsuka et al, "Progresses in development of the ITER edge Thomson scattering system," JINST, vol. 8, no. C12001, 2013.
- [19] Mukhin E.E. et.al., "Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER," Nucl. Fusion, vol. 54, 2014.
- [20] Г. С. Курскиеив и др. , Письма в Журнал технической физики, 2021, том 47, выпуск 24, страницы 41–45.
- [21] Zhiltsov N.S. et.al., "Thomson scattering diagnostics at the Globus M2 tokamak. arXiv:2311.18723".
- [22] Г.С. Курскиеив и др., "Модернизация диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М. ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 2".
- [23] Akers R. J. et.al. , "Transport and confinement in the Mega Ampère Spherical Tokamak (MAST) plasma," Plasma Phys. Control. Fusion, vol. 45, 2003.
- [24] Kurskiev G.S. et.al., "Prototype of precise Thomson scattering diagnostics for steady-state fusion experiment," in 39th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, 2021.
- [25] "Lasers & Optical Systems," 2021. [Online]. Available: <https://www.los.su/en/>.
- [26] "<https://www.los.su/upload/2021/12/15/4.%201kW%20LD%20pumped%20High%20Beam%20Quality%20Q-switched%20NdYAG%20laser.pdf>," [Online].
- [27] "CeramOptec," [Online]. Available: <https://www.ceramoptec.com>. [Accessed 2021].
- [28] Kurskiev G.S. et.al., "Digital filter polychromator for Thomson scattering applications".Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 963 (2020) 163734. DOI 10.1016/j.nima.2020.163734.
- [29] Hamamtsu, "APD S11519," [Online]. Available: <http://dtsheet.com/doc/1279457/s11519-series---hamamatsu-photonics>. [Accessed 05 2022].
- [30] Zhiltsov N.S. et.al., "A note on measurement accuracy and thermal stability of filter polychromators for Thomson scattering diagnostics," Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2020.
- [31] Yamada I. et.al., "Fast ADC system for Thomson scattering diagnostics," 2018.
- [32] J.H. Lee, H.J. Kim, I. Yamada, H. Funaba, Y.G. Kim and D.Y. Kim, "Research of Fast DAQ system in KSTAR Thomson," JINST, 2017.
- [33] Kurzan B. et.al., "Signal processing of Thomson scattering data in a noisy environment in ASDEX Upgrade," Plasma Phys. Control. Fusion, 2004.

- [34] Lee Jong-ha et.al., "Zeff profile measurement system using a Thomson polychromator," Fusion Engineering and Design, vol. 123, 2017.
- [35] M. Mattioli, Incoherent light scattering from high temperature plasmas, 1974, Euroatom/CEA.
- [36] Stott P.E., Gorini G., Prandoni P. and Sindoni E., Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors 2, 1998, DOI 10.1007/978-1-4615-5353-3.
- [37] S.A. Sabbagh, S.M. Kaye, J. Menard, F. Paoletti, M. Bell, R.E. Bell, J.M. Bialek, M. Bitter, E.D. Fredrickson, D.A. Gates, A.H. Glasser, H. Kugel, L.L. Lao, B.P. LeBlanc, R. Maingi, R.J. Maqueda, E. Mazzucato, D. Mueller, M. Ono, S.F. Paul, M. Peng, C.H. Skinner, D. Stutman, G.A. Wurden, W. Zhu and NSTX Research Team, Nuclear Fusion, vol. 41, no. 1601, 2001.
- [38] S.A. Galkin, A.A. Ivanov, S.Yu. Medvedev and Yu.Yu. Poshekhonov. 1997 Nucl. Fusion 37 1455. DOI 10.1088/0029-5515/37/10/I11.
- [39] Н.С. Жильцов и др., "Диагностика томсоновского рассеяния для управления концентрацией плазмы токамака Глобус-М2".Письма в ЖТФ, 2023, том 49, вып. 16 DOI: 10.21883/PJTF.2023.16.55961.19625.
- [40] X Litaudon, E Barbato, A Bécoulet, E J Doyle, T Fujita, P Gohil, F Imbeaux, O Sauter, G Sips. 2004 Plasma Phys. Control. Fusion 46 A19. DOI 10.1088/0741-3335/46/5A/002.
- [41] M.D. Boyer, D.J. Battaglia, D. Mueller, N. Eidietis, K. Erickson, J. Ferron, D.A. Gates, S. Gerhardt, R. Johnson, E. Kolemen, J. Menard, C.E. Myers, S.A. Sabbagh, F. Scotti and P. Vail. 2018 Nucl. Fusion 58 036016. DOI 10.1088/1741-4326/aaa4d0, "Plasma boundary shape control and real-time equilibrium reconstruction on NSTX-U".
- [42] А. В. Красильников и др..Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 11, стр. 970-985. DOI: 10.31857/S0367292121110196.
- [43] В. М. Леонов, "СЦЕНАРИИ РАЗРЯДА ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ," Физика плазмы, vol. 47, 2021.
- [44] Г. С. Курскиеv и др..Физика плазмы, 2022, Т. 48, № 8, стр. 711-721Физика плазмы. DOI: 10.31857/S0367292122100134.
- [45] V. V. Solokha, "Study of Kinetic Parameters of Globus-M Plasma by Thomson Scattering Using an Advanced Digital Polychromator".PHYSICS OF ATOMIC NUCLEI.
- [46] Г.С. Курскиеv и др.,ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 4. DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-4-86-94.
- [47] M. Kadziela, B. Jablonski, P. Perek & D. Makowski.Journal of Fusion Energy volume 39, pages261–269 (2020) DOI: 10.1007/s10894-020-00264-3.
- [48] F. M. Laggner et.al., Rev Sci Instrum 90, 043501 (2019). DOI: 10.1063/1.5088248.
- [49] Roman Rozenblat et.al., (2019), Fusion Science and Technology, 75:8, 835-840, DOI: 10.1080/15361055.2019.1658037.

- [50] Jong-ha Lee et.al., Fusion Engineering and Design. Volume 190, May 2023, 113532, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2023.113532.
- [51] K. C. Hammond, F. M. Laggner, A. Diallo, S. Doskoczynski, C. Freeman, H. Funaba, D. A. Gates, R. Rozenblat, G. Tchilinguirian, Z. Xing, I. Yamada, R. Yasuhara, G. Zimmer and E. Kolemen. Rev Sci Instrum 92, 063523 (2021), DOI:10.1063/5.0041507.
- [52] Ichihiro YAMADA et.al.. Plasma and Fusion Research, 2022 Volume 17 Pages 2402061, DOI:10.1585/pfr.17.2402061.
- [53] S. Shibaev, G. Naylor, R. Scannell, G. J. McArdle and M. J. Walsh. 2010 17th IEEE-NPSS Real Time Conference, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/RTC.2010.5750394..
- [54] S. Shibaev, G. Naylor, R. Scannell, G. McArdle, T. O’Gorman, M.J. Walsh. Fusion Engineering and Design, Volume 85, Issue 5, August 2010, Pages 683-686, DOI:10.1016/j.fusengdes.2010.03.035.
- [55] H. Arnichand, Y. Andrebe, P. Blanchard, S. Antonioni, S. Couturier, J. Decker, B.P. Duval, F. Felici, C. Galperti, P.-F. Isoz, P. Lavanchy, X. Llobet, B. Marlétaz, P. Marmillod and J. Masur. 2019 JINST 14 C09013. DOI: 10.1088/1748-0221/14/09/C09013, JINST, vol. 14, 2019.
- [56] T. N. Carlstrom; G. L. Campbell; J. C. DeBoo; R. Evanko; J. Evans; C. M. Greenfield; J. Haskovec; C. L. Hsieh; E. McKee; R. T. Snider; R. Stockdale; P. K. Trost; M. P. Thomas Rev. Sci. Instrum. 63, 4901 (1992); doi: 10.1063/1.1143545.
- [57] D. M. Ponce-Marquez; B. D. Bray; T. M. Deterly; C. Liu; D. Eldon. Review of Scientific Instruments 81, 10D525 (2010); doi: 10.1063/1.3495759.
- [58] M. Margo, B. Penaflor, H. Shen, J. Ferron, D. Piglowski, P. Nguyen, J. Rauch, M. Clement, A. Battey, C. Rea Fusion Engineering and Design, Volume 150, January 2020, 111368, 10.1016/j.fusengdes.2019.111368.
- [59] R. E. Stockdale; T. N. Carlstrom; C. L. Hsieh; C. C. Makariou Review of Scientific Instruments 66, 490 (1995); doi: 10.1063/1.1146326.
- [60] Е.Е. Ткаченко и др., "ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 ПО ДАННЫМ ДИАГНОСТИК ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ," ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, vol. 44, no. 3, 2021.
- [61] D. Keeling, R. Akers, M.F.M. de Bock, C. D. Challis, C. Michael, A. Patel, the MAST team, "38th EPS Conference on Plasma Physics," in Test of current diffusion modelling in MAST current ramp-up, 2011.
- [62] П.Б. Щёголев и др., "Комплекс нейтральной инжекции сферического токамака Глобус-М2," Физика Плазмы в тематическом выпуске, no. В этом выпуске.
- [63] S. C. Jardin, I. Krebs, N. Ferraro, "A new explanation of the sawtooth phenomena". Phys. Plasmas 27, 032509 (2020); doi: 10.1063/1.5140968.
- [64] Г.С. Курскиев и др., "Формирование внутренних транспортных барьеров в токамаке Глобус-М в режиме с ранним включением нейтрального пучка". Письма в ЖТФ, 2011, том 37, вып. 23.

- [65] V V Bulanin, G S Kurskiev, V V Solokha, A Yu Yashin and N S Zhiltsov, "The model of synchronization between internal reconnections and edge-localized modes". *Plasma Phys. Control. Fusion* 63 (2021) 122001, DOI 10.1088/1361-6587/ac36a4.
- [66] Н.В. Сахаров и др., "Диагностика и особенности больших срывов в сферическом токамаке Глобус-М2," *Физика плазмы в тематическом выпуске*, по. В этом выпуске, 2023.
- [67] T. Hayashi, N. Mizuguchi, T.H. Watanabe, Y. Todo, T. Sato and Complexity Simulation Group, "Non-linear simulations of internal reconnection events in spherical tokamaks." *Nuclear Fusion*, Vol. 40, 721, DOI 10.1088/0029-5515/40/3Y/337.
- [68] Е.А. Тюхменева и др., "Измерение мощности радиационных потерь и эффективного заряда плазмы на токамаке Глобус-М2". *Письма в ЖТФ*, 2021, том 47, вып. 2, DOI: 10.21883/PJTF.2021.02.50537.18471.
- [69] A.Yu. Yashin et.al., "FIRST OBSERVATIONS OF THE TRANSITION TO H-MODE ON THE GLOBUS-M2 TOKAMAK USING DOPPLER BACKSCATTERING". *FEC 2020*, DOI: 10.13140/RG.2.2.14491.39203.
- [70] A. P. et.al., "First Results of the Implementation of the Doppler Backscattering Diagnostic for the Investigation of the Transition to H-Mode in the Spherical Tokamak Globus-M2". *Sensors* 2023, 23, 830. doi: 10.3390/s23020830.
- [71] V.I. Vasiliev, Yu.A. Kostsov, K.M. Lobanov, L.P. Makarova, A.B. Mineev, V.K. Gusev, R.G. Levin, Yu.V. Petrov and N.V. Sakharov, "On-line plasma shape reconstruction algorithm in tokamaks and its verification in the Globus-M". *2006 Nucl. Fusion* 46 S625, DOI 10.1088/0029-5515/46/8/S08.
- [72] Г. С. Курскиев и др., "РЕЖИМ С ГОРЯЧИМИ ИОНАМИ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2". *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, 2023, том 49, № 4, с. 305–321.
- [73] Ю.В. Петров и др., "ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2". *Физика плазмы*, в тематическом выпуске.
- [74] Киселев Е.О. и др., "Расчёт равновесия со свободной границей в сферическом токамаке Глобус-М2 с помощью кода ruGSS". *Физика плазмы*, в тематическом выпуске.
- [75] Ткаченко Е.Е. и др., "Анализ экспериментов по нагреву плазмы на токамаке Глобус-М2 с помощью диамагнитных измерений." *Физика плазмы*, в тематическом выпуске.
- [76] ITER Physics Expert Groups on Confinement and Transport and Confinement Modelling and Database, ITER Physics Basis Editors, "ITER Physics Basis: Chapter 2: Plasma confinement and transport, *Nuclear Fusion*, 1999, Vol. 39, No. 12, DOI 10.1088/0029-5515/39/12/302".
- [77] G. R. J, "Energy confinement scaling in Tokamaks: some implications of recent experiments with Ohmic and strong auxiliary heating". *1984 Plasma Phys. Controlled Fusion* 26 87, DOI 10.1088/0741-3335/26/1A/308.
- [78] Жильцов Н.С. и др., "Сравнительный анализ энергобаланса плазмы токамака Глобус-М2 в режиме с омическим нагревом и в режиме с нейтральной инжекцией. 51 международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 18-22 марта 2024".