

На правах рукописи

Тюхменева Екатерина Алексеевна

Исследование эффективного заряда плазмы и радиационных потерь в сферическом токамаке Глобус-М2 в экспериментах с дополнительным нагревом пучками атомов

1.3.9 – Физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2025

Работа выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель
(консультант): Толстяков Сергей Юрьевич к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории
физики высокотемпературной плазмы
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Бурдаков Александр
Владимирович д.ф.-м.н., главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук

Алексеев Андрей
Геннадьевич к.ф.-м.н., начальник отдела ИТЭР НИЦ «Курчатовский
институт»
НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Защита состоится _____ в _____ на заседании диссертационного совета
ФТИ 34.01.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-
технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021,
Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, www.ioffe.ru.

Автореферат разослан _____

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба
высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ФТИ 34.01.03, к.ф.-м.н.

Курский Г.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка новых безопасных и экологически чистых источников энергии в настоящее время является одной из самых востребованных задач. Использование энергии управляемого термоядерной позволит решить проблему истощения углеводородных ресурсов, а также улучшить экологическую обстановку, связанную с выбросами углекислого газа от сжигания ископаемого топлива. В основе метода получения энергии за счет ядерного синтеза лежат реакции слияния легких ядер, например, дейтерия и трития. Для осуществления реакции синтеза широко используется магнитное удержание плазмы в установках токамак и стелларатор.

В настоящее время актуален вопрос исследования удержания плазмы в сферических токамаках с увеличенным магнитным полем. Сферические токамаки уже давно используются для исследований в области высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Данный тип установок обладает ключевыми возможностями токамаков с большим аспектным соотношением, но имеет достаточно компактные размеры и, соответственно, доступнее в производстве. Сферические токамаки могут быть эффективно использованы при создании гибридного реактора в качестве термоядерного источника нейтронов (ТИН), поскольку по сравнению с классическими токамаками имеют более высокую плотность потока нейтронов [1]. Исследования на сферических токамаках продемонстрировали возможность работы с высокими значениями «бета» [2] при сильной вытянутости плазмы и гораздо более сильную зависимость времени удержания от тороидального магнитного поля и столкновительности [3], чем на классических токамаках. Эта особенность может быть связана с различиями в процессах переноса частиц и тепла, которые должны быть изучены для дальнейшего развития применения сферических токамаков. В настоящее время прогресс в сфере сверхпроводников делает исследования плазмы в

сферических токамаках еще более перспективными, так как конструкция с использованием сверхпроводников позволит значительно повысить тороидальное магнитное поле установки без существенного увеличения ее размеров.

Установка Глобус-М2 является одним из действующих в настоящее время сферических токамаков, наряду с NSTX-U [4], MAST-U [5], [6], ST-40 [7]. На токамаке Глобус-М2 в 2020 г. было достигнуто значение тороидального поля 0,9 Тл и тока по плазме 0,45 МА [8] и в дальнейших планах увеличение поля и тока до проектных параметров 1 Тл и 0,5 МА. Эксперименты на установке Глобус-М2 позволили впервые оценить зависимость времени удержания энергии от тороидального магнитного поля в диапазоне 0,4 – 0,8 Тл [9].

Для дальнейшего развития концепции сферических токамаков важно исследовать параметры, влияющие на время удержания энергии. Одним из таких параметров является содержание примесей.

Плазма токамаков, состоящая из ионов, электронов и возбужденных атомов, является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне от миллиметровых волн до гамма-излучения. На основе измерений интенсивности, спектрального состава и распределения излучения можно получать огромное количество информации о поведении и параметрах плазмы.

Цели работы

- 1) Исследование влияния параметров разряда в сферическом токамаке Глобус-М2 на эффективный заряд плазмы, а также на спектр и интенсивность излучения в диапазоне 0,1 – 1200 нм.
- 2) Измерение мощности радиационных потерь в токамаке Глобус-М2.

В соответствии с поставленными целями в работе решались следующие задачи:

- 1) Определение параметров диагностического комплекса в соответствии с исследуемыми параметрами плазмы и процессами в токамаке Глобус-М2.
- 2) Разработка и внедрение диагностических систем на токамаке Глобус-М2.
- 3) Проведение измерений эффективного заряда плазмы для широкого диапазона параметров плазмы.
- 4) Проведение измерений мощности радиационных потерь в условиях увеличенного тороидального магнитного поля до 0,75 Тл и тока по плазме до 0,35 МА.
- 5) Проведение многохордовых измерений интенсивности излучения в широком спектральном диапазоне.

Научная новизна работы

Созданы и апробированы диагностики эффективного заряда плазмы и интенсивности спектральных линий на токамаке Глобус-М2, объединенных с многохордовой системой SPD (Silicon Precision Detector)-фотодиодов в комплекс спектроскопических диагностик для регистрации излучения в спектральном диапазоне 0,1 – 1200 нм с временным разрешением до 1 МГц.

Впервые на сферическом токамаке проведено исследование влияния боронизации, режима удержания и нагрева пучками нейтральных частиц на величину эффективного заряда плазмы в широком диапазоне значений тороидального магнитного поля до 0,95 Тл и тока по плазме до 0,45 МА.

Впервые на сферическом токамаке проведены измерения мощности радиационных потерь из основного объема плазмы при тороидальном магнитном поле до 0,75 Тл и токе по плазме до 0,35 МА.

Обнаружена возможность детектирования МГД-колебаний плазмы токамака Глобус-М2 с помощью массивов SPD-фотодиодов.

Практическая значимость результатов работы:

- 1) Использование результатов измерений для оценки влияния мощности радиационных потерь энергетический баланс электронной компоненты плазмы сферического токамака Глобус-М2 [А1] и [А2].
- 2) Применение комплекса спектроскопических диагностик для мониторинга поступления примеси в основной объем плазмы при напуске азота в диверторную область для снижения тепловой нагрузки на пластины дивертора [А3].
- 3) Использование результатов измерений эффективного заряда плазмы в широком диапазоне концентрации для моделирования энергобаланса плазмы и определения коэффициентов переноса (электронная и ионная температуропроводность) в режимах с дополнительным нагревом нейтральным пучком (в том числе и в режиме с горячими ионами) в работах [А1], [10], [А4].
- 4) Результаты данной работы, направленной на развитие спектроскопических методов для диагностики высокотемпературной плазмы, могут быть использованы при реализации Федерального проекта №3 «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» для планирования экспериментов на действующих установках, таких как Глобус-М2, Т-15МД, а также при проектировании установок следующего поколения – ТРТ, Глобус-3 и др.

Личное участие автора

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии.

Лично автором были сформулированы основные требования к геометрии, конструкции, компонентам разработанных диагностик и системе

сбора данных, разработана принципиальная схема диагностических систем. Автором произведена разработка и расчет оптических схем и геометрий наблюдения диагностики эффективного заряда, спектроскопии линий и проектируемой двухракурсной системы измерения интенсивности излучения в трех спектральных диапазонах. Автор выполнил расчеты и оценки для определения необходимых параметров разработанных диагностических систем: коэффициентов усиления и временного разрешения аппаратуры, чувствительности приемников и спектральных интервалов регистрации линий излучения. Также автором разработан алгоритм расчета эффективного заряда плазмы и выполнено моделирование данного параметра с помощью транспортного кода ASTRA. Автор занимался подготовкой и проведением измерений с помощью комплекса спектроскопических диагностик, обработкой экспериментальных результатов.

Автор принимал участие в экспериментах по исследованию снижения тепловой нагрузки на пластины дивертора при напуске азота. При непосредственном участии автора были проведены измерения мощности радиационных и эффективного заряда плазмы на токамаке Глобус-М2.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Создание комплекса спектроскопических диагностик для измерений эффективного заряда, спектрального состава и радиационных потерь из плазмы сферического токамака Глобус-М2.
- 2) Определение эффективного заряда плазмы и исследование влияния параметров разряда на его величину на сферическом токамаке Глобус-М2. При средней удельной мощности тепловой нагрузки на стенку до $0,4 \text{ МВт/м}^2$ и пиковой нагрузке на диверторные пластины до 3 МВт/м^2 величина эффективного заряда находится в пределах $1,1 - 4,0$. Обнаружено, что эффективный заряд уменьшается с ростом плотности электронов, а также в результате боронизации.

- 3) Определение мощности радиационных потерь в режиме омического нагрева и с дополнительным нагревом пучками атомов с энергией до 45 кэВ и мощностью до 1 МВт. Обнаружено, что доля радиационных потерь из объема плазмы достигает 50 % от поглощенной мощности.
- 4) Результаты исследования эффективного заряда плазмы в экспериментах с напуском азота в диверторную область для снижения тепловой нагрузки на диверторные пластины. Продемонстрировано, что величина эффективного заряда плазмы в основном объеме возрастает не более чем на 30 % при снижении нагрузки до 10 раз.

Апробация работы

Достоверность полученных результатов обеспечена хорошим соответствием экспериментальных результатов, полученных в результате многократного повторения измерений. Полученные данные не противоречат результатам экспериментов на других сферических токамаках. Описываемые в работе результаты были опубликованы в реферируемых журналах, а также обсуждались на российских и международных конференциях и на семинарах и совещаниях лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Результаты настоящей работы представлены в 9 статьях в реферируемых журналах и в 8 докладах на российских и международных конференциях:

- 1) XLVI Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 18 – 22 марта 2019 г., Москва.
- 2) XLVII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 16 – 20 февраля 2020 г., Москва.
- 3) International Polytech-SOKENDAI Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion 13-24 JULY 2020, Санкт-Петербург.
- 4) PhysicA.SPb/2020 19-23 октября 2020 г., Санкт-Петербург.

- 5) XLVIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 15 – 19 февраля 2021 г., Москва.
- 6) 47th EPS Conference on Plasma Physics, 21-25 июня 2021 г.
- 7) XIX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» 27 сентября – 1 октября 2021 г., г. Сочи.
- 8) XX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» 18 – 22 сентября 2023 г., г. Сочи.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения, содержит 146 страниц, 4 таблицы и 50 рисунков. Список литературы включает 232 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследования и приводится краткое содержание работы.

В первой главе представлен обзор литературы, достижений на сферических токамаках и спектроскопических методов диагностик высокотемпературной плазмы. В разделе 1.1 описаны преимущества сферических токамаков над классическими установками, приведены параметры современных установок, таких как MAST-U [5], NSTX-U [4] и ST-40 [7], и результаты их работы. Также в параграфе рассматривается роль излучения в энергобалансе плазмы токамаков и его применение в диагностических целях.

В разделе 1.2 рассматриваются спектральные диапазоны, в которых излучает плазма в установках с магнитным удержанием, виды электромагнитного излучения и лежащие в их основе физические процессы. Линейчатое излучение вызывается переходом электронов между энергетическими уровнями в атомах и не полностью ионизированных ионах. Излучение с непрерывным спектром возникает в результате ускорения электрона в поле заряженной частицы, если электрон в результате

взаимодействия оказывается захвачен ионом, то излучение является рекомбинационным, если электрон остается свободным после взаимодействия – тормозным. Циклотронное излучение возникает в результате вращения заряженных частиц в магнитном поле токамака по ларморовским орбитам. Вклады линейчатого, циклотронного, тормозного и рекомбинационного излучения определяются температурой и плотностью плазмы. Основной вклад в излучаемую плазмой мощность вносят линейчатое излучение атомов углерода и металлических примесей, а также тормозное излучение.

Раздел 1.3 посвящен обзору спектроскопических методов диагностики плазмы в токамаках. В данной работе рассматриваются только так называемые пассивные диагностики. Обзор затрагивает диагностические методы, основанные как на измерении интенсивности излучения, так и на анализе его спектра. По интенсивности излучения во всем диапазоне могут определяться радиационные потери, а измерения в определенных спектральных интервалах могут дать информацию об эффективном заряде плазмы, концентрации в плазме отдельных элементов и их зарядовых состояний, температуре электронов, МГД активности. По спектру излучения может быть определен примесный состав, уширение спектральных линий.

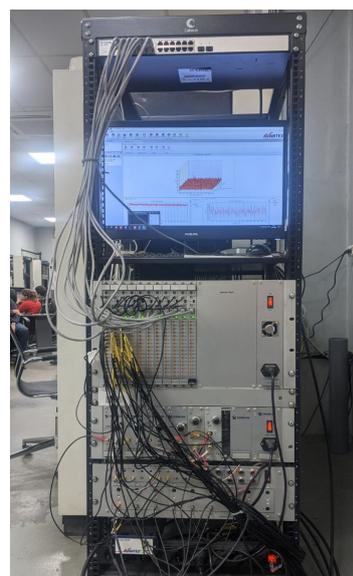
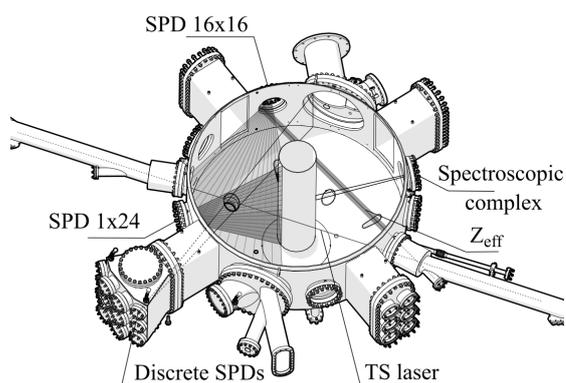
В разделе приводится обзор существующих в настоящее время приемников для регистрации излучения в различных спектральных диапазонах: фотодиоды, ФЭУ, лавинные фотодиоды, болометры, AXUV (Absolute eXtreme UltraViolet)-детекторы и SPD-фотодиоды. Описаны техники измерения эффективного заряда плазмы на различных установках: по напряжению на обходе, по интенсивности тормозного излучения, по интенсивности свечения линий при перезарядке примесных ионов на атомах пучка при нейтральной инжекции. Рассматриваются спектры излучения на токамаках в мягком рентгеновском, УФ, видимом и ИК диапазонах, наблюдаемые линии. Рассмотрены техники измерения радиационных потерь с помощью болометров, AXUV-детекторов и SPD-фотодиодов. Приведены примеры исследования МГД активности и измерения температуры электронов

в плазме по интенсивности тормозного излучения в мягком рентгеновском диапазоне.

Описаны примеры многохордовых диагностик излучения из плазмы, позволяющих определять пространственное распределение мощности мягкого рентгеновского излучения, радиационных потерь, эффективного заряда плазмы, температуры электронов. Рассматриваются математические методы решения задач томографии плазмы в токамаках [11], [12].

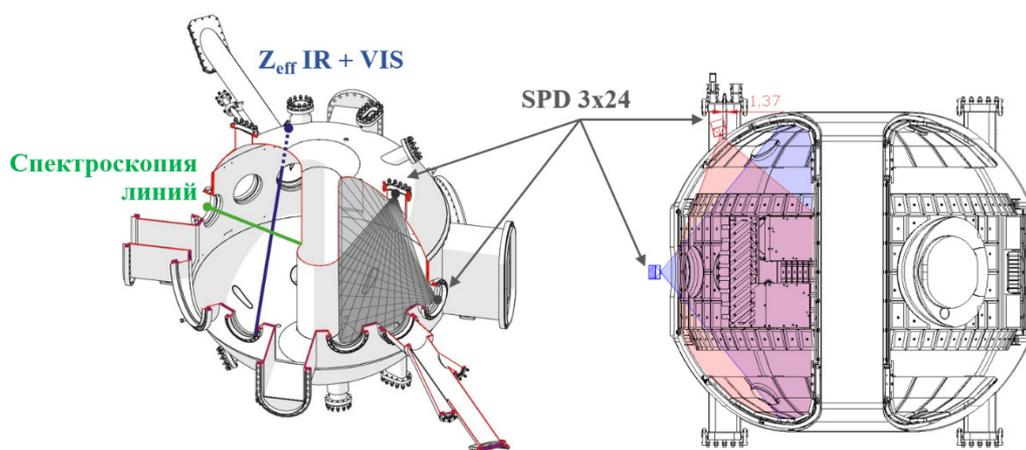
Глава 2 посвящена разработке спектроскопических диагностических методов на сферическом токамаке Глобус-М2. В разделе 2.1 описаны параметры сферического токамака Глобус-М2, в разделе 2.2 приведен краткий обзор набора его диагностик [А8].

В параграфе 2.3.1 описаны основные параметры и расположение на токамаке (рисунок 1) комплекса спектроскопических диагностик, состоящего из системы сбора данных, диагностики эффективного заряда плазмы, спектроскопии линий и многохордовой диагностики SPD-фотодиодов.



а)

в)



б)

Рис. 1. Конфигурация комплекса спектроскопических диагностик на токамаке Глобус-М2:

- а) – до модернизации [13] при измерении мощности радиационных потерь,
- б) – проектная геометрия наблюдения многохордовой системы SPD-фотодиодов после модернизации, в) – фото диагностического комплекса

Описывается система сбора данных, использующая 176 отдельных каналов регистрации с частотой оцифровки до 1 МГц, разработанная для диагностического комплекса.

Параграф 2.3.2 содержит информацию о параметрах, разработке и апробации диагностики эффективного заряда плазмы Z_{eff} . Описан алгоритм расчета среднехордового $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ на основе измерений интенсивности

тормозного излучения в видимом и ИК диапазонах и электронных профилей температуры T_e и концентрации n_e .

С помощью диагностики измеряется среднечордовая мощность тормозного излучения P_{br} , которая определяется эффективным зарядом, а также температурой и концентрацией электронов. Эффективный заряд определяется по формуле (1):

$$\langle Z_{eff} \rangle = \frac{P_{br}}{1,5 \cdot 10^{-23} \cdot \langle g_{ff} \rangle \int_V \int_{\Delta\lambda} \Omega \frac{n_e^2(R)}{\lambda^2 \sqrt{T_e(R)}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda T_e(R)}\right) dV d\lambda}, \quad (1)$$

где $n_e(R)$ и $T_e(R)$ – пространственные распределения плотности и температуры электронов в зависимости от большого радиуса R , P_{br} – интегральная мощность тормозного излучения, $\langle g_{ff} \rangle$ – усредненный по T_e Гаунт-фактор [14]. Интегрирование производится по длине волны λ на спектральном интервале $\Delta\lambda$ и по объему V , в котором регистрируется тормозное излучение, Ω - телесный угол сбора света. Гаунт-фактор $\langle g_{ff} \rangle$ для температуры электронов порядка сотен эВ – 1 кэВ оценен согласно [15] и его значение составило 3 для ИК диапазона и 2,75 для видимого диапазона измерения P_{br} .

Рассматривается выбор спектральных интервалов для измерения мощности тормозного излучения (рисунок 2а), геометрии (рисунок 2б), схемы регистрации излучения, описана процедура абсолютной калибровки каналов диагностики.

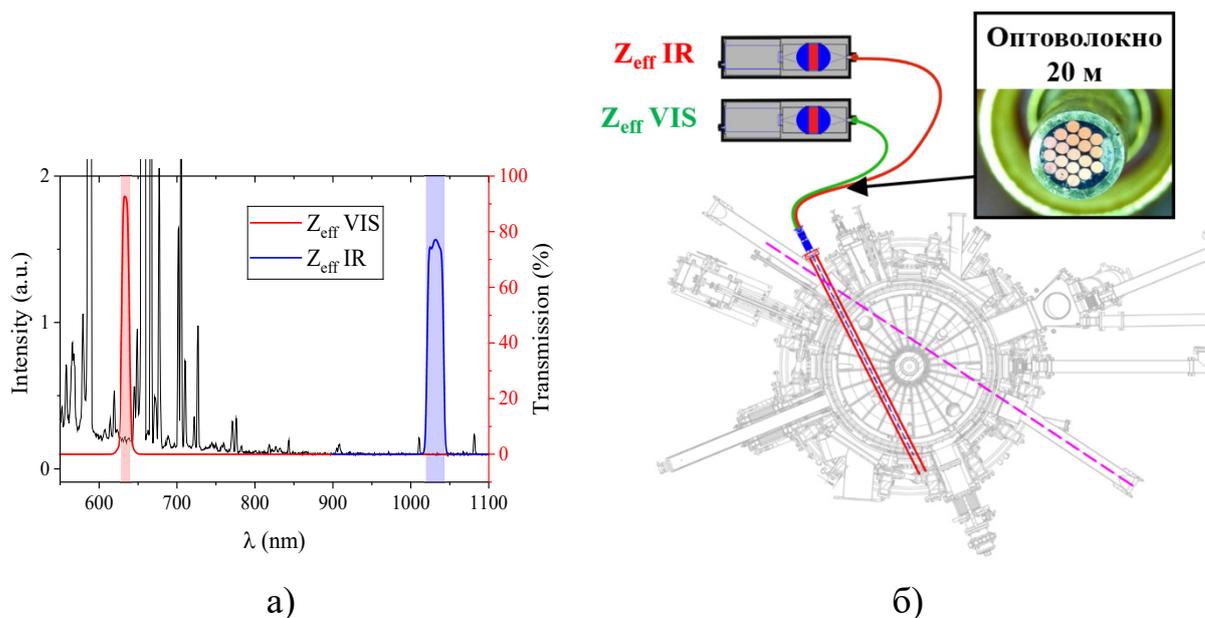
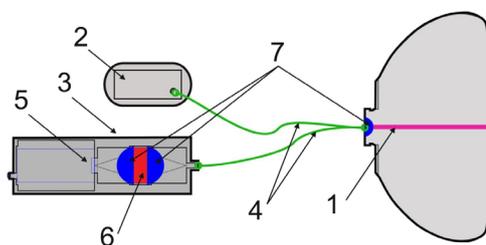


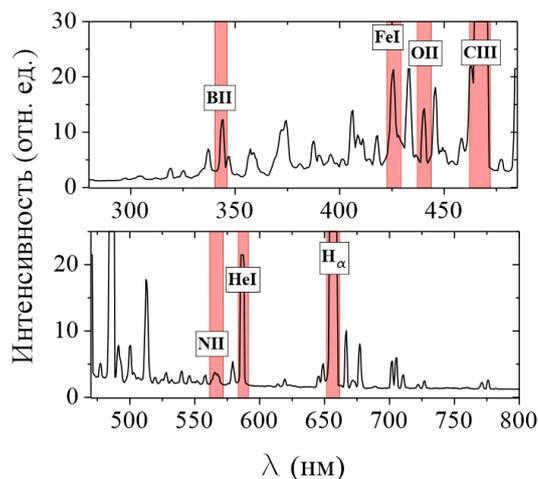
Рис. 2. Диагностика эффективного заряда плазмы Z_{eff} :

а) – спектральные интервалы регистрации тормозного излучения (вертикальные полосы), б) – схема размещения диагностики на токамаке Глобус-М2

Параграф 2.3.3 содержит информацию по спектроскопии линий примесей на токамаке Глобус-М2. Описана система на основе обзорного спектрометра и набора отдельных монохроматоров, регистрирующих излучение на линиях основных примесей, присутствующих в плазме. Схема диагностики изображена на рисунке 3. Приведена схема диагностики, параметры приемников и оптических компонентов, описана техника идентификации линий на обзорных спектрах.



а)



б)

Рис.3. Спектроскопия примесных линий на токамаке Глобус-М2:

- а) – схема диагностики: 1 – линия наблюдения обзорного спектрометра и монохроматоров, 2 – обзорный спектрометр, 3 – фильтровый монохроматор, 4 – оптическое волокно 20 м, 5 – приемник, 6 – интерференционный фильтр, 7 – линзы
- б) – обзорный спектр излучения в УФ – видимом – ближнем ИК диапазоне и спектральные интервалы регистрации отдельных линий (коричневые вертикальные полосы)

В параграфе 2.3.4 описывается многохордовая система SPD-фотодиодов. Приведены характеристики фотодиодов и геометрия одноракурсной системы на основе матрицы SPD-фотодиодов 16x16 пикселей (рисунок 1а), которая использовалась для измерения мощности радиационных потерь [13]. Также в параграфе описывается проект и процесс осуществления модернизации многохордовой системы, которая будет включать два массива SPD-фотодиодов 3x24 пикселя для проведения измерений с двух ракурсов (рисунок 1б) в трех спектральных диапазонах – широком диапазоне 1 эВ – 15 кэВ и двух в мягком рентгеновском 1,5 – 15 кэВ и 2 – 15 кэВ. Параметры усилителей для каждого канала фотодиодных массивов подобраны на основе оценки излученной мощности для параметров плазмы в токамаке Глобус-М2.

В параграфе 2.3.5 приведены параметры системы сбора данных, разработанной и изготовленной для комплекса спектроскопических диагностик, которая позволяет производить оцифровку сигналов с частотой до 1 МГц всех диагностик комплекса.

В параграфе 2.3.6 описывается применяемый метод восстановления локальных значений интенсивности излучения в полоидальном сечении токамака Глобус-М2 по интегральным измерениям с использованием SPD-фотодиодов [13].

Глава 3 содержит результаты измерения, полученные с помощью комплекса спектроскопических диагностик, среднего эффективного заряда плазмы $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ и интенсивности излучения на линиях основных примесей на установке Глобус-М и Глобус-М2 в разрядах с тороидальным магнитным полем 0,4 – 0,95 Тл, током по плазме 0,18 – 0,43 МА, температурой электронов до 1,5 кэВ и температурой ионов до 4 кэВ [10], с омическим нагревом и дополнительным нагревом пучками нейтральных частиц суммарной мощностью до 1,85 МВт [16]. Измерения радиационных потерь проведены в экспериментах на установке Глобус-М2 при тороидальном магнитном поле 0,5 – 0,75 Тл и токе по плазме 0,25 – 0,35 МА с дополнительным нагревом пучком нейтральных частиц мощностью до 0,85 МВт. В экспериментах по исследованию снижения тепловой нагрузки на стенку с напуском азота в диверторную область проведены измерения $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ и интенсивности излучения из плазмы в рентгеновском диапазоне спектра [А3].

Раздел 3.1 содержит результаты измерения эффективного заряда плазмы на установке Глобус-М2 в разрядах с тороидальным магнитным полем 0,5 – 0,9 Тл, током по плазме до 0,43 МА, концентрацией электронов $1 - 10 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, температурой электронов до 1,5 кэВ, с омическим нагревом и нагревом пучками атомов высокой энергии. Мощность радиационных потерь измерена в экспериментах с тороидальным магнитным полем 0,5 – 0,75 Тл, током по плазме 0,18 – 0,35 МА, с омическим нагревом и нагревом пучками атомов высокой энергии. Все приведенные в работе результаты измерения

радиационных потерь на токамаке Глобус-М2 получены с помощью первой версии системы SPD-фотодиодов на основе матричного детектора 16x16 SPD-фотодиодов [13].

В параграфе 3.1.1 результаты определения среднего по объему эффективного заряда $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ с помощью диагностики, описанной в главе 2, спектральном интервале 1019 – 1040 нм, сравниваются с результатами моделирования транспортным кодом ASTRA [17]. Параметр $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ подбирался таким образом, чтобы измеренное U_{loopEXP} совпадало с $U_{\text{loopASTRA}}$, определяемое из неоклассической проводимости плазмы, рассчитываемой модулем NCLASS.

На рисунке 4а продемонстрирована эволюция значений $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$, полученных из измерений мощности тормозного излучения и в результате моделирования, в разряде #37069 (Глобус-М) в дейтериевой плазме с тороидальным магнитным полем 0,4 Тл и током по плазме 0,18 МА с дополнительным нагревом пучком нейтрального дейтерия мощностью 650 кВт при средней концентрации электронов $\langle n_e \rangle = 2,7 - 3,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

На рисунке 4б приведены результаты измерения и расчета $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ для разрядов из диапазона #38000 – #38540 (Глобус-М2) в дейтериевой плазме с тороидальным магнитным полем $B_T = 0,7 - 0,75 \text{ Тл}$ и током по плазме $I_p = 0,2 - 0,33 \text{ МА}$ с дополнительным нагревом пучком нейтрального дейтерия мощностью $\sim 850-900 \text{ кВт}$ при электронной концентрации $\langle n_e \rangle = 1,8 - 5,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, в моменты времени на 15-20 мс с начала инъекции.

Результаты моделирования (рисунок 4) отличались от измеренных значений $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ на 10 – 30 %, что для большей части разрядов оказалось в пределах оценок погрешности $d\langle Z_{\text{eff}} \rangle$, метод расчета которой описан в параграф 2.3.2.

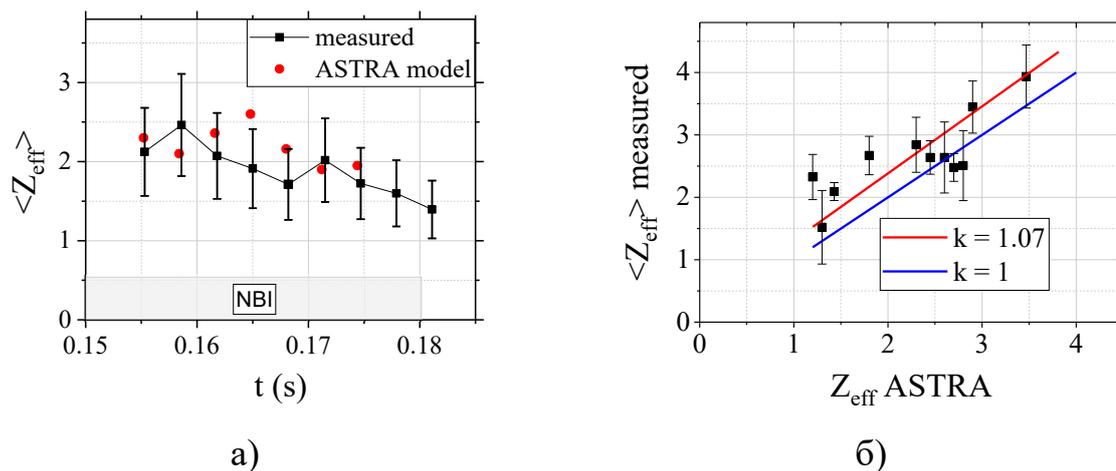


Рис. 4. Сравнение результатов измерения $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ с модельным расчетом транспортным кодом ASTRA [A5], [18]:

- а) – результаты определения $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ по интенсивности тормозного излучения и расчета с помощью кода ASTRA в разряде #37069 (Глобус-М)
- б) – отношение измеренного значения $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ к значению $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$, полученного моделированием в нескольких разрядах с различной концентрацией электронов n_e

В параграфе 3.1.2 приводится сравнение результатов измерений $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ в двух спектральных интервалах 1019 – 1040 нм и 630 – 640 нм и рассматриваются причины искажения результатов.

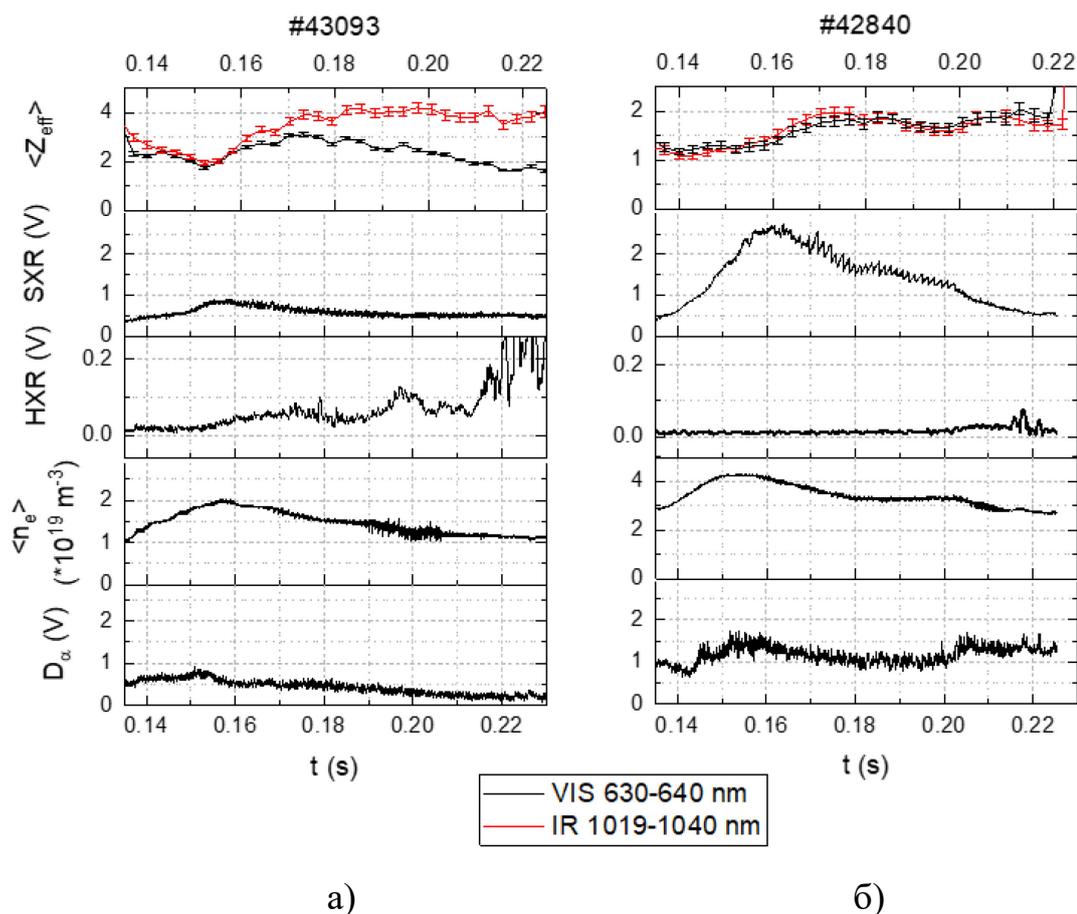


Рис. 5. Сравнение результатов определения Z_{eff} по измерениям в видимом и ИК диапазоне:

а) – в разряде #43093 с низкой концентрацией электронов n_e и интенсивным жестким рентгеновским излучением HXR, б) – в разряде #42840 высокой концентрацией n_e

Основная причина завышения значения $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ при низких концентрациях электронов связана с вкладом в сигнал излучения нагретой стенки (рисунок 5а).

Для более высоких значений концентрации электронов $\langle n_e \rangle$ и в отсутствие интенсивных краевых неустойчивостей уровень $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ может быть достаточно точно измерен и в спектральном интервале 1019 – 1040 нм. Значения $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ в разряде #42840 (рисунок 5б) с плотностью до $4,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для обоих спектральных интервалов различаются менее, чем на величину погрешности $d\langle Z_{\text{eff}} \rangle$, метод расчета которой описан в параграфе 2.3.2.

В параграфе 3.1.3 рассматривается влияние боронизации вакуумной камеры токамака Глобус-М2 на содержание примесей в плазме. На рисунке 6

продемонстрированы результаты измерения содержания примесей в плазме в нескольких однотипных разрядах с тороидальным магнитным полем 0,7 Тл и током по плазме 0,3 МА: в разрядах, произведенных после боронизации камеры, эффективный заряд на 25 – 35 % меньше, чем до боронизации.

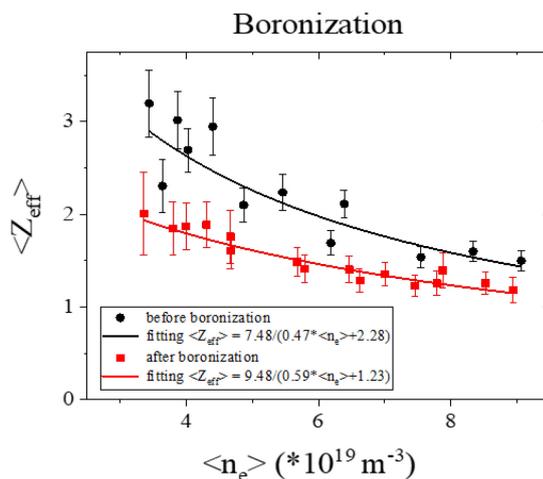


Рис. 6. Зависимость величины эффективного заряда от концентрации электронов до и после боронизации камеры

Результаты исследования радиационных потерь и эффективного заряда плазмы в режимах с дополнительным нагревом пучками нейтральных частиц приведены в параграфе 3.1.4. Доля радиационных потерь от вкладываемой мощности во время инъекции нейтральных частиц не превышала 50 % в экспериментах на установке Глобус-М2.

Инжекция пучков нейтральных частиц приводит к увеличению плотности и стимулирует переход плазмы в режим улучшенного удержания (Н-режим) [19]. Улучшение удержания энергии и частиц происходит для ионов рабочего газа и сопровождается накоплением примесей, которое приводит к росту эффективного заряда плазмы, что отражено в параграфе 3.1.5.

В параграфе 3.1.6 рассмотрено влияние краевых неустойчивостей на содержание примесей в плазме в разряде #44172 (рисунок 7), свидетельствующий о том, что значительный рост в 1,3 раза содержания

примеси в плазме происходит вместе с развитием сильных краевых неустойчивостей, синхронизированных с пилообразными колебаниями. При десинхронизированных краевых неустойчивостях, регистрируемых по сигналу на линии D_α до момента $t = 0,175$ с, наблюдается низкое распыление покрытия стенки камеры токамака и слабое поступление примеси в основной объем плазмы, а рост среднего эффективного заряда плазмы соответствует случаю с накоплением примеси в режиме улучшенного удержания без развития краевых неустойчивостей.

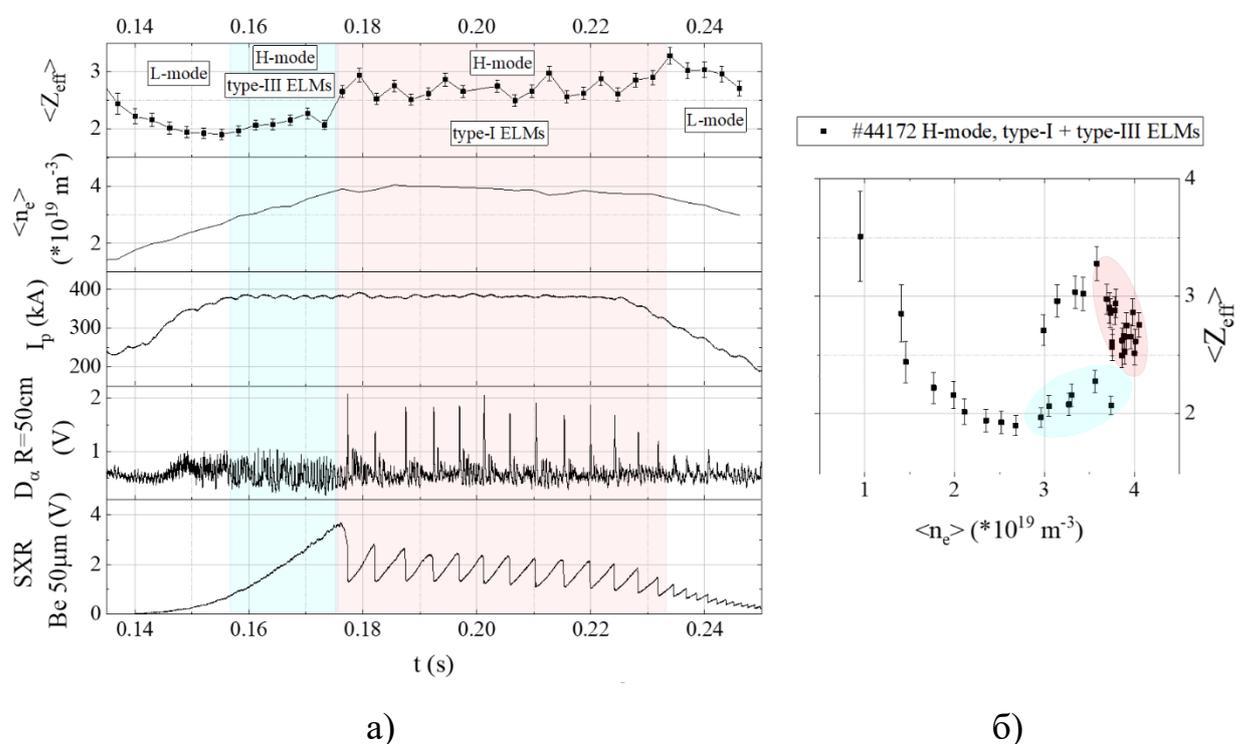


Рис. 7. Влияние краевых неустойчивостей на содержание примесей в плазме в разряде #44172:

- а) – эволюция $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$, средней концентрации электронов $\langle n_e \rangle$, тока по плазме I_p , интенсивности излучения на линии D_α на периферии плазменного шнура и интенсивности SXR мягкого рентгеновского излучения из центральной области плазмы;
- б) – зависимость $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ от концентрации электронов

Параграф 3.1.7 содержит результаты измерения мощности и доли радиационных потерь в условиях увеличенного поля до 0,75 Тл и тока до 0,35 МА. В измерениях, проведенных при помощи многохордовой системы

SPD-фотодиодов 16x16 пикселей, зарегистрировано падение абсолютной мощности и доли радиационных потерь из основного объема плазмы с ростом тороидального магнитного поля и тока по плазме (рисунок 8).

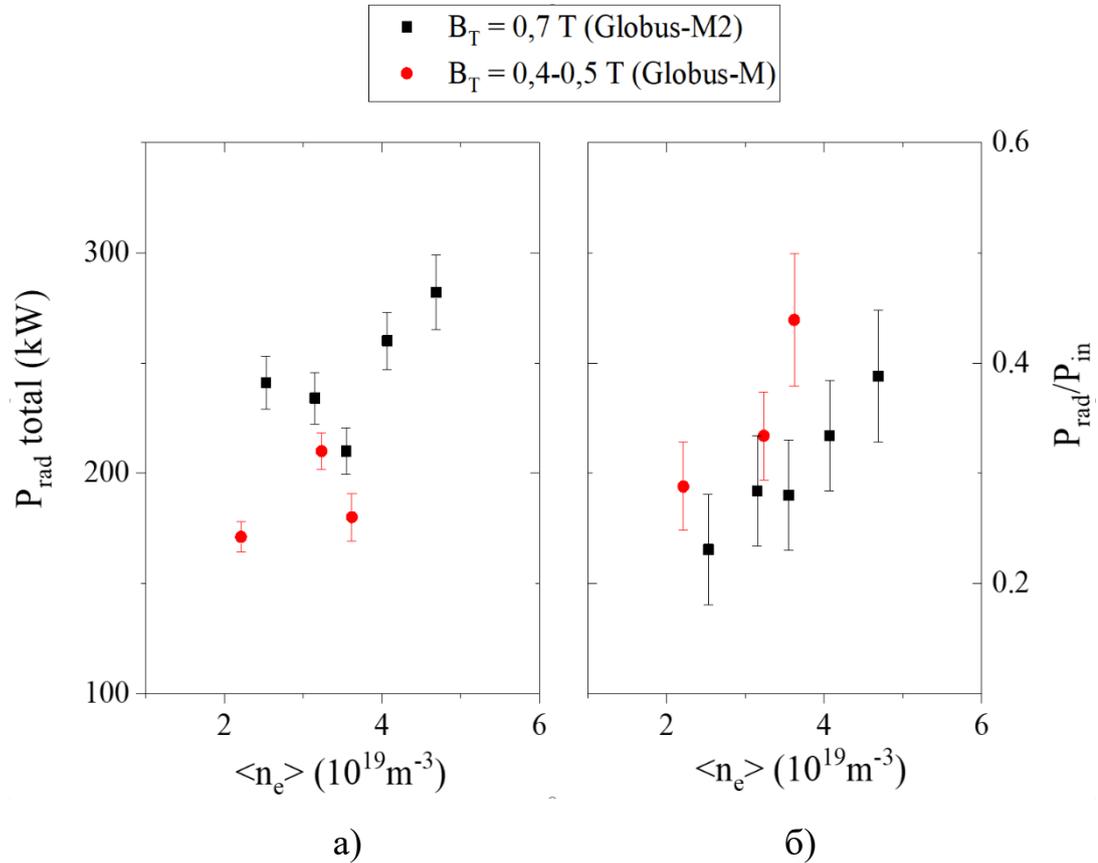


Рис.8. Зависимость радиационных потерь от электронной плотности $\langle n_e \rangle$ при $B_T = 0,4-0,5 \text{ Тл}$ ($I_p = 0,18 - 0,24 \text{ МА}$) и $B_T = 0,7 \text{ Тл}$ ($I_p = 0,25 - 0,33 \text{ МА}$) [Аб], [18]:
а) – абсолютная величина потерь, б) – доля радиационных потерь относительно поглощаемой мощности нагрева

В параграфе 3.1.8. приводятся результаты измерения профилей радиационных потерь для диверторной и лимитерной магнитной конфигурации на токамаке Глобус-М2.

В разделе 3.2 приведены результаты экспериментов с напуском азота в диверторную область для исследования снижения тепловой нагрузки на диверторные пластины при переизлучении энергии на атомах напускаемой примеси [20]. В данном разделе рассмотрено применение диагностики Z_{eff} ,

спектроскопии линий и многохордовой диагностики на основе SPD-фотодиодов для отслеживания влияния напускаемой в дивертор примеси на основной объем плазмы – обнаружено увеличение эффективного заряда плазмы до 30% (рисунок 9).

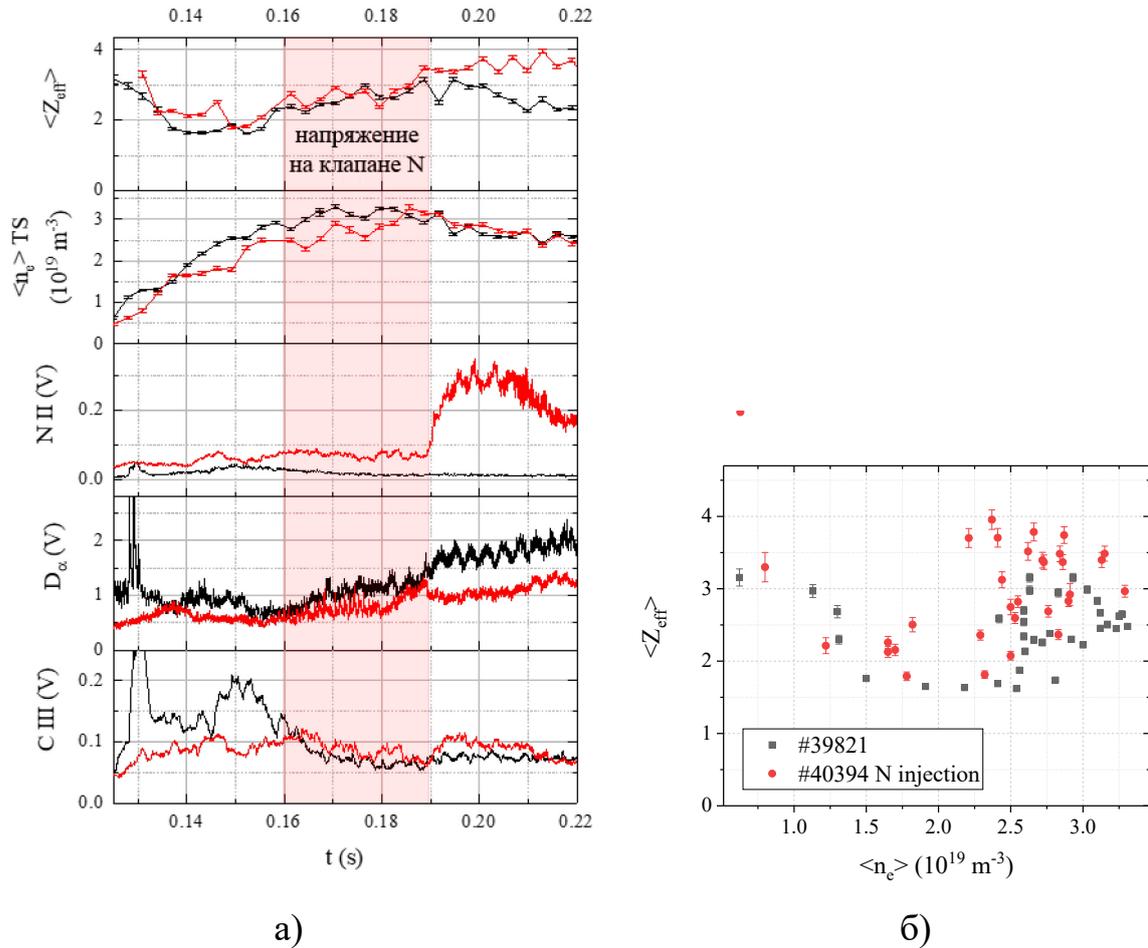


Рис. 9. Влияния напускаемого в дивертор азота на основной объем плазмы:
 а) – временная эволюция $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$, $\langle n_e \rangle$ и излучения на линиях С III, D α и N II,
 б) – зависимость $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ от $\langle n_e \rangle$ в разрядах без напуска азота (#39821) и с напуском азота (#40394) [21]

Раздел 3.3 посвящен описанию результатов применения метода локализации МГД активности с помощью двух многохордовых систем фотодиодов: SPD 16x16 [13] и SPD 1x24, подробное описание которых приведено в главе 2. Системы на основе SPD-фотодиодов имеют достаточное

временное разрешение, чтобы исследовать МГД-колебания с частотами до 1 МГц.

На рисунках 10 и 11 приводятся результаты локализации МГД-колебаний, полученные с использованием фотодиодной матрицы 16x16 [13] и линейного массива 1x24 [22], полученные в разрядах #38360 и #43248 соответственно.

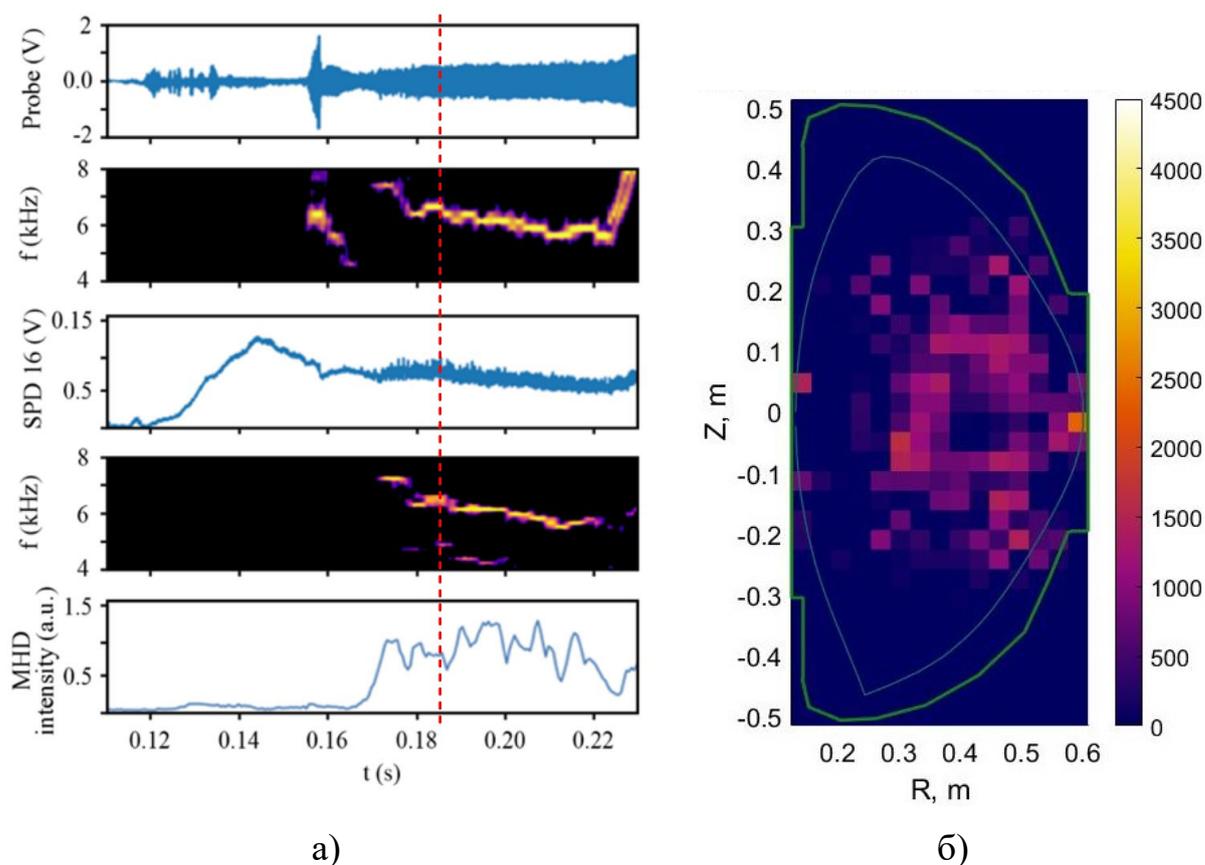


Рис. 10. Результаты регистрации МГД-колебаний матрицей SPD-фотодиодов 16x16 [13] в разряде #38360:

а) – сигналы магнитного зонда и одного из SPD-фотодиодов матрицы, их спектрограммы и интенсивность колебаний на частоте 5,5 – 7,5 кГц, регистрируемых SPD-фотодиодом матрицы, б) – результат восстановления интенсивности колебаний в плазме на частоте около 6,5 кГц в момент времени $t = 0,185$ с

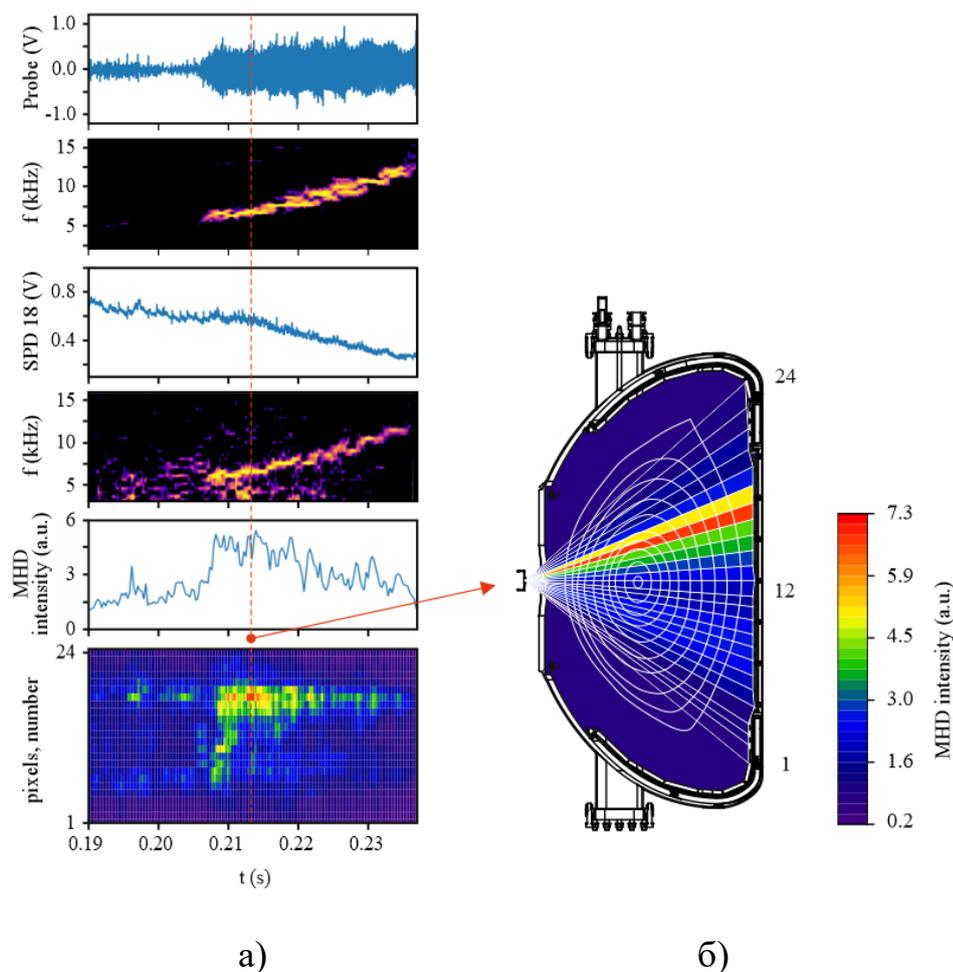


Рис. 11. Результаты регистрации МГД-колебаний с помощью массива SPD-фотодиодов 1x24 [22]:

а) – сигналы магнитного зонда и фотодиода №9 фотодиодного массива, их спектрограммы, интенсивность МГД-моды в канале №9 и эволюция интенсивности МГД-колебаний для 24 хорд наблюдения фотодиодного массива; б) – результат локализации интенсивности МГД-колебания в полоидальном сечении плазмы по измерениям интенсивности излучения из плазмы при $t = 0,215$ с.

В заключении представлено перечисление основных экспериментальных результатов, полученных в ходе работы.

Впервые на сферическом токамаке в широком диапазоне значений тороидального магнитного поля до 0,9 Тл и тока по плазме до 0,45 МА проведены измерения эффективного заряда плазмы, интенсивности излучения

на линиях примесей, мощности радиационных потерь и интенсивности мягкого рентгеновского излучения.

Было отмечено снижение $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ с ростом электронной плотности, а также обнаружено снижение величины $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ до 35 % в результате процедуры боронизации.

Было определено, что в разрядах с нейтральной инжекцией доля потерь на излучение может достигать 45 % от вкладываемой мощности. Была обнаружена зависимость мощности радиационных потерь от тороидального магнитного поля и тока по плазме.

В экспериментах с напуском азота в диверторную область для снижения тепловой нагрузки на диверторные пластины проведены измерения интенсивности излучения на линии NII в диверторной области и $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ в основном объеме плазмы.

Результаты данной работы, направленной на развитие спектроскопических методов диагностики высокотемпературной плазмы, открывают перспективы для дальнейших исследований, направленных на улучшение удержания энергии и снижение потерь на излучение.

Список литературы

1. S. A. Sabbagh et al., “Overview of physics results from the conclusive operation of the National Spherical Torus Experiment”, Nuclear Fusion, vol. 53, no. 10, 2013, DOI: 10.1088/0029-5515/53/10/104007.
2. M. P. Gryaznevich and A. Sykes, “The spherical tokamak programme at Culham”, Nuclear Fusion, vol. 39, no. 9Y, 1999, DOI: 10.1088/0029-5515/39/9Y/305.
3. G. S. Kurskiev et al., “Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field reaching 0.8 T”, Nuclear Fusion, vol. 62, no. 1, 2022, DOI: 10.1088/1741-4326/ac38c9.

4. J. E. Menard et al., “Overview of NSTX Upgrade initial results and modelling highlights”, *Nuclear Fusion*, vol. 57, no. 10, 2017, DOI: 10.1088/1741-4326/aa600a.
5. J. W. Berkery et al., “Operational space and performance limiting events in the first physics campaign of MAST-U”, *Plasma Phys. Control Fusion*, vol. 65, no. 4, 2023, DOI: 10.1088/1361-6587/acb464.
6. Scannell R. and on behalf of the MAST Upgrade team, “Developing understanding of spherical tokamaks with MAST Upgrade”, 48th EPS Conf. Plasma Physics Conf., vol. O1.104, 2022.
7. M. Gryaznevich, “Experiments on ST40 at high magnetic field”, *Nuclear Fusion*, vol. 62, no. 4, 2022, DOI: 10.1088/1741-4326/ac26ee.
8. Yu.V. Petrov et al., “Overview of GLOBUS-M2 spherical tokamak results at the enhanced values of magnetic field and plasma current”, *Nuclear Fusion*, vol. 62, no. 4, 2022, DOI: 10.1088/1741-4326/ac27c7.
9. G. S. Kurskiev et al., “Tenfold increase in the fusion triple product caused by doubling of toroidal magnetic field in the spherical tokamak Globus-M2”, *Nuclear Fusion*, vol. 61, no. 6, 2021, DOI: 10.1088/1741-4326/abe08c.
10. G. S. Kurskiev et al., “The first observation of the hot ion mode at the Globus-M2 spherical tokamak,” *Nuclear Fusion*, vol. 62, no. 10, p. 104002, 2022, doi: 10.1088/1741-4326/ac881d.
11. D. D. Carvalho et al., “Deep neural networks for plasma tomography with applications to JET and COMPASS”, *Journal of Instrumentation*, vol. 14, no. 09, pp. C09011–C09011, 2019, DOI: 10.1088/1748-0221/14/09/C09011.
12. Тихонов А. Н., «Методы решения некорректных задач», М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979, Изд. 2-е, 285 с.
13. A. D. Sladkomedova et al., “Tomography diagnostic of plasma radiated power on the spherical tokamak Globus-M”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 89, no. 8, 2018, DOI: 10.1063/1.5039801.

14. W. J. Karzas and R. Latter, “Electron Radiative Transitions in a Coulomb Field”, *Astrophys J Suppl Ser*, vol. 6, p. 167, 1961, DOI: 10.1086/190063
15. P. Bogen and D. Rusbüldt, “Bremsstrahlung of a Fully Ionized Plasma in the Infrared”, *Phys Fluids*, vol. 11, no. 9, pp. 2022–2024, 1968, DOI: 10.1063/1.1692236.
16. A. Y. Telnova, V. B. Minaev, P. B. Shchegolev, N. N. Bakharev, I. V. Shikhovtsev, and V. I. Varfolomeev, “New 50-keV neutral beam injector for the Globus-M2 spherical tokamak”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1400, no. 7, p. 077015, 2019, DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077015.
17. G. V. Pereverzev, P. N. Yushmanov, G. BEI MUNCHEN, and G. Pereverzev, “ASTRA Automated System for TRansport Analysis”, San Diego, 2002, 147c.
18. E. Tikhmeneva et al., “Measurement results of the power of radiation losses and effective ion charge in experiments on the Globus-M2 tokamak”, 47th EPS Conference on Plasma Physics, vol. P5.1010, 2021.
19. F. Wagner, “A quarter-century of H-mode studies”, *Plasma Phys Control Fusion*, vol. 49, no. 12B, pp. B1–B33, 2007, DOI: 10.1088/0741-3335/49/12B/S01.
20. A. W. Leonard, “Plasma detachment in divertor tokamaks”, *Plasma Phys Control Fusion*, vol. 60, no. 4, 2018, DOI: 10.1088/1361-6587/aaa7a9.
21. Тюхменева Е.А. и др., «Исследование примесей в экспериментах с напуском азота и гелия на токамаке Глобус-М2», XIX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Тезисы доклада, 27 сентября – 1 октября, Сочи, 2021.
22. Е.А. Тюхменева и др., «Развитие комплекса спектроскопических диагностик для исследования переноса примесей на токамаке Глобус-М2», XX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Тезисы доклада, Сочи, 2023.

Публикации соискателя по теме диссертации:

- А1. Г. С. Курские, Н. В. Сахаров, В. К. Гусев, В. Б. Минаев, И. В. Мирошников, Ю. В. Петров, А. Ю. Тельнова, Н. Н. Бахарев, Е. О. Киселев, Н. С. Жильцов, П. Б. Щеголев, И. М. Балаченков, В. И. Варфоломеев, А. В. Воронин, В. Ю. Горяинов, В. В. Дьяченко, Е. Г. Жилин, М. В. Ильясова, А. А. Кавин, А. Н. Коновалов, С. В. Крикунов, К. М. Лобанов, А. Д. Мельник, А. Б. Минеев, А. Н. Новохацкий, М. И. Патров, А. В. Петров, А. М. Пономаренко, О. М. Скрекель, В. А. Соловей, В. В. Солоха, Е. Е. Ткаченко, В. А. Токарев, С. Ю. Толстяков, Е. А. Тюхменева (определение эффективного заряда плазмы, измерения мощности радиационных потерь), Е. М. Хилькевич, Н. А. Хромов, Ф. В. Чернышев, А. Е. Шевелев, К. Д. Шулятьев, А. Ю. Яшин, «Режим с горячими ионами в сферическом токамаке Глобус-М2», Физика плазмы, т. 49, № 4, с. 305–321, 2023, DOI: 10.31857/S0367292122601497.
- А2. Тельнова А.Ю., Курские Г.С., Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Кавин А.А., Киселев Е.О., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Токарев В.А., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А. (измерения интенсивности тормозного излучения и расчет эффективного заряда плазмы, измерения мощности радиационных потерь), Хромов Н.А., Шулятьев К.Д., Щеголев П.Б., «Первые результаты исследования переноса тепла и частиц в сферическом токамаке Глобус-М2 при инжекции пучка на стадии роста тока», Журнал технической физики, т. 91, № 3, с. 412, 2021, doi: 10.21883/JTF.2021.03.50517.103-20.
- А3. Н. А. Хромов, Н. Н. Бахарев, Е. О. Векшина, В. К. Гусев, К. В. Долгова, Н. С. Жильцов, Е. О. Киселев, Г. С. Курские, В. Б. Минаев, И. В. Мирошников, П. А. Молчанов, А. Н. Новохацкий, Ю. В. Петров, В. А. Рожанский, Н. В. Сахаров, А. Ю. Тельнова, В. М. Тимохин, Е. Е. Ткаченко, В. А. Токарев, Е. А. Тюхменева (измерения мощности тормозного излучения и излучения на спектральных линиях примесей в

- экваториальном сечении и расчет эффективного заряда плазмы), П. Б. Щеголев, «Первые эксперименты по уменьшению тепловой нагрузки на диверторные пластины токамака Глобус-М2 с помощью инжекции азота и сопоставление с результатами моделирования», Физика плазмы, т. 49, № 12, с. 1327–1336, 2023, DOI: 10.31857/S0367292123601029.
- A4.А.Ю.Тельнова, Мирошников И.В., Митранкова М.М., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Киселев Е.О., Курские Г.С., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Щёголев П.Б., Тюхменева Е.А. (измерения эффективного заряда плазмы в режимах с дополнительным нагревом нейтральным пучком), «Первые результаты исследований ионного теплопереноса на сферическом токамаке Глобус-М2», Письма в журнал технической физики, т. 47, № 9, с. 25, 2021, DOI: 10.21883/pjtf.2021.09.50903.18618.
- A5.Е. А. Tukhmeneva et al., “Development of Z_{eff} diagnostic system on the Globus-M (M2) tokamak and the first experimental results”, Plasma Science and Technology, vol. 21, no. 10, 2019, DOI: 10.1088/2058-6272/ab305f.
- A6.Е. А. Tukhmeneva et al., “Measurement of Radiation Losses and Effective Ion Charge on the Globus-M2 Tokamak,” Technical Physics Letters, vol. 47, no. 1, pp. 56–60, 2021, DOI: 10.1134/S1063785021010272.
- A7.Е. А. Tukhmeneva et al., “Plasma effective charge diagnostics at the Globus-M2 tokamak”, Journal of Physics: Conference Series, Institute of Physics Publishing, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1383/1/012001.
- A8.Yu. V. Petrov, P. A. Bagryansky, I. M. Balachenkov, N. N. Bakharev, P. N. Brunkov, V. I. Varfolomeev, A. V. Voronin, V. K. Gusev, V. A. Goryainov, V. V. Dyachenko, N. V. Ermakov, E. G. Zhilin, N. S. Zhiltsov, S. V. Ivanenko, M. V. Il'yasova, A. A. Kavin, E. O. Kiselev, A. N. Konovalov, S. V. Krikunov, G. S. Kurskiev, A. D. Melnik, V. B. Minaev, A. B. Mineev, I. V. Miroshnikov, E. E. Mukhin, A. N. Novokhatsky, A. V. Petrov, A. M. Ponomarenko, N. V. Sakharov, O. M. Skrekel, A. E. Solomakhin, V. V. Solokha, A. Yu. Telnova, E. E.

Tkachenko, V. A. Tokarev, S. Yu. Tolstyakov, E. A. Tukhmeneva (описание диагностики эффективного заряда плазмы, диагностики примесных линий и многохордовой диагностики на основе SPD-фотодиодов), E. M. Khil'kevich, N. A. Khromov, F. V. Chernyshev, A. E. Shevelev, P. B. Shchegolev, K. D. Shulyat'ev & A. Yu. Yashin, "Diagnostic Complex of the Globus-M2 Spherical Tokamak", Plasma Phys. Rep., vol. 49, pp. 1459–1479, 2023, DOI: 10.1134/S1063780X23601360.

A9.G. S. Kurskiev, V. B. Minaev, N. V. Sakharov, V. K. Gusev, Yu. V. Petrov, I. V. Miroshnikov, N. N. Bakharev, I. M. Balachenkov, F. V. Chernyshev; V. V. Dyachenko, V. Yu. Goryainov, M. V. Iliasova, E. M. Khilkevich, N. A. Khromov, E. O. Kiselev, A. N. Konovalov, S. V. Krikunov, A. D. Melnik, A. N. Novokhatskii, M. I. Patrov, P. B. Shchegolev, A. E. Shevelev, K. D. Shulyatiev, O. M. Skrekel, V. V. Solokha, A. Yu. Telnova, N. V. Teplova, E. E. Tkachenko, V. A. Tokarev, S. Yu. Tolstyakov, G. A. Troshin, E. A. Tukhmeneva (измерения эффективного заряда плазмы и мощности радиационных потерь), V. I. Varfolomeev, A. V. Voronin; N. S. Zhiltsov, P. A. Bagryansky, S. V. Ivanenko, I. V. Shikhovtsev, A. L. Solomakhin, E. N. Bondarchuk, A. A. Kavin, A. B. Mineev, V. N. Tanchuk, A. A. Voronova, K. V. Dolgova, A. V. Petrov; A. M. Ponomarenko, V. A. Rozhansky, V. M. Timokhin, A. Yu. Yashin, A. E. Konkov, P. S. Korenev, Yu. V. Mitrishkin, E. G. Zhilin, V. A. Solovey, "Confinement, Heating, and Current Drive Study in Globus-M2 toward a Future Step of Spherical Tokamak Program in Ioffe Institute." Physics of Plasmas vol. 31, no.6, 2024, DOI: 10.1063/5.0211866.