

УДК 533.9

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

© 2023 г. Ю. В. Петров^{a,*}, П. А. Багрянский^b, И. М. Балаченков^a, Н. Н. Бахарев^a,
П. Н. Брунков^a, В. И. Варфоломеев^a, А. В. Воронин^a, В. К. Гусев^a, В. Ю. Горяинов^a,
В. В. Дьяченко^a, Н. В. Ермаков^a, Е. Г. Жилин^d, Н. С. Жильцов^a, С. В. Иваненко^b,
М. В. Ильясова^a, А. А. Кавин^c, Е. О. Киселев^a, А. Н. Коновалов^a, С. В. Крикунов^a, Г. С. Курскиев^a,
А. Д. Мельник^a, В. Б. Минаев^a, А. Б. Минеев^c, И. В. Мирошников^a, Е. Е. Мухин^a,
А. Н. Новохацкий^a, А. В. Петров^e, А. М. Пономаренко^e, Н. В. Сахаров^a, О. М. Скрекель^a,
А. Е. Соломахин^b, В. В. Солоха^a, А. Ю. Тельнова^a, Е. Е. Ткаченко^a, В. А. Токарев^a,
С. Ю. Толстяков^a, Е. А. Тюхменева^a, Е. М. Хилькевич^a, Н. А. Хромов^a, Ф. В. Чернышев^a,
А. Е. Шевелев^a, П. Б. Щёголев^a, К. Д. Шулятьев^a, А. Ю. Яшин^{a,e}

^aФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

^bИнститут ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

^cАО “Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА)”,
Санкт-Петербург, Россия

^dООО “Иоффе Фьюжн Текноложис”, Санкт-Петербург, Россия

^eПолитехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: yu.petrov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 29.06.2023 г.

После доработки 10.09.2023 г.

Принята к публикации 25.09.2023 г.

Описан диагностический комплекс сферического токамака Глобус-М2 ($R = 36$ см, $a = 24$ см) — единственного в России действующего токамака с диверторной конфигурацией плазмы, работающего в диапазоне субтермоядерных температур (T_e до 1.6 кэВ, T_i до 4.5 кэВ) и плотностей (n_e до 2×10^{20} м⁻³). Токamak Глобус-М2 является уникальной научной установкой, входящей в состав Федерального центра коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях”. Это позволяет сторонним организациям проводить на нем свои исследования. Статья содержит перечень всех имеющихся на токамаке на данный момент диагностик. Описание диагностик построено таким образом, чтобы читатель получил представление об их возможностях по измерению плазменных параметров с акцентом на пределы и точность измеряемых величин, а также пространственное и временное разрешение. При этом многие технические детали опущены в целях экономии места, даны ссылки на работы с более подробным описанием отдельных диагностик.

Ключевые слова: сферический токамак, диагностика высокотемпературной плазмы

DOI: 10.31857/S036729212360084X, **EDN:** CGOCCN

1. ВВЕДЕНИЕ

Модернизированный сферический токамак Глобус-М2 (большой радиус $R = 36$ см, малый радиус $a = 24$ см) [1] был запущен в 2018 г. В результате проведенной модернизации электромагнитной системы существенно повышены проектные параметры токамака: тороидальное магнитное поле B_T до 1 Тл и ток по плазме I_p до 500 кА. В настоящее время на токамаке получены разряды при $B_T = 0.9$ Тл и $I_p = 450$ кА. В результате повышения тока и поля существенно выросли плаз-

менные параметры. В экспериментах с дополнительным нагревом плазмы пучками атомов высокой энергии центральная температура ионов $T_i(0)$ достигла величины 4.5 кэВ при центральной температуре электронов $T_e(0)$ более 1.5 кэВ [2]. Кроме инжекторов нейтральных атомов, токамак оснащен комплексами ионного циклотронного нагрева (ИЦН) [3] и нижнегибридной генерации тока [4]. Глобус-М2 — единственный сферический токамак в мире, применяющий данные ВЧ-системы. Он также является единственным в России

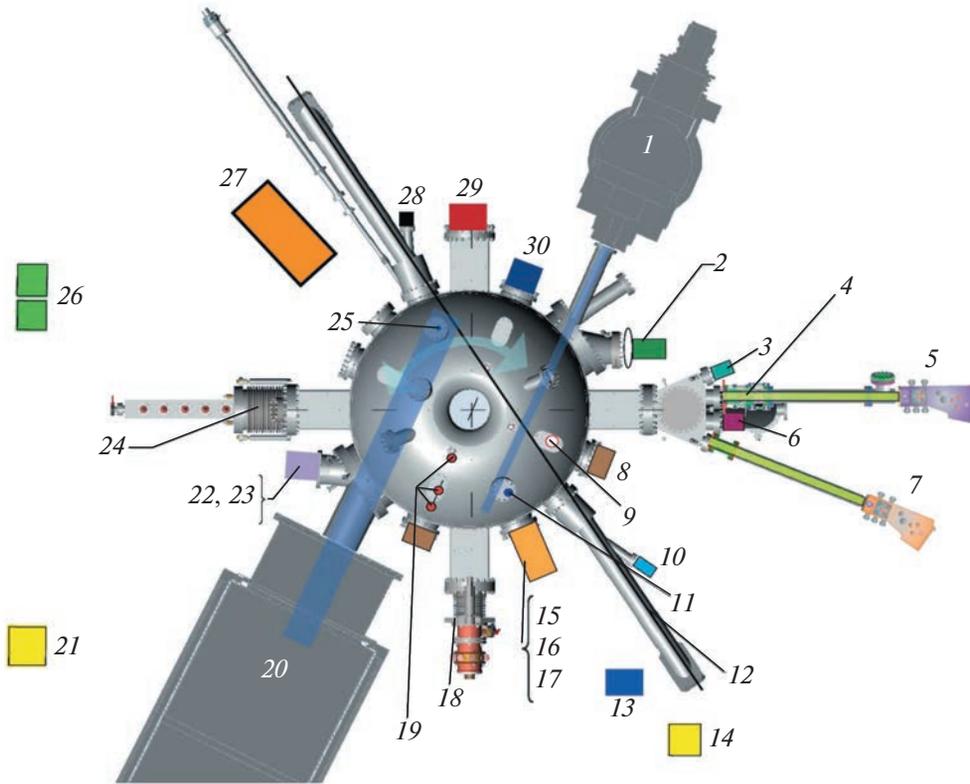


Рис. 1. Расположение диагностик на токамаке Глобус-М2: 1 – инжектор атомов с энергией частиц 18–40 кэВ; 2 – система сбора для диагностики Томсоновского рассеяния; 3 – диагностика радиационных потерь; 4 – фольговый детектор мягкого рентгеновского излучения; 5 – анализатор атомов перезарядки АКОРД-12; 6 – датчик $D\alpha$; 7 – анализатор атомов перезарядки АКОРД-24М; 8 – камера-обскура мягкого рентгеновского излучения; 9 – диверторная диагностика томсоновского рассеяния; 10 – лазерный интерферометр; 11 – тепловизор; 12 – зондирующий лазер диагностики томсоновского рассеяния; 13 – ^3He нейтронные счетчики; 14 – ^{10}B нейтронный счетчик (подвижный); 15 – плазменная пушка; 16 – подвижный зонд Ленгмюра; 17 – компактный анализатор атомов перезарядки (СНРА); 18 – ИЦР-антенна; 19 – микроволновый интерферометр; 20 – инжектор атомов с энергией частиц 30–50 кэВ; 21 – ^{10}B нейтронный счетчик (в защите); 22 – гелиевый термометр; 23 – видеокамера; 24 – антенна-грилл для нижнегибридной генерации тока; 25 – детектор мягкого рентгеновского излучения; 26 – спектрометр жесткого рентгеновского излучения $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$; 27 – нейтронный спектрометр ВС-501А; 28 – диагностика эффективного заряда плазмы; 29 – многоканальный доплеровский рефлектометр; 30 – диагностика спектроскопии перезарядки.

действующим токамаком с диверторной конфигурацией плазмы, работающим в режимах с нижней, верхней или двумя X-точками. На токамаке имеется обширный набор диагностик. Список диагностик приведен в табл. 1, а их расположение на токамаке на рис. 1. Все вышеперечисленное позволяет проводить на Глобусе-М2 исследования по широкому спектру тематик. Токamak Глобус-М2 является уникальной научной установкой (УНУ), входящей в состав Федерального центра коллективного пользования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях”. Это позволяет сторонним организациям проводить на нем свои исследования, что и происходит в последние годы во все больших масштабах. В связи

с этим возникает потребность довести до научного сообщества экспериментальные возможности установки. По согласованию с редакцией журнала “Физика плазмы” было принято решение посвятить специальный выпуск исследованиям, проводимым на токамаке Глобус-М2, куда, в частности, войдут статьи с описанием самого токамака и его нагревного комплекса. Настоящая статья посвящена описанию диагностического комплекса токамака. Описание диагностик построено таким образом, чтобы читатель получил представление об их возможности по измерению плазменных параметров с акцентом на пределы и точность измеряемых величин, а также пространственное и временное разрешение. При этом многие технические детали опущены в целях экономии места, даны ссылки на работы с более подробным описанием отдельных диагностик.

Таблица 1. Список диагностик токамака Глобус-М2

Назначение	Название	Характеристики
Магнитные измерения		
Ток по плазме	Пояса Роговского	2 катушки внутри камеры
Напряжение на обходе	Петли	2 тороидальные петли
Энергосодержание плазмы	Диамагнитные петли	2 полоидальные петли
Положение и форма плазмы	Петли	2 седловые и 24 тороидальные петли
МГД-возмущения плазмы	Магнитные зонды	2 полоидальных массива по 28 и 15 зондов и 1 тороидальный из 8 зондов трехкоординатный зонд
Кинетические измерения		
Профили T_e и n_e	Томсоновское рассеяние, основной массив Томсоновское рассеяние в диверторной области Подвижный ленгмюровский зонд	Профили по 11 пространственным точкам в экваториальной плоскости с интервалом 3 мс, весь разряд Измерения в 9 пространственных точках, с интервалом 10 мс Профили T_e, n_e за сепаратрисой
Интегральная хордовая плотность $n_e L$	Микроволновый интерферометр лазерный интерферометр	$\lambda = 1$ мм, 3 вертикальные хорды $\lambda = 9.6$ мкм, 1 горизонтальная хорда
Профили T_i скорости тороидального вращения плазмы	Диагностика активной спектроскопии перезарядки (CXRS)	8 пространственных точек по большому радиусу с интервалом 5 мс
Спектроскопия		
Измерение Z_{eff}	Фильтровый монохроматор	Измерения континуума в диапазонах $\lambda = 1019-1040$ и $\lambda = 948-952$ нм
Контроль поступления примесей в плазму	Обзорный спектрометр Avantes AvaSpec-ULS2048 Фильтровый спектрометр	Излучение примесных линий в диапазоне $\lambda = 200-1100$ нм линии CIII, OII, FeI, NII, VII, HeI в мониторинговом режиме
Контроль поступления рабочего газа	Фильтровые монохроматоры	Излучение D α из области верхней и нижней X-точки и по двум вертикальным хордам
Потери на излучение	SPD-фотодиоды	Измерения излучения в широком спектральном диапазоне $\lambda = 200-1100$ нм по центральным и периферийным хордам
Мягкое рентгеновское излучение (SXR)	Камера-обскура на линейке из 16 фотодиодов Четырехфольговый спектрометр SXR	Измерение SXR через бериллиевый фильтр 50 мкм в полоидальном сечении мониторинговая оценка $T_e(0)$
Корпускулярные измерения		
Температура и функция распределения ионов	Анализаторы спектров атомов перезарядки (NPA и CNPA)	АКОРД-12 – поперечная ориентация, сканирование по горизонтали и вертикали, АКОРД-24М и CNPA – продольная ориентация, сканирование по горизонтали
Жесткое рентгеновское излучение (HXR)	Гамма-спектрометры на кристаллах LaBr ₃ (Ce) HXR-детектор на кристалле NaI(Tl)	Два спектрометра, диапазон измерений 0.2–20 МэВ Мониторные измерения потока HXR

Таблица 1. Окончание

Назначение	Название	Характеристики
Нейтронное излучение	Спектрометры на жидком сцинтилляторе BC-501A Коронные счетчики СМ-11 He ³ Пропорциональные счетчики	Два спектрометра с диапазоном энергий нейтронов 0.1–5 МэВ Мониторные измерения потоков нейтронов
Тепловые потоки на стенку Температура стенки	Тепловизор Двухцветный пирометр диверторные зонды Ленгмюра	Измерения температуры диверторных пластин в диапазоне 5–1500°C, с частотой до 1.5 кГц Измерения температуры стенки в диапазоне 70–3500°C Измерение потоков тепла на диверторные пластины
Видеонаблюдение	Видеокамеры Olympus i-SPEED 2 Optronis CamRecord CR3000 2	Видеонаблюдение за плазменными процессами, в том числе быстрыми, со скоростью до 100000 кадров/с
Рефлектометрия	Допплеровский рефлектометр	Измерение радиального профиля скорости вращения плазмы в направлении $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ Исследование турбулентности

2. МАГНИТНАЯ ДИАГНОСТИКА

2.1. Магнитные петли

Для получения информации о полоидальном магнитном потоке и его распределении используется 21 полнообходная тороидальная петля. Петли изготовлены из кирскабеля, в котором центральный провод из нихрома защищен через изоляцию трубкой из нержавеющей стали диаметром 1.5 мм. Семь петель проложены по внутренней поверхности вакуумной камеры, а четырнадцать — снаружи (их расположение, а так же расположение полоидальных катушек показано на рис. 2). Сигналы с петель вместе с сигналами с поясов Роговского, измеряющими токи в полоидальных катушках и ток по плазме, записываются во время разряда с помощью АЦП. В дальнейшем эти данные используются для восстановления равновесия с помощью трех различных кодов: ruGSS [5], PET [6] и метода подвижных токовых колец [7]. Для работы этих трех кодов создана математическая модель токамака. Модель включает в себя все катушки, создающие внешнее магнитное поле, а также вакуумную камеру.

Метод токовых колец используется для вычисления границы плазмы между разрядами, благодаря простоте и высокой скорости работы. Такие результаты достигаются за счет сильного упрощения модели плазмы и отказа от решения уравнения Грэда–Шафранова. В методе токовых колец плазменный ток моделируется набором подвижных токовых колец. Их положение и величина то-

ка подбираются под измеренный плазменный ток и под измерения полоидального магнитного потока магнитными петлями. К недостаткам метода относится невозможность определения распределения равновесного давления плазмы, плотности тороидального тока и т.п. Поэтому к нему был написан модуль, позволяющий определить энергозапас плазмы, полоидальную и тороидальную бета, а также внутреннюю индуктивность плазмы с помощью метода шафрановских интегралов [8]. Два других кода требуют более трудоемкой обработки с помощью решения уравнения Грэда–Шафранова, но в результате вычисляют все необходимые геометрические и интегральные параметры, такие как малый и большой радиус плазмы и положение магнитной оси, положение X-точки, полоидальную бета, внутреннюю индуктивность, величину диамагнитного потока и энергозапас. Результат работы всех трех кодов в виде границы плазмы и потока полоидального магнитного поля из ruGSS для разряда #42368, $t = 200$ мс ($I_p = 400$ кА, $B_T = 0.8$ Тл), вместе с магнитной системой представлены на рис. 2. В коде PET в качестве дополнительного подгоночного параметра используется диамагнитный поток, измеряемый с помощью петли, охватывающей вакуумную камеру по полоидальному обходу. Компенсация потока вакуумного тороидального магнитного поля производится при помощи пояса Роговского, измеряющего ток в тороидальной катушке. При этом повышается достоверность

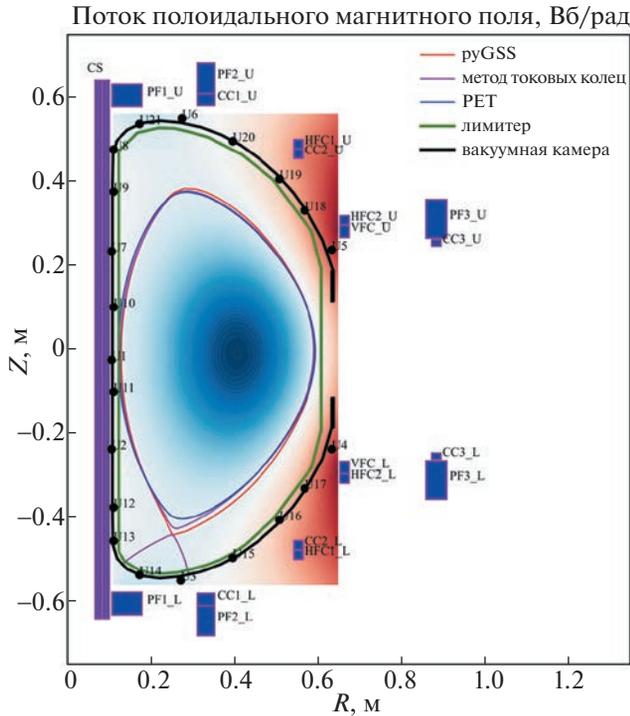


Рис. 2. Расположение полоидальных катушек, измерительных магнитных петель и результаты реконструкции формы магнитной поверхности с помощью кодов ruGSS, PET и метода токовых колец для разряда #42368, $t = 200$ мс, $I_p = 400$ кА, $B_T = 0.8$ Тл.

расчетов магнитной конфигурации и вычисляемых интегральных параметров плазмы.

2.2. Магнитные зонды

Магнитная зондовая диагностика на токамаке Глобус-М2 представлена одним тороидальным массивом зондов, двумя полоидальными массивами, а также трехкоординатным зондом для измерения поляризации магнитных возмущений.

Тороидальный массив установлен внутри нижней тороидальной диафрагмы токамака ($R = 57$ см, $Z = -23$ см) и состоит из 8 зондов, равномерно расположенных вдоль тороидального обхода, ориентированных на вертикальную компоненту магнитного поля (рис. 3а). Зонды представляют собой катушки из медного провода в полиимидной изоляции, намотанного на керамическую оправку, расположены внутри вакуумной камеры и защищены от потоков тепла и частиц только графитовыми пластинами. Электромагнитное излучение высокой частоты способно проникать в область установки зондов через зазоры между пластинами. Конструкция зондов в сочетании с быстрым АЦП позволяет измерять сигналы с частотами до сотен МГц.

Полоидальный массив (рис. 3б) предназначен для регистрации медленных МГД-колебаний и состоит из 28 цилиндрических катушек, установ-

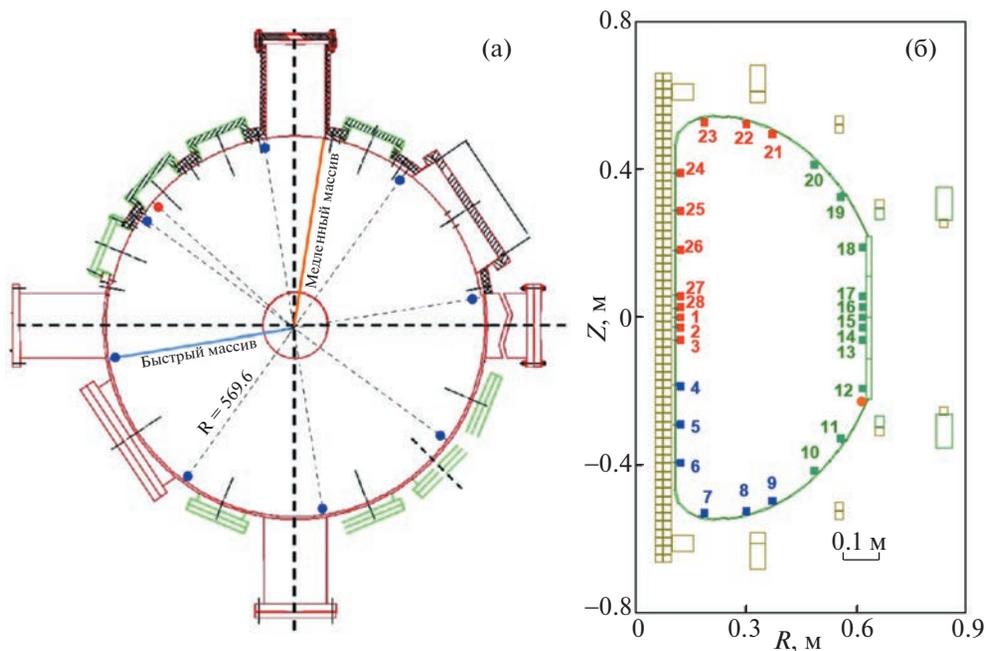


Рис. 3. Расположение магнитных зондов на установке Глобус-М2: тороидальный массив и трехкоординатный зонд (красный) (а); низкочастотный полоидальный массив (б). Оранжевым цветом отмечено положение тороидального массива в полоидальном сечении на (а), и положение полоидального массива в тороидальном сечении на (б). Светло-синим цветом отмечено положение высокочастотного полоидального массива.

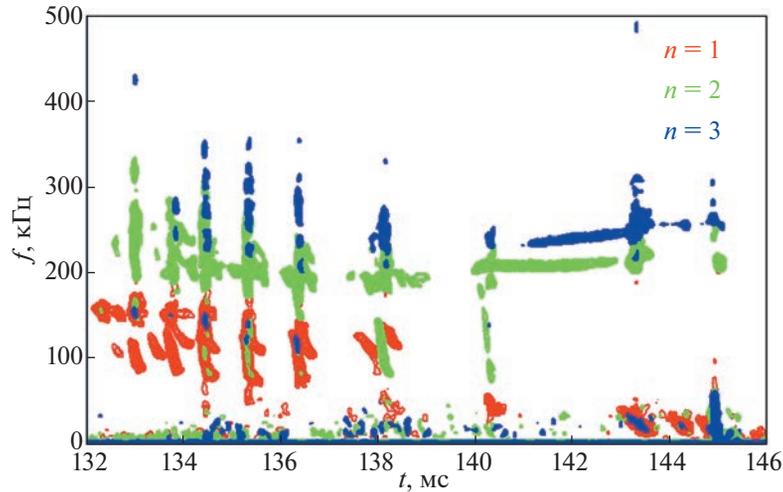


Рис. 4. Определение номеров мод по сигналам массива тороидальных зондов при помощи пространственного преобразования Фурье. Разряд #43338.

ленных внутри тонкостенных трубок из нержавеющей стали с толщиной стенки 0.5 мм, что препятствует прохождению электромагнитных волн с частотой выше 150 кГц. Недавно на токамаке установлен еще один полоидальный массив из 16 зондов с частотными характеристиками аналогичными тороидальному массиву, но приобретение быстрого АЦП для него пока только в планах. Так же на токамаке имеется трехкоординатный зонд, состоящий из трех отдельных магнитных катушек, аналогичных зондам тороидального массива, предназначенный для определения поляризации магнитных возмущений.

Магнитная диагностика токамака Глобус-М позволяет регистрировать электромагнитное излучение в широком диапазоне частот и исследовать структуру различных МГД-неустойчивостей, таких как тиринг-моды в диапазоне 5–20 кГц [9], шировые альфвеновские моды [10] в диапазоне 50–500 кГц, компрессионные альфвеновские моды с частотами порядка 1 МГц [11] ионно-циклотронное излучение (5–20 МГц), а также более высокочастотные колебания на частотах геликонов. В качестве примера на рис. 4 приведена спектрограмма сигналов тороидального массива зондов для тороидальных альфвеновских мод в разряде #42655. Тороидальные волновые числа мод (выделены цветом) определены с помощью пространственного преобразования Фурье.

3. ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Диагностика томсоновского рассеяния (ТР) на токамаке Глобус-М2 состоит из двух комплексов. Первый был существенно обновлен в 2020 г., обеспечивает измерения профилей температуры

и концентрации электронов в экваториальной плоскости [12]. Зондирование плазмы осуществляется лазером Nd:YAG 1064.5 нм с длительностью импульса ~ 10 нс значительно меньшей, чем характерные времена МГД-активности плазмы, т.е. измерения диагностики ТР можно считать мгновенными. Рассеянное на плазме лазерное излучение из 11 пространственных точек пересечения луча зондирующего лазера и хорд наблюдения собирается приемным объективом (рис. 5). За один импульс лазера проводятся измерения пространственных профилей температуры $T_e(R)$ и концентрации электронов $n_e(R)$. Зондирующий лазер работает с частотой следования импульсов 330 Гц, обеспечивая измерение динамики $T_e(R, t)$ и $n_e(R, t)$ с шагом 3.03 мс на протяжении всего разряда токамака. Пространственное разрешение находится в диапазоне от 11 мм на стороне сильного поля (HFS) ($R = 23$ см, $r/a = -0.5$) до 21 мм на стороне слабого поля (LFS) ($R = 57$ см, $r/a = 0.9$) и 10 мм для двух крайних точек на стороне слабого поля ($R = 60$ см, $r/a = 1$). Область наблюдения включает в себя пространство от LFS сепаратрисы до магнитной оси плазмы, плюс одна точка на HFS. Данные диагностики ТР доступны в режиме реального времени с задержкой < 2.4 мс, верифицированные оператором диагностики данные поступают в базу данных в паузе между разрядами токамака.

Диагностика обеспечивает измерение $T_e(R, t)$ в диапазоне от 6 эВ до 5 кэВ и $n_e(R, t)$ в диапазоне от 5×10^{17} до $3 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Информация о распределении температуры и концентрации электронов позволяет рассчитать профиль электронного давления $P_e(R, t)$. По положению максимума $P_e(R)$ оценивается положение магнитной оси. Анализ

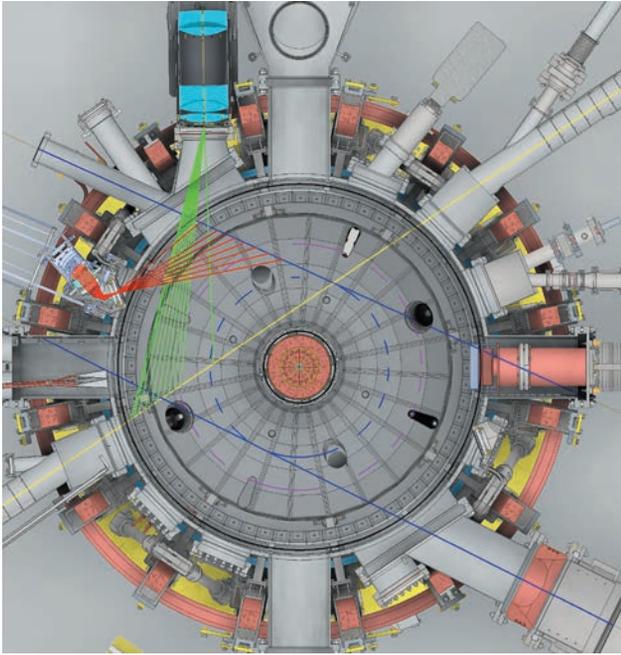


Рис. 5. Схема геометрии измерения диагностики ТР и CRXS в экваториальном сечении токамака Глобус-М2. Черными окружностями выделено положение обращенной к плазме графитовой поверхности. Штриховой фиолетовой линией показана магнитная ось плазмы. Зелеными крестиками показаны точки измерения диагностики ТР на хорде зондирования (желтая стрелка). Красными крестиками показаны точки измерения диагностики CXRS на нагревном пучке NBI₁ (синяя стрелка).

формы профилей $T_e(R, t)$ и $n_e(R, t)$ позволяет локализовать МГД-неустойчивости, такие как магнитные острова. Для пилообразных колебаний определяется радиус инверсии R_{inv} . На (рис. 6) приведен характерный пример измерения электронной температуры в режиме с пилообразными колебаниями. Благодаря высокой чувствительности диагностики возможно проводить измерения за пределами последней замкнутой магнитной поверхности (LCFS), что позволяет определить положение LCFS в экваториальной плоскости R_{sep} . При наличии данных о магнитной конфигурации, профили, измеренные диагностикой ТР, можно спроецировать на полное полоидальное сечение [13], получив $T_e(R, Z, t)$ и $n_e(R, Z, t)$ в предположении сохранения кинетических параметров электронов в пределах одной магнитной поверхности. Более подробно возможности диагностики описаны в [14].

Данные диагностики ТР находятся в соответствии с рядом независимых диагностик токамака. Абсолютные измерения n_e верифицируются данными дисперсионного лазерного интерферометра и СВЧ-интерферометра. Положение магнит-

ной оси и R_{inv} сравнивается с реконструкцией магнитного равновесия. Положение R_{sep} и величина $T_e(R, t)$ в окрестности сепаратрисы можно сравнить с зондовыми измерениями. Интегральная величина $W_e(t)$ сравнивается с оценкой из диамагнитных измерений и моделированием равновесными кодами, ruGSS [5] PET [6].

Второй комплекс диагностики ТР расположен в области выхода сепаратрисы на нижний купол камеры (рис. 7). Задачей этой системы является проведение локальных измерений электронной температуры $T_e(z, t)$ в диапазоне 1–100 эВ и плотности $n_e(z, t)$ в диапазоне от 10^{17} – 10^{20} м⁻³. Источником зондирующего излучения является лазер Nd:YAG, генерирующий импульсы длительностью 3 нс, энергией 2 Дж, с частотой 100 Гц на длине волны 1064 нм. Малая длительность лазерного импульса (заметно меньшая характерных времен МГД) не только обеспечивает высокое временное разрешение, но и минимизирует влияние на измерения фонового излучения плазмы. Перед диагностическим комплексом поставлена задача предоставлять данные в реальном времени с задержкой не более 3 мс. Рассеянное излучение собирается из 9 пространственных точек вдоль вертикальной хорды зондирования длиной 110 мм, проходящей на радиусе $R = 24$ см. В зависимости от магнитной конфигурации существует возможность изучения области под X-точкой, ограниченной внутренней и внешней ветвями сепаратрисы (private flux region), плазмы в окрестности X-точки или краевой плазмы на внутреннем обходе. Более подробно описание диагностики представлено в [15].

В настоящее время диагностика находится в процессе отладки. Первые результаты диагностики были получены в летнюю кампанию 2022 г. Измерения производились в одной пространственной точке. В стационарной фазе разряда происходило смещение магнитной конфигурации относительно точки измерения, что позволило получить профиль температуры в районе внутренней ноги сепаратрисы. На рис. 8 изображены магнитные конфигурации в различные моменты времени и расположение точки измерения относительно них.

Для измерения сверхнизких T_e добавлены два ближайших к лазерной длине волны спектральных канала. Спектральный канал шириной менее 1 нм в коротковолновой части спектра сформирован путем последовательной установки двух фильтров из одной партии, но имеющих разброс спектральных характеристик при изготовлении.

4. АНАЛИЗАТОРЫ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ

На токамаке Глобус-М2 используется три анализатора атомов перезарядки: два анализатора

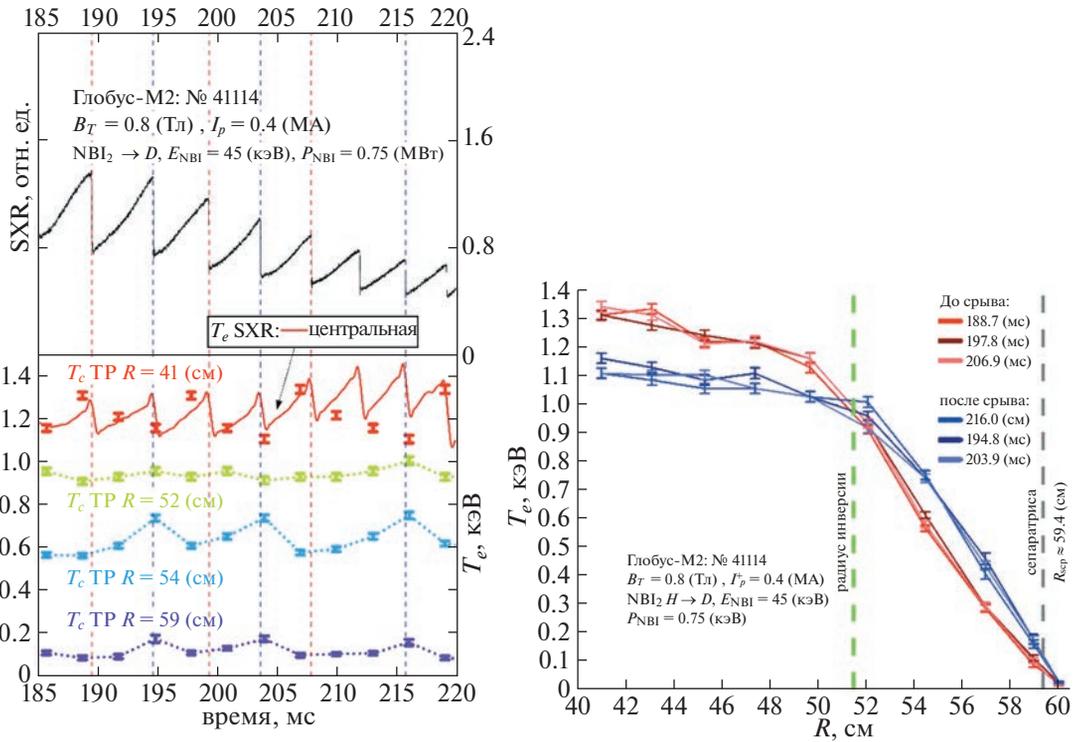


Рис. 6. Осциллограмма сигнала мягкого рентгеновского излучения демонстрирует пилообразные колебания в разряде Глобус-М2 #41114 с дополнительным нагревом нейтральной инжекцией; моменты срывов пилообразных колебаний выделены вертикальными пунктирными линиями (а). Динамика температуры электронов во время пилообразных колебаний (б). Сплошной красной линией показана оценка центральной температуры по данным фольгового спектрометра мягкого рентгеновского излучения. Точками показаны измерения температуры диагностики томсоновского рассеяния в следующих областях по большому радиусу: 41 см (центральная) – красный, 52 см – зеленый, 54 см – синий, 59 см – фиолетовый. Профили температуры электронов по данным диагностики томсоновского рассеяния, измеренные до релаксации пилообразного колебания (красные) и после (синие) (в). В легенде приведены моменты времени, в которые проводилось измерение. Зеленая штриховая линия показывает радиус инверсии.

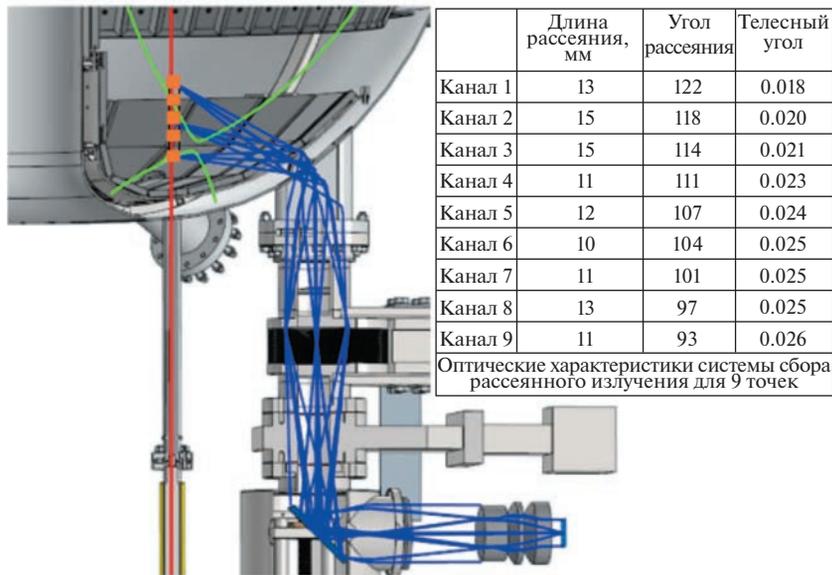


Рис. 7. Схема сбора излучения диагностикой TP в диверторной области токамака Глобус-М2. Красным цветом обозначена хорда зондирования, зеленым – магнитная конфигурация плазмы, синим цветом – ход лучей в системе сбора света.

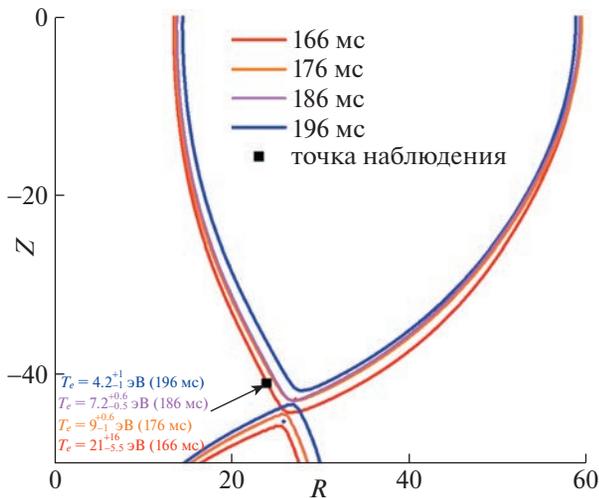


Рис. 8. Результаты измерений T_e в области внутренней ноги сепаратрисы.

типа АКОРД [16] (АКОРД-24М и АКОРД-12) и один компактный анализатор CNPA-09 [17]. Анализаторы применяются для определения ионной температуры, изотопного состава плазмы, а также для регистрации спектра ионов высокой энергии, возникающих при применении методов дополнительного нагрева. Расположение анализаторов показано на рис. 1, а их основные характеристики представлены в табл. 2.

Физические основы измерений с помощью анализаторов атомов перезарядки на токамаке Глобус-М2, а также основные результаты, полученные с использованием данной диагностики, описаны в статье [18]. Работа анализаторов возможна как в пассивном режиме, когда сигнал является проинтегрированным вдоль всей линии наблюдения диагностики, так и в активном режиме [19, 20], когда основной источник сигнала

формируется в области пересечения пучка инжектируемых атомов высокой энергии и линии наблюдения анализатора. Применение активного режима диагностики позволяет локализовать измерения, что существенно упрощает интерпретацию экспериментальных результатов. Анализаторы АКОРД-24М и АКОРД-12 используют для активных измерений инжектор 1, в ближайшее время CNPA-09 будет установлен в новое положение, в котором для активных измерений будет использован инжектор 2. Анализаторы типа АКОРД оснащены системой пространственного сканирования, позволяющей изменять линию наблюдения от разряда к разряду. Системы сканирования позволяют осуществлять вертикальное сканирование на $\pm 10^\circ$ относительно экваториальной плоскости, а также горизонтальное сканирование для анализатора АКОРД-12. Подобная система будет использована и для анализатора CNPA-09.

Пример реконструкции профиля ионной температуры с помощью сканирующего анализатора в разрядах №№ 38876, 78, 79, 86, 87 с одинаковыми параметрами показан на рис. 9. Метод восстановления профиля описан в работе [20]. Для сравнения, на рисунке представлен профиль ионной температуры, полученный с помощью диагностики CXRS. Как видно, наблюдается хорошее соответствие.

Рисунок 10 иллюстрирует использование анализаторов атомов перезарядки для исследования удержания быстрых ионов. На рис. 10а показаны экспериментальные спектры атомов перезарядки на 145 мс в разряде #42630. Сигнал анализатора CNPA-09 является преимущественно пассивным (проинтегрированным вдоль линии наблюдения), в то время как анализатор АКОРД-24М наклонен относительно экваториальной плоскости примерно на 6° вниз и регистрирует преимущественно локальный спектр в области $\rho = 0.46$ (где

Таблица 2. Основные параметры анализаторов атомов перезарядки

Параметр	Значение параметра		
	АКОРД-12	АКОРД-24М	CNPA-09
Число энергетических каналов \times \times число изотопов	6×2	12×2	44×1
Энергетический диапазон, кэВ			
для водорода	0.2–18	0.2–32	0.8–120
для дейтерия	0.2–25	0.2–32	0.8–60
Динамический диапазон		7	водород: 140 дейтерий: 70
Энергетическая ширина каналов, %	9–40	9–25	4–90
Массовое разделение		0.01	0.01–0.001
Временное разрешение, мс		0.1	

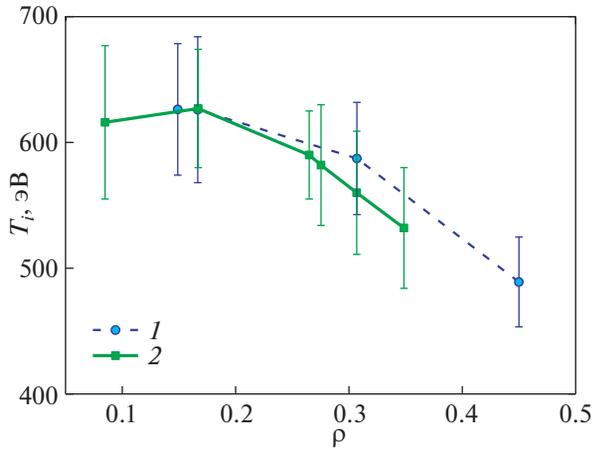


Рис. 9. Пример экспериментальных профилей ионной температуры, полученных с помощью анализатора атомов перезарядки и CXRS, в разрядах #38876, 78, 79, 86, 87 в момент времени $t = 200$ мс: 1 – данные анализаторов атомов перезарядки; 2 – данные диагностики активной спектроскопии перезарядки.

ρ – нормализованная магнитная координата). На рис. 10б показана вариация потока дейтерия 22.4 кэВ, полученная анализатором АКОРД-24М в режиме активных измерений ($\rho = 0.55$) и потока атомов дейтерия 28.6 кэВ, полученная анализатором CNPA-09 в режиме с преимущественно пас-

сивным сигналом во время тороидальных альфвеновских мод. Как видно, сигнал вдоль линии наблюдения падает, что косвенно свидетельствует о потерях быстрых частиц, в то время как периферийный активный сигнал растет, что связано с транспортом быстрых частиц из центральной области плазмы ближе к границе.

5. ДИАГНОСТИКА АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Диагностика активной спектроскопии перезарядки (или CXRS) основана на измерении и анализе спектрального контура линии излучения (как правило, видимого диапазона) водородоподобных ионов, образующихся в результате перезарядки ядер легкой примеси (He, B, C, N, O) на инжектируемых в плазму высокоэнергичных атомах дейтерия (или водорода) нагревного или диагностического пучка.

На токамаке Глобус-М2 в состав этой диагностики входят специально разработанная оптическая система сбора света по 7 “линиям наблюдения” (LOS) в экваториальной плоскости установки (см. рис. 5), оснащенная выходными волоконными SMA-разъемами; комплект 20-метровых SMA-SMA волоконно-оптических кварцевых кабелей диаметром 400 мкм с числовой апертурой $NA = 0.22$ для транспортировки светового

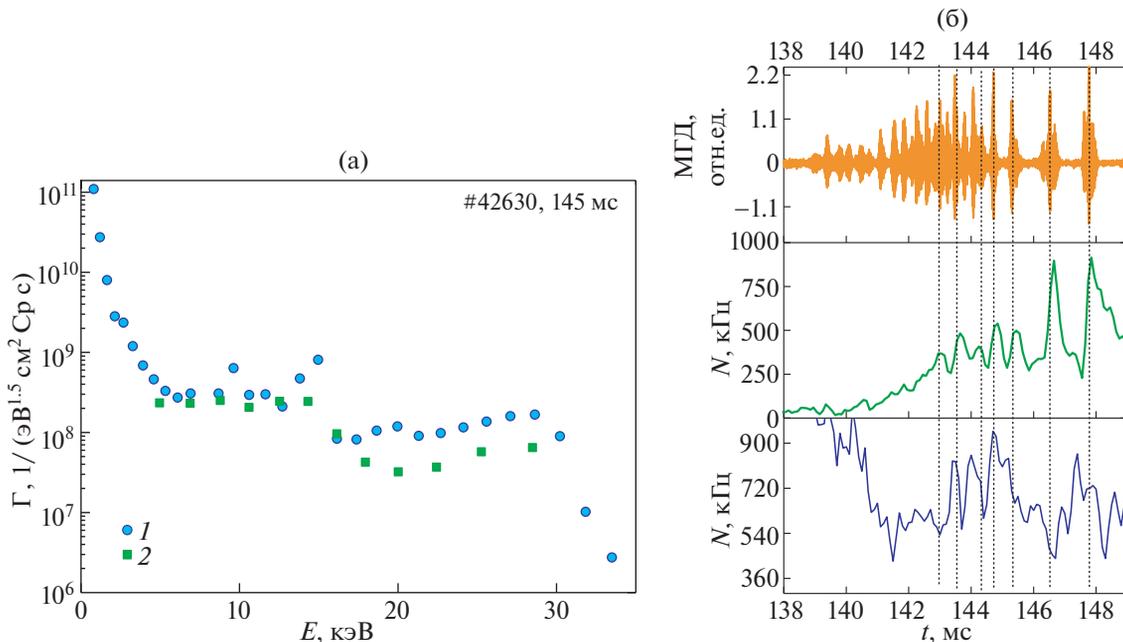


Рис. 10. Экспериментальные спектры атомов дейтерия, полученные с помощью анализаторов CNPA-09 (1) и АКОРДр24М (2) в разряде #42630 (а); вариация сигнала анализаторов атомов перезарядки во время тороидальных альфвеновских мод (б). Сверху вниз: сигнал МГД-зонда, поток атомов дейтерия 22.4 кэВ, полученный анализатором АКОРД-24М в режиме активных измерений, поток атомов дейтерия 28.6 кэВ, полученный анализатором CNPA-09 в режиме с преимущественно пассивным сигналом.

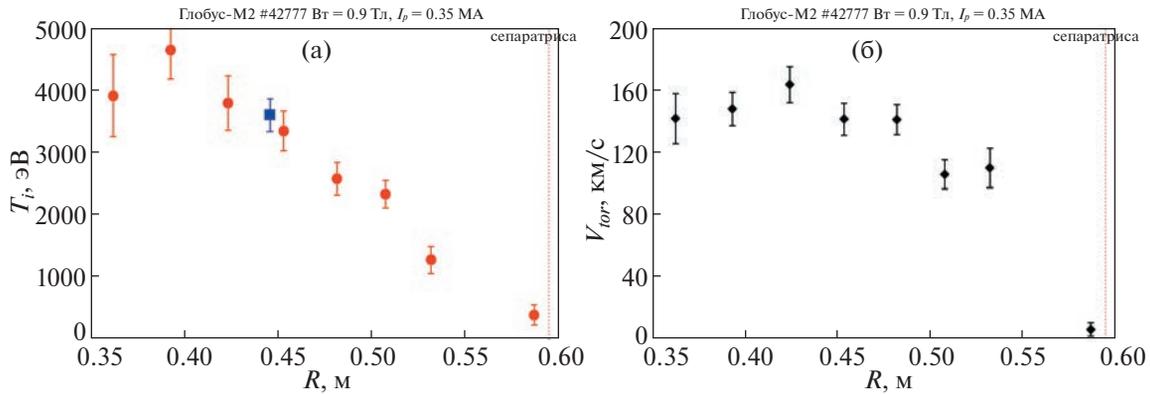


Рис. 12. Профили ионной температуры (а) и скорости тороидального вращения ионов углерода $C5^+$ в плазме (б) на 210–215 мс разряда #42777 при $B_T = 0.9$ Тл и $I_p = 0.35$ МА. Синим квадратом показана ионная температура, измеренная анализатором атомов АКОРД-12.

6. ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

На токамаке Глобус-М2 имеется два интерферометра для измерения плотности электронов. СВЧ-интерферометр на лампе обратной волны (ЛОВ) работает на длине зондирующих волн 1 мм. Интерферометр обеспечивает мониторинговые измерения. Изначально зондирование проводилось по трем вертикальным хордам с большим радиусом $R = 24, 42$ и 50 см. Ввиду старения лампы и падения мощности излучения, сейчас интерферометр способен обеспечить измерения только по одной хорде $R = 42$ см, проходящей вблизи магнитной оси. В связи с отсутствием запасных ламп рассматривается вопрос о замене генератора на твердотельный. Были проведены первые пробные испытания с прибором, предоставленным нам сотрудниками Курчатовского института во временное пользование. В настоящее время прорабатывается вопрос закупки аналогичных блоков.

Вторым интерферометром является недавно введенный в эксплуатацию, произведенный ИЯФ СО РАН дисперсионный интерферометр (ДИ) на основе CO_2 -лазера с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения [22]. Для регистрации сигналов ДИ и вычисления плотности плазмы в режиме реального времени был разработан специальный измерительный модуль [23]. Реализованные в его цифровом узле алгоритмы вычисления плотности плазмы основаны на гармоническом анализе сигналов интерферометра, что делает их устойчивыми к воздействию шумов и изменениям глубины модуляции. Размах шумовой компоненты при измерениях линейной плотности не превышает $\langle nl \rangle_{\min} \approx 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при временном разрешении в 20 мкс. Относительная погрешность вычисления абсолютного значения линейной плотности не превышает 2.5%. Для обоих интерферометров длина хорды для расчета

среднехордовой плотности электронов определяется с помощью восстановления положения последней замкнутой магнитной поверхности методом токовых колец [7].

В экспериментах на токамаке Глобус-М2 производилось сравнение двух диагностических систем: диагностики ТР и дисперсионной интерферометрии. Хорды измерений обеих диагностик лежат в экваториальной плоскости и имеют одинаковый прицельный параметр и длину. Для сравнения диагностик проводился расчет среднехордовой плотности электронов ТР с помощью интегрирования на параметризованных магнитных поверхностях [24]. Сравнение измерений ТР и дисперсионного интерферометра в разряде #42518 с $n_e = 0.1 - 0.9 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (рис. 13) демонстрируют хорошее совпадение. Таким образом, диагностика дисперсионной интерферометрии на токамаке Глобус-М2 производит надежные измерения среднехордовой плотности электронов и отличается высокой точностью измерений в разрядах с высокой средней плотностью плазмы, по крайней мере до $1.5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

7. ДОППЛЕРОВСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР

Допплеровское обратное рассеяние (ДОР), или доплеровская рефлектометрия – метод регистрации сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, обратно рассеиваемого на флуктуациях плотности плазмы. Данная диагностика позволяет по измеренному сдвигу частоты рассеянного излучения определять полоидальную скорость вращения плазмы, а так же исследовать плазменную турбулентность. На токамаке Глобус-М2 используется три микроволновые системы ДОР, расположение которых и лучевые траектории показаны на рис. 4. Первая система позволяет зондировать плазму одной частотой, которую можно

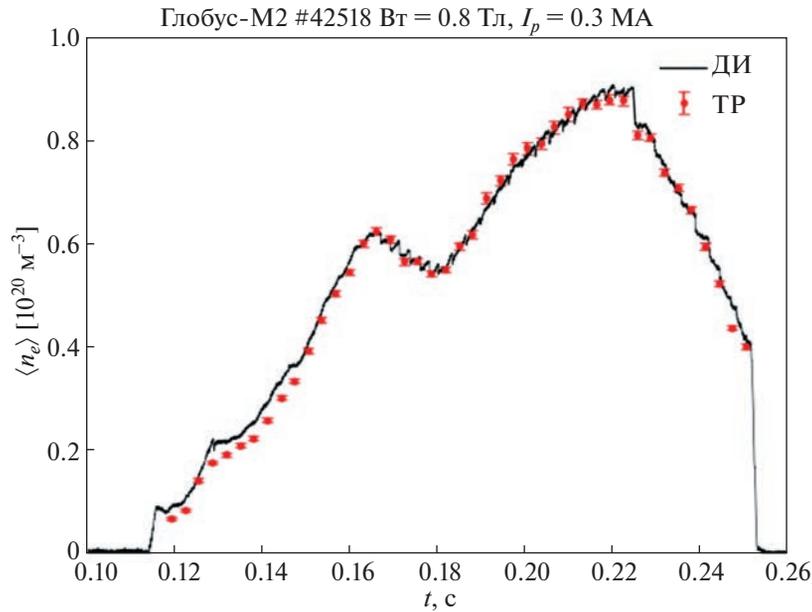


Рис. 13. Пример измерений электронной концентрации в разряде #42518 токамака Глобус-М2, проведенных ДИ (черная линия) и диагностикой томсоновского рассеяния (красные точки).

менять в пределах от 18 до 26 ГГц между разрядами токамака. Вторая система зондирует плазму одновременно на четырех частотах 20, 29, 39, 48 ГГц. Третья система работает на пяти частотах 50, 55, 60, 65, 70 ГГц. Диапазон частот рефлектометра соответствует интервалу нормализованных малых радиусов $\rho = 0.5-1.1$ в зависимости от условий эксперимента.

В первой и второй системах применяется метод двойного гомодинного приема обратного рассеяния. Работа этой схемы детально описана в работе [25].

Для третьей системы используется множитель частот излучения задающего генератора с частотой излучения 5 ГГц и применяется гетеродинное детектирование. Более детально работа этой схемы описана в работе [26].

Диагностика доплеровского обратного рассеяния обладает рядом преимуществ. Она позволяет проводить измерения локально, так как обратное рассеяние происходит в основном в отсечке из-за усиления электрического поля микроволнового излучения в точке поворота лучевой траектории. Кроме того, методом ДОР возможно одновременно проводить измерения скорости и турбулентности. Данный метод подразумевает избирательность измерений по волновым векторам рассеивающих флуктуаций. Кроме того, данный метод относительно прост в применении и является многофункциональным. Также, антенная система ДОР, установленная на Глобус-М2, позволяет менять угол наклона, тем самым позволяет использовать стандартную рефлектометрию.

На токамаке Глобус-М2 методом ДОР был детально исследован процесс перехода в режим

Таблица 4. Плазменные процессы, исследуемые с помощью диагностики ДОР

Явление	Определенные характеристики
Турбулентность	Подавление турбулентности широм скорости, корреляционные длины турбулентных структур
Геодезическая акустическая мода (ГАМ)	Амплитуда колебаний электрического поля, локализация, степень нелинейного взаимодействия с турбулентностью
Колебания предельного цикла (LCO) Филаменты	Шир скорости при LCO, модуляция турбулентности, локализация Радиальный и полоидальный размер, расстояние между филаментами, скорость распространения, область развития, модовая структура
Альфеновские моды	Частота, амплитуда колебаний магнитного поля, локализация
Тиринг моды	Частота, локализация

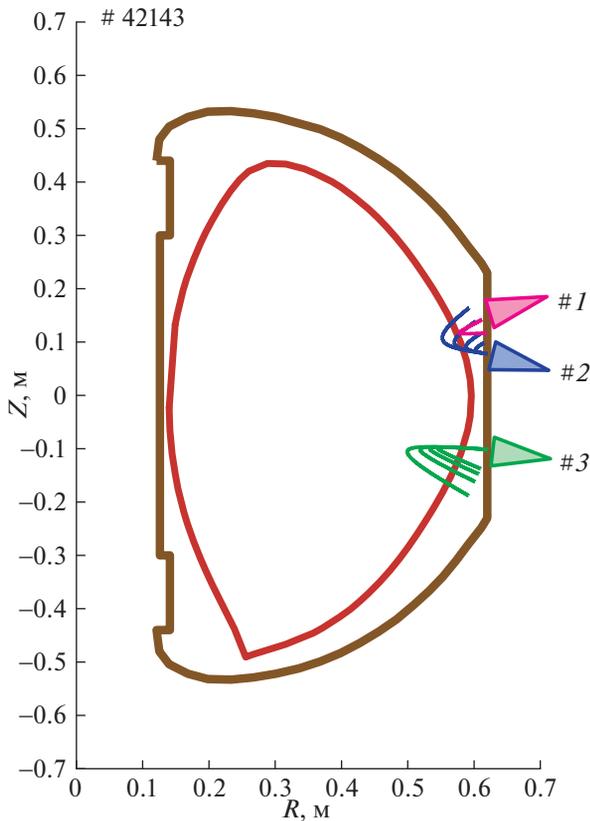


Рис. 14. Результаты расчета лучевых траекторий для трёх систем ДОР.

улучшенного удержания [27]. Помимо этого, метод ДОР широко применялся для исследования плазменных процессов, приведенных в табл. 4 [28].

8. НЕЙТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА

Для регистрации нейтронных потоков токамак Глобус-М2 оснащен двумя компактными нейтронными спектрометрами на основе жидкого органического сцинтиллятора ВС-501А, а также двумя ^{10}B коронными нейтронными счетчиками. Основным применением нейтронной диагностики является изучение удержания быстрых ионов, возникающих в процессе нагрева плазмы пучками атомов высокой энергии, а также оценка интегрального нейтронного выхода. Сигнал с нейтронных спектрометров оцифровывается с частотой 500 МГц, максимальная входная нагрузка $\sim 1 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$. Сигнал с нейтронных счетчиков оцифровывается с частотой 30 МГц, максимальная входная нагрузка $\sim 6 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$. Уровень сигнала на детекторах может регулироваться при помощи коллиматоров, изготовленных из свинца и полиэтилена. Расположение нейтронных детекторов в экспериментальном зале представлено на рис. 14. Подробно комплекс нейтронной диагностики токамака Глобус-М2 был рассмотрен в статье [29].

В плазме Глобуса-М2 нейтроны рождаются в процессах столкновения ионов высокой энергии

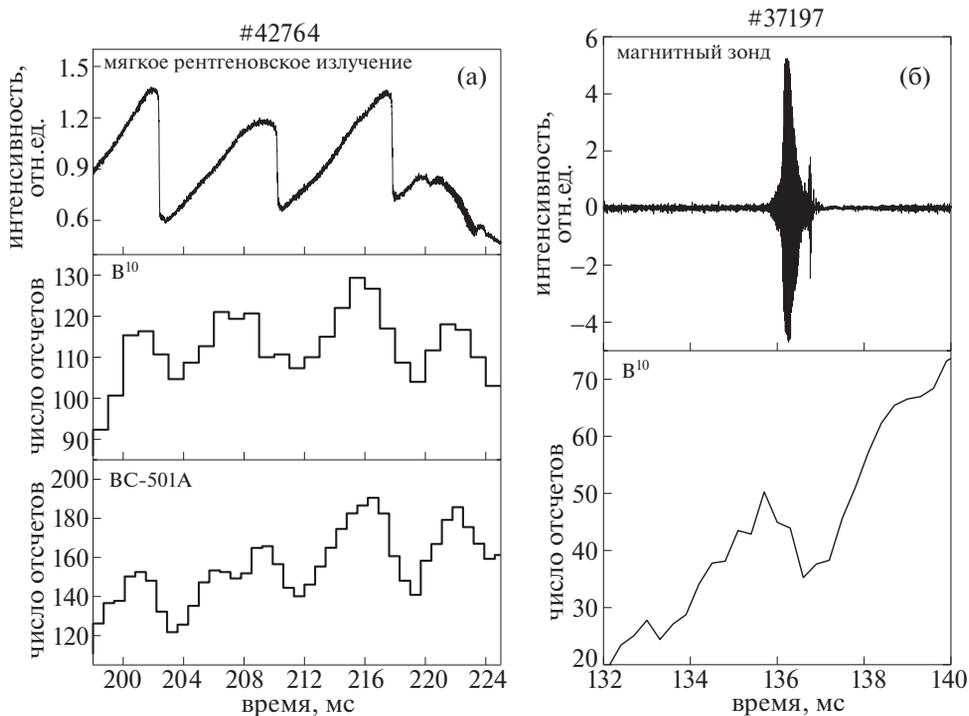


Рис. 15. Зависимость нейтронного потока от времени в разряде с пилообразными колебаниями (а), в разряде с ТАЕ (б).

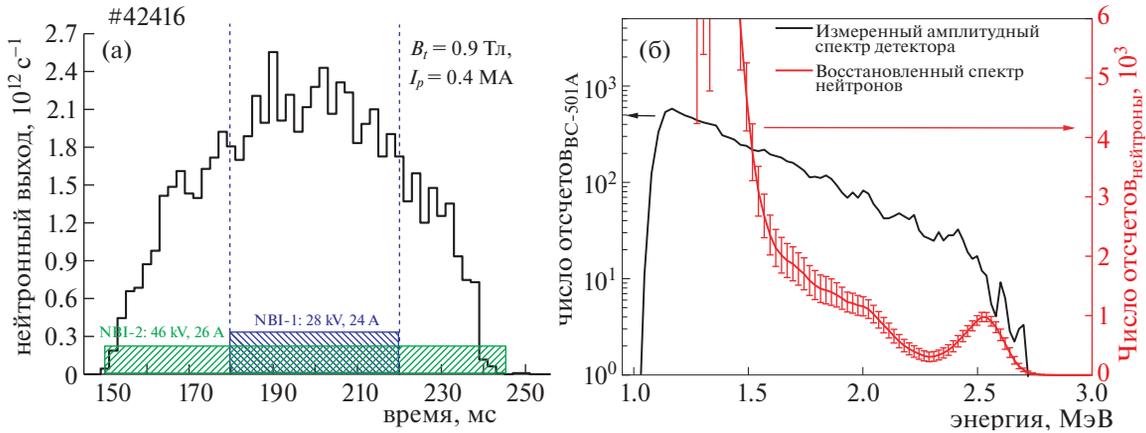


Рис. 16. Временная зависимость нейтронного выхода в разряде #42416 токамака Глобус-М2 (а), экспериментально измеренный спектр (черная линия) и восстановленный нейтронный спектр из плазмы токамака Глобус-М2 (красная линия) (б).

с тепловыми ионами основной плазмы, а также между собой. Таким образом, развитие в плазме процессов, приводящих к потере быстрых частиц или к их перераспределению в фазовом пространстве, будет вызывать изменение нейтронного потока. Пример реакции сигнала нейтронных детекторов на пилообразные колебания и тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ) представлен на рисунке рис. 15.

Для оценки интегрального нейтронного выхода из плазмы токамака нейтронные детекторы были абсолютно прокалиброваны в условиях экспериментального зала установки [30]. Пример эволюции интегрального нейтронного выхода в одном из разрядов токамака Глобус-М2 представлен на рис. 16а. Для вычисления энергетического спектра испускаемых плазмой нейтронов на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе были измерены функции отклика нейтронных спектрометров ВС-501А [31]. На их основании была проведена процедура деконволюции экспериментально измеряемых спектров [32]. Пример восстановленного энергетического спектра испускаемых нейтронов представлен на рис. 16б.

В настоящее время в дополнение к описанным в данном разделе нейтронным детекторам в эксплуатацию вводятся еще два He^3 пропорциональных нейтронных счетчика.

9. ДИАГНОСТИКА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для изучения сигналов жесткого рентгеновского излучения токамак оснащен двумя абсолютно калиброванными сцинтилляционными спектрометрами на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ [33]. Измерения проводятся в диапазоне энергий гамма-квантов 0.1–16 МэВ с частотой оцифровки

регистрируемого сигнала 250 МГц при максимальной входной статистической загрузке $\sim 3 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$. Измеряемые спектры могут быть использованы для изучения поведения убегающих электронов. Пример эволюции сигнала жесткого рентгеновского излучения во время омического разряда с низкой плотностью ($\langle n_e \rangle = 1.7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) представлен на рис. 17а. На рис. 17б приведен энергетический спектр регистрируемых в этом же разряде гамма-квантов.

Для контроля уровня жесткого рентгеновского излучения во время разряда токамак так же оснащен сцинтилляционным детектором на основе кристалла $\text{NaI}(\text{Tl})$, работающим в токовом режиме.

10. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Комплекс спектроскопических диагностик на токамаке Глобус-М2 используется для получения данных о поведении примесей в плазме на основе измерений интенсивности излучения в диапазоне от 0.02 до 1200 нм. В состав комплекса входит диагностика среднехордового эффективного заряда $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$, диагностика отдельных линий примесных элементов, обзорный спектрометр, монохроматоры для многоракурсных измерений интенсивности излучения на линии $\text{D}_\alpha/\text{H}_\alpha$ и кремниевые фотодиоды (SPD) для измерений мощности излучения в широком диапазоне 0.02–1100 нм.

Среднехордовое значение эффективного заряда $\langle Z_{\text{eff}} \rangle$ определяется по интенсивности тормозного излучения одновременно в двух спектральных интервалах 1019–1040 и 630–640 нм, где отсутствует интенсивное линейчатое излучение

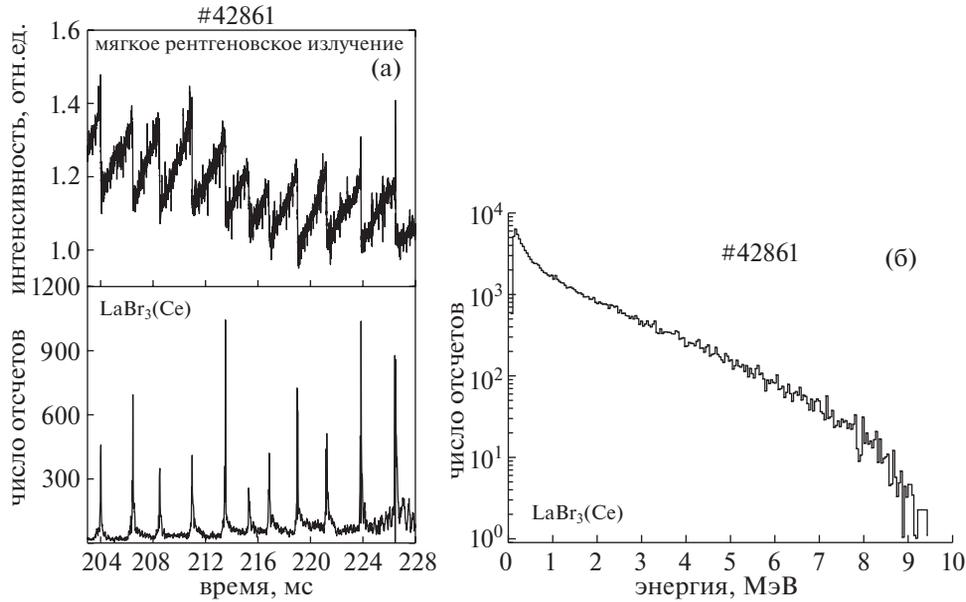


Рис. 17. Разряд #42861: временная зависимость сигнала жесткого рентгеновского излучения во время омического разряда токамака Глобус-М2 (а), экспериментально измеренный энергетический спектр жёсткого рентгеновского излучения (б).

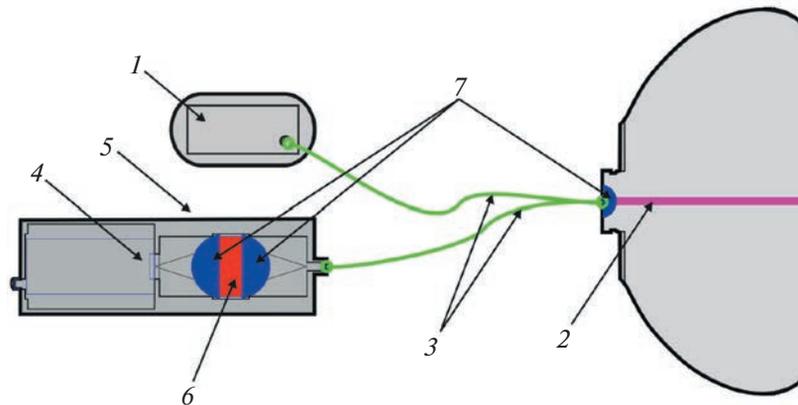


Рис. 18. Схема регистрации интенсивности излучения фильтровыми монохроматорами и обзорным спектрометром: 1 – обзорный спектрометр, 2 – область наблюдения, 3 – оптическое волокно, 4 – детектор, 5 – коллиматор, 6 – интерференционный фильтр, 7 – собирающие линзы.

(рекомбинационное излучение в условиях измерений пренебрежимо мало). Мощность тормозного излучения P_{br} измеряется вдоль одной хорды наблюдения в экваториальном сечении токамака Глобус-М2 [34]. Для расчета $\langle Z_{eff} \rangle$ по P_{br} используются профили $T_e(R)$ и $n_e(R)$, полученные с помощью диагностики томсоновского рассеяния (ТР) [12] и переведенные в потоковые координаты с использованием 0-мерной модели [13], а также данные магнитной реконструкции методом токовых колец [7]. Мощность тормозного излучения измеряется в мониторинг режиме (данные в

общем доступе обновляются после каждого разряда), величину $\langle Z_{eff} \rangle$ можно рассчитать в течение нескольких минут, как только будут получены профили $T_e(R)$ и $n_e(R)$ и магнитная реконструкция. Временное разрешение определяется частотой следования лазерных импульсов диагностики ТР 330 Гц и обеспечивает измерения $\langle Z_{eff} \rangle$ с шагом 3.03 мс.

С помощью шести фильтровых монохроматоров, настроенных на отдельные спектральные линии, производится контроль поступления каждого из основных примесных элементов С, О, Fe, N,

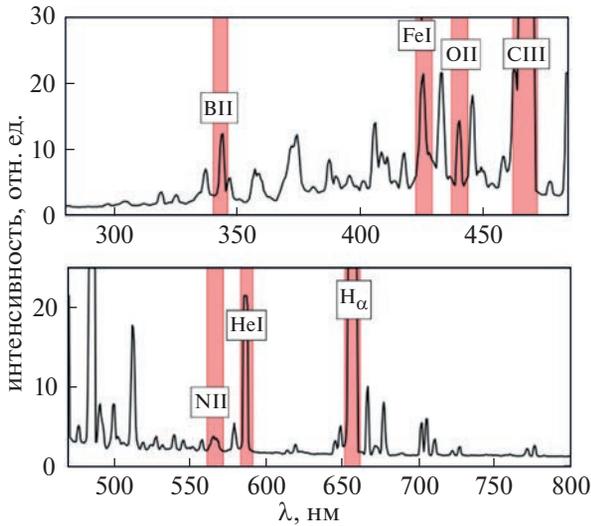


Рис. 19. Спектр излучения, измеренный с помощью обзорного спектрометра с указанными спектральными промежутками, в которых регистрируются примесные линии фильтровыми монохроматорами.

В и He в плазму. Система сбора данных позволяет записывать сигналы монохроматоров в течение всего разряда с частотой оцифровки до 1 МГц в мониторингном режиме. Излучение на линиях примесей регистрируется в объеме наблюдения диаметром около 5 мм вдоль хорды наблюдения в экваториальной плоскости токамака (рис. 18). В особых случаях, например, при напуске примеси в область дивертора, может быть изменен ракурс наблюдения монохроматоров.

Так же доступны измерения обзорных спектров излучения в диапазоне 200–1100 нм системой на базе спектрометра Avantes AvaSpec-ULS2048 (см. рис. 1). Регистрация спектров может производиться каждые 1.05 мс. Время интегрирования может быть увеличено для детального рассмотрения более слабых линий. Обзорные спектры регистрируются также в мониторингном режиме и доступны после каждого разряда. На рис. 19 приведен характерный вид спектра излучения, измеренного с помощью обзорного спектрометра, с указанными спектральными промежутками, в которых регистрируются примесные линии фильтровыми монохроматорами.

Измерения интенсивности излучения линии $D\alpha/H\alpha$ на длине волны 656 нм осуществляются с использованием пяти фильтровых монохроматоров в пяти различных ракурсах наблюдения: две хорды ориентированы на верхний и нижний купол камеры, две вертикальные хорды проходят через большой радиус $R = 42$ и 50 см, и одна хорда ориентирована по направлению большого радиуса на столб. Измерения также производятся в мониторингном режиме.

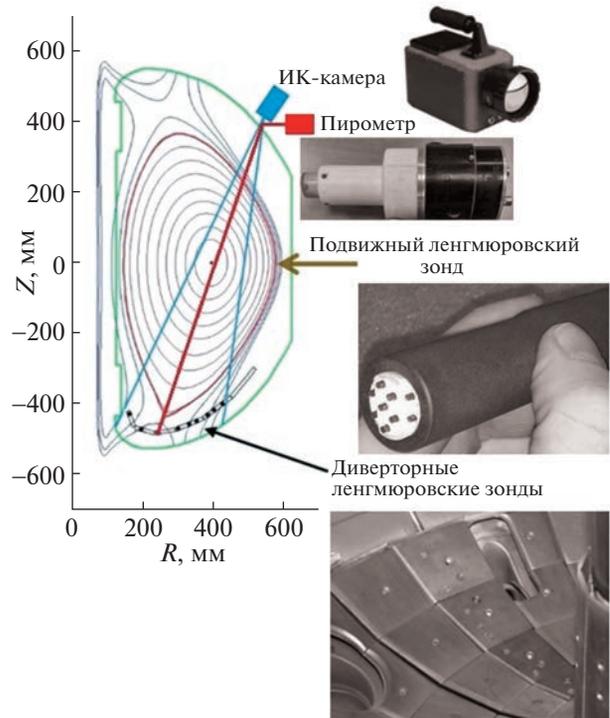


Рис. 20. Диагностики SOL на токамаке Глобус-М2.

Для измерения мощности излучения плазмы на токамаке применяются SPD-фотодиоды [35], которые позволяют производить измерения в широком спектральном диапазоне 1 эВ–60 кэВ с временным разрешением до 1 мкс. Используемые фотодиоды могут быть чувствительны как к излучению, так и к частицам [36]. В настоящее время доступны измерения по трем ракурсам. Один обзорный прибор с линией наблюдения, направленной тангенциально к плазменному шнуру, с широким углом сбора излучения. Два коллимированных датчика имеют линии наблюдения, направленные вдоль большого радиуса и тангенциально, в периферийной области.

11. ДИАГНОСТИКИ ОБЛАСТИ SOL

На токамаке Глобус-М2 имеется ряд диагностик, предназначенных для исследований плазмы в области пограничного слоя, между сепаратрисой и стенкой (SOL). Их расположение показано на рис. 20.

Подвижный ленгмюровский зонд [37], расположен в экваториальной плоскости со стороны слабого магнитного поля и оснащен головкой с девятью графитовыми электродами в изоляторе из нитрида бора. Зонд позволяет измерять плавающий потенциал (V_f), ионный ток (I_{sat}) насыщения, электронную концентрацию (n_e) и температуру (T_e), а также число Маха ($M_{||}$). Зондовая го-

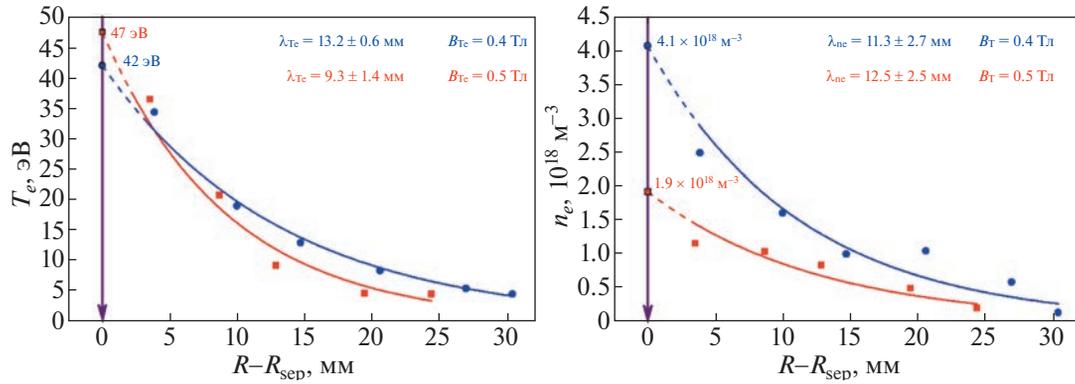


Рис. 21. Профили температуры и концентрации, полученные с помощью подвижного зонда.

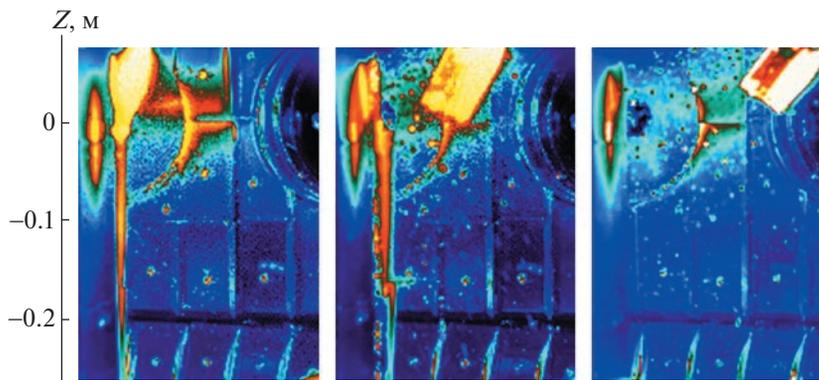


Рис. 22. Отрыв защитной графитовой пластины, зафиксированный с помощью тепловизора в разряде #42422.

ловка помещена в защитный графитовый экран. Приводом зонда выступает линейный магнитный манипулятор, позволяющий менять положение зонда по малому радиусу от разряда к разряду (что использовалось для получения профилей измеряемых параметров), а также обеспечивающий вращение головки на 360° вокруг продольной оси. На рис. 21 приведен пример профилей электронной температуры и концентрации, измеренных с помощью подвижного зонда. По профилям определяются характерные длины спада температуры (λ_{Te}) и концентрации (λ_{ne}) для сравнения со скейлингами.

ИК-камера (тепловизор) [10] расположена на верхнем куполе вакуумной камеры на расстоянии 1.3 м от нижних диверторных пластин, на которые она направлена. ИК-детектор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ обеспечивает работу в диапазоне длин волн 3.5–4.7 мкм, размер кадра 320×256 пикселей в полном кадровом режиме, что соответствует пространственному разрешению ~ 1.6 мм/пиксель с частотой ~ 220 Гц. Данная диагностика позволяет измерять эволюцию температуры поверхности диверторных пластин, и по полученным данным

восстанавливать плотность теплового потока. В некоторых экспериментах камера устанавливалась в экваториальной плоскости для наблюдения нагрева стенки камеры на внешнем обходе. На рис. 22 приведен аварийный случай, заснятый камерой, когда во время разряда оторвалась защитная графитовая пластина с центрального столба (слева на рисунке) и полетела к внешней стенке. Три фазы ее полета видны на рисунке.

Наряду с ИК-камерой для измерений температуры стенки применяется ИК-пирометр. Он позволяет проводить измерения интенсивности теплового излучения в диапазоне температур 100–3500°C с временным разрешением 2 мкс. Отличается от тепловизора более высоким временным разрешением. Совместное использование пирометра и тепловизора позволяет регистрировать как пространственное распределение, так и динамику абсолютного значения температуры поверхности. Подробнее об устройстве ИК-пирометра можно узнать из работы [38].

В нижние диверторные пластины вмонтирован набор из десяти ленгмюровских зондов [39]. Зонды изготовлены из той же марки графита

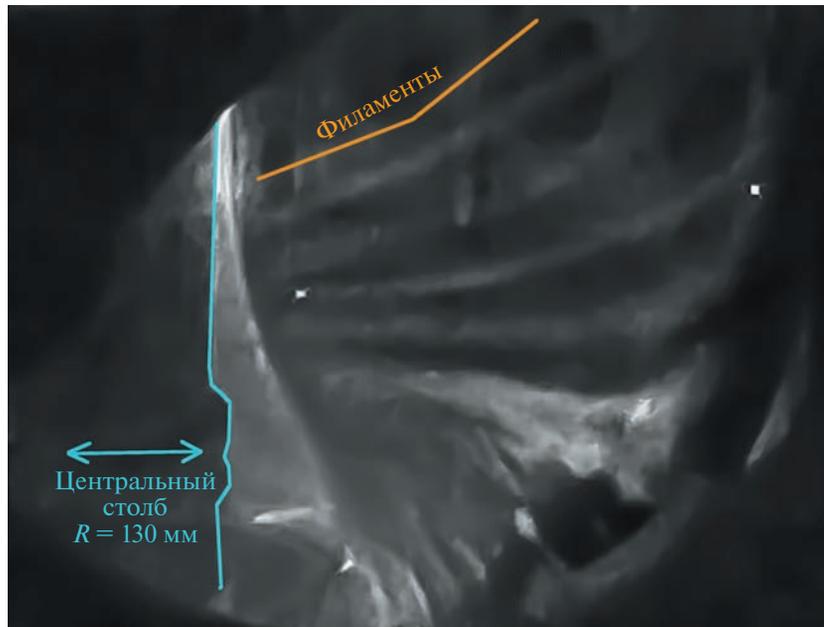


Рис. 23. Постобработанный кадр высокоскоростной камеры из разряда #29874 демонстрирующий филаментарную структуру, возникающую при развитии краевой неустойчивости (ELM).

РГТ-91, что и пластины, и имеют плоскую рабочую поверхность, расстояние между ними в среднем равно 2 см. Диаметр зондов составляет 8 мм, зазор между пластиной и зондом 0.5 мм, изоляция от диверторных пластин осуществляется с помощью керамических колец. Для данного массива зондов разработана система регистрации способная работать в трех режимах: измерение ионного тока насыщения, измерение плавающего потенциала зондов и запись зондовой вольт-амперной характеристики.

12. ФОЛЬГОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектрометр предназначен для непрерывного измерения мягкого рентгеновского излучения (SXR) из центра плазмы токамака. Наличие четырех каналов с фольгами бериллия различной толщины (15, 50, 80 и 127 мкм) позволяет использовать полученные данные для определения центральной электронной температуры с временным разрешением 3 мкс. Однако, температура электронов, определенная классическим “методом фольг” [40] по соотношению сигналов в разных каналах во многих случаях сильно отличается от измеренной диагностикой томсоновского рассеяния. Это происходит, по-видимому, из-за значительного вклада линейчатого излучения в сигналы SXR. Для улучшения ситуации был применен метод машинного обучения (МО) [41]. Обучающие данные включали в себя результаты измерения интенсивности потока мягкого и

жесткого рентгеновского излучения, а также излучения углеродной примеси на линии СIII. В качестве ответов для обучения с учителем использовались данные центральной температуры электронов, полученные диагностикой томсоновского рассеяния. В результате, с использованием МО по сигналам SXR удается определять температуру электронов с точностью 18%. В нашем случае метод применим для определения T_e в диапазоне значений от ~ 300 эВ до значений ~ 1200 эВ. Для измерения больших температур электронов необходимо расширить спектральный диапазон диагностики SXR и провести цикл обучения с использованием новых данных.

13. ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИДЕОКАМЕРА

Для визуализации процессов в плазме токамака Глобус-М2 используется высокоскоростная камера Optronis, позволяющая производить видеосъемку со скоростью от 540 кадров/с при разрешении 1696×1710 до 100000 кадров/с при разрешении 96×38 на протяжении всего разряда. Время непрерывной записи при 8 Гб памяти – 5.5 с. Камера используется для наблюдения границы плазмы и сравнения данных видеосъемки плазмы с реконструкцией крайней магнитной поверхности, получаемой из магнитных измерений с помощью кодов равновесия. Кроме того, камера используется для наблюдения внешнего воздействия на плазму, такого как газонапуск, проникновение струи от плазменной пушки и пылевых частиц. Так же была исследована воз-

возможность использования высокоскоростной видеосъемки в диапазоне видимого излучения для анализа структуры пилинг – баллонной моды во время развития и срыва краевых МГД неустойчивостей. На рис. 23 приведен кадр видеокамеры, полученный после специальной обработки. Скорость съемки составляла 1000 кадров/с, время экспозиции – 300 мкс. Для увеличения контрастности филаментов производилось вычитание фонового сигнала и домножение значений интенсивностей пикселей на постоянную величину. Кадр наглядно демонстрирует развитие краевой неустойчивости синхронизированной с перезарядкой [42]. Частота кадров съемки в 2.5 раза превышала частоту перезарядок, поэтому было возможно вычитание фона путем вычитания предыдущего кадра.

14. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностический комплекс токамака Глобус-М2 на настоящий момент представляет собой обширный набор диагностик различного плана, взаимно дополняющих друг друга. Часть диагностик обеспечивает мониторинг основных характеристик плазменного разряда, позволяя экспериментатору в ходе эксперимента следить за воспроизводимостью разряда или контролируемо изменять интересующие его параметры. Продвинутое диагностическое оборудование обеспечивает измерения радиальных профилей таких величин как электронная и ионная температура, плотность плазмы, скорость вращения, эффективный заряд, излучение в видимом и мягком рентгеновском диапазоне. Данные некоторых диагностик требуют дополнительной обработки. Результаты измерений используются для моделирования транспортных процессов. Ряд диагностик предоставляет данные об удержании и потерях быстрых частиц, возникающих при использовании методов дополнительного нагрева плазмы.

Диагностический комплекс токамака постоянно совершенствуется. Это происходит как путем развития имеющихся диагностик, так и создания новых. Так, в диагностике томсоновского рассеяния увеличивается число пространственных точек на профиле, в диагностике CXRS появляется второй ракурс наблюдения, ориентированный на работу с пучком нового инжектора. Планируется установка SXR камеры-обскуры с наблюдением в двух ракурсах в одном полоидальном сечении, что обеспечит томографические измерения.

Разработка диагностики томсоновского рассеяния дивертора токамака Глобус-М2 и проведение пилотных измерений электронной температуры (раздел 3) выполнены за счет гранта РНФ (проект № 23-79-00033). Измерения с помощью лазерного интерферометра (раздел 6) выполнены

при поддержке гранта РНФ 21-79-20201. Работы по подготовке полоидально-разнесенных систем ДОР (раздел 7) для исследования филаментов выполнены за счет гранта РНФ № 23-72-00024, <https://rscf.ru/project/23-72-00024>. Исследование быстрых частиц анализатором атомов перезарядки (раздел 4) и нейтронной диагностики (раздел 8) были поддержаны исследовательским проектом РНФ № 21-72-20007. Разработка фольгового спектрометра (раздел 12) была поддержана в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023. Разработка диагностики активной спектроскопии перезарядки (раздел 5) поддержана в рамках государственного задания по контракту 0034-2021-0001. Эксперименты проведены на УНУ “Сферический токамак Глобус-М”, входящей в состав ФЦКП “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V., Varfolomeev V.I., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Brunkov P.N., Chernyshev F.V., Davydenko V.I., Dyachenko V.V., Kavin A.A., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Konovalov A.N., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Labusov A.N., Melnik A.D., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Shikhovtsev I.V., Sladkomeдова A.D., Solokha V.V., Tanchuk V.N., Telnova A.Y., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Y., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 1.
2. Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Sakharov N.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Minaev V.B., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goryainov V.Yu., Kavin A.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Krikunov S.V., Lobanov K.M., Melnik A.D., Novokhatski A.N., Filipov S.V., Zhiltsov N.S., Mineev A.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Solokha V.V., Shulyatiev K.D., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Y., Tkachenko E.E., Tukhmenova E.A., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Y., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yashin A.Yu., Solovev V.A., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. P. 10. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac881d>
3. D'yachenko V.V., Irzak M.A., Tregubova E.N., Shcherbinin O.N. // Technical Phys. 2003. V. 48. P. 1061.
4. Dyachenko V.V., Shcherbinin O.N., Gusakov E.Z., Gusev V.K., Irzak M.A., Kurskiev G.S., Petrov Yu.V., Saveliev A.N., Sakharov N.V., Khitrov S.A. // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 113001.
5. Kuceliev E.O. в этом выпуске
6. Galkin S.A., Ivanov A.A., Medvedev S.Yu., Poshekhnov Yu.Yu. // Nuclear Fusion. 1997. V. 37. P. 1455. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/37/10/111>
7. Vasiliev V.I., Kostsov Yu.A., Lobanov K.M., Makarova L.P., Mineev A.B., Gusev V.K., Levin R.G., Petrov Yu.V., Sakharov N.V. // Nuclear Fusion. 2006. V. 46. P. S625. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/8/S08>

8. Lao L.L., John H. St., Stambaugh R.D., Pfeiffer W. // Nuclear Fusion. 1985. V. 25. P. 1421.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/8/S08>
9. Yashin A.Yu., Ponomarenko A.M., Balachenkov I.M., Kurskiev G.S., Kiselev E.O., Minaev V.B., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Zhiltsov N.S. // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 3430.
<https://doi.org/10.3390/app13063430>
10. Petrov Yu.V., Gusev V.K., Sakharov N.V., Minaev V.B., Varfolomeev V.I., Dyachenko V.V., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Bondarchuk N.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Iliasova M.V., Kavin A.A., Khilkevitch E.M., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kononov A.N., Kornev V.A., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Miroshnikov I.V., Novokhatskii A.N., Zhiltsov N.S., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Shulyatiev K.D., Shchegolev P.B., Shevelev A.E., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tukhmeneva E.A., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Voronin A.V., Yashin A.Yu., Bagryansky P.A., Zhilin E.G., Goryainov V.Yu. // Nuclear Fusion. 2022. V. 62. P. 042009.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac27c7>
11. Балаченков И.М., Петров Ю.В., Гусев В.К., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Дьяченко В.В., Коновалов А.Н., Корепанов П.А., Крикунов С.В., Минаев В.Б., Патров М.И., Сахаров Н.В. // Письма ЖТФ. 2021. Т. 47. С. 17.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.12.51061.18730>
12. Курские Г.С., Жильцов Н.С., Коваль А.Н., Корнев А.Ф., Макаров А.М., Мухин Е.Е., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Соловей В.А., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю., Чернаков П.В. // Письма ЖТФ. 2021. Т. 47. № 24.
13. Курские Г.С., Сахаров Н.В., Щёголев П.Б., Бахарев Н.Н., Киселев Е.О., Авдеева Г.Ф., Гусев В.К., Ибляминова А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Токарев В.А. // ВАНТ. 2016. Т. 39. № 4.
14. Zhiltsov N.S., Kurskiev G.S., Tolstyakov S.Yu., Solovey V.A., Koval A.N., Aleksandrov S.E., Bazhenov A.N., Chernakov P.V., Filippov S.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kornev A.F., Krikunov S.V., Makarov A.M., Minaev V.B., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Schegolev P.B., Telnova A.Yu., Tkachenko E.E., Tokarev V.A., Varfolomeev V.I., Voronin A.V. // arXiv:2311.18723 [physics.plasm-ph],
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.18723>
15. Ермаков Н.В. в этом выпуске.
16. Izvozchikov A.B., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Chernyshev F.V., Shustov I.V. // Tech. Phys. 1992. V. 37. P. 201.
17. Chernyshev F.V., Afanasyev V.I., Dech A.V., Kick M., Kislakov A.I., Kozlovskii S.S., Kreter A., Mironov M.I., Petrov M.P., Petrov S.Ya. // Instrum. Exp. Tech. 2004. V. 47. С. 214.
18. Bakharev N.N., Melnik A.D., Chernyshev F.V. // Atoms. 2023. V. 11(3). P. 53.
<https://doi.org/10.3390/atoms11030053>
19. Bakharev N.N., Balachenkov I.M., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Nesenevich V.G., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tukhmeneva E.A., Varfolomeev V.I. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 125036.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac3497>
20. Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Larionova M.M., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tukhmeneva E.A., Varfolomeev V.I. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. V. 62. P. 125010.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/abbe32>
21. Koshkin Yu.S., Mukhin E.E., Razdobarin G.T., Semenov V.V., Shilnikov A. // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. P. 3844.
<https://doi.org/10.1063/1.1149999>
22. Иваненко С.В., Соломахин А.Л., Жильцов Н.С., Зубарев П.В., Коваленко Ю.В., Курские Г.С., Солоха В.В., Ткаченко Е.Е., Шулятьев К.Д., Пурыга Е.А., Хильченко А.Д., Минаев В.Б., Багрянский П.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2023. Т. 46. С. 86.
23. Иваненко С.В., Гринемайер К.А., Пурыга Е.А., Квашин А.Н., Багрянский П.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. С. 67.
24. Kurskiev G.S., Sakharov N.V., Schegolev P.B., Bakharev N.N., Kiselev E.O., Avdeeva G.F., Gusev V.K., Iblyaminova A.D., Minaev V.B., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Tokarev V.A. // Phys. Atomic Nuclei. 2017. V. 80. P. 1313.
25. Bulanin V.V., Yashin A.Y., Petrov A.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Y.V., Prisiazhniuk D.V., Varfolomeev V.I. // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. P. 033539.
<https://doi.org/10.1063/5.0030307>
26. Yashin A.Y., Bulanin V.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Petrov A.V., Petrov Y.V., Ponomarenko A.M., Varfolomeev V.I. // J. Instrumentation. 2022. V. 17. P. C01023.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/01/C01023>
27. Ponomarenko A., Yashin A., Kurskiev G., Minaev V., Petrov A., Petrov Y., Sakharov N., Zhiltsov N. // Sensors. 2023. V. 23. P. 830.
<https://doi.org/10.3390/s23020830>
28. Yashin A., Bulanin V., Petrov A., Ponomarenko A. // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 8975.
<https://doi.org/10.3390/app11198975>
29. Iliasova M.V., Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Bakharev N.N., Skrekel O.M., Minaev V.B., Doinikov D.N., Gin D.B., Gusev V.K., Kornev V.A., Naidenov V.O., Novokhatskii A.N., Petrov Yu.V., Polunovsky I.A., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Telnova A.Yu., Varfolomeev V.I. // Nuclear Inst. Methods Phys. Res. A. 2022. V. 1029. P. 166425.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166425>
30. Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Ильясова М.В., Тельнова А.Ю., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е. // ЖТФ. 2022. Т. 92. С. 32.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2022.01.51848.151-21>
31. Iliasova M.V., Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Chugunov I.N., Minaev V.B., Gin D.B., Doinikov D.N., Polunovsky I.A., Naidenov V.O., Kozlovskiy M.A., Kudoyarov N.F. // Nuclear Inst. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 983. P. 164590.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164590>

32. *Khilkevitch E.M., Shevelev A.E., Chugunov I.N., Iliaso-va M.V., Doinikov D.N., Gin D.B., Naidenov V.O., Polunovsky I.A.* // Nuclear Inst. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 977. P. 164309.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164309>
33. *Shevelev A.E., Chugunov I.N., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Rozhdestvenskii V.V., Mineev A.B., Sakharov N.V., Doinikov D.N., Izotov A.L., Krikunov S.V., Naidenov V.O., Podushnikova K.A., Polunovskii I.A., Gin D.B., Chugunov A.I.* // Plasma Phys. Reps. 2004. V. 30. P. 159.
<https://doi.org/10.1134/1.1648942>
34. *Tukhmenova E.A., Tolstyakov S.Yu., Kurskiev G.S., Gusev V.K., Minaev V.B., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Telnova A.Yu., Bakharev N.N., Shchegolev P.B., Kiselev E.O.* // Plasma Sci. Technol. 2019. V. 21. P. 105104.
<https://doi.org/10.1088/2058-6272/ab305f>
35. *Artyomov A.P., Baksh E.H., Tarasenko V.F., Fedunin A.V., Chaikovskiy S.A., Aruev P.N., Zabrodskii V.V., Petrenko M.V., Sobolev N.A., Suhanov V.L.* // Instrum. Exp. Tech. 2015. V. 58. P. 102.
<https://doi.org/10.1134/S0020441215010017>
36. *Забродский В.В., Белик В.П., Аруев П.Н., Бер Б.Я., Бобашев С.В., Петренко М.В., Суханов В.Л.* // Письма ЖТФ. 2012. Т. 38. С. 69.
37. *Tokarev V.A., Gusev V.K., Khromov N.A., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Varfolomeev V.I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1094. 012003.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012003>
38. *Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Капралов А.А., Токарев В.А., Сотникова Г.Ю.* // ЖТФ. 2023. Т. 93. С. 622.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2023.05.55456.262-22>
39. *Хромов Н.А., Векшина Е.О., Гусев В.К., Литуновский Н.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. С. 421.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.03.50518.227-20>
40. *Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Забродский В.В., Шерстнев Е.В., Корнев В.А., Аруев П.Н., Курскиев Г.С., Жубр Н.А., Тукачинский А.С.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. С. 1922.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51758.188-21>
41. *Ткаченко Е.Е., Курскиев Г.С., Жильцов Н.С., Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Киселёв Е.О., Щеголев П.Б.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2021. Т. 44. С. 52.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2021-44-3-52-62>
42. *Bulanin V.V., Kurskiev G.S., Solokha V.V., Yashin A.Yu., Zhiltsov N.S.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 12.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac36a4>