

УДК 533.9.082.74

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-M2

© 2024 г. А. Ю. Токарев^{a, *}, А. Ю. Яшин^a, А. М. Пономаренко^a, В. К. Гусев^b,
Н. С. Жильцов^b, Г. С. Курские^b, В. Б. Минаев^b, Ю. В. Петров^b, Н. В. Сахаров^b,
В. В. Солоха^{a, b}, В. А. Велижанин^a

^aСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

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

*e-mail: tokarev_ayu@spbstu.ru

Поступила в редакцию 25.02.2024г.

После доработки 05.04.2024г.

Принята к публикации 06.04.2024г.

Режим улучшенного удержания в токамаках (H-мода) характеризуется большими значениями градиента давления на периферии, что приводит к возникновению периферийных локализованных мод (ELM). Их изучением занимаются в том числе на сферическом токамаке Глобус-M2, где наблюдаются периферийные локализованные моды преимущественно в режимах с инжекцией быстрых нейтральных атомов. Одним из способов, позволяющих изучать ELM, является установленная на Глобус-M2 диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР). Она позволяет оценивать амплитуду флуктуаций плотности плазмы и измерять радиальное электрическое поле E_r . В данной работе исследуется влияние периферийных локализованных мод на E_r на радиусах $0.4 < \rho < 1.1$. Показано, что во время ELM электрическое поле увеличивается на всем интервале измерений. Это свидетельствует о распространении влияния периферийных мод и на внутренние области плазмы, что не согласуется с общими представлениями о периферийной локализации ELM, но подтверждено экспериментально не только на Глобус-M2. Кроме того, приведено сравнение результатов режима ELM с колебаниями предельного цикла (LCO) и показано, что во время LCO не наблюдается подобного эффекта.

Ключевые слова: токамак, доплеровское обратное рассеяние, периферийные локализованные моды

DOI: 10.31857/S0367292124050014, **EDN:** PXNTYR

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной режим работы токамаков в настоящее время — режим улучшенного удержания, или H-мода [1], характеризуется большими значениями градиента давления на периферии, что является причиной возникновения различных неустойчивостей, в частности периферийных локализованных мод (ELM) [2–5]. Они приводят к импульсным выбросам частиц и энергии из области удержания на первую стенку и пластины дивертора, что может привести к повреждению установки. Однако у данного явления есть и положительная сторона. Считается, что благодаря ELM происходит очищение плазмы от примесей и регулирование уровня плотности, что, в конечном счете, позволяет поддерживать стационарный плазменный разряд [6]. В связи с этим изучение возникновения и развития ELM является важной и актуальной задачей в настоящее время.

Для описания ELM используется модель пилинг-баллонной (ПБ) моды, выделяющая две причины их возникновения: градиент давления со стороны слабого магнитного поля (баллонная мода) и ток, протекающий вблизи сепаратрисы (пилинг-мода) [7]. Краевые неустойчивости могут быть классифицированы на более чем 5 типов, однако наиболее распространенными являются типы I, II и III [8]. Тип I считается следствием развития пилинг-баллонной неустойчивости [9] и характеризуется наибольшей разовой потерей энергии в сравнении с другими типами. Тип II относится к баллонной ветви и имеет большую частоту следования и меньшее влияние на удержание плазмы. Краевые неустойчивости типа III относятся к пилинг-моду, развиваются при более низких значениях давления в пьедестале и приводят к меньшим потерям энергии. На большинстве токамаков с большим аспектным отношением наблюдаются ELM I и III, а также нескольких

других типов. На сферических же токамаках наиболее распространены ELM III типа, которые иногда дополнительно разделяют на ELM III, IV и V типа [2, 10]. Единственным сферическим токамаком с наблюдаемыми ELM I типа является MAST [11]. Предположительно, это связано с возникновением микротиринговых мод, которые приводят к дополнительному охлаждению электронов и, соответственно, недостаточному для дестабилизации ELM I типа градиенту давления [12].

Изучением возникновения и развития ELM занимаются в том числе на сферическом токамаке Глобус-М2 [13]. На Глобус-М2 наблюдаются разные типы периферийных локализованных мод: некоторые из них синхронизованы с пилообразными колебаниями, происходящими внутри зоны перемешивания в области $q = 1$ [14]. Однако наибольший интерес представляют десинхронизованные ELM, происходящие самопроизвольно в H-моде токамака Глобус-М2 [15]. Предположительно они относятся к типу III или V и аналогичны модам на NSTX [16], но для полного понимания их структуры требуется дальнейшее исследование.

В целом присутствие ELM можно обнаруживать многими методами — с самого начала исследований для этого используются ленгмюровские зонды и измеряется излучение на линии D_α , так как потоки частиц и энергии из плазмы обнаруживаются данными диагностиками проще всего. Однако они обладают одним важным недостатком — исследуются уже последствия ELM, но не причины и процесс развития. Эти процессы происходят внутри области удержания, сведения о которых возможно получить только ограниченным набором инструментов, основанных на косвенном определении параметров плазмы. Один из таких инструментов — диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР), установленная в том числе на сферическом токамаке Глобус-М2 [17, 18]. Эта диагностика успешно применялась на установке Глобус-М2 для исследования радиального электрического поля, влияние которого наиболее сильно проявляется в таких плазменных процессах, как переход в режим улучшенного удержания (H-мода) [19], режим улучшенного удержания без ELM (ELM-free H-mode) [20], а также таких плазменных колебательных процессах, как колебания предельного цикла (LCO) [21, 22], геодезические акустические моды [23, 24], альфеновские моды [25, 26], квазикогерентные моды [27], тиринг-моды [28], филаменты [29], которые, как показывает полноволновое моделирование [30, 31], могут существенно влиять на

спектры сигналов доплеровского обратного рассеяния, и другие процессы [32]. Кроме того, ДОР позволяет оценивать уровень мелкомасштабной турбулентности внутри области удержания, ответственной за увеличение потоков энергии и частиц из плазмы. В частности, ДОР может использоваться для исследования периферийных локализованных мод, так как и радиальное электрическое поле E_r , и турбулентность сильно меняются во время их возникновения [33].

Хотя диагностика ДОР обладает многими преимуществами (хорошее пространственное и временное разрешение), до настоящего момента не было опубликовано экспериментальных результатов по ее использованию для исследования профиля радиального электрического поля во время периферийных локализованных мод. Первые подобные исследования были проведены на токамаке ASDEX Upgrade [34] и на сферическом токамаке Глобус-М2. Именно использованию ДОР на токамаке Глобус-М2 для изучения профиля радиального электрического поля во время ELM и посвящена данная публикация.

Статья организована следующим образом. Сначала представлены условия эксперимента, проводимого на сферическом токамаке Глобус-М2. Затем дано краткое описание диагностики доплеровского обратного рассеяния как метода исследования плазмы, а также показана реализация данной диагностики на Глобус-М2. Далее идет раздел с представлением результатов, полученных с помощью ДОР во время разрядов с ELM. Приводятся данные диагностики излучения D_α и соответствующий профиль радиального электрического поля, полученный методом ДОР. Производится сравнение со случаем колебаний предельного цикла, также обнаруженных на Глобус-М2. В заключении суммируются все результаты, полученные при выполнении данной работы.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

На сферическом токамаке Глобус-М2 (большой радиус $R=0.36$ м, малый радиус $a=0.24$ м, аспектное отношение $R/a=1.5$) после модернизации относительно версии Глобус-М значительно возросли максимально достижимые значения тороидального магнитного поля до $B_T=1$ Т и тока по плазме до $I_p=0.5$ МА [35]. Треугольность и вытянутость плазменного шнура могут достигать величины 0.5 и 2.2 соответственно. В результате значительно возросло качество удержания и параметры плазмы. В анализируемых разрядах благодаря использованию двух

инжекторов атомарного пучка (NBI) мощностью до 2 МВт в сумме [36] происходит переход плазмы в режим улучшенного удержания и наблюдается увеличение средней концентрации электронов до $\langle n_e \rangle \sim (0.5 - 1) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, температуры электронов в центре до $T_e \sim 1.2 - 1.4 \text{ кэВ}$ [37].

Именно в H-моде, в разрядах со значениями тока $I_p \geq 420 \text{ кА}$ и магнитного поля $B_T > 0.7 \text{ Тл}$, и начинают наблюдаться десинхронизованные периферийные локализованные моды. На рис. 1 приведены параметры характерного разряда #41226 с обоими типами ELM: синхронизованными и десинхронизованными. Плазма находится в режиме улучшенного удержания с дополнительным нагревом NBI и электронной плотностью, показанной на рис. 1а. На рис. 1б изображен сигнал диагностики мягкого рентгена (SXR), на котором четко видны пилообразные колебания, о которых шла речь во введении и которые на токамаке Глобус-М2 приводят к появлению синхронизованных ELM. На рис. 1в приведен сигнал диагностики излучения D_α , благодаря которой возможно обнаруживать появление периферийных локализованных мод, что и наблюдается на данном рисунке. Небольшие вспышки на сигнале D_α во время роста уровня SXR представляют собой маркеры появления десинхронизованных ELM. Резкий рост излучения D_α одновременно с резким падением уровня SXR свидетельствует о появлении синхронизованных ELM, которые не будут рассмотрены в рамках текущей статьи, но представляют отдельный интерес.

Метод обнаружения периферийных мод на токамаке Глобус-М2 с помощью излучения D_α является простым и наглядным, но имеет некоторые недо-

статки. Во-первых, с помощью него нельзя точно определить, что за явление в плазме вызвало поток частиц, который регистрируется данной диагностикой. Кроме того, нельзя ничего сказать о зарождении и развитии ELM, так как обнаруживается лишь следствие срыва. В связи с этим еще на первой версии токамака Глобус-М была установлена диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР), хорошо зарекомендовавшая себя на многих токамаках мира. Эта диагностика основана на изучении электромагнитного излучения, рассеянного в обратном направлении на флуктуациях плотности. Из-за вытянутости данных флуктуаций вдоль линий полного магнитного поля они в первом приближении представляют собой дифракционную решетку, причем движущуюся в перпендикулярном магнитному полю направлении. В линейном приближении амплитуда рассеянного излучения прямо пропорциональна величине флуктуаций плотности. Фаза содержит в себе доплеровский сдвиг из-за полоидального вращения флуктуаций, благодаря которому можно найти скорость вращения плазмы. Измеренная скорость содержит в себе сумму скорости дрейфа плазмы в скрещенных полях и фазовой скорости распространения флуктуаций, которой зачастую можно пренебречь. Кроме того, благодаря использованию многочастотного зондирования можно получить радиальную зависимость параметров флуктуаций плотности и построить профиль скорости полоидального вращения плазмы.

На Глобус-М2 установлено большое количество разнообразных диагностик для измерения параметров плазмы, в частности два многочастотных рефлектометра с несколькими наклоненными антеннами для использования в режиме ДОР. Они расположены в экваториальной плоскости со стороны слабого магнитного поля. Первый позволяет зондировать плазму на четырех частотах: 20, 29, 39 и 48 ГГц, что соответствует периферийной области $0.8 < \rho < 1.1$ (соответствующие $n_e \approx (0.5 - 2.9) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). Второй рефлектометр использует шесть частотных каналов: 50–70 ГГц с шагом 5 ГГц, что позволяет исследовать внутренние плазменные области $0.4 < \rho < 0.8$ (соответствующие $n_e \approx (3.1 - 6.1) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$). Благодаря одновременному использованию нескольких антенн и частот возможны наблюдения в разных областях плазменного шнура, что сильно улучшает исследование плазмы методом ДОР.

Для определения локализации измерений и волновых векторов рассеивающих флуктуаций проводится расчет лучевых траекторий в трехмерной геометрии сферического токамака Глобус-М2 и с па-

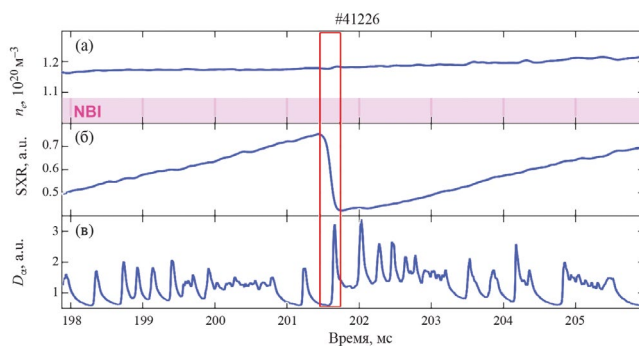


Рис. 1. Осциллограммы разряда #41226: средняя электронная концентрация (а), сигнал диагностики мягкого рентгена (SXR) (б), сигнал диагностики излучения D_α (в). В данном разряде поддерживались значения тока по плазме $I_p \approx 420 \text{ кА}$, магнитного поля $B_T \approx 0.8 \text{ Тл}$. Красным прямоугольником выделена вспышка синхронизованного с пилообразными колебаниями ELM.

раметрами плазмы, соответствующими конкретному разряду. Используется усредненный по периоду разряда с ELM профиль плотности, полученный с помощью диагностики Томсоновского рассеяния. Результаты данного расчета для исследуемого разряда #41226 можно увидеть на рис. 2. Зеленым цветом изображена вакуумная камера токамака, красным — сепаратриса, синим — ход лучей для шести-частотного рефлектометра (только 4 частоты: 50, 55, 60, 65 ГГц), фиолетовым — для четырехчастотного.

Результатом работы системы ДОР на Глобус-М2 являются оцифрованные сигналы в 10 каналах с разными частотами дискретизации, у каждого канала 2 сигнала — I и Q — исходный и смещенный по фазе на $\pi/2$. При обработке информации отдельные сигналы сразу преобразуются в комплексные каналы [38]. Их амплитуда пропорциональна величине амплитуды флуктуаций, на которых происходило рассеяние. Фаза позволяет определить доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала. Ее производная пропорциональна скорости вращения плазмы. Та-

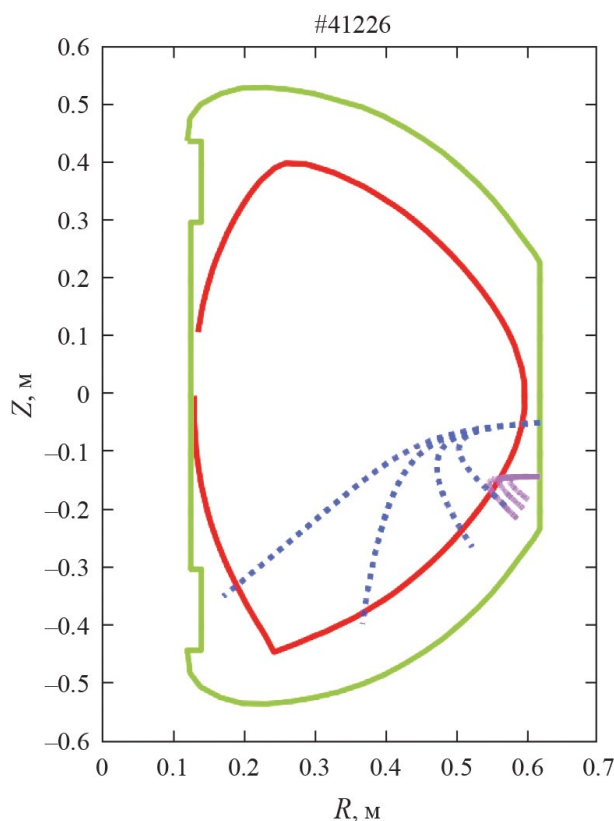


Рис. 2. Результаты расчета лучевых траекторий для разряда #41226. Зеленым цветом изображена вакуумная камера токамака, красным — сепаратриса. Приведен ход лучей используемых в разряде частот: 20, 29, 39 ГГц для четырехчастотного рефлектометра (показан сплошной фиолетовой линией); 50, 55, 60, 65 ГГц для шестичастотного рефлектометра (показан штриховой синей линией).

ким образом, можно получить временную зависимость скорости вращения и величины амплитуды флуктуаций. Преобразованием скорости можно получить значение радиального электрического поля в приближении малости фазовой скорости вращения плазменных флуктуаций [39]. Спектральный анализ также применим для исследования комплексных IQ сигналов. Усредненное значение доплеровского частотного сдвига определяется как центр тяжести спектра комплексного сигнала ДОР.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа был выбран характерный разряд #41226 с десинхронизованными ELM типа III или V [15]. Данные диагностики излучения D_α во время всплеск десинхронизованных ELM, а также обработанные сигналы ДОР приведены на рис. 3. На сигнале диагностики D_α (рис. 3а) заметны квазипериодические возмущения с периодом $T \approx 200\text{--}250$ мкс, соответствующие срыву ELM. Ниже изображена амплитуда сигнала с канала 50 ГГц ДОР (рис. 3б) и его производная фазы, она же доплеровский сдвиг (рис. 3в). Данный канал соответствует положению отсечки зондирующего излучения на радиусе $\rho \approx 0.8$ и концентрации в отсечке $n_e \approx 3.1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Представленный на рис. 3 временной интервал выбран из-за его характерности для детектирования ELM методом ДОР. Модуль принятого сигнала начинает возрастать за несколько десятков мкс перед всплеском на D_α и в максимуме увеличивается в 1.5–2 раза относительно начального значения. Такое увеличение амплитуды сигнала ДОР соответствует увеличению амплитуды флуктуаций плотности, сильнее рассеивающих зондирующий сигнал. Это соответствует представлению о том, что перед срывом ELM увеличиваются периферийные градиенты давления плазмы и, соответственно, возрастают флуктуации концентрации электронов. Однако одновременно с этим возмущения заметны и на производной фазы, которая пропорциональна поперечной скорости вращения плазмы, а значит, и радиальному электрическому полю. Как видно из рис. 3в, между всплесками доплеровский сдвиг сигнала ДОР, а следовательно, и скорость поперечного вращения плазмы, примерно постоянен и равен 0, во время же ELM происходит значительное увеличение его модуля. Утверждение о малости скорости поперечного вращения плазмы не соответствует данным о скорости вращения плазмы, представленным в статье [38]. Однако в работе [38] приведенные данные сглажены по большому периоду времени, превышающему период колебаний ELM.

Более того, в [38] рассматривается режим работы с синхронизированными ELM, который некорректно сравнивать с режимом, представленным в данной работе. Вероятно, малое значение радиального электрического поля определяется влиянием срыва ELM, сопровождающегося локальными уменьшениями градиентов давления плазмы и периодическим ухудшением удержания. Таким образом, можно утверждать, что диагностика ДОР является хорошим средством изучения ELM, так как во время них меняется и модуль принятого сигнала, и производная его фазы.

Для исследования радиального электрического поля E_r во время срыва периферийных локализованных мод сначала были получены его значения в разных разрядах и в разные моменты времени, которые определялись относительно сигнала D_α : между ELM и на пике (рис. 4).

Полученные результаты усреднялись по однотипным событиям (оценка подобия производилась по сигналу диагностики D_α) в каждом разряде отдельно

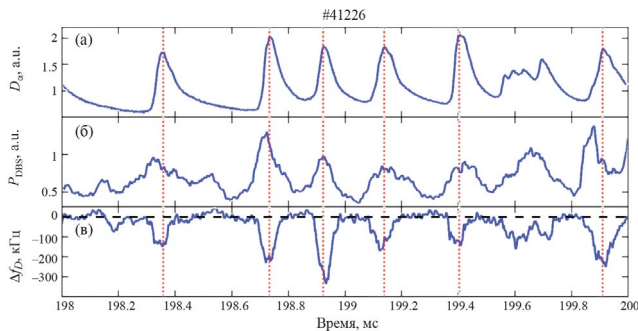


Рис. 3. Осциллограммы разряда #41226 во время десинхронизованных ELM: излучение D_α (а), амплитуда принятого сигнала с канала 50 ГГц ДОР (б), доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала с канала 50 ГГц ДОР (в).

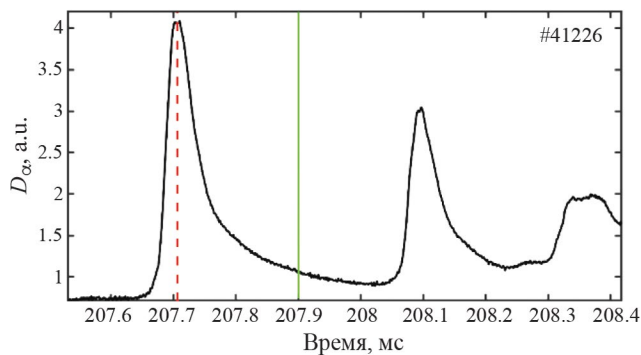


Рис. 4. Сигнал диагностики излучения D_α разряда #41226 со всплесками, соответствующими периферийным локализованным модам. Красная штриховая линия показывает момент усреднения на максимуме излучения, зеленая сплошная — момент усреднения между всплесками.

ввиду невозможности точного повторения условий разряда. Благодаря использованию многочастотной схемы имелась возможность построить профиль радиального электрического поля, которое определялось по скорости вращения плазмы в скрещенных полях [39], в каждом конкретном случае, что и продемонстрировано на рис. 5 для того же разряда #41226 и интервала 195–230 мс. Сигналы диагностик D_α и ДОР уже были представлены на рис. 3. Зеленая сплошная линия на рис. 5 — профиль E_r между ELM, примерный момент измерений показан на рис. 4 зеленой линией, красная штриховая линия соответствует максимуму излучения D_α , что связано с пиком срыва ELM. Моменту пика срыва ELM на рис. 4 соответствует та же линия. Видно, что между всплесками радиальное электрическое поле маленькое (не превышает 0.5 кВ/м) и примерно постоянно внутри сепаратрисы с заметным увеличением по модулю до 1 кВ/м на ней. Снаружи поле меняет знак. Во время пика излучения D_α модуль электрического поля синхронно возрастает на всех радиусах вплоть до 8 см вглубь от сепаратрисы. Во внутренней области плазмы происходит увеличение до 1–1.5 кВ/м. На сепаратрисе же наблюдается локальный максимум — 2.5 кВ/м, что соответствует увеличению поля в 3 раза. В недавней публикации с «Глобус-М2» было проведено исследование флуктуаций плотности во время ELM с помощью обычной рефлектометрии [33]. В нем показано, что возмущения средней плотности плазмы присутствуют только на периферии плазмы. Из проведенных экспериментов видно, что радиальное электрическое поле меняется вплоть до глубоких областей плазмы ($\rho \approx 0.7$), а не только на краю. Стоит отметить, что развитие ELM влияет на профиль концентрации, приводя к небольшому смещению положения отсечек вблизи сепаратрисы, что также отражалось бы в сигналах диагностики ДОР в виде колебаний производной фазы. Однако такие

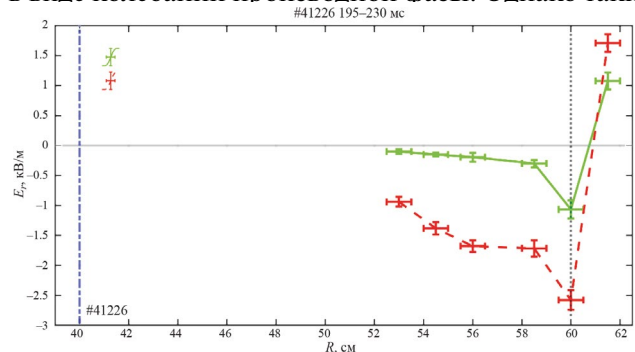


Рис. 5. Усредненный профиль радиального электрического поля разряда #41226 на участке 195–230 мс. Красная штриховая линия соответствует среднему значению поля на максимумах всплесков D_α , зеленая сплошная — среднему значению между всплесками.

периферийные колебания производной фазы не могут объяснить измерения на глубоких радиусах ($\rho \approx 0.7$).

Данное наблюдение не согласуется с общими представлениями о периферийном влиянии ELM на параметры плазмы, но подтверждено экспериментально не только на Глобус-М2. На токамаке ASDEX Upgrade был получен подобный профиль [34] с использованием той же диагностики ДОР. На нем радиальное электрическое поле увеличивается во время пика ELM на всех исследуемых радиусах в диапазоне $0.6 < \rho < 1$, а на сепаратрисе наблюдается локальный максимум.

Кроме получения профиля электрического поля был получен радиальный профиль амплитуды его флуктуаций (рисунок 6), которые через связь со скоростью полоидального вращения отвечают за аномальные потоки частиц из плазмы. Он показывает среднее квадратичное отклонение поля на интервале 50 мкс, т. е. насколько оно отличается в данный момент времени от своего среднего значения на интервале времени в 50 мкс. Как можно заметить, во время ELM увеличивается не только модуль радиального электрического поля, но и его флуктуации в 2–3 раза на всех радиусах, причем максимум наблюдается снаружи от сепаратрисы.

На Глобус-М2 наблюдался и другой тип вспышек на D_α — относительно маленькие и частые, которые зачастую происходили в тех же разрядах, что и описанные выше. На рис. 7 представлены сигналы диагностики D_α в одном временном и амплитудном масштабе в разряде #41226. Сверху — соответствующие ELM, то же, что и на рис. 4, снизу — иного типа. По данному рисунку видно, что амплитуда возмущений типа ELM больше в 2–3 раза, а частота меньше в 1.5–2 раза, чем у возмущений иного типа.

Более того, во время иного характера вспышек на сигнале D_α сигнал ДОР также отличался. Это можно увидеть на рис. 8, где он изображен во время того же разряда #41226, но в другом временном интервале по сравнению с рис. 3. Сверху (рис. 8а) — сигнал диагностики D_α , ниже — амплитуда принятого сигнала ДОР (рис. 8б). Наблюдалась аналогичная картина — вспышкам на D_α соответствует увеличение модуля сигнала ДОР, который пропорционален амплитуде плазменной турбулентности. Однако на графике производной фазы сигнала (рис. 8в) наблюдаются отличия от случая ELM (рис. 3в). В периодических интервалах с пониженным уровнем турбулентности зафиксирован значительный доплеровский сдвиг фазы, а во время максимумов уровня турбулентности он имеет значение близкое

к нулю. Уменьшение абсолютной величины скорости вращения плазмы сопровождается увеличением уровня турбулентности, которое заканчивается вспышкой на сигнале D_α . Подобная динамика обычно наблюдается во время развития колебаний предельного цикла [40].

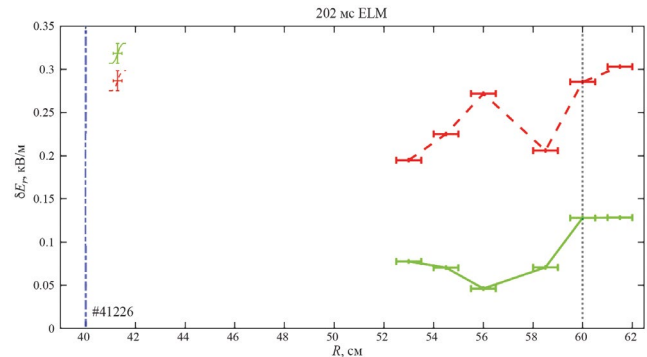


Рис. 6. Радиальный профиль амплитуды флуктуаций радиального электрического поля разряда #41226 для одного из ELM на участке 195–230 мс. Красная штриховая линия соответствует максимуму вспышки D_α , зеленая сплошная — значению между вспышками.

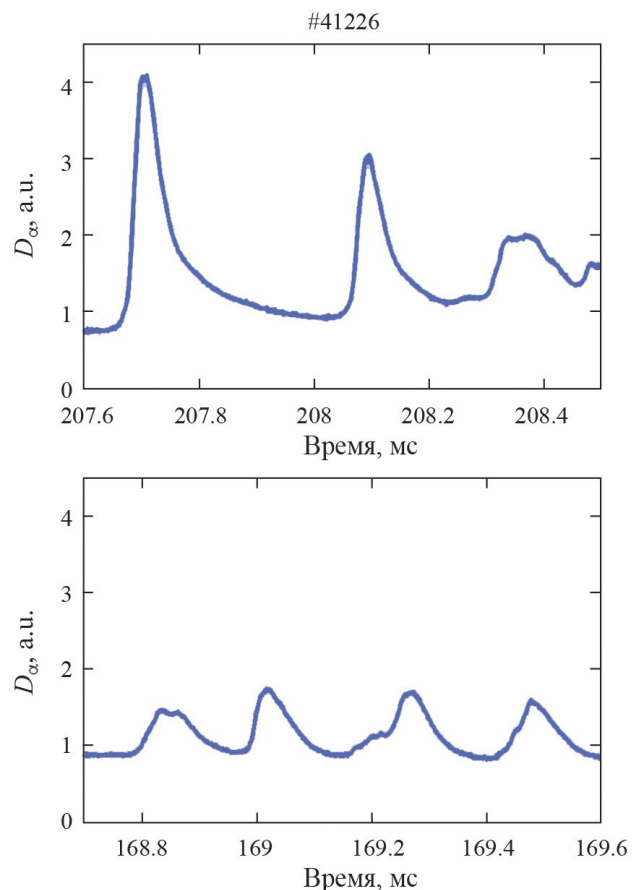


Рис. 7. Сигналы диагностики излучения D_α в одном масштабе разряда #41226 на разных его временных участках. Вспышки на верхнем рисунке соответствуют ELM, на нижнем — иного типа.

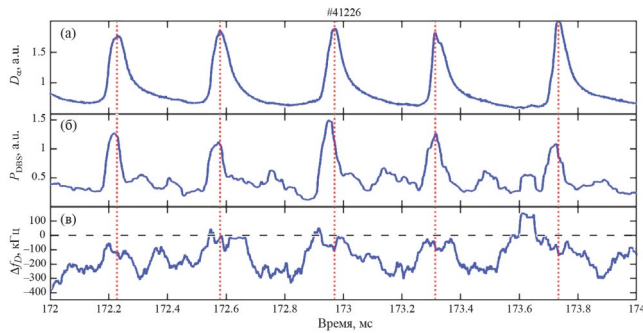


Рис. 8. Осциллограммы диагностик разряда #41226 во время предположительно LCO: излучение D_α (а), амплитуда принятого сигнала с канала 29 ГГц ДОР (б), доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала с канала 29 ГГц ДОР (в).

Кроме того, оказалось, что такому поведению сигнала D_α (малая амплитуда и большая частота всплеск) соответствует другой профиль радиального электрического поля (рис. 9), отличающегося от случая ELM. В области около сепаратрисы (1.5 см по обе стороны от нее) радиальное электрическое поле, наоборот, уменьшается в 2–3 раза во время максимума всплески D_α . В более внутренних областях (более 3 см от сепаратрисы) поле практически не меняется и остается практически постоянным во всем временном интервале. Его значение 0.5–1 кВ/м не превышает значения между всплесками D_α во время режима с ELM, т. е. значения для невозмущенной плазмы. Снаружи сепаратрисы поле меняет свой знак, как и в случае ELM. Можно заметить особенность — всплески на сигнале D_α появляются во время уменьшения по модулю радиального электрического поля (оно отличается от значения доплеровского сдвига фазы сигнала (рис. 8в) только множителем). Из рис. 9 видно, что в фазе всплески D_α уменьшаются градиенты радиального электрического поля, что свидетельствует о периодическом уменьшении его шири. Уменьшение шири одновременно с ростом амплитуды турбулентности (рис. 8б) может косвенно свидетельствовать об ухудшении удержания плазмы во время данных явлений [19]. Между периодами уменьшения шири наблюдается возврат к прежним параметрам излучения D_α и E_r . Такое периодическое поведение радиального электрического поля, амплитуды турбулентности и излучения на линии D_α являются характерными признаками LCO [41].

Если вернуться к рис. 7, то можно найти еще один признак того, что малые и частые всплески D_α соответствуют колебаниям предельного цикла. Как известно [42], такой режим описывается моделью

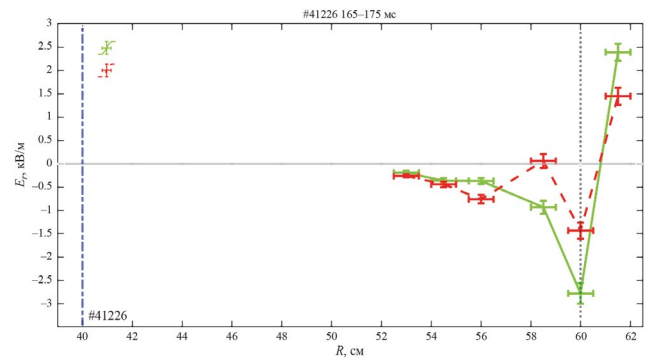


Рис. 9. Усредненный профиль радиального электрического поля разряда #41226 на участке 165–175 мс. Красная штриховая линия соответствует среднему значению поля на максимумах всплеск D_α , зеленая сплошная — среднему значению между всплесками.

«хищник—жертва», когда мелкая турбулентность вызывает появление зональных потоков, которые подавляют эту же турбулентность и на некоторое время переводят плазму в режим улучшенного удержания, а потом происходит затухание зональных потоков и рост мелкомасштабной неустойчивости — цикл замыкается. Эти колебания происходят почти по гармоническому закону, что можно увидеть на рис. 7б — время уменьшения уровня излучения D_α в 2 раза от максимума сопоставимо с периодом колебаний, а вот на рис. 7а, соответствующем ELM, период уменьшения уровня излучения D_α в 2 раза от максимума значительно меньше периода колебаний, так как ELM — единичное явление резкого выброса частиц и энергии. Таким образом, можно сказать, что мелкие и частые всплески на D_α относятся к LCO.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было показано, что диагностика доплеровского обратного рассеяния обладает преимуществами по сравнению с другими методами диагностик для исследования периферийных локализованных мод. Диагностика ДОР позволяет изучать быстрые процессы, связанные с изменением радиального электрического поля, внутри области удержания в диапазоне $0.4 < \rho < 1.1$. Благодаря хорошему временному разрешению возможно исследовать даже такие кратковременные процессы, как флуктуации E_r во время десинхронизованных ELM с характерным временным масштабом 30–50 мкс на токамаке Глобус-М2, что и было продемонстрировано в данной работе. Было показано, что во время десинхронизованных ELM наблюдается увеличение мощности обратно рассеянного сигнала, которая пропорциональна величине флуктуаций элект-

ронной концентрации. Одновременно с увеличением амплитуды возрастает доплеровский сдвиг фазы сигнала, что свидетельствует об увеличении амплитуды электрического поля на всех исследуемых радиусах, а не только на периферии, где непосредственно развивается пилинг-баллонная неустойчивость [14]. Вместе с изменением самого поля меняются и его флуктуации так же на всех радиусах.

Было показано, что диагностика ДОР позволяет обнаруживать не только периферийные локализованные моды, но и колебания предельного цикла. Во время LCO, когда на сигнале D_α наблюдались более частые и менее интенсивные всплески, картина радиального поля иная — увеличение в районе сепаратрисы и практически без изменений в глубине области удержания. Таким образом, можно заключить, что диагностика доплеровского обратного рассеяния является надежным средством для изучения поведения радиального электрического поля во время разнообразных плазменных процессов, таких как периферийные локализованные моды и LCO.

Представленное в разделе 3 «Экспериментальные результаты» исследование радиального электрического поля выполнено А.Ю. Токаревым, А.Ю. Яшиным, А.М. Пономаренко за счет гранта РНФ № 23-72-00024, <https://rscf.ru/project/23-72-00024> на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях». Расчет положений отсечки зондирующего излучения диагностики доплеровского обратного рассеяния, представленный в разделе 2 «Схема эксперимента», выполнен В.А. Велижаниным при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы Исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (соглашение №075-15-2022-311 от 20.04.2022). Измерения электронной плотности и интенсивности мягкого рентгеновского излучения, представленные в разделе 2 «Схема эксперимента», выполнены Н. С. Жильцовым, Г. С. Курскиевым, В. В. Солохой в рамках государственного задания ФТИ им. А. Ф. Иоффе, тема 0034-2024-0028. Эксперименты по нагреву плазмы инъекцией нейтрального пучка, представленные в разделе 3 «Экспериментальные результаты», выполнены В. К. Гусевым, В. Б. Минаевым, Ю. В. Петровым, Н. В. Сахаровым в рамках гос. задания, тема 0034-2021-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wagner F., Becker G., Behringer K., Campbell D., Eberhagen A., Engelhardt W., Fussmann G., Gehre O., Gernhardt J., Gierke G.V., Haas G., Huang M., Karger F., Keilhacker M., Klüber O., Kornherr M., Lackner K., Lisitano G., Lister G.G., Mayer H.M., Meisel D., Müller E.R., Murmann H., Niedermeyer H., Poschenrieder W., Rapp H., Röhr H., Schneider F., Siller G., Speth E., Stäbler A., Steuer K.H., Venus G., Vollmer O., Yü Z.* // *Phys. Rev. Lett.* 1982. V. 49. P. 1408.
Doi: 10.1103/PhysRevLett.49.1408
2. *Leonard A.W.* // *Phys. Plasmas.* 2014. V. 21. P. 090501.
Doi: 10.1063/1.4894742
3. *Zohm H.* // *Plasma. Phys. Control. Fusion.* 1996. V. 38. P. 105.
Doi: 10.1088/0741-3335/38/2/001.
4. *Connor J.W.* // *Plasma. Phys. Control. Fusion.* 1998. V. 40. P. 531.
Doi: 10.1088/0741-3335/40/5/002
5. *Suttrop W.* // *Plasma. Phys. Control. Fusion.* 2000. V. 42. P. A1.
Doi: 10.1088/0741-3335/42/5A/301
6. *Connor J.W., Kirk A., Wilson H.R.* // *AIP Conf. Proc.* 2008. V. 1013. P. 174.
Doi: 10.1063/1.2939030
7. *Snyder P.B., Wilson H.R., Ferron J.R., Lao L.L., Leonard A.W., Mossessian D., Murakami M., Osborne T.H., Turnbull A.D., Xu X.Q.* // *Nucl. Fusion.* 2004. V. 44. P. 320.
Doi: 10.1088/0029-5515/44/2/014
8. *Doyle E.J., Houlberg W.A., Kamada Y., Mukhovatov V., Osborne T.H., Polevoi A., Bateman G., Connor J.W., Cordey J.G., Fujita T., Garbet X., Hahn T.S., Horton L.D., Hubbard A.E., Imbeaux F., Jenko F., Kinsey J.E., Kishimoto Y., Li J., Luce T.C., Martin Y., Ossipenko M., Parail V., Peeters A., Rhodes T.L., Rice J.E., Roach C.M., Rozhansky V., Ryter F., Saibene G., Sartori R., Sips A.C.C., Snipes J.A., Sugihara M., Synakowski E.J., Takenaga H., Takizuka T., Thomsen K., Wade M.R., Wilson H.R., ITPA Transport Physics Topical Group, ITPA Confinement Database and Modelling Topical Group, ITPA Pedestal and Edge Topical Group* // *Nucl. Fusion.* 2007. V. 47. P. S18.
Doi: 10.1088/0029-5515/47/6/S02
9. *Maggi C.F., Saarelma S., Casson F.J., Challis C., de la Luna E., Frassinetti L., Giroud C., Joffrin E., Simpson J., Beurskens M., Chapman I., Hobirk J., Leyland M., Lomas P., Lowry C., Nunes I., Rimini F., Sips A.C.C., Urano H., JET Contributors* // *Nucl. Fusion.* 2015. V. 55. P. 113031.
Doi: 10.1088/0029-5515/55/11/113031

10. Maingi R., Hubbard A.E., Meyer H., Hughes J.W., Kirk A., Maqueda R., Terry J.L., the Alcator C-Mod, MAST and NSTX teams // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. P. 063036.
Doi: 10.1088/0029-5515/51/6/063036
11. Smith S.F., Kirk A., Chapman-Oplopoiou B., Clark J.G., Ham C.J., Horvath L., Maggi C.F., Scannell R., Saarelma S., the MAST Team // Plasma Phys. Control. Fusion. 2022. V. 64. P. 045024.
Doi: 10.1088/1361-6587/ac529b
12. Dickinson D., Roach C.M., Saarelma S., Scannell R., Kirk A., Wilson H.R. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 135002. Doi: 10.1103/PhysRevLett.108.135002
13. Petrov Yu.V., Gusev V.K., Sakharov N.V., Minaev V.B., Varfolomeev V.I., Dyachenko V.V., Balachenkov M., Bakharev N.N., Bondarchuk E.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Iliasova M.V., Kavin A.A., Khilkevitch E.M., Khromov N.A., Kiselev E.O., Konovalov 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.A. // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. P. 042009.
Doi: 10.1088/1741-4326/ac27c7
14. Bulanin V.V., Kurskiev G.S., Solokha V.V., Yashin A.Yu., Zhiltsov N.S. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 122001.
Doi: 10.1088/1361-6587/ac36a4
15. Solokha V.V., Kurskiev G.S., Yashin A.Yu., Balachenkov I.M., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Gusev V.K., Goryainov V.Yu., Dyachenko V.V., Zhiltsov N.S., Kiselev E.O., Minaev V.B., Novokhatsky A.N., Petrov Yu.V., Ponomarenko A.M., Sakharov N.V., Telnova A.Yu., Tkachenko E.E., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Tukhmeneva E.A., Khromov N.A., Shchegolev P.B. // Plasma Phys. Rep. 2023. V. 49. P. 419.
Doi: 10.1134/S1063780X23600184
16. Maingi R., Bell M.G., Fredrickson E.D., Lee K.C., Maqueda R.J., Snyder P., Tritz K., Zweben S.J., Bell R.E., Biewer T.M., Bush C.E., Boedo J., Brooks N.H., Delgado-Aparicio L., Domier C.W., Gates D.A., Johnson D.W., Kaita R., Kaye S.M., Kugel H.W., LeBlanc B.P., Luhmann N.C., Jr., Menard J.E., Mueller D., Park H., Raman R., Roquemore A.L., Sabbagh S.A., Soukhanovskii V.A., Stevenson T., Stutman D. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 092510.
Doi: 10.1063/1.2226986
17. Yashin A.Y., Bulanin V.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Petrov A.V., Petrov Y.V., Ponomarenko A.M., Varfolomeev V.I. // JINST. 2022. V. 17. P. C01023.
Doi: 10.1088/1748-0221/17/01/C01023
18. Bulanin V.V., Yashin A.Y., Petrov A.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Y.V., Prisyazhnyuk D.V., Varfolomeev V.I. // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. P. 033539.
Doi: 10.1063/5.0030307
19. Ponomarenko A., Yashin A., Kurskiev G., Minaev V., Petrov A., Petrov Y., Sakharov N., Zhiltsov N. // Sensors. 2023. V. 23. P. 830.
Doi: 10.3390/s23020830
20. Yashin A.Y., Bulanin V.V., Petrov A.V., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V. // Plasma Phys. Rep. 2020. V. 46. P. 683.
Doi: 10.1134/S1063780X20070107
21. Yashin A.Yu., Bulanin V.V., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Tolstyakov S.Yu. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. P. 112009.
Doi: 10.1088/1741-4326/aac4d8
22. Grover O., Manz P., Yashin A.Y., Réfy D.I., Seidl J., Vianello N., Birkenmeier G., Solano E.R., Sos M., Bohm P., Bilkova P., Hron M., Panek R., the ASDEX Upgrade Team, the COMPASS Team, the Globus-M Team, JET Contributors // Nucl. Fusion. 2024. V. 64. P. 026001.
Doi: 10.1088/1741-4326/ad0eae
23. Yashin A.Yu., Bulanin V.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Prisyazhnyuk D.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Wagner F. // Nucl. Fusion. 2014. P. 54. P. 114015.
Doi: 10.1088/0029-5515/54/11/114015
24. Bulanin V.V., Wagner F., Varfolomeev V.I., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Prisyazhnyuk D.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Khromov N.A., Shchegolev P.B., Yashin A.Yu. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 375.
Doi: 10.1134/S106378501405006X
25. Bulanin V.V., Bakharev N.N., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Yashin A.Yu. // Phys. Atom. Nuclei. 2020. V. 83. P. 1124.
Doi: 10.1134/S1063778820070042
26. Bulanin V.V., Balachenkov I.M., Varfolomeev V.I., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Ponomarenko A.M., Telnova A.Yu., Shchegolev P.B., Yashin A.Yu. // Tech. Phys. Lett. 2021. V. 47. P. 197.
Doi: 10.1134/S1063785021020206
27. Yashin A.Yu., Bulanin V.V., Gusev V.K., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Ponomarenko A.M., Shchegolev P.B. // Nucl. Fusion. 2021. V. 61. P. 092001.
Doi: 10.1088/1741-4326/ac1297
28. Yashin A., Ponomarenko A., Balachenkov I., Kurskiev G., Kiselev E., Minaev V., Petrov A., Petrov Y.,

- Sakharov N., Zhiltsov N.* // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 3430.
Doi: 10.3390/app13063430
29. *Bulanin V.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov M.A., Petrov Yu.V., Prisiazhniuk D., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Yashin A.Yu.* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 096026.
Doi: 10.1088/1741-4326/ab2cdf
30. *Yashin A., Teplova N., Zadvitskiy G., Ponomarenko A.* // Sensors. 2022. V. 22. P. 9441.
Doi: 10.3390/s22239441
31. *Bulanin V.V., Gusakov E.Z., Gusev V.K., Zadvitskiy G., Lechte C., Heuraux S., Minaev V.B., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Teplova N., Yashin A.Yu.* // Plasma Phys. Rep. 2020. V. 46. P. 490.
Doi: 10.1134/S1063780X20050025
32. *Yashin A., Bulanin V., Petrov A., Ponomarenko A.* // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 8975.
Doi: 10.3390/app11198975
33. *Ponomarenko A., Gusev V., Kiselev E., Kurskiev G., Minaev V., Petrov A., Petrov Y., Sakharov N., Solokha V., Teplova N., Shchegolev P., Yashin A., Zhiltsov N.* // Nucl. Fusion. 2024. V. 64. P. 022001.
Doi: 10.1088/1741-4326/ad0ead
34. *Conway G.D., Lechte C., Poli E., the ASDEX Upgrade Team* // Proc. 15th Intl. Refl. Wksh., France, 2022.
35. *Kurskiev G.S., Sakharov N.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Miroshnikov I.V., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., Bakharev N.N., Kiselev E.O., Zhiltsov N.S., Shchegolev P.B., Balachenkov I.M., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Goryainov V.Yu., Dyachenko V.V., Zhilin E.G., Iliasova M.V., Kavin A.A., Kononov A.N., Krikunov S.V., Lobanov K.M., Melnik A.D., Mineev A.B., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Skrekel' O.M., Solovei V.A., Solokha V.V., Tkachenko E.E., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Tikhmeneva E.A., Khilkevitch E.M., Khromov N.A., Chernyshev F.V., Shevelev A.E., Shulyat'ev K.D., Yashin A.Yu.* // Plasma Phys. Rep. 2023. V. 49. P. 403.
Doi: 10.1134/S1063780X23600214
36. *Shchegolev P.B., Minaev V.B., Telnova A.Yu., Varfolomeev V.I., Gusev V.K., Esipov L.A., Zhiltsov N.S., Kolmogorov V.V., Kondakov A.A., Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Panasenkov A.A., Sorokin A.V., Shikhovtsev I.A.* // Plasma Phys. Rep. 2023. V. 49. P. 1501.
Doi: 10.1134/S1063780X23601098
37. *Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Kavin A.A., Kiselev E.O., Khromov N.A., Minaev V.B., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Shchegolev P.B., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Tikhmeneva E.A., Varfolomeev V.I., Yashin A.Yu., Zhiltsov N.S.* // Nucl. Fusion. 2021. V. 61. P. 064001.
Doi: 10.1088/1741-4326/abe08c
38. *Ponomarenko A.M., Bulanin V.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Yashin A.Yu.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2103. P. 012210.
Doi: 10.1088/1742-6596/2103/1/012210
39. *Conway G.D., Schirmer J., Kluge S., Suttrop W., Holzhauser E., the ASDEX Upgrade Team* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. P. 951.
Doi: 10.1088/0741-3335/46/6/003
40. *Tynan G.R., Xu M., Diamond P.H., Boedo J.A., Cziegler I., Fedorczak N., Manz P., Miki K., Thakur S., Schmitz L., Zeng L., Doyle E.J., McKee G.M., Yan Z., Xu G.S., Wan B.N., Wang H.Q., Guo H.Y., Dong J., Zhao K., Cheng J., Hong W.Y., Yan L.W.* // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. P. 073053.
Doi: 10.1088/0029-5515/53/7/073053
41. *Schmitz L.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 025003.
Doi: 10.1088/1741-4326/57/2/025003
42. *Diamond P.H., Itoh S.-I., Itoh K., Hahn T.S.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. P. R35.
Doi: 10.1088/0741-3335/47/5/R01

APPLICATION OF MULTI-FREQUENCY DOPPLER BACKSCATTERING FOR STUDYING EDGE LOCALIZED MODES AT THE GLOBUS-M2 TOKAMAK

A. Yu. Tokarev^{a,*}, A. Yu. Yashin^a, A. M. Ponomarenko^a, V. K. Gusev^b,
N. S. Zhiltsov^b, G. S. Kurskiev^b, V. B. Minaev^b, Yu. V. Petrov^b, N. V. Sakharov^b,
V. V. Solokha^{a, b}, V. A. Velizhanin^a

^a*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia*

^b*Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia*

**e-mail: tokarev_ayu@spbstu.ru*

Abstract—The high-confinement mode in tokamaks (H-mode) is characterized by high pressure gradients at plasma edge, which results in the appearance of edge localized modes (ELMs). They are studied at the Globus-M2 spherical tokamak too, where edge localized modes are observed mainly in regimes with neutral beam injection. One of the ways for studying ELMs is the use of the Doppler backscattering (DBS) diagnostics installed at Globus-M2. It makes possible to estimate the amplitude of plasma density fluctuations and measure the radial electric field E_r . In this work, the effect of edge localized modes on the E_r field is studied in the radial range $0.4 < \rho < 1.1$. It is shown that during ELMs the electric field increases in the entire measurement range. This indicates that ELMs affect the inner plasma regions as well. This is not consistent with the general ideas concerning the peripheral localization of ELMs, but is confirmed experimentally not only at Globus-M2. In addition, the results for the regime with ELMs are compared with those for the regime with limit cycle oscillations (LCOs) and it is shown that during LCOs such effect is not observed.

Keywords: tokamak, Doppler backscattering, edge localized modes