

Применение диагностики доплеровского обратного рассеяния для исследования периферийных локализованных мод на токамаке Глобус-М2

© А.Ю. Токарев¹, А.Ю. Яшин^{1,2}, Н.С. Жильцов^{1,2}, Г.С. Курскиев², В.Б. Минаев², Ю.В. Петров², А.М. Пономаренко¹, Н.В. Сахаров²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: tokarev_ayu@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 2 сентября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

В режиме улучшенного удержания с периферийным транспортным барьером (H-мод) наблюдаются большие градиенты давления на периферии плазмы, что приводит к появлению периферийных локализованных мод (ELM). На сферическом токамаке Глобус-М2 ELM могут быть разделены на два вида: синхронизованные с пилообразными колебаниями в центре плазменного шнура и десинхронизованные. Проведено исследование синхронизованных периферийных локализованных мод с применением диагностики доплеровского обратного рассеяния. Показано, что уровень турбулентности сильно меняется во время ELM. Также получены профили радиального электрического поля, построенные для различных по размеру синхронизованных периферийных локализованных мод.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59443.6593k

В настоящее время основным режимом работы токамаков является режим улучшенного удержания плазмы (или H-мода) [1]. Улучшение удержания достигается за счет появления на периферии плазмы области с сильно подавленным переносом частиц и энергии — транспортного барьера, что приводит к формированию пьедестала [2]. В пьедестале возникают большие градиенты давления, что является потенциальным источником плазменных неустойчивостей [3], в частности периферийных локализованных мод (ELM) [4]. Они приводят к периодическим импульсным выбросам частиц и энергии из плазмы на первую стенку и пластины дивертора, что может привести к их повреждению [5]. Таким образом, исследование ELM является в настоящее время важной задачей.

Для описания периферийных локализованных мод используют модель пилинг-баллонной моды, в рамках которой выделяют две причины возникновения ELM: градиент давления со стороны слабого магнитного поля (баллонная мода) и ток, протекающий вблизи сепаратрисы (пилинг-мода) [6]. По размеру и степени влияния на удержание плазмы классифицировано более пяти типов периферийных локализованных мод, однако наиболее часто встречаются типы I, II и III. На сферических же токамаках за редким исключением наблюдается только тип III/V [7].

Периферийные локализованные моды на сферическом токамаке Глобус-М2 несколько отличаются от общепринятой классификации. Помимо стандартных, или десинхронизованных, ELM типа III/V, происходящих самопроизвольно в режиме улучшенного удержания

плазмы [8], на токамаке Глобус-М2 наблюдаются периферийные локализованные моды, синхронизованные с пилообразными колебаниями в центре плазменного шнура [9]. Их исследованием активно занимаются на токамаке Глобус-М2.

Существует большое количество диагностик, позволяющих исследовать ELM. С самого начала для их обнаружения использовалась диагностика излучения на линии D_{α} , которая позволяла обнаруживать потоки частиц и энергии из плазмы. Однако наиболее ценны сведения, получаемые из области удержания. Их позволяет получать диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР) [10], успешно примененная для исследования ELM на токамаке Глобус-М2 [11]. В настоящей работе представлены результаты измерения скорости вращения плазмы перпендикулярно магнитному полю, по которым было вычислено радиальное электрическое поле, во время синхронизованных ELM на сферическом токамаке Глобус-М2. Первые результаты исследования десинхронизованных ELM недавно были описаны в работе [12].

Сферический токамак Глобус-М2 имеет большой радиус $R = 0.36$ м, малый радиус $a = 0.24$ м, аспектное отношение $R/a = 1.5$. Проектные значения тороидального магнитного поля до 1 Т, тока по плазме до 0.5 МА [13]. Треугольность и вытянутость плазменного шнура могут достигать величин 0.5 и 2.2 соответственно. В анализируемом разряде благодаря использованию коинъекции атомарного пучка (NBI) мощностью до 1 MW происходит переход плазмы в режим улучшенного удержания. Наблюдается увеличение средней концентрации электронов до $\langle n_e \rangle \sim 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Именно в режиме улучшенного удержания начинают наблюдаться синхронизованные с пилообразными колебаниями периферийные локализованные моды. На рис. 1 приведены параметры исследуемого разряда #41152. Плазма находится в режиме улучшенного удержания. Средняя электронная концентрация приведена на рис. 1, *a*. На рис. 1, *b* пунктирной линией показан сигнал диагностики интенсивности коллимированного мягкого рентгеновского излучения вдоль хорды, направленной на центр шнура, на котором четко видны пилообразные колебания. Сплошной линией на рис. 1, *b* обозначен сигнал диагностики излучения на линии D_α с периодическими вспышками, которые соответствуют ELM. Можно заметить, что вспышки на сигнале диагностики D_α происходят сразу после резкого падения уровня интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Это характерный признак появления синхронизованных периферийных локализованных мод.

Для исследования ELM была использована диагностика доплеровского обратного рассеяния, хорошо зарекомендовавшая себя на многих токамаках мира [14–17]. Диагностика основана на изучении электромагнитного излучения, рассеянного в обратном направлении на флуктуациях концентрации вблизи области отсечки для частоты зондирующего излучения. Флуктуации концентрации вытянуты вдоль линий полного магнитного поля, поэтому в первом приближении представляют собой дифракционную решетку. Из-за движения флуктуаций происходит вращение дифракционной решетки вокруг плазменного шнура. Амплитуда рассеянного электромагнитного излучения прямо пропорциональна величине флуктуаций электронной концентрации с определенным значением волнового вектора k_\perp . Типичные значения волнового вектора для регистрируемых флуктуаций в обсуждаемых экспериментах составляют $k_\perp = 2.7\text{--}11.6\text{ см}^{-1}$. Фаза содержит в себе доплеровский сдвиг из-за вращения флуктуаций вместе с плазмой, благодаря которому можно найти скорость вращения плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях, а значит, и радиальное электрическое поле в предположении о малости фазовой скорости распространения флуктуаций. Более подробное описание диагностики доплеровского обратного рассеяния можно найти в [14].

Использование нескольких зондирующих частот позволяет сильно упростить исследование плазмы методом ДОР, так как становятся возможными одновременные измерения на разном расстоянии от центра плазменного шнура. Благодаря этому есть возможность исследовать радиальную зависимость параметров плазмы. Поэтому на токамаке Глобус-М2 используются две многочастотные схемы. Первая позволяет зондировать плазму на четырех частотах: 20, 29, 39 и 48 GHz [18], что соответствует периферийной области $0.8 < \rho < 1.1$. Вторая схема использует шесть частотных каналов: 50–70 GHz с шагом 5 GHz [10], что позволяет исследовать внутренние плазменные области $0.4 < \rho < 0.8$. Использо-

вание этих двух схем на токамаке Глобус-М2 позволило детально исследовать процесс перехода в классический режим улучшенного удержания (H-mode) [19] и режим улучшенного удержания без ELM (ELM-free H-mode) [20], а также такие плазменные колебательные процессы, как колебания предельного цикла [21,22], геодезическая акустическая мода [23,24], альфвеновские моды [25,26], квазикогерентные моды [27], тиринг-моды [28] и формирование плазменных филаментов [29,30], которые, как показывает полноволновое моделирование [31,32], могут существенно влиять на спектр доплеровского обратного рассеяния [33].

Результатом работы системы ДОР на токамаке Глобус-М2 являются оцифрованные сигналы в десяти каналах с разными частотами дискретизации, у каждого канала два сигнала: I и Q — исходный и смещенный по фазе на $\pi/2$. При обработке информации отдельные сигналы сразу преобразуются в комплексные каналы. Амплитуда комплексного сигнала пропорциональна величине амплитуды флуктуаций, на которых происходило рассеяние. Производная фазы комплексного сигнала пропорциональна доплеровскому сдвигу частоты, а доплеровский сдвиг частоты пропорционален скорости дрейфа плазмы в скрещенных радиальном электрическом и полном магнитном полях.

Для анализа был выбран характерный разряд #41152 с синхронизованными ELM. Данные диагностики излучения D_α во время вспышек синхронизованных периферийных локализованных мод, а также обработанные сигналы диагностики доплеровского обратного рассеяния приведены на рис. 2. На сигнале диагностики D_α (рис. 2, *a*) заметны периодические возмущения с периодом $T \approx 4\text{ ms}$, соответствующие срывам ELM. На рис. 2 также изображены амплитуда принятого сигнала ДОР при частоте зондирования 50 GHz (*b*) и его доплеровский сдвиг (*c*). Данный канал соответствует положению отсечки зондирующего излучения на радиусе $\rho \approx 0.8$ и концентрации в отсечке $n_e \approx 3.1 \cdot 10^{19}\text{ м}^{-3}$. По данному рисунку нельзя однозначно судить о том, как ведет себя модуль принятого сигнала во время вспышки на сигнале диагностики D_α , хотя во время некоторых вспышек все же происходит его заметное увеличение. Такое увеличение амплитуды сигнала ДОР соответствует увеличению амплитуды флуктуаций концентрации, сильнее рассеивающих зондирующий сигнал. Однако одновременно с этим более явные возмущения заметны и на доплеровском сдвиге сигнала, который пропорционален скорости вращения плазмы перпендикулярно полному магнитному полю, а значит, и радиальному электрическому полю. Как видно из рис. 2, *c*, между вспышками доплеровский сдвиг сигнала ДОР (а следовательно, и скорость вращения плазмы) примерно постоянен, он не превосходит 100 kHz. Во время ELM происходит значительное увеличение модуля доплеровского сдвига сигнала вплоть до значений порядка 400 kHz. Таким образом, можно утверждать, что диагностика ДОР является хорошим средством

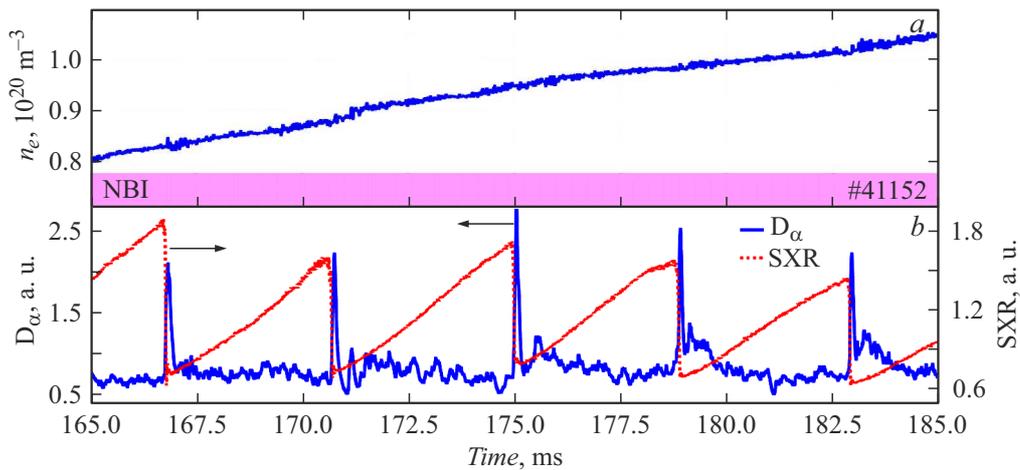


Рис. 1. Осциллограммы разряда #41152. *a* — средняя электронная концентрация; *b* — сигнал диагностики интенсивности мягкого рентгеновского излучения (SXR) и сигнал диагностики излучения D_α . В данном разряде поддерживались значения тока по плазме $I_p \approx 300$ кА и магнитного поля $B_T \approx 0.8$ Т.

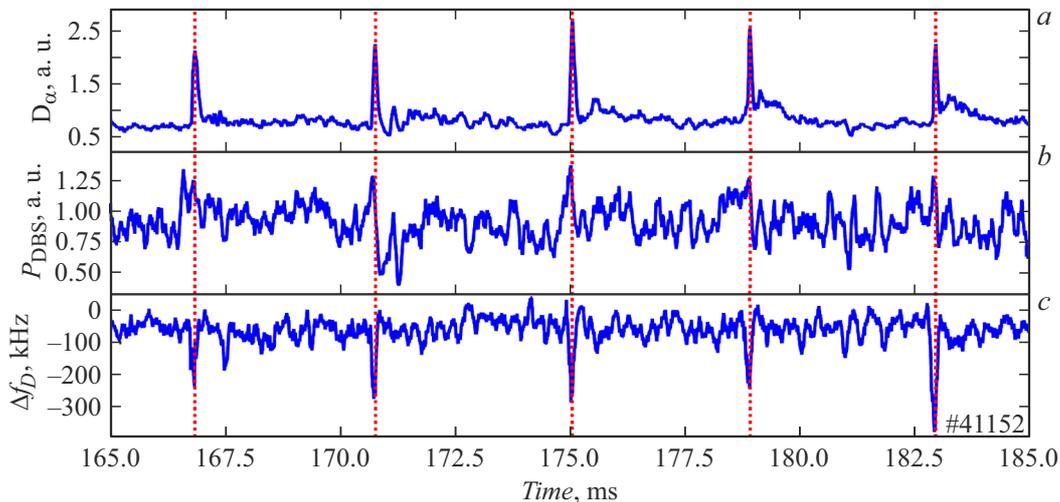


Рис. 2. Осциллограммы разряда #41152 во время синхронизированных ELM. *a* — излучение D_α ; *b* — амплитуда принятого сигнала ДОР при частоте зондирования 50 GHz; *c* — доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала ДОР при частоте зондирования 50 GHz.

изучения периферийных локализованных мод, так как во время них меняется и модуль принятого сигнала диагностики, и (значительно сильнее) производная его фазы.

Для исследования радиального электрического поля E_r во время срыва периферийных локализованных мод сначала были получены его значения во время ELM разного размера, происходящих в одном разряде #41152 в разные моменты времени. Размер определялся по амплитуде вспышки на сигнале диагностики D_α во время вспышки ELM. Примеры „больших“ вспышек приведены на рис. 1 и 2. Во время „малых“ вспышек амплитуда сигнала диагностики излучения D_α не превосходила 1.5 а.е., во время „больших“ наблюдалось увеличение до 2.7 а.е. Кроме того, все синхронизированные ELM, исследованные в настоящей работе, наблюдались в одном разряде

#41152, но в разные моменты времени, для которых условия нормировки сигнала были одинаковыми.

Полученные результаты усреднялись по однотипным событиям (оценка подобия проводилась по сигналу диагностики D_α). Благодаря использованию многочастотной схемы имелась возможность построить профиль радиального электрического поля в каждом конкретном случае, что и продемонстрировано на рис. 3 для разряда #41152. На рис. 3, *a* приведен профиль для „больших“ ELM, на рис. 3, *b* — для „малых“. В обоих случаях использованы одинаковые масштабы. Сигналы диагностик D_α и ДОР для случая „больших“ ELM представлены также на рис. 2. Сплошная линия на рис. 3 — профиль E_r между ELM, штриховая линия соответствует максимуму излучения D_α , что связано с пиком срыва ELM. Сначала рассмотрим профиль

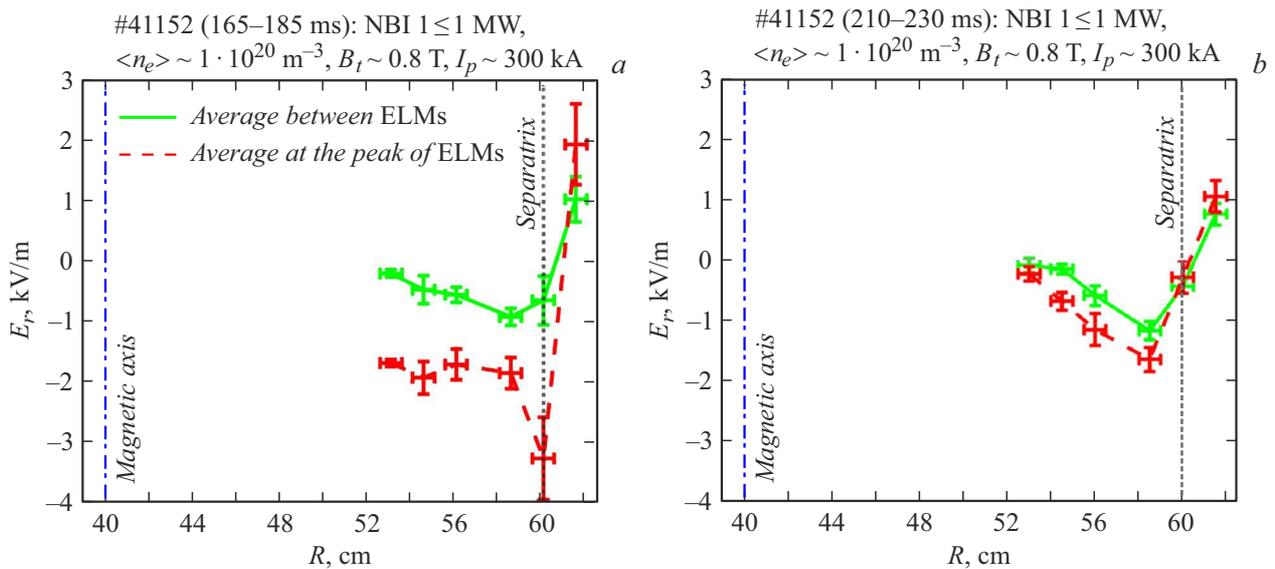


Рис. 3. Усредненные профили радиального электрического поля разряда #41152. *a* — случай „больших“ ELM, *b* — случай „малых“ ELM. Штриховая линия соответствует среднему значению поля на максимумах всплеск D_α , сплошная — среднему значению между всплесками.

на рис. 3, *a*. Видно, что между всплесками радиальное электрическое поле маленькое (модуль не превышает 1 kV/m) и имеет локальный максимум по модулю около сепаратрисы. Снаружи поле меняет знак. Во время пика излучения D_α модуль электрического поля синхронно возрастает на всех радиусах вплоть до 8 cm вглубь от сепаратрисы. Во внутренней области плазмы происходит увеличение до 2 kV/m. На сепаратрисе же наблюдается локальный максимум — 3 kV/m, что соответствует увеличению поля в 4 раза. На рис. 3, *b* поведение радиального электрического поля отличается. Во-первых, кривые почти не различаются: наблюдается изменение поля в пределах 1.5–2 раз внутри области удержания, а около сепаратрисы изменения практически отсутствуют. Во-вторых, значения E_r и во время „малых“ ELM, и между ними практически совпадают со значением E_r между всплесками „больших“ ELM. Это свидетельствует о том, что „большие“ ELM сильно возмущают плазму на всех исследованных радиусах, в то время как „малые“ ELM практически не оказывают влияния на радиальное электрическое поле.

Таким образом, в работе показано, что диагностика доплеровского обратного рассеяния является мощным средством для исследования периферийных локализованных мод. Во время ELM происходит сильное изменение доплеровского сдвига частоты принятого сигнала, амплитуда же не демонстрирует однозначного поведения. Благодаря этому был построен усредненный по нескольким явлениям профиль радиального электрического поля во время синхронизированных с пилообразными колебаниями периферийных локализованных мод на сферическом токамаке Глобус-М2. Показано, что во время относительно „сильных“ ELM происходит

заметное (в 2–4 раза) увеличение E_r на всех исследованных радиусах. Предположительно это может быть связано с изменениями градиента давления в пьедестале из-за сильного влияния ELM на плазму. Во время же относительно „слабых“ ELM заметного изменения поля не наблюдается, а полученные значения близки к значениям радиального электрического поля между „сильными“ ELM. Предположительно это связано со слабым влиянием „малых“ ELM на плазму.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00024 (<https://rscf.ru/project/23-72-00024>) на Уникальной научной установке „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав Федерального центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Wagner, G. Becker, K. Behringer, D. Campbell, A. Eberhagen, W. Engelhardt, G. Fussmann, O. Gehre, J. Gernhardt, G. v. Gierke, G. Haas, M. Huang, F. Karger, M. Keilhacker, O. Klüber, M. Kornherr, K. Lackner, G. Lisitano, G.G. Lister, H.M. Mayer, D. Meisel, E.R. Müller, H. Murmann, H. Niedermeyer, W. Poschenrieder, H. Rapp, H. Röhr, F. Schneider, G. Siller, E. Speth, A. Stübler, K.H. Steuer, G. Venus, O. Vollmer, Z. Yü, Phys. Rev. Lett., **49** (19), 1408 (1982). DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.1408

- [2] E.J. Doyle, W.A. Houlberg, Y. Kamada, V. Mukhovatov, T.H. Osborne, A. Polevoi, G. Bateman, J.W. Connor, J.G. Cordey, T. Fujita, X. Garbet, T.S. Hahm, L.D. Horton, A.E. Hubbard, F. Imbeaux, F. Jenko, J.E. Kinsey, Y. Kishimoto, J. Li, T.C. Luce, Y. Martin, M. Ossipenko, V. Parail, A. Peeters, T.L. Rhodes, J.E. Rice, C.M. Roach, V. Rozhansky, F. Ryter, G. Saibene, R. Sartori, A.C.C. Sips, J.A. Snipes, M. Sugihara, E.J. Synakowski, H. Takenaga, T. Takizuka, K. Thomsen, M.R. Wade, H.R. Wilson, ITPA Transport Physics Topical Group, ITPA Confinement Database and Modelling Topical Group and ITPA Pedestal and Edge Topical Group, *Nucl. Fusion*, **47** (6), S18 (2007). DOI: 10.1088/0029-5515/47/6/S02
- [3] T.C. Hender, J.C. Wesley, J. Bialek, A. Bondeson, A.H. Boozer, R.J. Buttery, A. Garofalo, T.P. Goodman, R.S. Granetz, Y. Gribov, O. Gruber, M. Gryaznevich, G. Giruzzi, S. Günter, N. Hayashi, P. Helander, C.C. Hegna, D.F. Howell, D.A. Humphreys, G.T.A. Huysmans, A.W. Hyatt, A. Isayama, S.C. Jardin, Y. Kawano, A. Kellman, C. Kessel, H.R. Koslowski, R.J. La Haye, E. Lazzaro, Y.Q. Liu, V. Lukash, J. Manickam, S. Medvedev, V. Mertens, S.V. Mirnov, Y. Nakamura, G. Navratil, M. Okabayashi, T. Ozeki, R. Paccagnella, G. Pautasso, F. Porcelli, V.D. Pustovitov, V. Riccardo, M. Sato, O. Sauter, M.J. Schaffer, M. Shimada, P. Sonato, E.J. Strait, M. Sugihara, M. Takechi, A.D. Turnbull, E. Westerhof, D.G. Whyte, R. Yoshino, H. Zohm and the ITPA MHD, Disruption and Magnetic Control Topical Group, *Nucl. Fusion*, **47** (6), S128 (2007). DOI: 10.1088/0029-5515/47/6/S03
- [4] J.W. Connor, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **40** (5), 531 (1998). DOI: 10.1088/0741-3335/40/5/002
- [5] J.W. Connor, A. Kirk, H.R. Wilson, *AIP Conf. Proc.*, **1013** (1), 174 (2008). DOI: 10.1063/1.2939030
- [6] P.B. Snyder, H.R. Wilson, J.R. Ferron, L.L. Lao, A.W. Leonard, D. Mossessian, M. Murakami, T.H. Osborne, A.D. Turnbull, X.Q. Xu, *Nucl. Fusion*, **44** (2), 320 (2004). DOI: 10.1088/0029-5515/44/2/014
- [7] A.W. Leonard, *Phys. Plasmas*, **21** (9), 090501 (2014). DOI: 10.1063/1.4894742
- [8] V.V. Solokha, G.S. Kurskiev, A.Yu. Yashin, I.M. Balachenkov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, V.K. Gusev, V.Yu. Goryainov, V.V. Dyachenko, N.S. Zhiltsov, E.O. Kiselev, V.B. Minaev, A.N. Novokhatsky, Yu.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, N.V. Sakharov, A.Yu. Telnova, E.E. Tkachenko, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, N.A. Khromov, P.B. Shchegolev, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (4), 419 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23600184
- [9] V.V. Bulanin, G.S. Kurskiev, V.V. Solokha, A.Yu. Yashin, N.S. Zhiltsov, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **63** (12), 122001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6587/ac36a4
- [10] A.Y. Yashin, V.V. Bulanin, V.K. Gusev, V.B. Minaev, A.V. Petrov, Y.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, V.I. Varfolomeev, *JINST*, **17** (1), C01023 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/01/C01023
- [11] A. Ponomarenko, V. Gusev, E. Kiselev, G. Kurskiev, V. Minaev, A. Petrov, Y. Petrov, N. Sakharov, V. Solokha, N. Teplova, P. Shchegolev, A. Yashin, N. Zhiltsov, *Nucl. Fusion*, **64** (2), 022001 (2024). DOI: 10.1088/1741-4326/ad0ead
- [12] A.Yu. Tokarev, A.Yu. Yashin, A.M. Ponomarenko, V.K. Gusev, N.S. Zhiltsov, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.V. Solokha, V.A. Velizhanin, *Plasma Phys. Rep.*, **50** (5), 541 (2024). DOI: 10.1134/S1063780X24600518
- [13] G.S. Kurskiev, N.V. Sakharov, V.K. Gusev, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, Yu.V. Petrov, A.Yu. Telnova, N.N. Bakharev, E.O. Kiselev, N.S. Zhiltsov, P.B. Shchegolev, I.M. Balachenkov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.V. Dyachenko, E.G. Zhilin, M.V. Iliasova, A.A. Kavin, A.N. Konovalov, S.V. Krikunov, K.M. Lobanov, A.D. Melnik, A.B. Mineev, A.N. Novokhatsky, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, O.M. Skrekel', V.A. Solovei, V.V. Solokha, E.E. Tkachenko, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, F.V. Chernyshev, A.E. Shevelev, K.D. Shulyat'ev, A.Yu. Yashin, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (4), 403 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23600214
- [14] G.D. Conway, J. Schirmer, S. Kluge, W. Suttrop, E. Holzhauser, the ASDEX Upgrade Team, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46** (6), 951 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/6/003
- [15] C. Silva, E.R. Solano, J.C. Hillesheim, E. Delabie, G. Birkenmeier, L. Gil, C. Giroud, R.B. Morales, D. Nina and JET Contributors, *Nucl. Fusion*, **62** (12), 126057 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac97f4
- [16] X. Feng, A.D. Liu, C. Zhou, M.Y. Wang, J. Zhang, Z.Y. Liu, Y. Liu, T.F. Zhou, S.B. Zhang, D.F. Kong, L.Q. Hu, J.X. Ji, H.R. Fan, H. Li, T. Lan, J.L. Xie, W.Z. Mao, Z.X. Liu, W.X. Ding, G. Zhuang, W.D. Liu, *Rev. Sci. Instrum.*, **90** (2), 024704 (2019). DOI: 10.1063/1.5075615
- [17] Z. Shi, W. Zhong, M. Jiang, Z. Yang, B. Zhang, P. Shi, W. Chen, J. Wen, C. Chen, B. Fu, Z. Liu, X. Ding, Q. Yang, X. Duan, *Rev. Sci. Instrum.*, **87** (11), 113501 (2016). DOI: 10.1063/1.4966680
- [18] V.V. Bulanin, A.Y. Yashin, A.V. Petrov, V.K. Gusev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, Y.V. Petrov, D.V. Prisiazhniuk, V.I. Varfolomeev, *Rev. Sci. Instrum.*, **92** (3), 033539 (2021). DOI: 10.1063/5.0030307
- [19] A. Ponomarenko, A. Yashin, G. Kurskiev, V. Minaev, A. Petrov, Y. Petrov, N. Sakharov, N. Zhiltsov, *Sensors*, **23** (2), 830 (2023). DOI: 10.3390/s23020830
- [20] A.Y. Yashin, V.V. Bulanin, A.V. Petrov, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, *Plasma Phys. Rep.*, **46** (7), 683 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20070107
- [21] A.Yu. Yashin, V.V. Bulanin, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, S.Yu. Tolstyakov, *Nucl. Fusion*, **58** (11), 112009 (2018). DOI: 10.1088/1741-4326/aac4d8
- [22] O. Grover, P. Manz, A.Y. Yashin, D.I. Refy, J. Seidl, N. Vianello, G. Birkenmeier, E.R. Solano, M. Sos, P. Bohm, P. Bilkova, M. Hron, R. Panek, the ASDEX Upgrade Team, the COMPASS Team, the Globus-M Team, JET Contributors, *Nucl. Fusion*, **64** (2), 026001 (2024). DOI: 10.1088/1741-4326/ad0eac
- [23] A.Yu. Yashin, V.V. Bulanin, V.K. Gusev, N.A. Khromov, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, D.V. Prisyazhnyuk, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, F. Wagner, *Nucl. Fusion*, **54** (11), 114015 (2014). DOI: 10.1088/0029-5515/54/11/114015
- [24] В.В. Буланин, Ф. Вагнер, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Ю.В. Петров, Д.В. Присяжнюк, Н.В. Сахаров, С.Ю. Толстяков, Н.А. Хромов, П.Б. Шегелев, А.Ю. Яшин, *Письма в ЖТФ*, **40** (9), 24 (2014). [V.V. Bulanin, F. Wagner, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev,

- M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, D.V. Prisyazhnyuk, N.V. Sakharov, S.Yu. Tolstyakov, N.A. Khromov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Yashin, *Tech. Phys. Lett.*, **40** (5), 375 (2014). DOI: 10.1134/S106378501405006X].
- [25] V.V. Bulanin, N.N. Bakharev, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov, A.Yu. Yashin, *Phys. Atom. Nucl.*, **83** (7), 1124 (2020). DOI: 10.1134/S1063778820070042
- [26] В.В. Буланин, И.М. Балаченков, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Г.С. Курскиеv, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Ю.В. Петров, А.М. Пономаренко, А.Ю. Тельнова, П.Б. Щеголев, А.Ю. Яшин, *Письма в ЖТФ*, **47** (4), 41 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.04.50645.18584 [V.V. Bulanin, I.M. Balachenkov, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, A.Yu. Telnova, P.B. Shchegolev, A.Yu. Yashin, *Tech. Phys. Lett.*, **47** (2), 197 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021020206].
- [27] A.Yu. Yashin, V.V. Bulanin, V.K. Gusev, E.O. Kiselev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, P.B. Shchegolev, *Nucl. Fusion*, **61** (9), 092001 (2021). DOI: 10.1088/1741-4326/ac1297
- [28] A. Yashin, A. Ponomarenko, I. Balachenkov, G. Kurskiev, E. Kiselev, V. Minaev, A. Petrov, Y. Petrov, N. Sakharov, N. Zhiltsov, *Appl. Sci.*, **13** (6), 3430 (2023). DOI: 10.3390/app13063430
- [29] V.V. Bulanin, V.K. Gusev, N.A. Khromov, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, M.A. Petrov, Yu.V. Petrov, D. Prisyazhniuk, N.V. Sakharov, S.Yu. Tolstyakov, A.Yu. Yashin, *Nucl. Fusion*, **59** (9), 096026 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab2cdf
- [30] А.Ю. Яшин, А.М. Пономаренко, Н.С. Жильцов, К.А. Кукушкин, Г.С. Курскиеv, В.Б. Минаев, А.В. Петров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, *Письма в ЖТФ*, **49** (13), 28 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55733.19604 [A.Y. Yashin, A.M. Ponomarenko, N.S. Zhiltsov, K.A. Kukushkin, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (3), S239 (2023). DOI: 10.1134/S1063785023900893].
- [31] A. Yashin, N. Teplova, G. Zadvitskiy, A. Ponomarenko, *Sensors*, **22** (23), 9441 (2022). DOI: 10.3390/s22239441
- [32] V.V. Bulanin, E.Z. Gusakov, V.K. Gusev, G. Zadvitskiy, C. Lechte, S. Heuraux, V.B. Minaev, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, N. Teplova, A.Yu. Yashin, *Plasma Phys. Rep.*, **46** (5), 490 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20050025
- [33] A. Yashin, V. Bulanin, A. Petrov, A. Ponomarenko, *Appl. Sci.*, **11** (19), 8975 (2021). DOI: 10.3390/app11198975