

04.2

Определение параметров филаментов на сферическом токамаке Глобус-М2 с помощью метода доплеровского обратного рассеяния

© А.Ю. Яшин^{1,2}, А.М. Пономаренко¹, Н.С. Жильцов², К.А. Кукушкин¹, Г.С. Курскиев²,
В.Б. Минаев², А.В. Петров¹, Ю.В. Петров², 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: alex_yashin@list.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 4 мая 2023 г.

Принято к публикации 5 мая 2023 г.

В режиме улучшенного удержания (H-мода) в токамаке Глобус-М2 развитие периферийной локализованной неустойчивости (ELM) сопровождается возникновением нитевидных структур. Использование метода доплеровского обратного рассеяния позволило определить параметры филаментов как во время ELM, инициированных пилообразными колебаниями, так и во время самосогласованных ELM. Показано, что число филаментов, наблюдаемых во время синхронизированных с пилообразными колебаниями ELM, оказывается больше, а область их наблюдения по радиусу — шире. Скорости филаментов во время всех наблюдаемых на токамаке Глобус-М2 типах ELM оказываются выше, чем на токамаке Глобус-М. Филаменты, развивающиеся непосредственно перед вспышкой ELM, характеризуются меньшими амплитудами и скоростями. Сравнение результатов применения двух диагностик (доплеровского обратного рассеяния и поперечной корреляционной доплеровской рефлектометрии) для определения скорости таких филаментов демонстрирует совпадение измеряемой величины, что может свидетельствовать о линейном случае рассеяния на этих филаментах.

Ключевые слова: высокотемпературная плазма, токамак, филаменты, доплеровское обратное рассеяние.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55733.19604

Филаменты вносят значительный вклад в перенос и потери частиц и энергии в L- и H-режимах, а также могут привести к разрушению стенок токамака и ухудшить параметры центральной плазмы [1]. Известно, что они представляют собой вытянутые вдоль магнитных силовых линий возмущения плотности плазмы, которые развиваются в периферийной области токамака в районе последней замкнутой магнитной поверхности или сепаратрисы. На сферическом токамаке Глобус-М эти структуры были обнаружены и была продемонстрирована возможность использования метода доплеровского обратного рассеяния (ДОР) для их исследования [2]. Для правильной интерпретации экспериментальных данных было предпринято моделирование сигналов ДОР с помощью программного кода IPF-FD3D, которое показало, что экспериментально наблюдаемые квазикогерентные вспышки в сигналах — проявление обратного рассеяния на филаментах [3,4]. С учетом того, что диагностика ДОР работает в линейном режиме рассеяния, были определены различные параметры филаментов, такие как их локализация и скорость [5,6]. Также было обнаружено несколько типов филаментов: во время периферийных локализованных неустойчивостей (ELM) и между ними, которые различались по своим характеристикам. После модернизации установки Глобус-М, которая привела к увеличению основных параметров плазменного разряда [7], можно ожидать изменения характеристик наблюдаемых филаментов. Такое изменение возможно из-за

увеличения величины градиента давления плазмы [8,9], которое привело к тому, что на токамаке Глобус-М2 теперь часто развиваются не только инициируемые пилообразными колебаниями краевые неустойчивости [10], но и самосогласованные [11]. Поэтому с целью изучения и определения параметров филаментов на новом токамаке Глобус-М2 была применена диагностика ДОР [12], которая также была модернизирована, чтобы учесть недостатки старой системы. Теперь она позволяет исследовать больший диапазон малых радиусов токамака. В настоящей работе представлены новые сведения о филаментах, развивающихся при различных условиях разряда.

ДОР (также доплеровская рефлектометрия) — микроволновая диагностика, подразумевающая зондирование плазмы под углом к магнитным поверхностям, что позволяет детектировать обратное рассеяние микроволнового излучения из области отсечки [13]. Диагностика ДОР позволяет проводить локальные измерения плазменных параметров. По доплеровскому сдвигу в спектре обратного рассеяния можно определить перпендикулярную скорость вращения турбулентности, движущейся вместе с плазмой. Эта компонента скорости соответствует вращению в направлении диамагнитного дрейфа, или $E \times B$ дрейфа. Кроме того, амплитуда комплексного сигнала ДОР связана с поведением амплитуды турбулентных флуктуаций плотности плазмы. Этот метод используется на различных установках для

определения скорости вращения плазмы и радиального электрического поля. На токамаках Глобус-М/М2 эта диагностика также была успешно применена для исследования различных колебательных процессов, таких как геодезические акустические моды, колебания предельного цикла, альфвеновские моды и др. [14].

На токамаке Глобус-М2 установлены две многочастотные системы ДОР [12] и одна система с меняющейся частотой. Первая многочастотная система, расположенная в экваториальной плоскости, позволяет зондировать плазму на частотах 20, 29, 39, 48 GHz, вторая, расположенная на 14 см ниже, — на частотах 50, 55, 60, 65 GHz, а третья, расположенная на 14 см выше, имеет одну частоту зондирования, меняющуюся в диапазоне 18–24 GHz. Все доступные частоты зондирующего излучения были выбраны с целью производить измерения в различных областях токамака от внутренней плазмы до сепаратрисы. Диапазон частот соответствует интервалу нормализованных малых радиусов $\rho = 0.5–1.1$ для разрядов, представленных в работе.

На токамаке Глобус-М2 в режиме улучшенного удержания, инициированного инъекцией пучка быстрых нейтральных атомов, филаменты систематически наблюдались во время краевых неустойчивостей, синхронизованных с пилообразными колебаниями. С помощью обновленной системы ДОР было проведено исследование этих нитевидных структур. Использование высокочастотных каналов зондирования в системе ДОР позволило впервые исследовать развитие филаментов в центральной области плазмы. Было обнаружено, что на токамаке Глобус-М2 нитевидные структуры наблюдаются на каналах с частотами зондирования 20–50 GHz, что соответствует диапазону нормализованных малых радиусов $\rho = 0.7–1.1$. Кроме того, были определены скорости перпендикулярного движения филаментов на токамаке Глобус-М2 с целью сравнения их характеристик с филаментами, наблюдаемыми на токамаке Глобус-М. Результат приведен на рис. 1 в виде гистограммы, где черные столбцы соответствуют филаментам, наблюдаемым в области пьедестала, а серые — на периферии плазмы. В рассматриваемом разряде было обнаружено 25 филаментов на частоте зондирования 20 GHz (радиус 60 см) и 32 на частоте 50 GHz (радиус 55 см). Каждый из найденных филаментов наблюдался только на одном частотном канале, что указывает на то, что радиальный размер филамента не превышает расстояния между отсечками зондирующего излучения (около 1.5 см). Важно отметить, что периферийные филаменты имели полоидальную скорость порядка 10–30 км/с, в то время как нитевидные структуры в области пьедестала имели значения скорости до 50 км/с. Отсутствие филаментов с такими высокими полоидальными скоростями на канале 20 GHz позволяет объяснить, почему на этом канале наблюдалось меньшее количество нитевидных структур. По-видимому, филаменты с большой полоидальной компонентой скорости имеют очень малую радиальную составляющую скорости и не доходят до сепаратрисы за

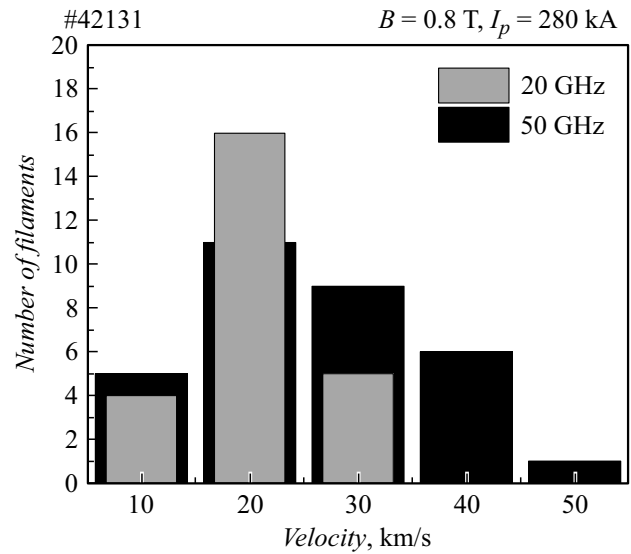


Рис. 1. Распределение наблюдаемых филаментов по скоростям для различных частотных каналов ДОР для разряда № 42131.

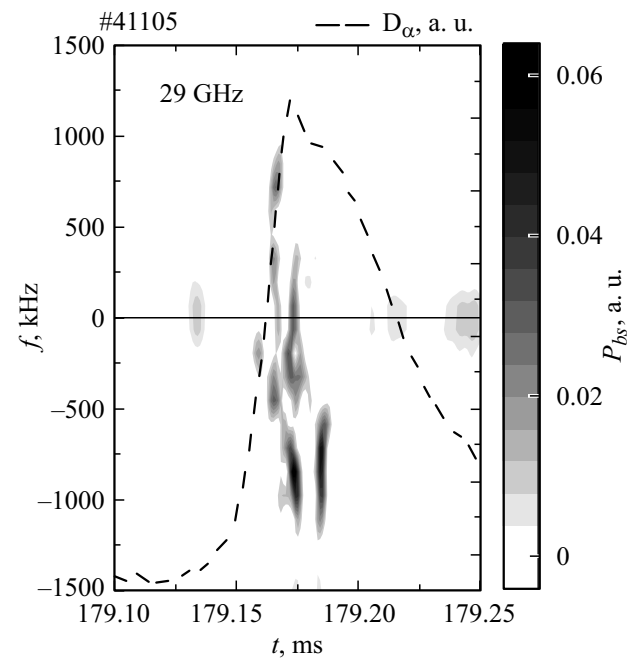


Рис. 2. Спектрограмма комплексного сигнала ДОР для частоты зондирования 29 GHz для разряда № 41105. Яркие пятна представляют собой филаменты. Штриховая линия поверх спектрограммы — линия свечения D_α во время вспышки самосогласованного ELM.

время своего существования. Схожее поведение филаментов было обнаружено на токамаке MAST [15], когда филаменты с большими полоидальными компонентами скорости имели очень маленькую радиальную компоненту и, наоборот, филаменты с большой радиальной составляющей скорости медленно распространялись в полоидальном направлении. Кроме того, полученные

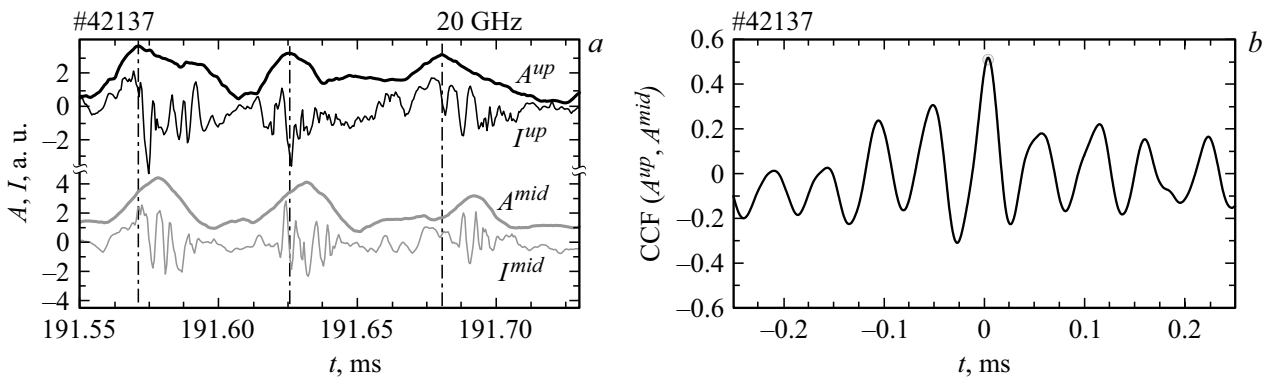


Рис. 3. *a* — временная эволюция сигналов ДОР и их огибающие (амплитуды) для частоты зондирования 20 GHz. Черным цветом показан сигнал, полученный системой ДОР, расположенной на расстоянии 14 см над экваториальной плоскостью, серым — системой ДОР, расположенной в экваториальной плоскости; *b* — корреляционная функция для амплитуды сигналов с частотами зондирования 20 GHz для двух систем ДОР.

значения скоростей оказались выше, чем у филаментов, наблюдаемых ранее на токамаке Глобус-М [5].

После увеличения значений магнитного поля и тока на токамаке Глобус-М2 стали часто появляться самосогласованные краевые неустойчивости. Это явление связано с увеличением величины градиента давления плазмы и плотности периферийного тока, что привело к дестабилизации пилинг-баллонной неустойчивости. С помощью диагностики ДОР было подтверждено, что нитевидные структуры развиваются также и во время таких ELM. Пример наблюдаемых филаментов приведен на рис. 2, где изображена спектрограмма комплексного сигнала канала с частотой зондирования 29 GHz. Кроме того, на рисунке присутствует линия свечения D_α для иллюстрации того, что развитие нитевидных структур происходит во время вспышки ELM. В данном случае было обнаружено два филамента с одинаковой полоидальной скоростью 15 km/s (или доплеровским смещением частоты 800 kHz), которые проявляются в виде ярких всплесков на спектрограмме. Важно отметить, что за время одной вспышки самосогласованной ELM обычно наблюдается один или два филамента, тогда как во время ELM, инициированной пилообразными колебаниями, развивается до пяти нитевидных структур. Это может быть объяснено тем, что вспышки самосогласованной ELM значительно короче по времени (0.1 ms). Помимо этого филаменты во время самосогласованных ELM отличаются периферийной локализацией и наблюдаются преимущественно на каналах 20 и 29 GHz системы ДОР. Это может быть связано с тем, что срывы пилообразных колебаний, которые происходят в центральных областях плазмы и соответственно возмущают плазменный ток не только на периферии, дестабилизируют пилинг-баллонную неустойчивость в большом диапазоне радиусов, тем самым инициируя связанные с ними ELM с широкой локализацией.

Группы филаментов наблюдались не только во время ELM, но и на стадии непосредственно перед ELM,

когда пилинг-баллонная неустойчивость, по-видимому, приближается к порогу своего развития. Такие филаменты характеризовались меньшей амплитудой и несколько меньшими скоростями полоидального распространения. Поскольку известно, что филаменты являются структурами, вытянутыми вдоль магнитных силовых линий, на токамаке Глобус-М2 была применена полоидальная корреляционная доплеровская рефлектометрия для определения направления полоидального движения нитевидных структур и альтернативной оценки скорости данного движения. С этой целью использовались две системы ДОР, расположенные в экваториальной плоскости и на расстоянии 14 см над ней. Применение полоидальной корреляционной рефлектометрии подразумевает анализ данных, собранных на одном радиусе, поэтому в экспериментах использовалась одна и та же частота 20 GHz на двух системах. Пример получаемых сигналов приведен на рис. 3, *a*, где изображены сигналы ДОР и их огибающие. Можно видеть, что филаменты наблюдались на обоих каналах, но с некоторой задержкой: сначала всплеск происходит на верхней системе, а затем на нижней, что продемонстрировано вертикальными линиями. Это свидетельствует о том, что филаменты движутся в направлении сверху вниз. Для анализа данной задержки был применен корреляционный анализ. На рис. 3, *b* приведена корреляционная функция, рассчитанная для амплитуды сигналов с частотами зондирования 20 GHz для двух систем ДОР (системы № 1 и 3) в рассматриваемом разряде. Отсчеты данных зондирующих пучков находятся на одном радиусе ($r = 60$ см), но разнесены на 3.5 см в полоидальном направлении. Максимальное значение 0.52 функция имеет при временной задержке 4 μ s. Полученные значения расстояния между отсчетками и временной задержки можно использовать для оценки полоидальной скорости движения филаментов, которая для продемонстрированного на рисунке случая оказалась порядка 8 km/s. При этом скорость данных филаментов,

определенная по доплеровскому сдвигу частоты сигнала ДОР, оказывается очень близка к этому значению (7 km/s). Совпадение значений скорости, измеренной разными методами, указывает на то, что рассеяние на филаментах происходило в линейном режиме. Этого и следовало ожидать для рассеяния на филаментах перед ELM, амплитуда которых мала. Однако при сильном увеличении амплитуды рассеивающих филаментов скорость, восстанавливаемая по доплеровскому смещению частоты обратнорассеянного сигнала, может отличаться от реального значения, о чем свидетельствует результат моделирования с помощью полноволнового кода IPF-FD3D [4]. Таким образом, применение метода одновременного спектрального и корреляционного анализа сигналов ДОР для определения скорости филаментов, продемонстрированного в настоящей работе, оказывается эффективным для исследования параметров нитевидных структур.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-72-10028 (<https://rscf.ru/project/18-72-10028/>) на УНУ „Сферический токамак Глобус-М“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.A. D'Ippolito, J.R. Myra, S.J. Zweben, *Phys. Plasmas*, **18**, 060501 (2011). DOI: 10.1063/1.3594609
- [2] В.В. Буланин, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, А.Е. Иванов, С.В. Крикунов, Г.С. Курскиев, М.М. Ларионов, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, С.Ю. Толстяков, Н.А. Хромов, А.Ю. Яшин, *Письма в ЖТФ*, **37** (7), 103 (2011). [V.V. Bulanin, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, A.E. Ivanov, S.V. Krikunov, G.S. Kurskiev, M.M. Larionov, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, S.Yu. Tolstyakov, N.A. Khromov, A.Yu. Yashin, *Tech. Phys. Lett.*, **37**, 340 (2011). DOI: 10.1134/S1063785011040043].
- [3] V.V. Bulanin, E.Z. Gusakov, V.K. Gusev, G. Zadvitskiy, C. Lechte, S. Heuroux, V.B. Minaev, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, N. Teplova, A.Yu. Yashin, *Plasma Phys. Rep.*, **46**, 490 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20050025
- [4] A. Yashin, N. Teplova, G. Zadvitskiy, A. Ponomarenko, *Sensors*, **22**, 9441 (2022). DOI: 10.3390/s22239441
- [5] 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. Prisiazhniuk, *Nucl. Fusion*, **59**, 096026 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab2cdf
- [6] A.Yu. Yashin, V.V. Bulanin, A.V. Petrov, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, *JINST*, **14**, C10025 (2019). DOI: 10.1088/1748-0221/14/10/C10025
- [7] Yu.V. Petrov, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.B. Minaev, V.I. Varfolomeev, V.V. Dyachenko, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, E.N. Bondarchuk, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, M.V. Iliasoza, A.A. Kavin, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Kononov, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, G.S. Kurskiev, A.D. Melnik, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatskii, N.S. Zhiltsov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, K.D. Shulyatiev, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, E.A. Tukhmenova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, A.V. Voronin, A.Yu. Yashin, P.A. Bagryansky, E.G. Zhilin, V.A. Goryainov, *Nucl. Fusion*, **62**, 042009 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac27c7
- [8] G.S. Kurskiev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, A.A. Kavin, E.O. Kiselev, N.A. Khromov, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmenova, V.I. Varfolomeev, A.Yu. Yashin, N.S. Zhiltsov, *Nucl. Fusion*, **61**, 064001 (2021). DOI: 10.1088/1741-4326/abe08c
- [9] G.S. Kurskiev, I.V. Miroshnikov, N.V. Sakharov, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, V.B. Minaev, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, V.Yu. Goryainov, A.A. Kavin, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, S.V. Krikunov, K.M. Lobanov, A.D. Melnik, A.N. Novokhatskii, S.V. Filippov, N.S. Zhiltsov, A.B. Mineev, E.E. Mukhin, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, V.V. Solokha, K.D. Shulyatiev, P.B. Shchegolev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, E.E. Tkachenko, E.A. Tukhmenova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, A.Yu. Yashin, V.A. Solovey, E.G. Zhilin, *Nucl. Fusion*, **62**, 104002 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac881d
- [10] V.V. Bulanin, G.S. Kurskiev, V.V. Solokha, A.Yu. Yashin, N.S. Zhiltsov, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **63**, 122001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6587/ac36a4
- [11] 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, O.E. 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. Tukhmenova, N.A. Khromov, P.B. Shchegolev, *Plasma Phys. Rep.*, **49**, 419 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23600184
- [12] 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**, C01023 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/01/C01023
- [13] G.D. Conway, J. Schirmer, S. Klenge, W. Suttrop, E. Holzhauser and the ASDEX Upgrade Team, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46**, 951 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/6/003
- [14] A. Yashin, V. Bulanin, A. Petrov, A. Ponomarenko, *Appl. Sci.*, **11**, 8975 (2021). DOI: 10.3390/app11198975
- [15] N. Ben Ayed, A. Kirk, B. Dudson, S. Tallents, R.G.L. Vann, H.R. Wilson and MAST team, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **51**, 035016 (2009). DOI: 10.1088/0741-3335/51/3/035016