

04.2

## Обнаружение высокочастотных альфвеновских колебаний в омических разрядах сферического токамака Глобус-М2

© И.М. Балаченков<sup>1,2</sup>, Ю.В. Петров<sup>1</sup>, В.К. Гусев<sup>1</sup>, Н.Н. Бахарев<sup>1</sup>, В.И. Варфоломеев<sup>1</sup>, В.В. Дьяченко<sup>1</sup>, А.Н. Коновалов<sup>1</sup>, П.А. Корепанов<sup>1</sup>, С.В. Крикунов<sup>1</sup>, В.Б. Минаев<sup>1</sup>, М.И. Патров<sup>1</sup>, Н.В. Сахаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 февраля 2021 г.

В окончательной редакции 10 марта 2021 г.

Принято к публикации 17 марта 2021 г.

В омических разрядах токамака Глобус-М2 при низкой плотности с помощью магнитных зондов обнаружены колебания магнитного поля на частотах порядка 1 МГц, которые вызваны распространением в плазме альфвеновской волны. Частота этих колебаний значительно превосходит частотный диапазон, в котором ранее наблюдались различные альфвеновские волны, а амплитуда, наоборот, оказалась значительно меньше. Установлено, что колебания, по всей видимости, возникают в присутствии в плазме ускоренных электронов. Возмущение всегда формирует стоячую волну с низкими номерами тороидальных чисел, в том числе с  $n = 0$ , а значит, обнаруженная неустойчивость не является модой, возникающей в частотном зазоре. Характер изменения частоты моды во время отдельных вспышек колебаний  $\delta\omega \sim \sqrt{I}$ , что согласуется с предсказанием hole-clump-модели.

**Ключевые слова:** сферический токамак, Глобус-М2, альфвеновские колебания, убегающие электроны.

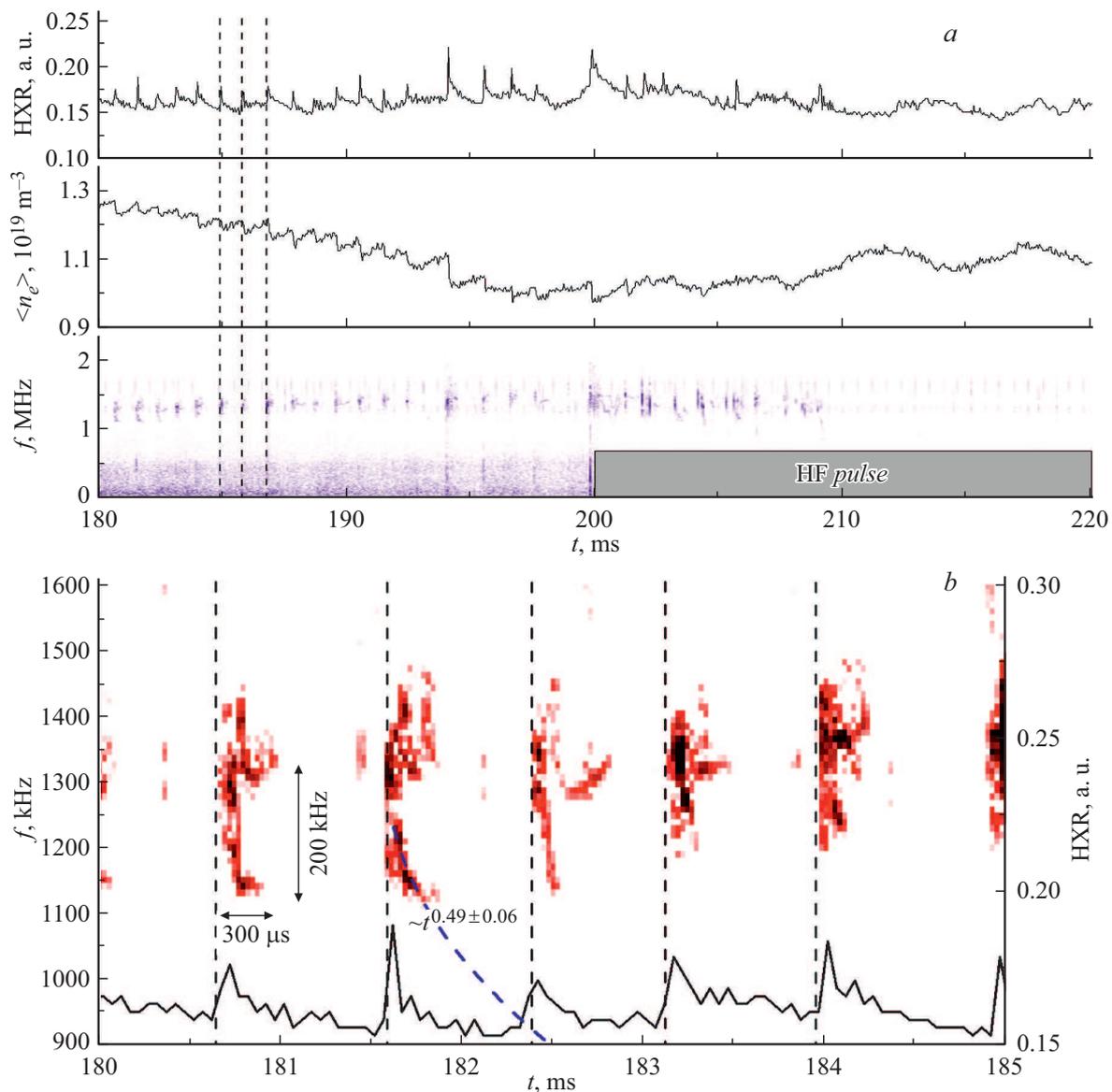
DOI: 10.21883/PJTF.2021.12.51061.18730

Альфвеновские волны на протяжении долгого времени регистрируются в плазме токамаков [1,2]. Наибольший практический интерес представляет изучение их влияния на энергобаланс и эффективность дополнительного нагрева, поскольку их возбуждение, как правило, происходит за счет энергии надтепловых ионов и электронов [1]. В сферических токамаках Глобус-М2 [3] и Глобус-М [4] (большой радиус  $R = 0.36$  м, малый радиус  $a = 0.24$  м, аспектное отношение  $A = 1.5$ ) ранее наблюдались различные типы альфвеновских мод: тороидальные моды (toroidicity-induced Alfvén eigenmodes, TAE) [5,6] и так называемые альфвеновские каскады (Alfvén cascades, AC) [7]. Моды, наблюдению которых посвящена настоящая работа, до последнего времени не регистрировались на токамаках Глобус-М и Глобус-М2 в связи с ограничениями полосы пропускания системы магнитных измерений. Для наблюдения сигналов в более широком частотном диапазоне были установлены аналого-цифровые преобразователи с частотой оцифровки 10 МГц, подключенные к зондам тороидального массива через гальванически развязанные фильтры с полосой пропускания 30 кГц–3 МГц. Для увеличения пространственного разрешения число зондов было увеличено с четырех до восьми.

Изначально во время экспериментов по генерации тока волнами нижнегибридного диапазона (2.45 GHz) в сигнале магнитного зонда регистрировались регулярные (с периодом следования порядка 1 мс) вспышки квазикогерентных колебаний магнитного поля с частотой в диапазоне 0.8–1.8 МГц (рис. 1). Обнаруженные колеба-

ния наблюдались во множестве разрядов при достаточно низкой электронной концентрации  $\langle n_e \rangle < 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , полях  $B_0 = 0.7\text{--}0.8$  Т в широком диапазоне токов по плазме ( $I_p = 180\text{--}400$  кА). Аналогичные колебания на сигналах магнитных зондов были обнаружены также в омических разрядах. Дальнейший анализ большого объема экспериментальных данных показал, что обнаруженные сигналы могут появляться независимо от импульса высокочастотного (ВЧ) излучения, а кажущаяся взаимосвязь возникает из-за того, что генерация тока, как правило, происходит при низкой плотности, когда, по всей видимости, создаются благоприятные условия для развития этой неустойчивости. Обнаруженные колебания имеют большую частоту, чем у наблюдавшихся ранее TAE и AC, частота которых находилась в диапазоне 100–300 кГц, и значительно меньшую амплитуду, не превосходящую величину 1 Г, что в совокупности довольно сильно затрудняет их наблюдение.

Колебания магнитного поля, изучению которых посвящена настоящая работа, по всей видимости, возникают в результате распространения в плазме альфвеновской волны с дисперсионным соотношением  $2\pi f_A = (\mathbf{k} \cdot \mathbf{V}_A)$ , где  $k$  — волновое число,  $V_A = B/\sqrt{4\pi\rho_i}$  — альфвеновская скорость [1],  $B$  — локальная величина магнитного поля, а  $\rho_i$  — массовая плотность плазмы. Об альфвеновской природе неустойчивости свидетельствует хорошее согласие (коэффициент корреляции Пирсона  $\rho = 90\%$ ) частоты, измеренной магнитным зондом, со скейлингом  $f_A \sim B_0^1 \langle n_e \rangle^{-0.5}$ , где  $B_0$  — поле на магнитной оси, а  $\langle n_e \rangle$  — среднехордовая концентрация электронов, изме-



**Рис. 1.** Разряд № 39078,  $B_0 = 0.75$  Т,  $I_p = 200$  кА. *a* (сверху вниз) — сигнал датчика жесткого рентгена, эволюция среднечордовой электронной концентрации, спектрограмма сигнала зонда Мирнова. Прямоугольником выделен импульс ВЧ-нагрева. Вертикальные штриховые линии показывают соответствие моментов времени всплеск альфвеновских колебаний и пилообразных срывов. *b* — подробная структура всплеск высокочастотных колебаний. На спектрограмму наложены сигнал датчика жесткого рентгена и кривая, аппроксимирующая частоту всплески.

ренная вдоль вертикальной хорды, проходящей на радиусе  $R = 42$  см. Зависимость частоты от альфвеновской скорости представлена на рис. 2.

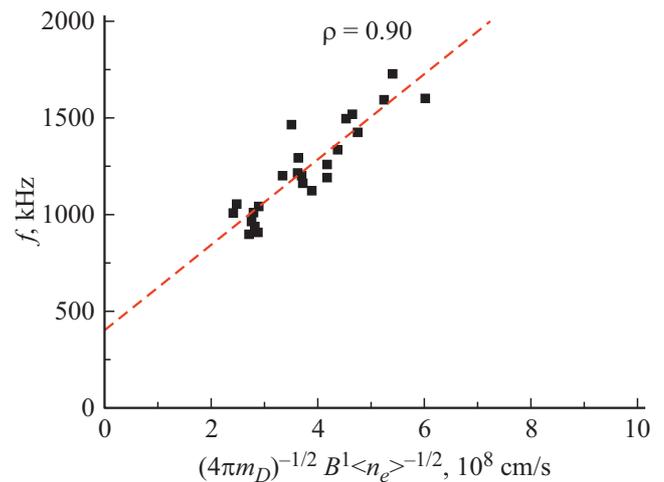
Пространственная структура альфвеновской волны в токамаке определяется набором волновых чисел  $(m, n)$ . Тороидальное число  $n$  определялось при помощи тороидального массива, состоящего из восьми магнитных зондов, установленных равномерно вдоль тороидального обхода и измеряющих радиальную составляющую магнитного потока. Пространственный спектр тороидальных гармоник возмущения определялся при помощи разложения Фурье. Это является оправданным, так как для тороидального сечения характерна азимутальная

симметрия, позволяющая разложить возмущение в классе гармонических функций. Полоидальная структура этих колебаний, однако, не может быть определена существующими диагностиками, так как массив полоидальных зондов в установке Глобус-М2 расположен в металлических трубках, для которых скин-эффект на частоте обнаруженных колебаний превышает их период. На рис. 3, *a* показана эволюция амплитуды тороидальных гармоник в течение одной из всплеск колебаний с усреднением пространственного фурье-спектра по окну 800 ns с 50% перекрытием. Дополнительная информация о структуре возмущения была получена путем построения матрицы кросс-фаз [8]. Каждой ячейке матрицы

на рис. 3, *b* соответствует фазовый сдвиг между парой зондов, номера которых отложены по осям. В случае распространения возмущения в виде плоской волны с волновым числом  $n$ , на матрице кросс-фаз формируется  $n$  полос равной фазы, соответствующих структуре бегущей волны с номером  $n$ . В случае, представленном на рис. 3, *b*, полос равной фазы не формируется, однако можно заметить группы зондов, сигналы которых практически не имеют фазового сдвига, а фаза сигнала меняется скачкообразно два раза за обход между зондами 1, 2 и 5, 6. Оказалось, что такая структура соответствует стоячей волне с  $n = 1$ , о чем можно судить на основании сравнения матрицы кросс-фаз для реальных сигналов (рис. 3, *b*) с матрицей кросс-фаз, для которой сигналы каждого из восьми зондов задавались вручную в виде суммы двух плоских волн с разными знаками перед фазовым множителем и  $n = 1$  (рис. 3, *c*). Сравнивая положение областей равной фазы на рис. 3, *b* и *c*, можно заключить, что в момент времени, представленный на рис. 3, *b*, развивалась именно стоячая волна с  $n = 1$  (структура с  $n = 0$  с преобладающей интенсивностью в фурье-спектре не приводит к фазовому сдвигу между сигналами зондов и на рис. 3, *b* не отражена). В итоге было установлено, что во всех зарегистрированных вспышках ВЧ-колебаний формируются только стоячие волны с небольшими номерами  $n = 1, 2$ , а также  $n = 0$ . Также оказалось, что наблюдаемая неустойчивость не является TAE или другой модой, возникающей в частотном зазоре, так как структура такой моды подразумевает полоидальное зацепление мод с номерами  $m$  и  $m + l$  (где  $l$  — целое число). Так, например, для TAE из условия  $k_m = -k_{m+1}$  следует, что  $q = (m + 1/2)/n$ , что исключает возможность развития TAE с  $n = 0$ .

Анализируя сигналы других диагностик, можно сделать вывод, что вспышки альфвеновских колебаний возникают сразу после пилообразных срывов, которые наиболее хорошо заметны на сигнале жесткого рентгена, а также на сигнале микроволнового интерферометра (рис. 1, *a*). Подробное рассмотрение отдельных вспышек показало (рис. 1, *b*), что частота колебаний может существенно меняться за время существования моды. Например, в разряде № 39078 в районе 180.5 ms (и в соседних вспышках) частота моды разделяется на растущую и спадающую ветви. Наиболее хорошо изменение частоты заметно на спадающей ветви, где за время вспышки (порядка 200–300  $\mu$ s) частота моды спадает на 200 kHz.

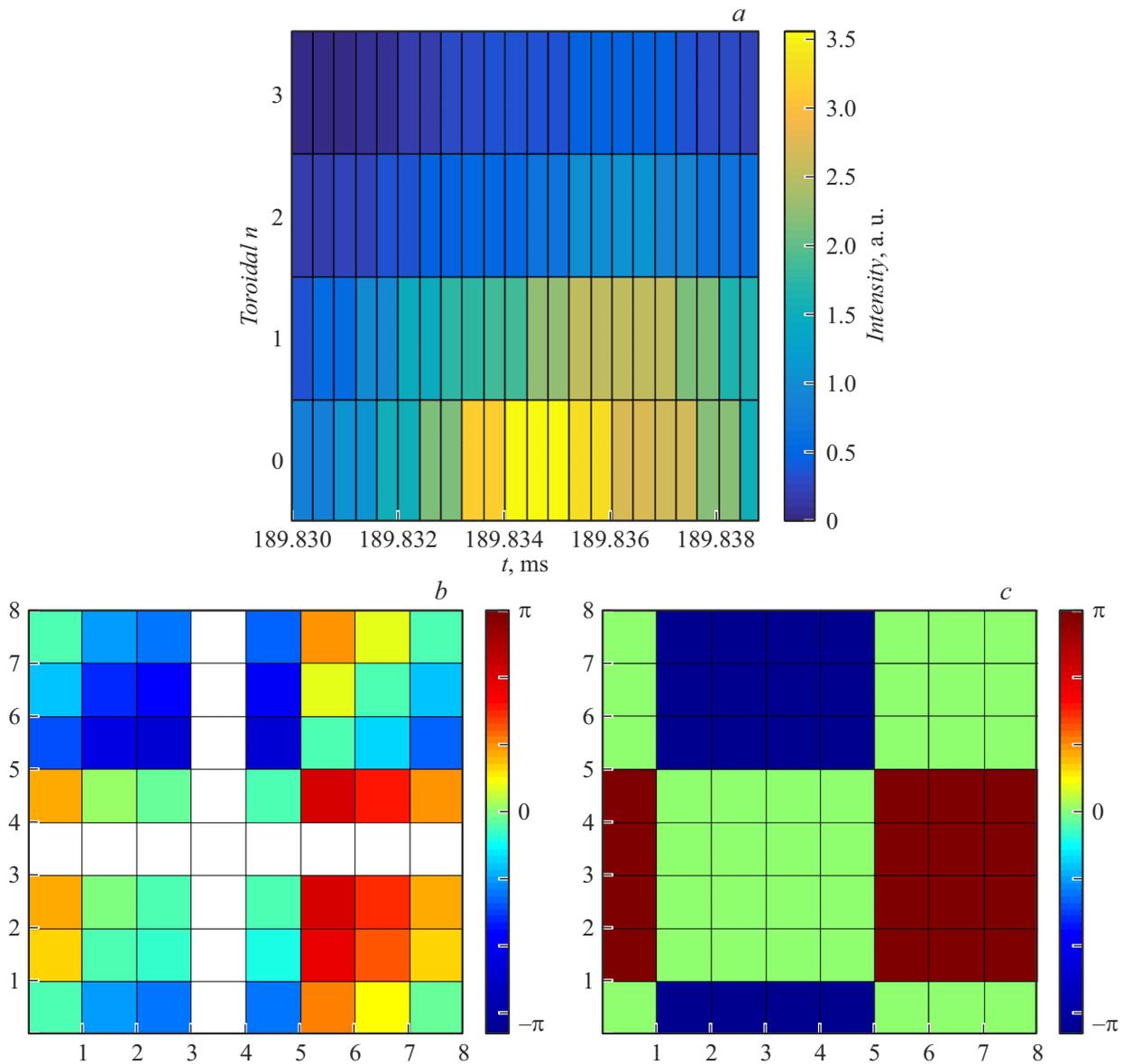
Колебания, возникающие на альфвеновских частотах и проявляющиеся в виде вспышек, следующих за медленными магнитогидродинамическими (МГД) событиями, такими как пилообразные колебания, IRE (internal reconnection event) или ELM (edge localized mode), наблюдались ранее на других установках, а именно TFTR [9], MAST [10], ТУМАН-3М [11], COMPASS [12] и др., однако определенные свойства и механизмы возбуждения, судя по всему, различаются. В работе [9] сообщается об обнаружении на TFTR колебаний в альфвеновском диапазоне частот (Alfven frequency mode, AFM)



**Рис. 2.** Зависимость частоты колебаний, измеренной магнитным зондом, от альфвеновской скорости.

в периферийной области, имеющих структуру с  $n = 0$  и возникающих после ELM. В [10] обнаружено присутствие в плазме фракции ионов, ускоренных во время IRE, с которой связано возникновение МГД-событий, обнаруженных ранее на MAST. В [13] предлагается модель возбуждения TAE ускоренными электронами на частоте прецессии их орбит. В [14] рассмотрена возможность развития TAE и EAE (elliptic Alfvén eigenmode), а также EPM (energetic particle mode) на частотах EAE ускоренными электронами. В работах [11,15] приводятся свидетельства возбуждения глобальной моды (global Alfvén eigenmode) ускоренными электронами вследствие уплощения профиля тока после пилообразного срыва.

Поскольку признаков наличия надтепловых ионов в разрядах с AFM на токамаке Глобус-М2 обнаружено не было, присутствие этой неустойчивости в омических разрядах позволяет предположить, что вероятной причиной ее возбуждения является присутствие в разряде фракции быстрых электронов, появление которой возможно без дополнительного нагрева. В омическом режиме пучок электронов начинает ускоряться тороидальной компонентой электрического поля при превышении полем критической величины  $E_c = 4\pi e^3 n \Lambda / \epsilon_e$  для электронов, находящихся в „хвосте“ электронной функции распределения, из-за чего эти электроны переходят в режим „убегания“ [16]. Здесь  $\epsilon_e$  — энергия электрона,  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона,  $\Lambda$  — кулоновский логарифм,  $n_e$  — локальная электронная концентрация. С увеличением электрического поля происходит экспоненциальный прирост численности убегающих электронов. Факт присутствия значительной фракции убегающих электронов в разрядах, где были обнаружены высокочастотные альфвеновские моды, подтверждается данными диагностики жесткого рентгеновского излучения (рис. 1), эмиссия которого вызвана торможением быстрых электронов в элементах камеры токамака. Также взаимосвязь с убегающими электронами косвенно подтверждается корре-



**Рис. 3.** *a* — эволюция пространственного фурье-спектра сигналов восьми зондов тороидального массива во время вспышки альфвеновских колебаний на 189.83-й мс разряда № 39610. Присутствуют гармоники  $n = 1$  и 0. *b* — разряд № 39610, 189.8 мс, матрица кросс-фаз, соответствующая встречному распространению двух волн с  $n = 1$  (сигнал на зонде 4 отсутствует). *c* — расчет матрицы кросс-фаз для аналогичной конфигурации зондов, соответствующей стоячей волне с  $n = 1$ .

ляцией появления вспышек колебаний магнитного поля с моментами пилообразных срывов, во время которых происходит перезамыкание силовых линий резонансных магнитных поверхностей, лежащих внутри радиуса перемешивания  $r_{mix}$ , сопровождающееся формированием магнитных островов, через  $X$ -точки которых протекает ток, создающий электрическое поле, которое способно перевести в режим ускорения значительную фракцию электронов [16]. В процессе стохастизации параметров плазмы внутри радиуса перемешивания  $r_{mix}$  в момент срыва ускоренные электроны могут попадать на орбиты, где они не удерживаются, что вызывает отклик на сигнале жесткого рентгена.

Наблюдение спадающей за короткое время частоты (рис. 1, *b*) моды может быть объяснено при помощи так называемой hole-clump-модели [1,17], где изменение частоты связано с переносом резонансных частиц в пространстве скоростей. На рис.1, *b* штриховой (синей в электронной версии статьи) линией показана эволюция частоты согласно степенному закону. Степень зависимости порядка 0.5 получена путем аппроксимации методом наименьших квадратов и соответствует предсказанию модели  $\delta\omega \sim \sqrt{t}$ . Эффект снижения (роста) частоты, как правило, наблюдается [18] при дестабилизации различных (в том числе альфвеновских) неустойчивостей быстрыми ионами, однако сообщается [19] и о возбуж-

дении hole-clump-неустойчивости на частотах порядка нескольких МГц ускоренными электронами.

На основании того, что вспышки колебаний, описываемые в настоящей работе, имеют меньшую продолжительность, чем альфвеновские моды, регистрировавшиеся ранее, можно сделать предположение, что данная неустойчивость может являться ЕРМ, затухающей сразу после ухода пучка надтепловых электронов на элементы камеры токамака, однако нельзя исключать также возможность развития глобальной моды. Для дальнейшего изучения обнаруженных колебаний требуется определить пространственную локализацию неустойчивости, которая их вызывает, для этого запланированы эксперименты по зондированию плазмы при помощи рефлектометра доплеровского обратного рассеяния с использованием комбинации шестичастотной схемы [20] и четырехчастотной схемы [6], что позволит получить радиальное распределение интенсивности сигнала.

### Финансирование работы

Измерения высокочастотных альфвеновских колебаний проводились при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020, а эксперименты по генерации тока волнами нижнегибридного диапазона частот — в рамках государственного задания по проекту № 0040-2019-0023. Измерения основных параметров проведены на Уникальной научной установке „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав Федерального центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (проект RFMEFI62119X0021) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] W.W. Heidbrink, *Phys. Plasmas*, **15** (5), 055501 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2838239>
- [2] K-L. Wong, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **41** (1), R1 (1999). <https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/1/001>
- [3] V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, E.N. Bondarchuk, P.N. Brunkov, F.V. Chernyshev, V.I. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Kononov, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, A.D. Melnik, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, A.N. Savelyev, I.Yu. Senichenkov, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, A.D. Sladkomedova, V.V. Solokha, V.N. Tanchuk, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.G. Zhilin, *Nucl. Fusion*, **57** (6), 066047 (2017). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0>
- [4] В.К. Гусев, В.Е. Голант, Е.З. Гусаков, В.В. Дьяченко, М.А. Ирзак, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, А.Н. Новохацкий, К.А. Подушникова, Г.Т. Раздобарин, Н.В. Сахаров, Е.Н. Трегубова, В.С. Узлов, О.Н. Щербинин, В.А. Беляков, А.А. Кавин, Ю.А. Косцов, Е.Г. Кузьмин, В.Ф. Сойкин, Е.А. Кузнецов, В.А. Ягнов, *ЖТФ*, **69** (9), 58 (1999). <https://journals.ioffe.ru/articles/36172> [Пер. версия: 10.1134/1.1259469].
- [5] Yu.V. Petrov, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, A.A. Martynov, S.Yu. Medvedev, V.B. Minaev, M.I. Patrova, A.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov, A.Yu. Yashin, *Plasma Phys. Rep.*, **25** (8), 723 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063780X19080075>
- [6] В.В. Буланин, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, М.А. Петров, Ю.В. Петров, А.Ю. Тельнова, А.Ю. Яшин, *Письма в ЖТФ*, **43** (23), 40 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.23.45274.16986 [Пер. версия: 10.1134/S1063785017120033].
- [7] И.М. Балаченков, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Н.Н. Бахарев, В.В. Буланин, В.И. Варфоломеев, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселёв, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, А.М. Пономаренко, Н.В. Сахаров, А.Ю. Тельнова, В.А. Токарев, Н.А. Хромов, П.Б. Щеголев, А.Ю. Яшин, *Письма в ЖТФ*, **46** (23), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.23.50338.18450 [Пер. версия: 10.1134/S1063785020120032].
- [8] I.M. Balachenkov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, A.S. Tukachinsky, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1400**, 077016 (2019). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077016>
- [9] Z. Chang, E.D. Frederickson, S.J. Zweben, H.K. Park, R. Nazikian, E. Mazzucato, S.H. Batha, M.G. Bell, R.V. Bundy, C.E. Bush, D.S. Darrow, D. Ernst, G.Y. Fu, R.J. Hawryluk, K.W. Hill, J.C. Hosea, A.C. Janos, D.L. Jassby, D.W. Johnson, L.C. Johnson, F.M. Levinton, D.K. Mansfield, K.M. McGuire, D.R. Mikkelsen, D. Muller, D.K. Owens, A.T. Ramsey, S.A. Sabbagh, E.J. Synakowski, H. Takashi, G. Taylor, M.E. Thompson, R.M. Wieland, K.-L. Wong, M.C. Zarnstorf, *Nucl. Fusion*, **35** (12), 1469 (1995). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/35/12/107>
- [10] P. Helander, L.-G. Eriksson, R.J. Akers, C. Byrom, C.G. Gimblett, M.R. Tournianski, *Phys. Rev. Lett.*, **89** (23), 235002 (2002). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.235002>
- [11] А.С. Тукачинский, Л.Г. Аскинази, И.М. Балаченков, А.А. Белокуров, Д.Б. Гин, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Е.М. Хилькевич, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев, *Письма в ЖТФ*, **42** (24), 72 (2018). DOI: 10.21883/pjtf.2016.24.44081.16482 [Пер. версия: 10.1134/S1063785018110172].
- [12] T. Markovic, A. Melnikov, J. Seidl, L. Eliseev, J. Havlicek, A. Havránek, M. Hron, M. Imříšek, K. Kovářik, K. Mitošinková, J. Mlynar, R. Pánek, J. Stockel, J. Varju, V. Weinzettl, the COMPASS Team, in *Proc. of the 44th EPS Conf. on plasma physics. Europhysics conference abstracts (Belfast, 2017)*, vol. 41F, P5.140. <http://ocs.ciemat.es/EPS2017PAP/pdf/P5.140.pdf>
- [13] N. Chu, Y. Sun, S. Gu, H.H. Wang, Y.J. Hu, T.H. Shi, D.L. Chen, X. Gu, K.Y. He, M. Jia, S.Y. Lin, H.Q. Liu, J.P. Qian, J. Ren, B. Shen, A. Ti, S.X. Wang, J.L. Xie, M. Xu, M.M. Xue, N. Yan, Q. Zang, L. Zeng, J.Z. Zhang, T. Zhang, Y. Zhang, G.Q. Zhong, C. Zhou, R.J. Zhou, *Nucl. Fusion*, **58** (10), 104004 (2018). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aad70c>

- [14] J. Wang, Y. Todo, H. Wang, Z.-X. Wang, *Nucl. Fusion*, **60** (11), 112012 (2020). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab6c79>
- [15] Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Крикунов, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.С. Тукачинский, *Письма в ЖТФ*, **44** (3), 47 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.03.45578.17063 [Пер. версия: 10.1134/S1063785018020025].
- [16] B.N. Breizman, P. Aleynikov, E.M. Hollmann, M. Lehnen, *Nucl. Fusion*, **59** (8), 083001 (2019). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1822>
- [17] M.K. Lilley, B.N. Breizman, S.E. Sharapov, *Phys. Plasmas*, **17** (9), 092305 (2011). <https://doi.org/10.1063/1.3486535>
- [18] S.D. Pinches, H.L. Berk, D.N. Borba, B.N. Breizman, S. Briguglio, A. Fasoli, G. Fogaccia, M.P. Gryaznevich, V. Kiptily, M.J. Mantsinen, S.E. Sharapov, D. Testa, R.G.L. Vann, G. Vlad, F. Zonca and JET-EFDA Contributors, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46** (12B), B187 (2004). <https://doi.org/10.1088/0741-3335/46/12B/017>
- [19] A. Lvovskiy, W.W. Heidbrink, C. Paz-Soldan, D.A. Spong, A. DalMolin, N.W. Eidietis, M. Nocente, D. Shiraki, K.E. Thome, *Nucl. Fusion*, **59** (12), 124004 (2019). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab4405>
- [20] 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 [Пер. версия: 10.1134/S1063785021020206].