

04

Пространственно-временная структура альфвеновских волн в токамаке ТУМАН-3М

© Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, Н.А. Жубр,
В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.С. Тукачинский

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

E-mail: Abdullina@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 июля 2018 г.

Исследована пространственная и временная структура альфвеновских волн в компактном токамаке ТУМАН-3М при помощи набора магнитных зондов. Определены полоидальные модовые числа для двух типов альфвеновских вспышек: короткой и длинной. Обнаружено отсутствие полоидального вращения возмущения магнитного поля для обоих типов вспышек. Также в обоих случаях не наблюдается выраженной асимметрии возмущения магнитного поля в направлении большого радиуса.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.22.46923.17481

Альфвеновские волны (АВ) в токамаках увеличивают потери быстрых ионов, тем самым снижая эффективность дополнительного нагрева плазмы [1–3]. Как ожидается, в термоядерном реакторе АВ могут вызывать потери 3.5 MeV альфа-частиц, что затрудняет осуществление самоподдерживающейся реакции синтеза [2–6]. Кроме того, выход быстрых частиц на стенку может привести к повреждениям конструкций реактора [1,3,4]. Обычно в токамаках АВ возбуждаются высокоэнергичными надтепловыми ионами, которые возникают при дополнительном нагреве плазмы волнами радиочастотного ВЧ-диапазона или методом инжекции пучка нейтральных атомов (neutral beam injection, NBI), ускоренных до энергий порядка 10–100 keV [1–6]. Самостоятельный интерес представляет случай возбуждения АВ в омическом режиме, в котором не ожидается отклонения функции распределения ионов от максвелловской [7–9]. Особенностью альфвеновских волн, наблюдаемых в плазме токамака ТУМАН-3М в омическом режиме, является то, что

они возникают в разрядах с пилообразными колебаниями и убегаящими электронами [10–13]. Задача настоящей работы — определить полоидальные модовые числа АВ и эволюцию пространственного распределения возмущения магнитного поля для короткой и длинной вспышек АВ.

Набор зондов, использовавшихся в описываемых экспериментах, включает 16 магнитных зондов, установленных внутри вакуумной камеры в одном полоидальном сечении и отстоящих друг от друга на равные углы $\theta = 360^\circ/16$. Таким образом, с помощью этого массива зондов можно определять полоидальные модовые числа m до $m = 8$. Все магнитные зонды имеют идентичную конструкцию, коэффициент усиления усилителей составляет $19 \pm 10\%$ в альфвеновском диапазоне частот 0.6–2.1 МГц (полный диапазон частот 0.01–100 МГц), частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя 64 МГц.

Полоидальные модовые числа определялись путем пространственного фурье-преобразования в цилиндрическом приближении. Амплитуда

моды вычислялась как $I_m = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$, где $I_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta) \cdot \cos(m\theta) d\theta$,

$I_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta) \cdot \sin(m\theta) d\theta$, $m = 0, \dots, 7$, θ — полоидальный угол. В качестве $U(\theta)$ для расчета принималась функция, полученная в результате интерполяции кубическим сплайном мгновенных значений напряжений на зондах.

Альфвеновские волны регистрируются на магнитных зондах в виде вспышек высокочастотных (0.6–2.1 МГц) колебаний, которые можно условно разделить на два типа, имеющие, по-видимому, различные механизмы возбуждения [12]. Как видно из рис. 1, существует корреляция вспышек АВ с пилообразными колебаниями, наблюдающимися на сигнале среднечордовой плотности плазмы, измеряющейся СВЧ-интерферометром. Короткая вспышка ($t = 73.62\text{--}73.67$ ms, $f = 0.82$ МГц) появляется сразу после фазы срыва пилообразной эволюции плотности, в то время как длинная, или квазинепрерывная, вспышка ($t = 73.90\text{--}74.08$ ms, $f = 0.80$ МГц) развивается в фазе роста амплитуды пилообразной эволюции плотности. Амплитуда коротких вспышек в ~ 10 раз больше, чем амплитуда длинных вспышек. Далее рассмотрена пространственно-временная структура этих вспышек. На рис. 1 для примера показаны вспышки АВ в дейтериевом разряде на стадии NBI. Следует отметить, что АВ возникают до инжекции

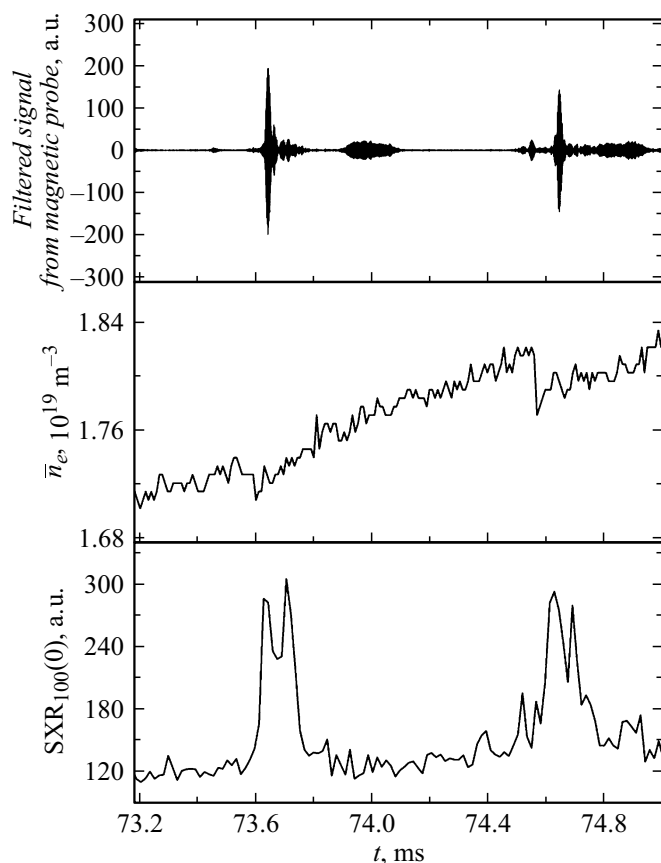


Рис. 1. Сигнал с магнитного зонда, центральная среднечордовая электронная плотность и мягкое рентгеновское излучение по центральной хорде в разряде 18052805.

и существуют длительное время после ее окончания, что свидетельствует об отсутствии влияния нейтральной инжекции на их поведение. По-видимому, это связано с тем, что при типичной для токамака ТУМАН-3М энергии инжекции ($E_{\text{NBI}} \sim 14 \text{ keV}$ для рассматриваемого разряда) скорость инжектируемых частиц много меньше альфвеновской. С другой стороны, как показывает измерение спектра жесткого

рентгеновского излучения, энергия убегающих электронов составляет 2–4.5 MeV независимо от наличия или отсутствия нейтральной инжекции [11], при этом их скорость много больше альфвеновской. В дейтериевой плазме токамака ТУМАН-3М альфвеновские скорости находятся в диапазоне $v_A = (2-8) \cdot 10^6$ m/s. Короткие вспышки АВ коррелируют с выбросами убегающих электронов на лимитер, возникающими в результате срывов в ходе пилообразных колебаний [10,12]. На рис. 1 показан сигнал с детектора мягкого рентгеновского излучения, на котором видны всплески, вызванные выбросами пучков убегающих электронов. Предположения о роли убегающих электронов в генерации АВ в омическом режиме сделаны в работе [11].

В случае короткой вспышки фурье-анализ дает максимальные амплитуды мод для $m = 2, 3$ в момент времени $t = 73.6465$ ms. На рис. 2, *a* показаны две формы $U(\theta)$, характерные для моментов достижения возмущением экстремальных (max и min) значений. На протяжении всей короткой вспышки АВ распределение $U(\theta, t)$ колеблется, что качественно соответствует кривым, показанным на рис. 2, *a*. Таким образом, возмущение магнитного поля оказывается преимущественно сконцентрированным в верхней части поперечного сечения плазменного шнура. Рис. 2, *b* иллюстрирует эту особенность: амплитуда спектральной компоненты возмущения магнитного поля на частоте АВ, полученная методом быстрого преобразования Фурье (FFT) в указанном на рисунке временном окне для каждого из зондов, расположенных под углами 60–90°, в ~ 4 раза выше амплитуд при остальных полоидальных углах. Другая особенность временной эволюции АВ состоит в отсутствии выраженной асимметрии в направлении большого радиуса тора (отсутствие „баллонного“ или „антибаллонного“ эффектов): амплитуда возмущения приблизительно одинакова на стороне сильного поля и на стороне слабого поля (рис. 2, *a, b*). Возможной причиной генерации коротких вспышек АВ помимо убегающих электронов может быть и ударное возбуждение, вызванное перезамыканием магнитного поля во время срыва пилообразного колебания [8]. При таком механизме возбуждения АВ должны наблюдаться низкие полоидальные модовые числа [8].

Фурье-анализ длинной вспышки показывает преобладание амплитуд с номерами мод $m = 1, 2$ в момент времени $t = 73.9880$ ms. В отличие от случая короткой вспышки возмущение локализовано преимущественно в нижней части поперечного сечения плазменного шнура (рис. 2, *c, d*). Рис. 2, *d* показывает, что амплитуда возмущения

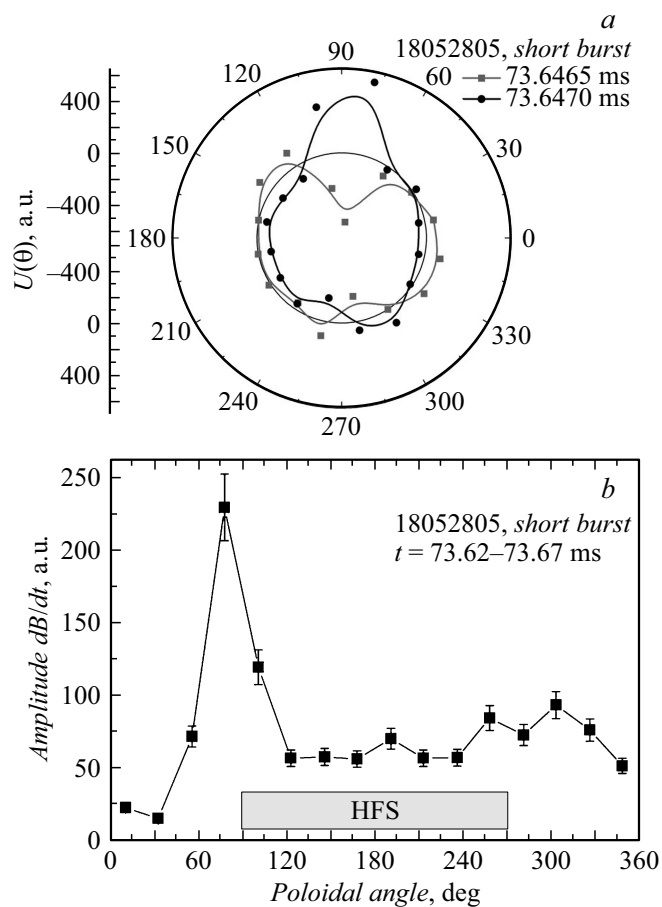


Рис. 2. Результаты для короткой (*a, b*) и длинной (*c, d*) альфвеновских вспышек. *a, c* — полоидальное распределение возмущения магнитного поля на магнитных зондах в различные моменты времени; *b, d* — амплитуда спектральной компоненты возмущения магнитного поля на частоте АВ, определенная по всей длительности вспышки, в зависимости от полоидального угла.

в диапазоне углов расположения зондов 260–280° в ~ 3.5 раза выше амплитуд на остальных углах. Как и в случае короткой вспышки,

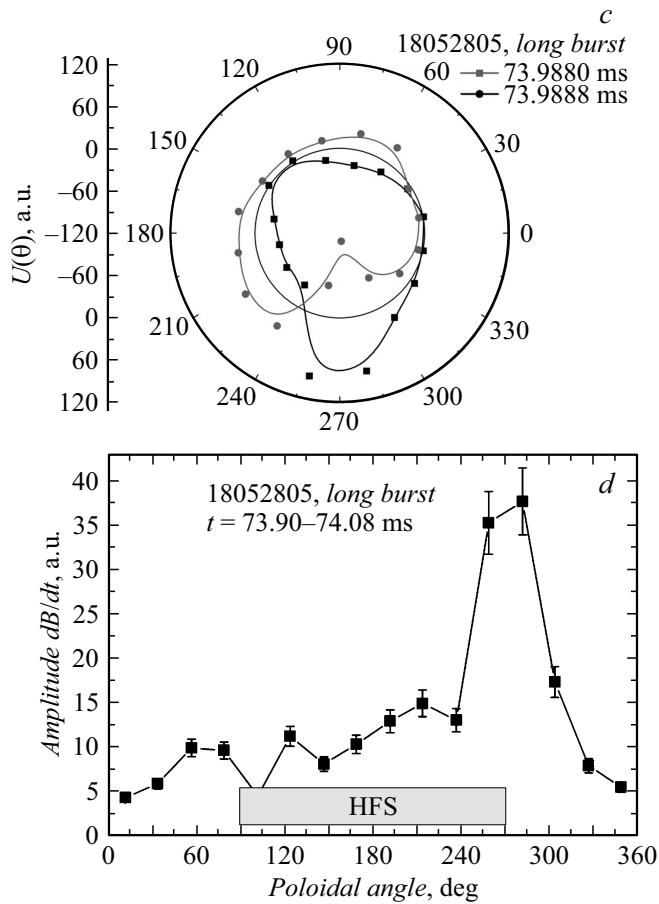


Рис. 2 (продолжение).

амплитуда спектральной компоненты возмущения магнитного поля на частоте АВ на стороне сильного и слабого поля оказывается примерно одинаковой. Убегающие электроны могут способствовать возбуждению АВ [11], приводя к появлению локального экстремума на профиле коэффициента запаса устойчивости $q(r)$; это может происходить как в случае короткой, так и в случае длинной вспышки АВ. Неопределенным

остается механизм этого возбуждения: неясно, что является источником свободной энергии для рассматриваемого типа неустойчивостей, особенно в случае длинных всплесков.

Таким образом, на основе анализа возмущений магнитного поля на магнитных зондах можно заключить следующее. Отсутствие выраженной асимметрии возмущения магнитного поля в направлении большого радиуса тора подтверждает центральную локализацию АВ [13]. Установление причины сильной асимметрии возмущения верх-низ требует дополнительного анализа. Для обоих типов всплесков определены модовые числа колебаний $m = 1-3$ в конкретные моменты времени. Ранее было определено, что наблюдаемым колебаниям удовлетворяют наборы модовых чисел (n, m) , где $|n-m| = 1$. С учетом определенных ранее [13] тороидальных модовых чисел $n = 1, 2$ можно заключить, что указанные в [13] вероятные наборы (n, m) соответствуют действительности, а именно полоидальным модовым числам $m = 1-3$, определенным при помощи полоидального массива магнитных зондов, удовлетворяют следующие наборы: $(n, m) = (1, 2), (2, 1), (2, 3)$. Таким образом, низкие значения полоидальных модовых чисел не противоречат проведенным ранее исследованиям и одновременно с этим подтверждают локализацию АВ в центральной части плазмы. Временная эволюция полоидального распределения возмущения магнитного поля на зондах показывает отсутствие вращения. Этот факт, вероятно, свидетельствует о том, что регистрируемое зондами возмущение может быть результатом сложения двух мод с близкими амплитудами, движущихся навстречу друг другу, т.е. стоячей волной.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-12-10285) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Список литературы

- [1] Heidbrink W.W. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 055501; <https://doi.org/10.1063/1.2838239>
- [2] Heidbrink W.W., Strait E.J., Doyle E., Sager G., Snider R.T. // Nucl. Fusion. 1991. V. 31. N 9. P. 1635–1648; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/31/9/002>
- [3] Wong K.L., Fonck R.J., Paul S.F., Roberts D.R., Fredrickson E.D., Nazikian R., Park H.K., Bell M., Bretz N.L., Budny R., Cohen S., Hammett G.W., Jobes F.C., Meade D.M., Medley S.S., Mueller D., Nagayama Y., Owens D.K., Synakowski E.J. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. N 14. P. 1874–1877; <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.1874>

- [4] *Wong K.L.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 1999. V. 41. P. R1–R56; <https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/1/001>
- [5] *Pinches S.D., Berk H.L., Borba D.N., Breizman B.N., Briguglio S., Fasoli A., Fogaccia G., Gryaznevich M.P., Kiptily V., Mantsinen M.J., Sharapov S.E., Testa D., Vann R.G.L., Vlad G., Zonca F. and JET-EFDA Contributors* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2004. V. 46. P. B187–B200; <https://doi.org/10.1088/0741-3335/46/12B/017>
- [6] *ITER Physics Basis Editors et al.* // *Nucl. Fusion.* 1999. V. 39. N 12. P. 2137–2174; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/39/12/301>
- [7] *Markovic T., Melnikov A., Seidl J., Eliseev L., Havlicek J., Havránek A., Hron M., Imříšek M., Kovarik K., Mitošinková K., Mlynar J., Pánek R., Stockel J., Varju J., Weinzettl V., the COMPASS Team.* Alfvén-character oscillations in ohmic plasmas observed on the COMPASS tokamak // *Proc. 44th EPS Conf. on plasma physics.* Belfast, Northern Ireland, 2017. P. P5.140 (1–4).
- [8] *McClements K.G., Appel L.C., Hole M.J., Thyagaraja A.* // *Nucl. Fusion.* 2002. V. 42. P. 1155–1161; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/42/9/314>
- [9] *Chang Z., Fredrickson E.D., Zweben S.J., Park H.K., Nazikian R., Mazzucato E., Batha S.H., Bell M.G., Budny R.V., Bush C.E., Darrow D.S., Ernst D., Fu G.Y., Hawryluk R.J., Hill K.W., Hosea J.C., Janos A.C., Jassby D.L., Johnson D.W., Johnson L.C., Levinton F.M., Mansfield D.K., McGuire K.M., Mikkelsen D.R., Mueller D., Owens D.K., Ramsey A.T., Sabbagh S.A., Synakowski E.J., Takahashi H., Taylor G., Thompson M.E., Wieland R.M., Wong K.-L., Zarnstorff M.C.* // *Nucl. Fusion.* 1995. V. 35. N 12. P. 1469–1479; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/35/12/107>
- [10] *Askinazi L.G., Afanasyev V.I., Altukhov A.B., Bakharev N.N., Belokurov A.A., Bulanin V.V., Bykov A.S., Chernyshev F.V., Chugunov I., Dyachenko V.V., Esipov L.A., Gin D., Goncharov P.R., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Gusev V.K., Heuroux S., Ibyaminova A.D., Irzak M.A., Kantor M.Yu., Kaveeva E.G., Kiviniemi T., Khilkevitch E.M., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kornev V.A., Kouprienko D.V., Kurskiev G.S., Lashkul S.I., Lebedev S.V., Leerink S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Nesenevich V.G., Niskala P., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Perevalov A.A., Petrov M.P., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Popov A.Yu., Rozhansky V.A., Rozhdestvenskiy V.V., Sakharov N.V., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Sergeev V.Yu., Shchegolev P.B., Shatalin S.V., Shcherbinin O.N., Shevelev A.E., Sidorov A.V., da Silva F., Smirnov A.I., Stepanov A.Yu., Syssoeva E.V., Teplova N.V., Tolstyakov S.Yu., Tukachinsky A.S., Varfolomeev V.I., Vekshina E.O., Vildjunas M.I., Voronin A.V., Voskoboinikov S.P., Wagner F., Yashin A.Yu., Zhubr N.A.* // *Nucl. Fusion.* 2015. V. 55. N 10. P. 104013; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/10/104013>

- [11] Тукачинский А.С., Аскинази Л.Г., Балаченков И.М., Белокуров А.А., Гин Д.Б., Жубр Н.А., Корнев В.А., Лебедев С.В., Хилькевич Е.М., Чугунов И.Н., Шевелев А.Е. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 24. С. 72–78. DOI: 10.21883/pjtf.2016.24.44081.16482
- [12] Lebedev S.V., Askinazi L.G., Balachenkov I.A., Belokurov A.A., Kornev V.A., Tukachinsky A.S., Zhubr N.A. Alfvén instabilities in hydrogen, deuterium and helium plasmas in ohmic regime of TUMAN-3M tokamak // Proc. 43rd EPS Conf. on plasma physics. Leuven, Belgium, 2016. P. P5.036.
- [13] Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Разуменко Д.В., Тукачинский А.С. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 3. С. 47–54. DOI: 10.21883/PJTF.2018.03.45578.17063