

04

Тороидальные альфвеновские моды в плазме токамака Глобус-М

© В.К. Гусев¹, А.А. Мартынов², С.Ю. Медведев², Ю.В. Петров^{1,¶},
М.И. Патров¹, А.Ю. Тельнова¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

² Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва,
Россия

¶ E-mail: yu.petrov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 сентября 2017 г.

Для выяснения условий возбуждения ТАЕ-мод (toroidal Alfvén eigenmode) и их влияния на удержание быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М при помощи кода KINX проведены расчеты магнитогидродинамических спектров реконструированных диверторных равновесных конфигураций со значением фактора запаса устойчивости на магнитной оси $q_0 > 1$. Исследована чувствительность частот ТАЕ-мод с тороидальным волновым числом $n = 1$ к типу граничных условий и выбору граничной поверхности. Найдено, что частоты мод с доминирующими полоидальными гармониками $m = 1$ и 2 в щели континуума существенно выше, чем наблюдаемые в спектрограммах сигналов от катушек Мирнова, особенно в предположении свободной границы плазмы и с учетом ее сжимаемости. ТАЕ-моды с более низкими частотами и более высокими полоидальными волновыми числами, локализованные вблизи границы плазмы, могут быть ответственны за колебания, наблюдаемые в эксперименте. Однако для этих мод характерно взаимодействие с континуумом и, возможно, связанное с этим затухание.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.02.45466.17034

В экспериментах с инжекцией пучка нейтральных атомов на ранней стадии разряда токамака Глобус-М наблюдались неустойчивости, возбуждаемые быстрыми ионами в диапазоне частот 50–200 kHz, которые были идентифицированы как тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ) [1–3]. Цель настоящей работы — промоделировать структуру и частотный спектр альфвеновских мод и провести их сравнение с экспериментально наблюдаемыми. Для моде-

лирования был выбран разряд с инъекцией водородного пучка в дейтериевую плазму (см. рис. 2, *d* в работе [2], разряд 31497), в котором основная интенсивная мода развивается на частоте ~ 100 kHz.

Малое аспектное отношение плазмы сферического токамака приводит к появлению широкой щели в континууме за счет взаимодействия мод с соседними номерами полоидальных гармоник m и $m + 1$. На рис. 1, *a* показана структура непрерывного альфвеновского спектра (показатель адиабаты $\Gamma = 0$), рассчитанного по коду KINX [4] с использованием экспериментального профиля массовой плотности для квазинейтральной дейтериевой плазмы. В этой щели существует несколько глобальных ТАЕ-мод вблизи верхней и нижней границ континуума (сплошные горизонтальные линии на рис. 1, *a*). Заметим, что граничные условия на свободной границе плазмы (радиус проводящей стенки $1.3a$, где a — радиус границы плазмы) приводят к заметному увеличению частот глобальных ТАЕ-мод (рис. 1, *a*, штрихпунктирные горизонтальные линии). При этом выбор в качестве границы плазмы сепаратрисы магнитного поля или магнитной поверхности внутри сепаратрисы, определяемой заданной долей полоидального потока, не приводит к существенному изменению частот внешних ТАЕ-мод, что является следствием большого шира у границы плазмы сферического токамака. Помимо ТАЕ-мод с частотами, попадающими в основную тороидальную щель, расположенную вблизи магнитной поверхности с $q = 1.5$, в идеальном магнитогидродинамическом спектре существуют глобальные моды с частотами, попадающими в непрерывный спектр. Частота и полоидальные числа этих мод ближе к экспериментально наблюдаемым. На рис. 2, *a, b* показаны структуры таких мод с относительно большими номерами полоидальных гармоник, которые соответствуют тороидальному „перезамыканию“ ветвей континуума на магнитных поверхностях с $q = 2.5, 3.5$. На всех рисунках линий уровня темный цвет соответствует максимумам смещения плазмы.

В более сложной модели, предполагающей сжимаемость плазмы (показатель адиабаты $\Gamma = 5/3$), участвуют профили давления плазмы, полученные на основе данных об электронной температуре и заданного соотношения ионной и электронной температур ($T_i/T_e = 0.5$), что дает хорошее совпадение с профилями давления из восстановленного равновесия. Учет сжимаемости приводит к зацеплению альфве-

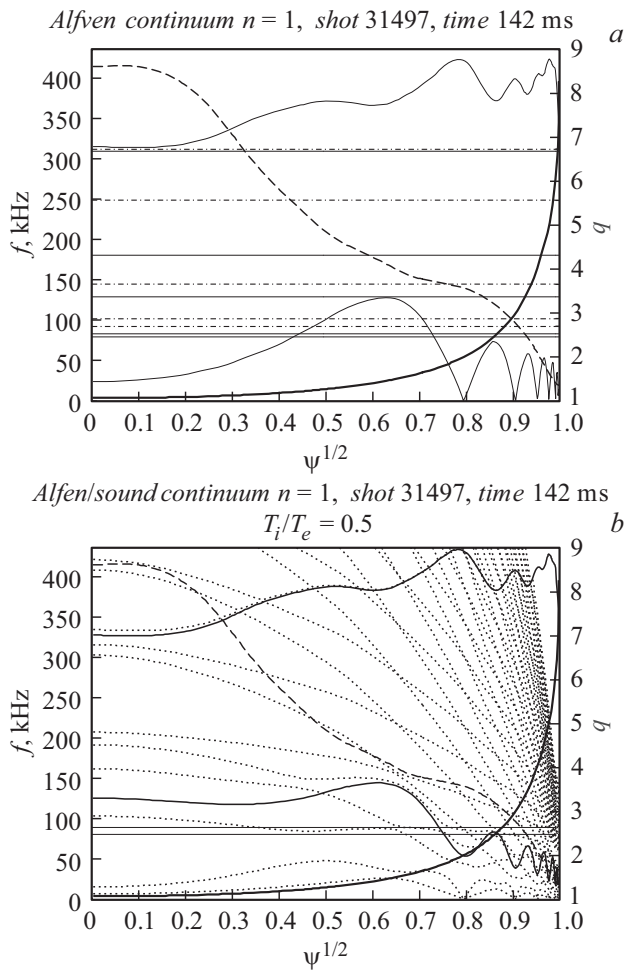


Рис. 1. Структура непрерывного альфвеновского спектра для тороидального волнового числа $n = 1$ (разряд 31497, время 142 ms). Профиль фактора запаса устойчивости q показан жирной линией, экспериментальный профиль массовой плотности — штриховой линией. Горизонтальные линии соответствуют частотам глобальных мод. *a* — альфвеновский спектр (показатель адиабаты $\Gamma = 0$), *b* — альфвеновский/звуковой спектр ($\Gamma = 5/3$) показан пунктирными линиями, спектр в модели медленного звука представлен сплошными линиями.

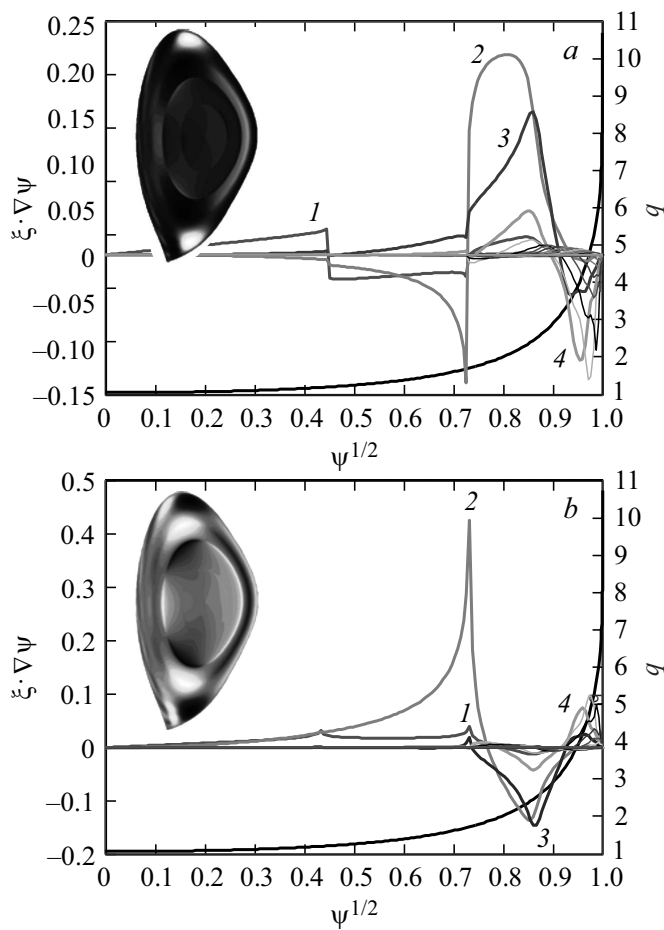


Рис. 2. Структура TAE-мод в альфвеновском спектре ($\Gamma = 0$) с частотами 83 (a) и 79 kHz (b). Показаны гармоники смещения плазмы, нормального к магнитным поверхностям, $\xi \cdot \nabla\psi$ в координатах с выпрямленными силовыми линиями и линии уровня $\xi \cdot \nabla\psi / |\nabla\psi|$ (темный цвет — максимум смещения). Цифры около кривых соответствуют номерам полоидальных гармоник $m = 1, 2, 3, 4$.

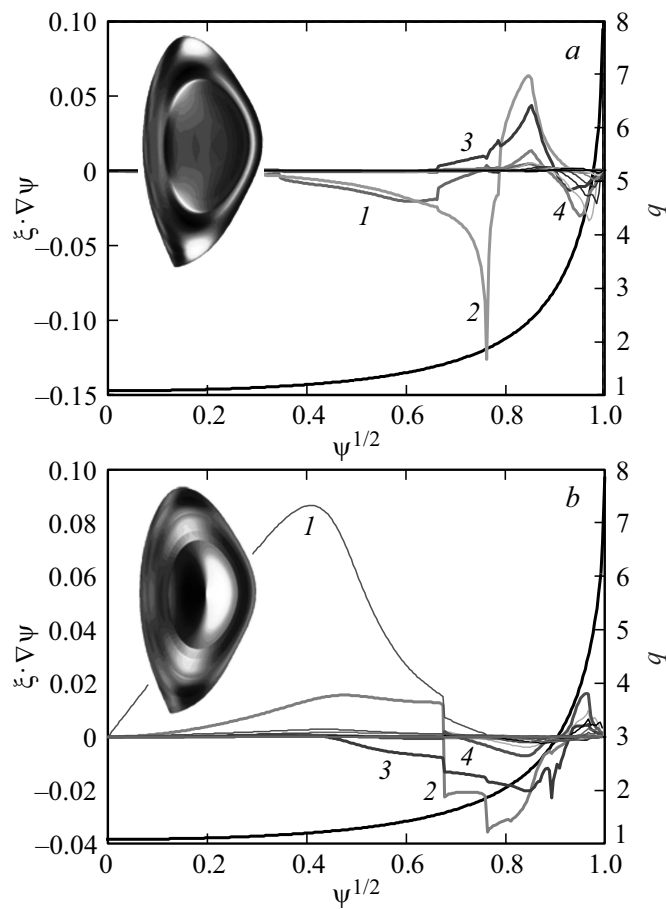


Рис. 3. Структура глобальных мод с низкими частотами в альфвеновском / звуковом спектре для сжимаемой плазмы: *a* — 89 kHz, *b* — 80 kHz. Цифры 1–4 — то же, что на рис. 2.

новского и звукового континуумов (рис. 1, *b*). Здесь кроме ветвей альфвеновского звукового континуума показаны также частоты альф-

веноской ветви в пределе медленного звука (сплошные линии) [5]. Код KINX был модифицирован для использования экспериментального профиля давления в слагаемом $\Gamma p |\nabla \cdot \xi|^2$ для сжимаемого смещения плазмы ξ в интеграле возмущенной потенциальной энергии. Для сжимаемой плазмы с конечным давлением найдены аналоги глобальных мод с частотами, близкими к экспериментальным (показаны на рис. 1, *b* горизонтальными линиями). На рис. 3 показаны структуры таких мод с частотами и локализацией, соответствующими локальным максимумам ветвей альфвеновского звукового континуума. При этом мода с меньшей частотой и большой полой гармоникой $m = 1$ (рис. 3, *b*), по-видимому, является результатом взаимодействия альфвеновских и звуковых мод, как и в случае ВААЕ-мод (beta-induced Alfvén acoustic eigenmode) с более низкими частотами.

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что частоты колебаний, наблюдаемых в эксперименте, наиболее близки к частотам ТАЕ-мод, локализованных у границы плазмы в районе магнитных поверхностей с величинами фактора запаса устойчивости $q = 2.5, 3.5$. Частоты этих мод попадают в непрерывный спектр, что может приводить к их усиленному затуханию. Однако, как обсуждается в работе [6], коэффициенты затухания Ландау на тепловых ионах могут быть низкими из-за изменения поляризации моды при взаимодействии волны с энергичными частицами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-12-01177).

Список литературы

- [1] Петров Ю.В., Патров М.И., Гусев В.К., Иванов А.Е., Минаев В.Б., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Курские Г.С. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 12. С. 1075–1080.
- [2] Petrov Yu.V., Bakharev N.N., Gusev V.K., Minaev V.B., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Patro M.I., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Shchegolev P.B. // J. Plasma Phys. 2015. V. 81. P. 515810601.
- [3] Петров Ю.В., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Минаев В.Б., Корнев В.А., Мельник А.Д., Патров М.И., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Курские Г.С., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 24. С. 99–106.

- [4] *Degtyarev L., Martynov A., Medvedev S., Troyon F., Villard L., Gruber R.* // *Comput. Phys. Commun.* 1997. V. 103. P. 10–27.
- [5] *Cheng C.Z., Chance M.S.* // *Phys. Fluids.* 1986. V. 11. P. 3695.
- [6] *Liu Y., Lin Z., Zhang H., Zhang W.* // *Nucl. Fusion.* 2017. V. 57. P. 114001.