

04

## Наблюдение геодезических акустических мод в сферическом токамаке Глобус-М

© В.В. Буланин, Ф. Вагнер, В.И. Варфоломеев,  
В.К. Гусев, Г.С. Курские, 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. Щеголев, А.Ю. Яшин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Россия

E-mail: V. Bulanin@spbstu.ru

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

Институт физики плазмы им. Макса Планка, Ассоциация ЕВРОАТОМ,  
Грейфсвальд, Германия

Поступило в Редакцию 21 октября 2013 г.

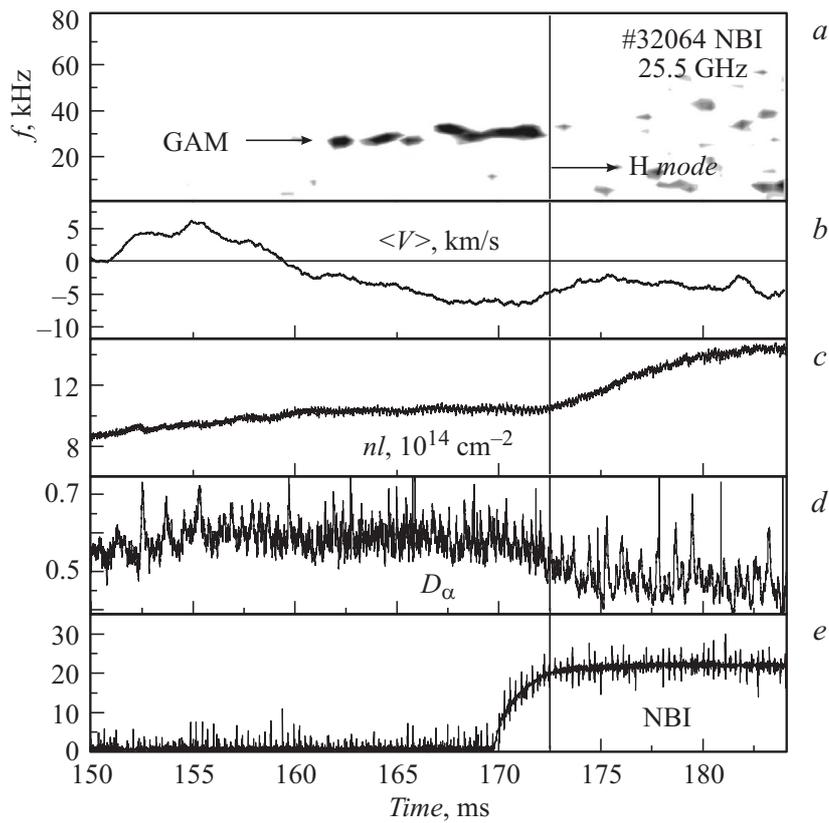
Представлены результаты первых исследований геодезических акустических мод (ГАМ) в сферическом токамаке. Эксперименты были проведены с использованием доплеровской рефлектометрии. Были получены сведения об условиях возникновения ГАМ, характере их развития и области их локализации. Данные сопоставляются с экспериментальными результатами, полученными в токамаках с большим аспектным отношением.

Геодезические акустические моды, как высокочастотная разновидность зональных потоков, являются результатом нелинейного развития дрейфовых турбулентностей в тороидальных магнитных системах [1]. Они представляют собой однородные по магнитной поверхности и локализованные по радиусу возмущения радиального электрического поля. Зональные потоки представляют интерес при изучении удержания плазмы в токамаках, так как ожидается, что они ограничивают дрейфовые неустойчивости и тем самым могут приводить к уменьшению турбулентного переноса [1]. Известно большое число работ, в которых ГАМ исследовались различными методами в тороидальных установках с большим аспектным отношением [2]. В данной работе ГАМ были зарегистрированы в сферическом токамаке с малым аспектным отношением

Глобус-М ( $R = 0.36$  м,  $a = 0.24$  м). Влияние такого геометрического фактора, как аспектное отношение, на развитие ГАМ ранее не исследовалось.

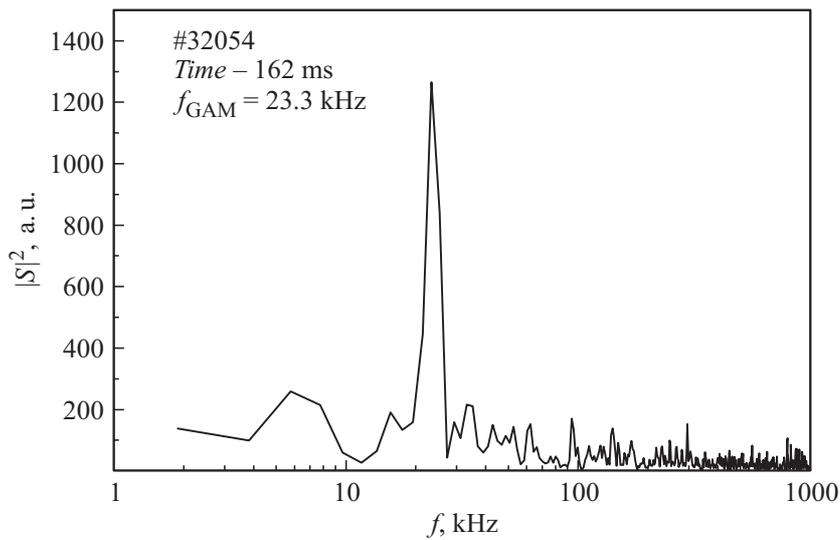
Исследование ГАМ в токамаке Глобус-М проводилось методом доплеровской рефлектометрии, который впервые с успехом был применен для детектирования ГАМ на токамаке ASDEX-Upgrade [3]. В этой работе, в частности, сообщалось, что колебания на частотах ГАМ не отмечались в Н-моду. При низком пороге перехода в Н-моду в токамаке Глобус-М режим улучшенного удержания обычно наблюдается в течение всего разряда, за исключением начальной стадии нарастания тока и плотности плазмы, когда использование доплеровской рефлектометрии невозможно. Поэтому для наблюдения ГАМ потребовалось специальным образом выбирать режим, когда переходы L–H или H–L наблюдались в квазистационарной стадии разряда и имелся временной интервал для наблюдения ГАМ. Эти режимы достигались в дейтерии при относительно низком плазменном токе  $I_p = 150$  кА, когда запас устойчивости у сепаратрисы достигал 5.5, и при низкой плотности плазмы  $\langle n \rangle \approx 2 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>. Направление магнитного поля было выбрано таким, чтобы тороидальный дрейф ионов был направлен от X-точки. На рис. 1 отображены временные зависимости основных параметров плазмы в разряде с переходом L–H на 172 мс, который был инициирован инжекцией быстрых нейтральных атомов и характеризовался быстрым подъемом плотности плазмы при спаде интенсивности излучения на линии  $D_\alpha$ .

ГАМ регистрировались путем спектрального анализа скорости вращения плазмы в направлении дрейфа в радиальном электрическом поле, которая определялась по доплеровскому частотному сдвигу обратнорассеянного СВЧ-излучения [4]. Доплеровский частотный сдвиг оценивался или как смещение спектра комплексного сигнала квадратурного (IQ) детектора обратнорассеянного излучения, или как производная фазы сигнала детектора [3]. При использовании обоих методов частота Найквиста дискретной записи частотного сдвига значительно превосходила ожидаемую частоту ГАМ. Зондирование плазмы на токамаке Глобус-М осуществлялось излучением O-моды на частоте в 20–36 GHz, которая могла изменяться от разряда к разряду токамака. Для зондирования и приема рассеянного излучения использовалась одна и та же рупорная антенна, расположенная на внешнем обходе тора вблизи экваториальной плоскости. Угол падения зондирующего СВЧ-



**Рис. 1.** *a* — спектрограмма колебаний доплеровского сдвига, *b* — скорость вращения плазмы; отрицательные значения соответствуют вращению в сторону электронного диамагнитного дрейфа, *c* — эволюция среднечордовой плотности плазмы, *d* — интенсивность излучения на линии  $D_\alpha$ , *e* — импульс тока пучка нейтральных атомов.

пучка на поверхность равного коэффициента преломления на границе плазмы составлял  $12^\circ$ , что соответствовало обратному рассеянию на флуктуациях плазмы масштаба 1.1–2.2 см вблизи отсечки. При этом отсечка могла находиться внутри или вне сепаратрисы в зависимости



**Рис. 2.** Спектр флуктуаций доплеровского сдвига, полученный при зондировании плазмы на частоте 25.5 GHz до перехода в H-моду, инициированного инъекцией быстрых атомов.

от плотности плазмы. Согласно оценкам, радиальное разрешение метода составляло  $\approx 0.5$  см.

Возникновение ГАМ отмечалось в виде появления квазикогерентных колебаний доплеровского сдвига. Частоты колебаний лежали в области 20–30 kHz. Амплитуда колебаний электрического поля на этих частотах достигала значений 3 kV/m, что значительно превосходит средние значения радиального электрического поля. Типичные спектры флуктуаций доплеровского смещения отображены на рис. 2. Для выбранного разряда в токамаке явно выделяется пик на частоте  $f = 23.3$  kHz, амплитуда которого более чем на порядок величины превосходит спектральный уровень фоновой турбулентности. Спектральная ширина пика на рис. 2 определяется длительностью выборки — 256  $\mu$ s.

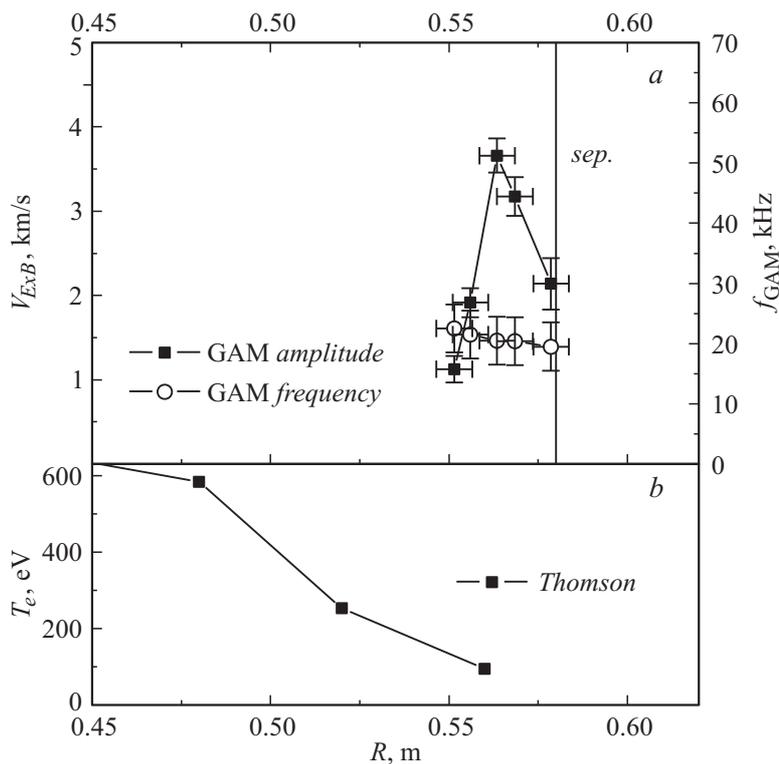
Частоты квазикогерентных колебаний сравнивались с теоретическими оценками частоты ГАМ, полученными при кинетическом рассмотрении с учетом конечного обратного аспектного отношения  $\varepsilon$ , которое

соответствует условиям токамака Глобус-М [5]:

$$f_{GAM} = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\left(\frac{2T_i}{M_i}\right) \left(\frac{7}{4} + \tau\right) \left(\frac{2}{k^2 + 1}\right)} \\ \times \left(1 - \varepsilon^2 \frac{9k^2 + 3}{8k^2 + 8} - s_k \frac{k^2}{4k^2 + 4}\right),$$

где  $\tau = T_e/T_i$ ,  $R_0$  и  $k$  — большой радиус и вытянутость соответственно,  $s_k \approx (k - 1)/k$ . Электронная температура измерялась методом томсоновского рассеяния (рис. 3, *b*), а ионная температура  $T_i$  была оценена из баланса энергии ионов при численном моделировании периферии разряда в Глобусе-М [6]. Для  $T_e = 100$  eV,  $T_i = 50$  eV,  $k = 1.8$  и  $\varepsilon = 0.67$  расчетная частота ГАМ для дейтерия составляла 20 kHz, что было близко к измеренной частоте при положении отсечки, соответствующей максимуму амплитуды колебаний ГАМ  $R = 0.563$  m (рис. 3, *a*). Для токамака круглого сечения ( $k = 1$ ) и большого аспектного отношения соответствующая оценка дает значительно большую величину — 59 kHz. Это сравнение явно демонстрирует влияние геометрического фактора на частоту ГАМ, которое предсказывает теория.

Эволюция колебаний на частоте ГАМ анализировалась путем построения спектрограмм флуктуаций частотного доплеровского сдвига. На рис. 1, *a* представлена спектрограмма для разряда с переходом в Н-моду. Квазикогерентные колебания проявляются на спектрограмме в виде цепочки темных пятен вблизи ожидаемых частот ГАМ в период с 162 по 175 ms. Видно, что эти колебания прекращаются в Н-моду еще до того, как происходит заметное смещение отсечки. Это наблюдение подтверждает общую тенденцию исчезновения ГАМ при возникновении периферийного транспортного барьера. Область регистрации ГАМ находилась внутри сепаратрисы. Средняя скорость полоидального вращения плазмы, вычисленная путем сглаживания доплеровского сдвига частоты, на временном интервале от 162 до 175 ms (рис. 1, *b*) направлена в сторону диамагнитного дрейфа электронов, что соответствует положению отсечки внутри сепаратрисы. Для изучения локализации ГАМ проводились измерения в сходных разрядах токамака при различных значениях зондирующих частот и, следовательно, при различных радиальных положениях отсечки. Эти измерения показали, что ГАМ развиваются в очень узком радиальном



**Рис. 3.** Радиальные профили: *a* — амплитуды и частоты ГАМ, *b* — электронной температуры.

слое внутри сепаратрисы на расстоянии 1 см от нее и не возникают снаружи от сепаратрисы в области SOL (рис. 3, *a*). Действительно, ГАМ никогда не наблюдались в области существования незамкнутых силовых линий магнитного поля. Узкая область локализации ГАМ может быть связана с резким уменьшением запаса устойчивости от значения  $q = 5.5$  на сепаратрисе до  $q = 4.6$  на расстоянии 1.5 см от сепаратрисы. Считается, что при малых значениях запаса устойчивости ГАМ не могут развиваться [1] и резкое уменьшение запаса устойчивости на периферии разряда может вызвать сужение области существования

ГАМ. Узкая зона развития ГАМ вблизи сепаратрисы наблюдалась ранее на токамаке DIII-D [7]. Частота наблюдаемых колебаний во всей области локализации ГАМ изменялась незначительно, несмотря на то, что электронная температура в этой области меняется почти в два раза (рис. 3). Эти результаты могут указывать на развитие единой геодезической моды [2].

ГАМ были зарегистрированы также в режиме омического нагрева. Колебания скорости вращения на частоте ГАМ возникали при слабом спаде средней плотности плазмы в интервале  $10^{19} - 8 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ , который явным образом никак не был отмечен переходами в режимах удержания плазмы. В некоторых разрядах с сильными МГД-возмущениями  $m/n = 2/1$  ГАМ исчезали, когда происходило замедление и запираание МГД-моды, которое, как известно, приводит к сильному возмущению магнитных поверхностей и может быть причиной подавления ГАМ.

На спектрограмме рис. 1, а ГАМ развиваются в ограниченных временных интервалах, которые чередуются с периодами подавления колебаний. Длительность периодов существования ГАМ оценивалась по затуханию автокорреляционной функции колебаний доплеровского сдвига. Ее характерная величина составляла 0.3–0.4 ms. Чередование периодов возбуждения и затухания ГАМ ранее исследовалось на токамаке ASDEX-Upgrade, и предполагалось, что оно соответствует промежуточной между L- и H-модами фазе удержания плазмы [8].

Таким образом, первые данные о ГАМ, полученные на сферическом токамаке, свидетельствуют о том, что основные свойства геодезических акустических мод в токамаке с малым аспектным отношением сходны со свойствами ГАМ в обычных токамаках. В частности, такие свойства ГАМ, как их периферийная локализация, отсутствие ГАМ в H-моде, прерывистость в развитии ГАМ, влияние на их развитие МГД-активности, были ранее отмечены, например, в экспериментах с использованием доплеровской рефлектометрии на токамаке ASDEX-Upgrade [8]. Количественные различия в основном касаются частоты ГАМ, которая оказалась меньше, чем в токамаках с большим аспектным отношением при прочих равных условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства РФ согласно постановлению № 220 по договору № 11.G34.31.0041 и контракта № 14.518.11.7004 по программе президиума РАН, а также грантов РФФИ: 11-08-00813-а, 13-02-00129-а, 13-08-00370-а, 12-02-31610.

## Список литературы

- [1] *Diamond P.H., Itoh S.-I., Itoh K., Hahn T.S.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. P. R35.
- [2] *Fujisawa A.* // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. P. 013 001.
- [3] *Conway G.D., Scott B., Schirmer J.* et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. P. 1165.
- [4] *Буланин В.В., Варфоломеев В.И., Гусев В.К.* и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 7. С. 103–110.
- [5] *Zhe Gao* // Physics of Plasmas. 2010. V. 17. P. 092 503.
- [6] *Senichenkov I.Yu., Rozhansky V.A., Bogomolov A.V.* et al. // 35th EPS Conference on Plasma Phys. Hersonissos, 9–13 June 2008. ECA. V. 32D. P. 2.046.
- [7] *McKee G.R.* et al // Plasma Phys. Control. Fusion. 2006. V. 48. P. S123.
- [8] *Conway G.D., Angioni C., Ryter F.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 065 001.