

УДК 533.932, 621.039.616

ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ МОД В УСТАНОВКЕ Т-10

*А.В. Мельников^{1,2}, Л.Г. Елисеев¹, С.Е. Лысенко¹, С.В. Перфилов¹, Д.А. Шелухин¹, В.А. Вериков¹,
В.Н. Зенин¹, Л.И. Крупник³, А.С. Козачек³, Н.К. Харчев⁴, М.В. Уфимцев⁵ и группа «тяжёлый пучок»³*

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³ Институт физики плазмы, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

⁴ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

⁵ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Геодезические акустические моды (ГАМ) рассматриваются в качестве механизма самостабилизации турбулентности. На токамаке Т-10 ГАМ на электростатическом потенциале и флуктуации плотности одновременно исследовались с помощью зондирования пучком тяжёлых ионов (ЗПИ) и корреляционной рефлектометрии (КР). Изучались режимы с омическим и электронно-циклотронным (ЭЦ) нагревом. ГАМ более выражены во время ЭЦ-нагрева, при этом их типичные частоты лежат в узкой полосе 22—27 кГц для основного пика и 25—30 кГц для более высокочастотного сателлита. Локальные значения электрического потенциала и флуктуаций демонстрируют заметную когерентность и постоянный фазовый сдвиг в диапазоне частот ГАМ. Существование дальних пространственных (1/4 тора) корреляций потенциала и плотности для ГАМ означает, что ГАМ является глобальной модой, что впервые показано на токамаке.

Ключевые слова: геодезические акустические моды, турбулентность, токамак Т-10, тяжёлый пучок, рефлектометр.

LONG-DISTANCE CORRELATIONS OF GEODESIC ACOUSTIC MODES IN T-10

*A.V. Melnikov^{1,2}, L.G. Eliseev¹, S.E. Lysenko¹, S.V. Perfilov¹, D.A. Shelukhin¹, V.A. Vershkov¹, V.N. Zenin¹,
L.I. Krupnik³, A.S. Kozachek³, N.K. Kharchev⁴, M.V. Ufimtsev⁵ and HIBP team³*

¹ NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

² National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³ Institute of Plasma Physics, NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology», Kharkov, Ukraine

⁴ Institute of General Physics Russian Academy of Science, Moscow, Russia

⁵ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Geodesic acoustic modes (GAMs) are considered as a mechanism of turbulence self-stabilization. In the T-10 tokamak, GAMs on the electrostatic potential and density fluctuations were simultaneously measured by heavy ion beam probe (HIBP) and correlation reflectometry (CR). The discharges with ohmic and electron cyclotron resonance heating (ECRH) were studied. GAMs are more pronounced during ECRH, when the typical frequencies were seen in the narrow band from 22 to 27 kHz for the main peak and 25—30 kHz for the higher frequency satellite peak. The local values of electric potential and density fluctuations show the significant coherency and constant phase shift at GAM frequency range. The existence of the long-distance (one quarter of the torus) correlations of core electric potential and density for GAM implying that GAM is a global mode. This was shown for the first time in tokamaks.

Key words: geodesic acoustic modes, turbulence, T-10 tokamak, heavy beam, reflectometer.

ВВЕДЕНИЕ

В термоядерной плазме с магнитным удержанием зональные течения и их высокочастотная ветвь — геодезические акустические моды (ГАМ) наблюдались с конца прошлого века на нескольких токамаках, обладающих соответствующей диагностикой, и были названы «мода 20 кГц» [1]. Широкий интерес к ГАМ возник после теоретической работы [2], где ГАМ представлялись как механизм стабилизации турбулентности, переводящий радиальный вынос энергии из плазмы в крутильные колебания, не выносящие энергию, т.е. как средство стабилизации турбулентности и снижения переноса. Результаты исследований зональных течений, полученные на многих термоядерных установках — токамаках и стеллараторах, обобщены в обзорах [3, 4]. Однако дальнейшие исследования показали, что в плазме возникает сложная взаимосвязь между ГАМ, дрейфово-волновой турбулентностью, широм вращения плазмы, L—H-переходами (к улучшенному удержанию) и нелокальным переносом [5, 6]. Взаимодействие ГАМ с турбулентностью происходит по принципу «хищник—жертва», поэтому ГАМ носит вспышечный, перемежающийся характер [7, 8]. Обнаружились расхождения по вопросу, в какой степени ГАМ являются локальной или глобальной модой. Оказалось, что локальные зависимости частоты ГАМ от температуры не соответствовали измерениям на ряде установок и численным расчётам [9]. На Т-10 был показан глобальный

характер ГАМ [10], но на токамаке Туман-3 измерения, использующие аналогичные методики, показали периферийный характер ГАМ [11]. Актуальность и уровень всеобщего интереса к проблеме ГАМ характеризует тот факт, что в недавнем обзоре [12] зональные течения поставлены на первое место. В связи с этим корреляционные свойства ГАМ являются важной темой исследования переноса и турбулентности.

На большинстве установок ГАМ исследуются с помощью корреляционной рефлектометрии (КР), зондов Ленгмюра и доплеровского рассеяния, но эти методы позволяют получать информацию только из периферийной плазмы [13—16]. Самый прямой и надёжный метод исследования ГАМ в горячей зоне плазмы — это зондирование пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ, или НІВР в английской транскрипции), который много лет используется на токамаке Т-10 для измерения профилей как средних значений потенциала, так и его колебаний [17]. Помимо Т-10, ЗПТИ используется на крупнейшем в мире стеллараторе LHD и на стеллараторе TJ-II, сравнимом с Т-10 [18], а также на токамаках JFT-2M [19], Туман-3М [11] и других. Впервые экспериментально корреляционные свойства зональных потоков исследовались двойным ЗПТИ на стеллараторе CHS [20]. На Т-10 наблюдался некоторый эффект перекачки энергии из широкополосной турбулентности в ГАМ, хотя уровень модуляции был не очень высоким [21, 22]. Отметим недавнюю работу со стелларатора LHD, где дальние корреляции рассматривались как механизм, связывающий турбулентный перенос в центре и на периферии плазмы [23].

Токамак Т-10 обладает уникальным сочетанием диагностик для исследования ГАМ: ЗПТИ, КР и зонды Ленгмюра. В данной работе описаны первые результаты корреляционных изменений ГАМ, сделанных в горячей зоне плазмы диагностиками КР и ЗПТИ. Приводятся основные характеристики ГАМ, определяются корреляции между локальными значениями потенциала и плотности, и показано наличие дальних пространственных корреляций, т.е. ещё один аргумент в пользу глобального характера ГАМ.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В токамаке Т-10 ГАМ изучались в разрядах с омическим нагревом, центральным и нецентральным ЭЦР-нагревом (тороидальное магнитное поле $B = 2,2—2,5$ Тл, ток $I_p = 180—330$ кА, средняя плотность $\bar{n}_e = (1,3—2,5)10^{19} \text{ м}^{-3}$). Расположение диагностик показано на рис. 1. Область наблюдения ЗПТИ (детекторная сетка, DG) находилась в патрубке D, в верхнем квадранте сечения плазмы со стороны слабого поля (LFS), причём радиальное положение точек наблюдения (SV) можно было менять в диапазоне $0,16 < r_{SV} < 0,3$ м за счёт изменения E_b — энергии первичного пучка ионов Ti^+ и угла инжекции пучка.

КР исследует характеристики электромагнитной волны, отражённой от плазмы. В патрубке D вместе с ЗПТИ размещались антенны, зондирующие плазму как снаружи, со стороны слабого магнитного

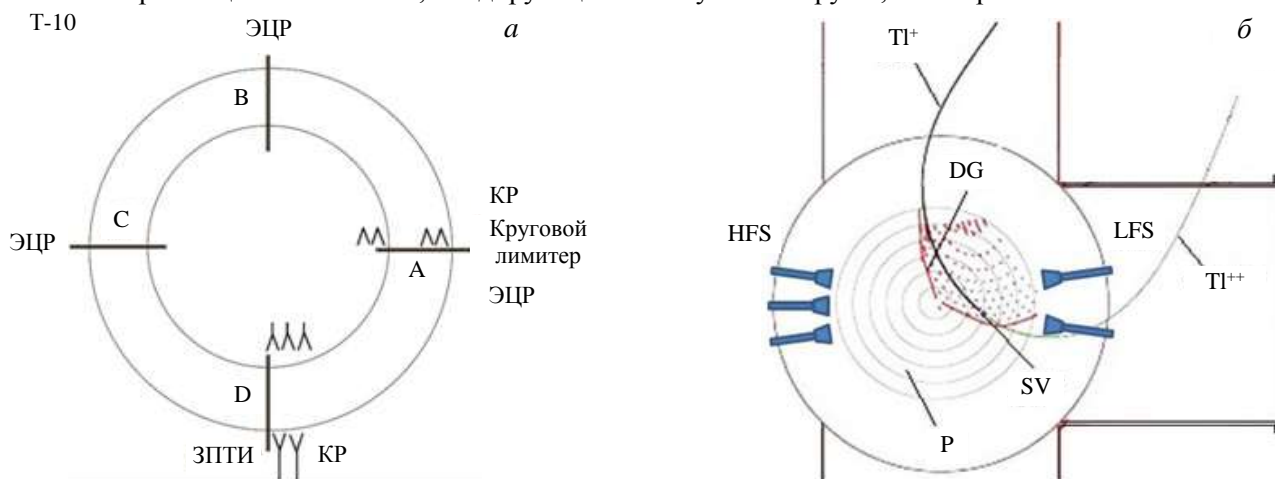


Рис. 1. Расположение диагностик на Т-10 — вид сверху (а) и в патрубке D (б): КР — корреляционный рефлектометр; DG — детекторная сетка; ЭЦР — ввод электронно-циклотронного нагрева; HFS — рупоры КР на стороне сильного поля; ЗПТИ — зондирование пучком тяжёлых ионов; LFS — рупоры КР на стороне слабого поля; P — плазма; SV — точка наблюдения пучком; Ti^+ — первичный зондирующий пучок; Ti^{++} — вторичный зондирующий пучок

поля (LFS), так и изнутри, со стороны сильного поля (HFS) и направленные на центр плазменного шнура. Две антенны помещались в патрубке А, смещённом относительно D на 90° в тороидальном направлении, одна антенна была сдвинута на $28,5^\circ$ от вертикали в сторону LFS, другая на $26,5^\circ$ в сторону HFS. В данной работе использовались только антенны на LFS. В исследуемом диапазоне плотностей КР мог

получать отражённый сигнал из плазмы до радиуса $r > 0,1$ м [24]. Расчёты показали, что чувствительность КР слабо зависит от радиуса при волновых числах $k_{\perp} < 3$, типичных для турбулентности в Т-10.

ЗПТИ является мощной диагностикой для исследования ГАМ в различных тороидальных системах [3]. Она позволяет одновременно наблюдать радиальные профили осциллирующего компонента двух параметров: электрического потенциала плазмы ϕ по энергии вторичных ионов и электронной плотности n_e по полному току вторичных ионов I_{tot} , если затухание пучка не влияет на сигнал (эффект интеграла по траектории) [25, 26]. Это справедливо для низких плотностей, которые изучаются в данной работе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Наблюдения ГАМ. На рис. 2, *a* представлены спектры удельной мощности (power spectral density (PSD)) колебаний, измеренные ЗПТИ. Видно, что ГАМ сильнее выражены на потенциале плазмы, чем на плотности, в то время как МГД-мода с $m = 2$ доминирует на спектре колебаний плотности. Заметим, что обычно в Т-10 пик ГАМ состоит из низкочастотного основного пика и более высокочастотных сателлитов [21]. Рис. 2, *б* иллюстрирует измерения относительной амплитуды, сделанные КР. Видно, что наибольшая амплитуда ГАМ наблюдается в верхней части плазмы, там же, где находятся точки наблюдения ЗПТИ, а вблизи экватора амплитуда мала.

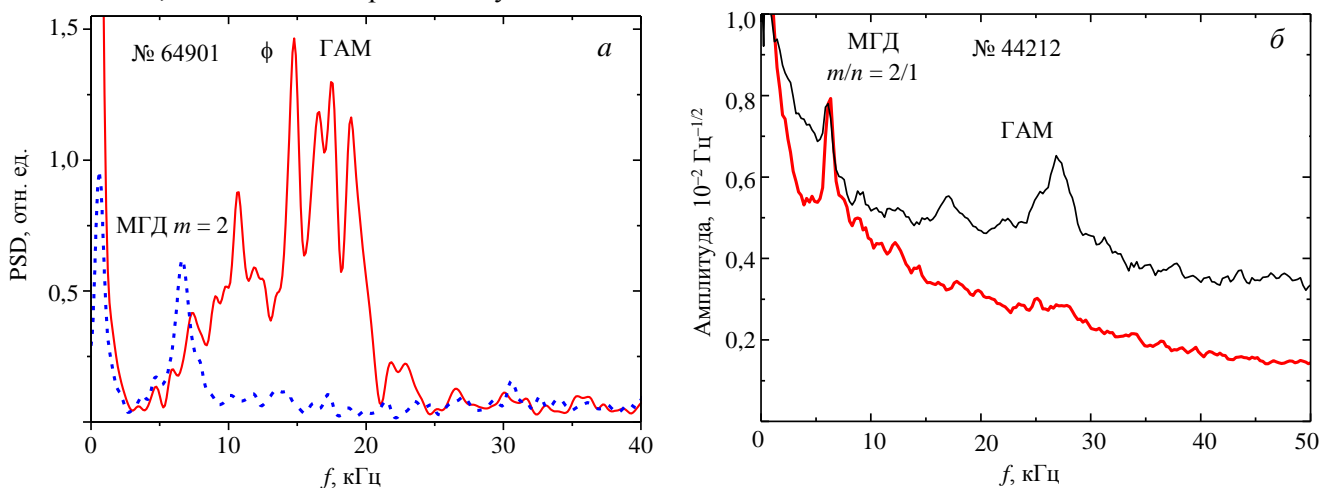


Рис. 2. PSD потенциала ϕ (—) и относительной плотности (---) в омическом разряде, измеренные ЗПТИ (*a*), спектры возмущений плотности, измеренные КР (*б*); ГАМ более заметны на потенциале, в то время как МГД-мода $m = 2$ с пиком 7 кГц более заметна на плотности; ГАМ более заметны в верхней части плазменного шнура на LFS (—), в экваториальной плоскости на HF они малы (—)

Переменяющийся характер ГАМ в омической и ЭЦР-плазме. Ранее было показано, что частота ГАМ растёт с температурой T_e после включения ЭЦР-нагрева в соответствии с частотной зависимостью для ГАМ $f \sim \sqrt{T_e}$ [27]. Эксперименты в омических и ЭЦР-режимах показали, что ГАМ могут иметь сложную структуру, не похожую на обычные периодические колебания с одной частотой. Из вэйвлет-спектра, колебаний потенциала, показанного на рис. 3, *a*, видно, что ГАМ имеет переменяющийся характер, проявляющийся в виде стохастической последовательности волновых пакетов. Эта особенность видна как для основного пика ГАМ, так и более высокочастотного сателлита. На Т-10 «время жизни» этих пакетов составляло 0,5—2 мс, поэтому вэйвлет-анализ является наиболее удобным методом изучения свойств ГАМ. Видно, что ГАМ сильнее выражены при ЭЦР-нагреве по сравнению с омической стадией разряда (рис. 3, *б*). Типичные частоты волновых пакетов лежат в узком интервале 20—30 кГц, а сами пакеты расположены на наружной трети малого радиуса плазмы.

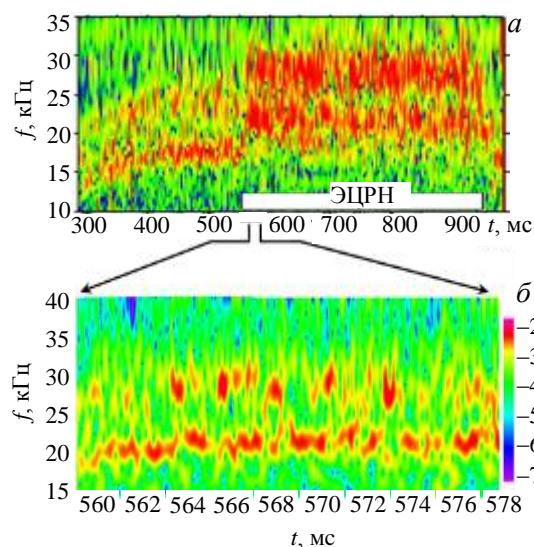


Рис. 3. Вэйвлет-спектрограмма потенциала ϕ , измеренного ЗПТИ (*a*); переменяющийся сигнал ГАМ в разряде с ЭЦР-нагревом (*б*)

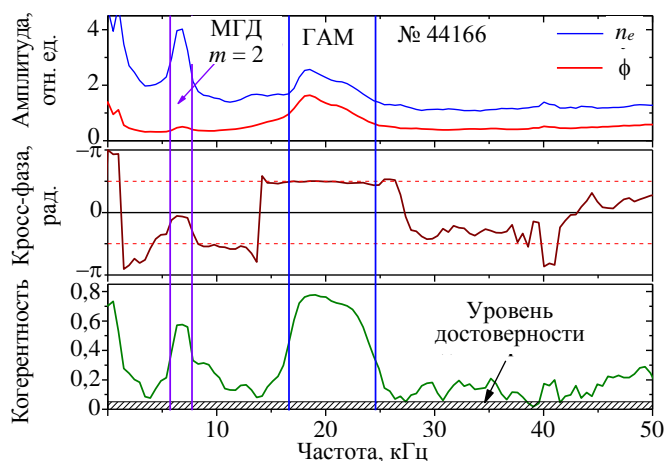


Рис. 4. Локальная когерентность потенциал—плотность. Видны высокая когерентность вблизи частоты ГАМ и постоянная кросс-фаза. Кросс-фазы для МГД-моды $m = 2$ (7 кГц) и для ГАМ различаются. Импульс № 44166, $B = 2,2$ Тл, $E_b = 210$ кэВ, $r_{sv} = 22,1$ см

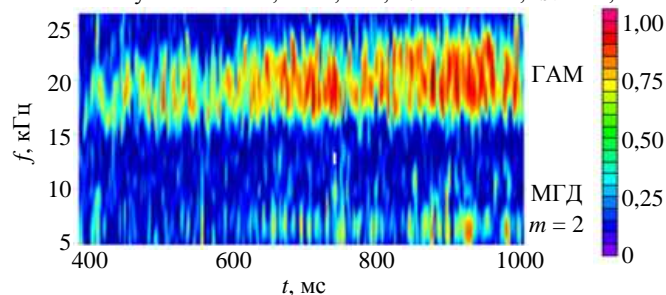


Рис. 5. Фурье-спектр для локальной когерентности потенциал—плотность, измеренной ЗПТИ. Видны высокая когерентность ($>0,9$) и перемежаемость в омическом разряде при частоте ГАМ около 20 кГц и низкая когерентность для МГД-моды $m = 2$ около 7 кГц. Импульс № 44160, $B = 2,2$ Тл, $E_b = 250$ кэВ, $r_{sv} = 16,1$ см

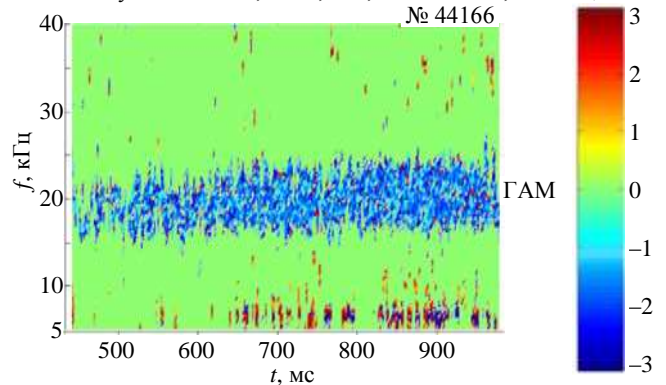


Рис. 6. Временная эволюция кросс-фазы для локальных корреляций потенциал—плотность, измеренных ЗПТИ и показанных на рис. 5. Порог когерентности $coh_t = 0,3$. Если когерентность $> 0,3$, то кросс-фаза окрашена разными цветами, если когерентность $< 0,3$, то кросс-фаза окрашена зелёным (цвет нуля)

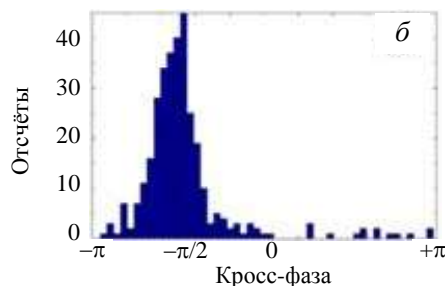
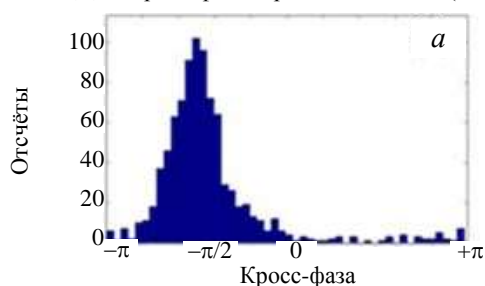


Рис. 7. Примеры гистограмм кросс-фазы, построенные по данным рис. 5 и 6. Наиболее вероятное значение для ГАМ $-\pi/2$: $t = 760—780$ мс (а); $t = 920—940$ мс (б)

Кросс-фаза потенциал—плотность и локальные корреляции ГАМ, измеренные ЗПТИ.

Когерентный анализ с большим временем выборки (>200 мс) был проведён в стационарной фазе разряда с постоянной плотностью. Явно видна когерентность между потенциалом и плотностью, измеренными ЗПТИ в одной точке SV на частоте ГАМ. В приведённом примере фазовый сдвиг для ГАМ равен $\pi/2$, для пика МГД-моды $m = 2$ фазовый сдвиг нулевой (рис. 4). Когерентный анализ измерений ЗПТИ с малым временем выборки (10 мс), представленный на рис. 5, показывает постоянную частоту и всплывчатый характер корреляции между потенциалом и плотностью на частоте ГАМ.

Кросс-фаза между потенциалом и плотностью, в общем, ведёт себя стохастически во всём наблюдаемом диапазоне частот. Однако для квазикогерентных мод типа МГД-моды $m = 2$ и ГАМ кросс-фаза выглядит более систематичной (рис. 6). Чтобы сделать рисунок более ясным и убрать из него стохастический компонент, разными цветами показаны только фазы с когерентностью выше некоторого порога, в данном случае $coh_t > 0,3$, а для малой когерентности кросс-фаза положена нулевой (зелёный цвет на рис. 6). Чтобы проанализировать кросс-фазу для ГАМ, построена гистограмма для значений, превосходящих пороговую когерентность coh_t . Результат показан на рис. 7. Сравнение рис. 4 и 7 показывает, что метод гистограмм даёт те же значения, что и долговременная выборка.

Кросс-фаза потенциал—плотность для ГАМ. Глобальные корреляции между ЗПТИ и КР.

Для исследования радиальной длины далёких пространственных корреляций был проделан следующий эксперимент: точки измерения ЗПТИ и КР размещались на одном и том же фиксированном радиусе, но разнесены на $1/4$ тора (патрубки А и D). Фурье-анализ корреляций с большим временем выборки (>200 мс) надёжно показывает корреляцию между потенциалом, измеренным

ЗПТИ, и плотностью, измеренной КР, на частоте ГАМ (рис. 8). Эти наблюдения подтверждают глобальный характер ГАМ.

Фурье-анализ корреляций с коротким временем выборки (4 мс) указывает на постоянную частоту и вспышечный характер корреляции между колебаниями потенциала по данным ЗПТИ и плотности по КР на частоте ГАМ (рис. 9). Для исследования радиальной длины далёких пространственных корреляций был проделан другой эксперимент: ЗПТИ устанавливался в фиксированном положении, $r_{SV} = 25 \pm 0,5$ см, а из-за падения плотности плазмы в интервале $600 \text{ мс} < t < 1000 \text{ мс}$ (рис. 10, б) радиус наблюдения r_c (отражающий слой КР) менялся со временем (рис. 10, в). Рис. 10, г демонстрирует надёжную корреляцию между потенциалом по данным ЗПТИ и плотностью по КР на частоте ГАМ в течение всего разряда. Видно, что когерентность остаётся почти неизменной при радиальной вариации отражающего слоя КР на 1 см. Таким образом, это наблюдение показывает, что радиальная длина корреляции для ГАМ превышает 2 см. Это согласуется с прежними оценками по КР, дающими значение радиального волнового числа $k_r \leq 3\text{--}5 \text{ см}^{-1}$ [21].

Анализ данных КР, находящихся в разных трубках, показал, что тороидальная длина корреляции вдоль силовой линии для квазикогерентных колебаний (ГАМ) составляет 12,5 м, а для стохастических низкочастотных флуктуаций она не превышает 2,5 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детальное исследование структуры ГАМ показало, что эта мода плазменных колебаний потенциала имеет непостоянный, вспышечный характер, представленный на рис. 3. Несмотря на это, между колебаниями локальных значений потенциала и плотности, измеренных в одной и той же пространственной области (SV), обнаружены высокая когерентность и конечная кросс-фаза. Характерно, что когерентность и кросс-фаза также имеют характер отдельных нерегулярных вспышек. Таким образом, аperiodические волновые пакеты, характеризующие ГАМ, возникают синхронно на электрическом потенциале и плотности плазмы в одной и той же локальной области. Сигналы колебаний потенциала и плотности плазмы, разнесённые на 1/4 тора и подсчитанные

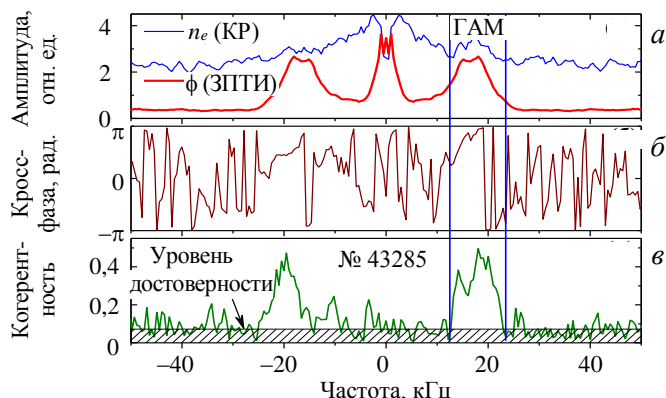


Рис. 8. Дальние пространственные корреляции потенциал—плотность, измеренные ЗПТИ (в сечении D) и КР (в сечении A) в импульсе № 43285: $B = 2,2$ Тл, $E_b = 250$ кэВ, $r_{SV} = 25 \pm 0,5$ см

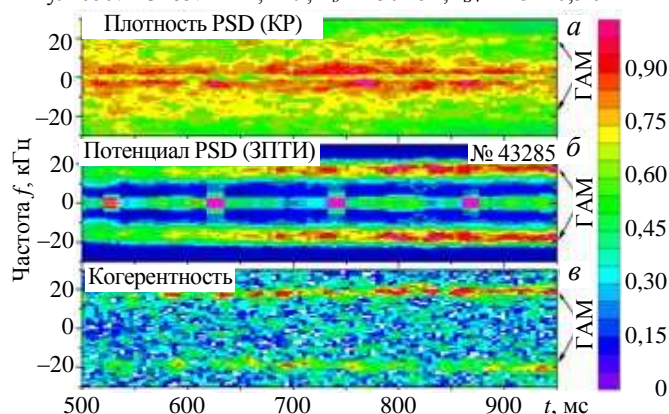


Рис. 9. Временная эволюция далёких корреляций потенциал—плотность, измеренных ЗПТИ и КР. Амплитуды комплексных спектров сигналов плотности и потенциала даны в относительных единицах

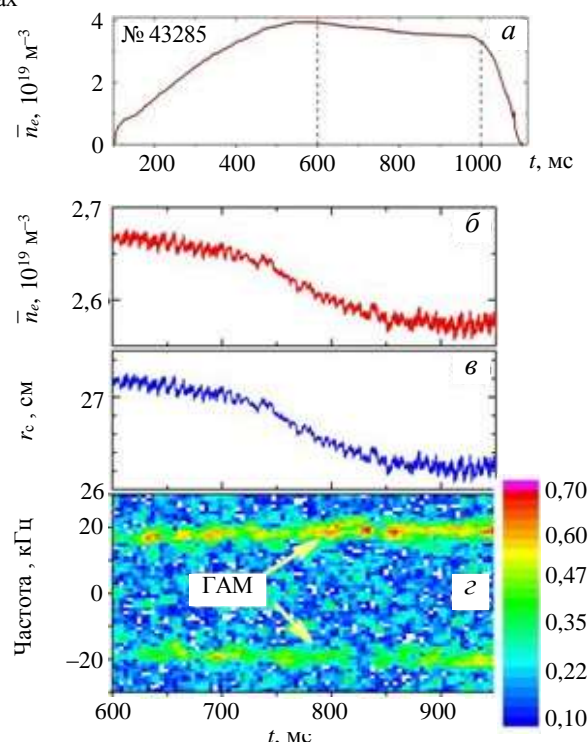


Рис. 10. Радиальная эволюция далёких пространственных корреляций потенциал—плотность: временная эволюция средней плотности в омическом разряде (а); участок со спадающей плотностью (б); изменение радиуса отражающего слоя КР (в); когерентность потенциал—плотность в диапазоне ГАМ достигает 0,7, точка наблюдения ЗПТИ $r_{SV} = 25 \pm 0,5$ см (г)

по временному интервалу большой длительности, который существенно превышает длительность отдельных вспышек ГАМ, показывают высокую когерентность на всём частотном интервале ГАМ 12—21 кГц (см. рис. 8). В то же время когерентность и кросс-фаза, полученные при высоком временном разрешении (длительность временной выборки для Фурье-анализа меньше длительности вспышек ГАМ), также показывают всплещный характер. Как показано на рис. 9 и 10, вспышки (волновые пакеты ГАМ) возникают синхронно на электрическом потенциале и плотности плазмы в различных областях, значительно удалённых друг от друга. Таким образом, отдельные вспышки ГАМ имеют глобальный характер. На глобальный характер ГАМ также указывает отсутствие радиальной зависимости у амплитуды и частоты ГАМ [10]. В пользу глобального характера ГАМ свидетельствуют не только результаты, полученные на нескольких установках и описанные во Введении, но и результаты теоретических работ [28, 29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке Т-10 исследованы ГАМ с помощью диагностик ЗПТИ и КР. Показано, что ГАМ в основном проявляются как флуктуации потенциала и слабее видны на флуктуациях плотности. ГАМ имеют перемежаемый характер на амплитуде и частоте. ГАМ на потенциале и плотности обладают высокой когерентностью и постоянным фазовым сдвигом. Радиальная корреляционная длина ГАМ превышает несколько сантиметров, а тороидальная длина корреляции сравнима с длиной обхода тора. Впервые обнаружены далёкие пространственные корреляции ГАМ в горячей зоне плазмы токамака. Их наличие означает, что ГАМ является глобальной модой.

Авторы благодарны всему коллективу установки Т-10 за помощь в проведении экспериментов. Работа проведена за счёт Российского научного фонда, проект 14-22-00193.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tsui W.H.Y., Schoch P.M., Wootton A.J.** Observation of a quasicohherent mode in the Texas Experimental Tokamak. — *Phys. Fluids B*, 1993, vol. 5, p. 1274.
2. **Diamond P.H., Itoh S.-I., Itoh K., Hahm T.S.** Zonal flows in plasma—a review. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2005, vol. 47, p. R35.
3. **Fujisawa A., Ido T., Shimizu A., Okamura S., Matsuoka K., Iguchi H., Hamada Y., Nakano H., Ohshima S., Itoh K. et al.** Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas. — *Nucl. Fusion*, 2007, vol. 47, p. S718.
4. **Fujisawa A.** A review of zonal flow experiments. — *Nucl. Fusion*, 2009, vol. 49, p. 013001.
5. **Cziegler I., Tynan G.R., Diamond P.H., Hubbard A.E., Hughes J.W., Irby J., Terry J.L.** Zonal flow production in the L—H transition in Alcator C-Mod. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2014, vol. 56, p. 075013.
6. **Hu G.S., Shao L.M., Liu S.C., Wang H.Q. et al.** Study of L—H transition with a new dual gas puffing imaging system in the EAST superconducting tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, p. 013007.
7. **Miki K., Diamond P.H., Fedorczak N., Gürcan O.D. et al.** Spatio-temporal evolution of the L→H and H→L transitions. — *Nucl. Fusion*, 2013, vol. 53, p. 073044.
8. **Schmitz L., Zeng L., Rhodes T.L., Hillesheim J.C. et al.** The role of zonal flows and predator–prey oscillations in triggering the formation of edge and core transport barriers. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, p. 073012.
9. **Miki K., Diamond P.H.** Role of geodesic acoustic modes shearing feedback loop in transport bifurcations and turbulence spreading. — *Phys. Plasmas*, 2010, vol. 17, p. 032309.
10. **Мельников А.В., Елисеев Л.Г., Лысенко С.Е., Перфилов С.В., Шурыгин Р.В., Крупник Л.И., Козачек А.С., Смоляков А.И.** Радиальная однородность геодезических акустических мод в омических разрядах с низким B на токамаке Т-10. — Письма в ЖЭТФ, 2014, т. 100, с. 633.
11. **Аскинази Л.Г., Вильдджонас М.И., Жубр Н.А., Комаров А.Д. и др.** Эволюция колебаний геодезической акустической моды в разряде с омическим переходом в режим хорошего удержания в токамаке ТУМАН-3М. — Письма в ЖТФ, 2012, т. 38, вып. 6, с. 29.
12. **Hahm T.S.** Summary of the magnetic confinement theory and modelling activity presented at the 24th IAEA Fusion Energy Conference. — *Nucl. Fusion*, 2013, vol. 53, p. 104002.
13. **Conway G.D. and the ASDEX Upgrade Team.** Amplitude behaviour of geodesic acoustic modes in the ASDEX upgrade tokamak. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2008, vol. 50, p. 085005.
14. **Yashin A.Yu., Bulanin V.V., Gusev V.K., Khromov N.A. et al.** Geodesic acoustic mode observations in the Globus-M spherical tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, p. 114015.
15. **Chen W., Ding X.T., Yu L.M., Ji X.Q., Shi Z.B., Zhang Y.P. et al.** Observation of energetic-particle-induced GAM and nonlinear interactions between EGAM, BAEs and tearing modes on the HL-2A tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2013, vol. 53, p. 113010.
16. **Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Altukhov A.B., Selyunin E.P. et al.** Spatial structure of the geodesic acoustic mode in the FT-2 tokamak by upper hybrid resonance Doppler backscattering. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2013, vol. 55, p. 085017.

17. **Melnikov A.V., Hidalgo C., Eliseev L.G., Ascasibar E., Chmyga A.A., Dyabilin K.S., Krasilnikov I.A., Krupnik V.A., Krupnik L.I., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachek A.S. et al.** Plasma potential and turbulence dynamics in toroidal devices (survey of T-10 and TJ-II experiments). — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, p. 083043.
18. **Melnikov A.V., Hidalgo C., Ido T., Shimizu A., Fujisawa A., Dyabilin K.S., Lysenko S.E.** Plasma potential in toroidal devices: T-10, TJ-II, CHS and LHD. — Plasma and Fusion Research, 2012, vol. 7, p. 2402114.
19. **Ido T., Miura Y., Hoshino K., Kamiya K., Hamada Y. et al.** Observation of the interaction between the geodesic acoustic mode and ambient fluctuation in the JFT-2M tokamak. — Nucl. Fusion, 2006, vol. 46, p. 512—520.
20. **Fujisawa A., Itoh K., Iguchi H., Matsuoka K., Okamura S., Shimizu A., Minami T., Yoshimura Y., Nagaoka K., Takahashi C. et al.** Identification of zonal flows in a toroidal plasma. — Phys. Rev. Lett., 2004, vol. 93, p. 165002.
21. **Melnikov A.V., Vershkov V.A., Eliseev L.G., Grashin S.A., Gudozhnik A.V., Krupnik L.I., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Shelukhin D.A. et al.** Investigation of geodesic acoustic mode oscillations in the T-10 tokamak. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, p. S87—S110.
22. **Vershkov V.A., Shelukhin D.A., Soldatov S.V., Urazbaev A.O., Grashin S.A., Eliseev L.G., Melnikov A.V. and the T-10 team.** Summary of experimental core turbulence characteristics in ohmic and electron cyclotron resonance heated discharges in T-10 tokamak plasmas. — Nucl. Fusion, 2005, vol. 45, p. S203—S226.
23. **Inagaki S., Tokuzawa T., Kobayashi T., Itoh S.-I., Itoh K., Ida K., Fujisawa A. et al.** Study of non-linear coupling of fluctuations at long distance in LHD. — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 114014.
24. **Shelukhin D.A., Vershkov V.A., Khmara A.V.** Spatial structure of density fluctuations and geodesic acoustic mode in T-10 tokamak. — In: Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conf. Geneva, 13—18 October 2008, EX/P5-36.
25. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Grashin S.A., Gudozhnik A.V., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Soldatov S.V., Shelukhin D.A., Vershkov V.A. et al.** Observation of the specific oscillations with frequencies near 20 kHz by HIBP, reflectometry and Langmuir probes in T-10. — In: Proc. 30th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. St. Petersburg, 7—11 July 2003, ECA, vol. 27A, P3-114.
26. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Perfilov S.V., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Shurygin R.V., Shelukhin D.A., Vershkov V.A., Tulinin G.N., Grashin S.A. et al.** The study of GAM properties in the T-10 tokamak. — In: Proc. 34th EPS Conf. on Plasma Physics. Warsaw, 2—6 July 2007, ECA, vol. 31F, P-1.096.
27. **Melnikov A.V., Eliseev L.G., Gudozhnik A.V., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Zimeleva L.G., Ufimtsev M.V., Krupnik L.I., Schoch P.M.** Investigation of the plasma potential oscillations in the range of geodesic acoustic mode frequencies by heavy ion beam probing in tokamaks. — Czech. J. Phys., 2005, vol. 55, p. 349—360.
28. **Ilgisonis V.I., Khalzov I.V., Lakhin V.P., Smolyakov A.I., Sorokina E.A.** Global geodesic acoustic mode in a tokamak with positive magnetic shear and a monotonic temperature profile. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2014, vol. 56, p. 035001.
29. **Ильгисонис В.И., Коновальцева Л.В., Лахин В.П., Сорокина Е.А.** Аналитические решения для глобальных геодезических акустических мод в плазме токамака. — Физика плазмы, 2014, т. 40, с. 955—966.



Александр Владимирович Мельников, в.н.с., д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; профессор; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
melnikov_07@yahoo.com



Леонид Геннадьевич Елисеев, н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
reonid@yahoo.com



Сергей Евгеньевич Лысенко, ведущий н.с., к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Lysenko_SE@nrcki.ru



Станислав Васильевич Перфилов, н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
stas_893@pochtamt.ru



Дмитрий Александрович Шелухин, с.н.с., к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Shelukhin_DA@nrcki.ru



Владимир Александрович Вершков, начальник лаборатории, д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
v.verzhkov@fc.iterru.ru



Виталий Николаевич Зенин, аспирант; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
vitalyzenin@mail.ru



Людмила Ивановна Крупник, ведущий н.с., к.ф.-м.н.; Институт физики плазмы, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», 61108 Харьков, ул. Академическая 1, Украина
krupnik@ipp.kharkov.ua



Александр Станиславович Козачек, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; Институт физики плазмы, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», 61108 Харьков, ул. Академическая 1, Украина
hibp@ipp.kharkov.ua



Николай Константинович Харчев, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова 38, Россия
khar@fpl.gpi.ru



Михаил Валентинович Уфимцев, с.н.с., к.ф.-м.н.; МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет ВМК, 119991 Москва, Ленинские горы 1, стр. 52, Россия
mufimtzev.jack.com@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 октября 2014 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 1, с.49—56.