

УДК 533.951.7

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЫ И КВАЗИКОГЕРЕНТНОЙ МОДЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ОМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ НА ТОКАМАКЕ T-10

© 2023 г. Я. М. Аммосов^{a, b, *}, Ф. О. Хабанов^a, М. А. Драбинский^a,
А. В. Мельников^{a, c}, Л. Г. Елисеев^a, Н. К. Харчев^{a, d}, С. Е. Лысенко^a

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

^bМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

^cНИЯУ Московский инженерно-физический институт, Москва, 115409 Россия

^dИнститут общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

*E-mail: ammosov.yar@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 22.07.2022 г.

Принята к публикации 01.08.2022 г.

В омической плазме токамака T-10 измерены радиальные распределения колебаний электрического потенциала и плотности плазмы. По данным о колебаниях электрического потенциала плазмы построены радиальные распределения амплитуды и частоты геодезической акустической моды, по данным о колебаниях плотности плазмы — радиальные распределения амплитуды и частоты квазикогерентной моды. Квазикогерентной моде соответствует основная часть турбулентного потока частиц, геодезическая акустическая мода как высокочастотная ветвь зональных течений участвует в регуляции турбулентности, что делает эти объекты весьма важными для физики плазмы. В работе представлены результаты, полученные в различных режимах работы токамака T-10.

Ключевые слова: квазикогерентная мода, геодезическая акустическая мода, зональные течения, турбулентность плазмы, токамак T-10, зондирование плазмы пучком тяжелых ионов, электрический потенциал плазмы

DOI: 10.56304/S2079562922050049

ВВЕДЕНИЕ

В физике высокотемпературной плазмы одной из главных проблем является существенная разница между теоретически предсказываемыми и получаемыми в эксперименте потоками тепла и частиц из плазмы на стенку. Потоки, не описываемые физической теорией, называются аномальными. По современным представлениям аномальные потоки обусловлены наличием в плазме мелкомасштабной турбулентности.

На токамаке T-10 ($R = 1.5$ м, $a = 0.3$ м, $B_t \leq 2.5$ Тл, $I_{pl} \leq 300$ кА, $n_e \leq 6 \cdot 10^{19}$ м⁻³) было показано, что основная часть турбулентного потока частиц в омической стадии разряда связана с квазикогерентной модой (ККМ, $f \approx \Delta f$) [1]. Пик данной моды обычно приходится на частотный диапазон (50–150) кГц [2–4]. Впервые она была обнаружена с помощью корреляционной рефлектометрии на токамаке T-10 [5]. Изучение свойств ККМ позволит лучше понять природу турбулентного потока частиц.

Важную роль в процессах удержания играют зональные течения [6], которые рассматриваются как механизм саморегуляции турбулентности в плазме [7, 8]. Высокочастотной ветвью зональных течений является геодезическая акустическая мода (ГАМ) [9]. Было установлено, что ГАМ взаимодействует с широкополосной турбулентностью в широкой области ионно-дрейфовых частот (100–300 кГц) [10]. Так как ГАМ участвует в регуляции турбулентности, научное сообщество проявляет большой интерес к изучению свойств данной моды.

Одним из методов, позволяющих проводить комплексные исследования турбулентности и зональных течений в периферийной и горячей областях плазмы токамака является зондирование пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) [11]. ЗПТИ — единственный метод прямого измерения потенциала плазмы тороидальных магнитных установок в центральных областях плазмы. Помимо среднего значения потенциала диагностика позволяет одновре-

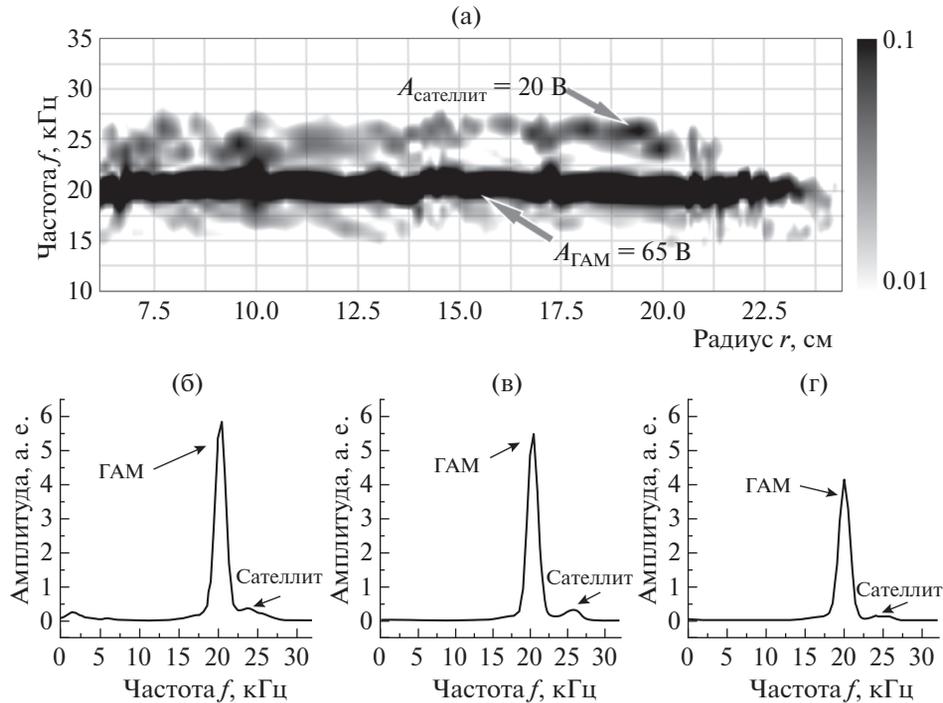


Рис. 1. (а) Радиальная спектрограмма колебаний электрического потенциала плазмы. Спектр колебаний потенциала плазмы в различных радиальных диапазонах: (б) $0.2 \leq r_{SV}/a \leq 0.4$; (в) $0.4 \leq r_{SV}/a \leq 0.6$; (г) $0.6 \leq r_{SV}/a \leq 0.8$. На рисунке отмечены GAM и ее спутник. Режим: $B_t = 1.7$ Тл, $I_{pl} = 200$ кА, $n_e = 1.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

менно и независимо измерять колебания электрического потенциала, плотности плазмы и полоидального магнитного поля [12–14].

Целью данной работы является измерение радиальных (в зависимости от радиуса сечения плазменного шнура) зависимостей интенсивности и частоты квазикогерентной моды и геодезической акустической моды в омической плазме токамака Т-10 с помощью диагностики зондирования пучком тяжелых ионов.

Были рассмотрены следующие режимы работы токамака Т-10:

1. $B_t = 1.7$ Тл, $I_{pl} = 200$ кА, $n_e = 1.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $0.2 \leq r_{SV}/a \leq 0.8$;

2. $B_t = 2.4$ Тл, $I_{pl} = 250$ кА, $n_e = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $0.7 \leq r_{SV}/a \leq 0.9$.

где B_t – тороидальное магнитное поле, I_{pl} – ток плазмы, n_e – среднечордовая электронная плотность, r_{SV}/a – отношение радиуса области измерения (sample volume, SV) к величине малого радиуса токамака, определяющее радиальный диапазон измерений.

Для режима 1 приведена радиальная спектрограмма [15] колебаний электрического потенциала плазмы (рис. 1), на которой выделены GAM и ее спутник. Для режимов 1 и 2 для различных ра-

диальных областей плазменного шнура показаны спектры колебаний электрического потенциала плазмы (рис. 1, 3), а также радиальные зависимости амплитуды и частоты GAM и ее спутника (рис. 2, 4). Для режима 2 приведены спектры колебаний плотности плазмы в различных радиальных областях плазменного шнура (рис. 5). На данных спектрах выделена квазикогерентная мода, для которой были построены радиальные зависимости амплитуды и частоты (рис. 6).

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЫ

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 1.7$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 200$ кА и плотностью $n_e = 1.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение геодезической акустической моды в широком радиальном диапазоне $0.2 \leq r_{SV}/a \leq 0.8$ для омической стадии плазменного разряда (рис. 1).

На рис. 2. отмечены GAM и ее спутник. Можно наблюдать геодезическую акустическую моду и ее спутник.

По данным спектрам были построены графики зависимости частоты и амплитуды колебаний геодезической акустической моды и ее спутника

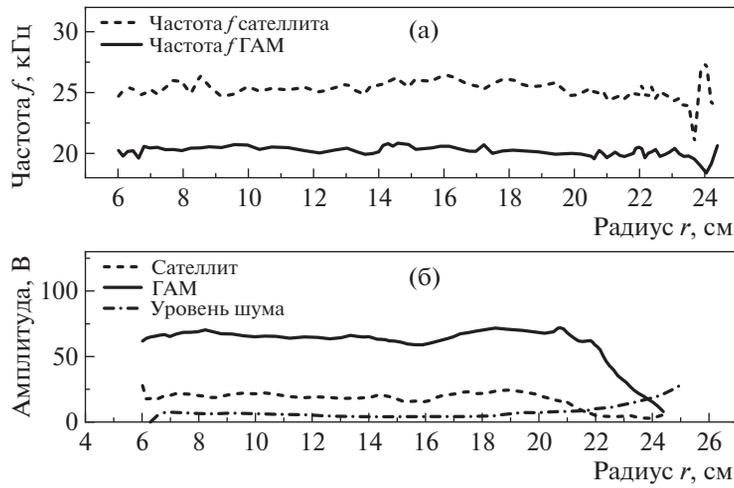


Рис. 2. Радиальные распределения ГАМ и спутника в режиме T-10 $B_t = 1.7$ Тл, $I_{pl} = 200$ кА, $n_e = 1.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$: (а) частоты; (б) амплитуды.

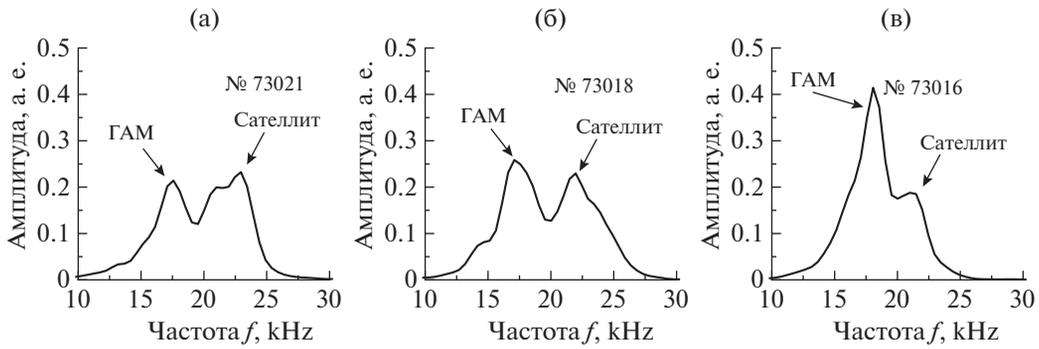


Рис. 3. Спектр колебаний потенциала плазмы в различных радиальных диапазонах: (а) $0.67 \leq r_{SV}/a \leq 0.72$; (б) $0.75 \leq r_{SV}/a \leq 0.80$; (в) $0.84 \leq r_{SV}/a \leq 0.90$. Режим: $B_t = 2.4$ Тл, $I_{pl} = 250$ кА, $n_e = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

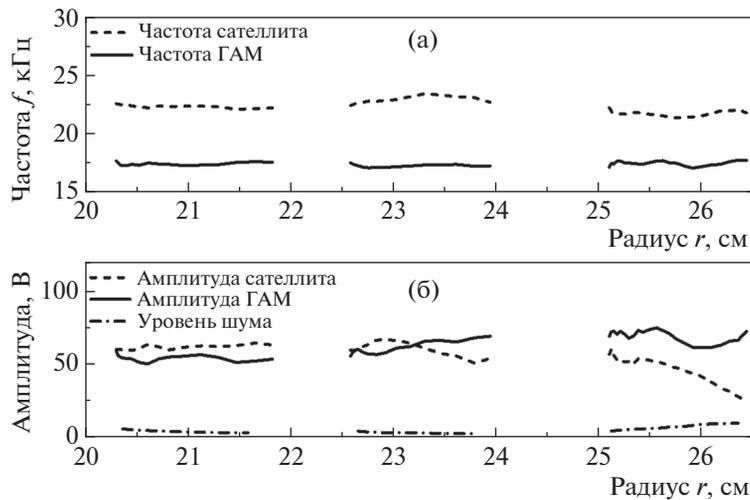


Рис. 4. Радиальные распределения ГАМ и спутника в режиме T-10 $B_t = 2.4$ Тл, $I_{pl} = 250$ кА, $n_e = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$: (а) частоты; (б) амплитуды.

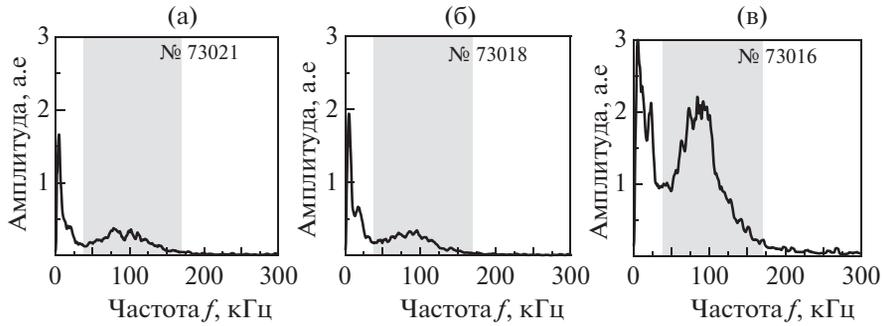


Рис. 5. Спектр колебаний плотности плазмы в различных радиальных диапазонах: (а) $0.68 \leq r_{SV}/a \leq 0.73$; (б) $0.75 \leq r_{SV}/a \leq 0.79$; (в) $0.84 \leq r_{SV}/a \leq 0.88$. Серым выделен частотный диапазон квазикогерентной моды. Режим: $B_t = 2.4$ Тл, $I_{pl} = 250$ кА, $n_e = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

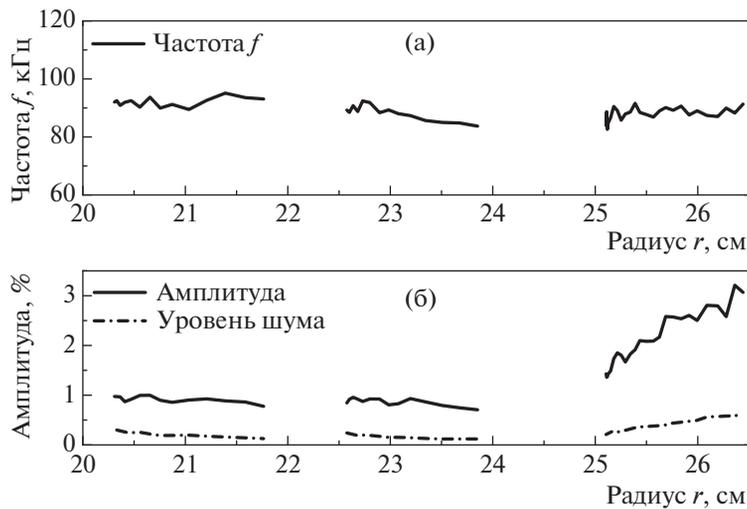


Рис. 6. Радиальные распределения ККМ в режиме Т-10 $B_t = 2.4$ Тл, $I_{pl} = 250$ кА, $n_e = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$: (а) частоты; (б) амплитуды.

(рис. 2). По полученным данным, можно установить, что частота ГАМ составляет $f_{\text{ГАМ}} \approx 20$ кГц, а амплитуда ее колебаний – $A_{\text{ГАМ}} \approx 65$ В. Частота спутника составляет $f_{\text{САТ}} \approx 25$ кГц, а его амплитуда – $A_{\text{САТ}} \approx 20$ В. В плазме Т-10 обычно наблюдается спутник со сравнимой с ГАМ амплитудой. В данном режиме амплитуда спутника в 3 раза меньше амплитуды ГАМ, подобный результат наблюдался в данном режиме при более низкой плотности плазмы $n_e = 1.0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [15].

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 2.4$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 250$ кА и плотностью $n_e = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ было построено радиальное распределение геодезической акустической моды в радиальном диапазоне $0.7 \leq r_{SV}/a \leq 0.9$ для омической стадии плазменного разряда.

На рис. 3 приведен спектр колебаний потенциала плазмы в различных радиальных диапазонах.

По данным спектров были построены графики зависимости частоты и амплитуды колебаний геодезической акустической моды и ее спутника (рис. 4). По полученным данным, можно установить, что частота ГАМ составляет $f_{\text{ГАМ}} \approx 17$ кГц, а амплитуда ее колебаний – $A_{\text{ГАМ}} \approx 62$ В. Частота спутника составляет $f_{\text{САТ}} \approx 22$ кГц, а его амплитуда – $A_{\text{САТ}} \approx 62$ В.

На основании полученных результатов можно сделать следующие заключения:

- ГАМ доминирует в спектре колебаний потенциала плазмы в плазме токамака Т-10;

- амплитуда ГАМ и ее сателлита постоянна на всем диапазоне измерений и убывает лишь на периферии плазмы;
- амплитуда сателлита ГАМ на периферии начинает убывать раньше, чем амплитуда ГАМ;
- частота ГАМ и ее сателлита постоянна по всему интервалу измерений;
- в режиме $B_t = 1.7$ Тл, $I_{pl} = 200$ кА, $n_e = 1.3 \cdot 10^{19}$ м⁻³ амплитуда сателлита значительно ниже амплитуды ГАМ.

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИКОГЕРЕНТНОЙ МОДЫ

Для режима с магнитным полем на оси $B_t = 2.4$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 250$ кА и плотностью $n_e = 2.7 \cdot 10^{19}$ м⁻³ было построено радиальное распределение квазикогерентной моды в радиальном диапазоне $0.7 \leq r_{SV}/a \leq 0.9$ для омической стадии плазменного разряда.

На рис. 5 приведены спектры колебаний плотности плазмы в различных радиальных диапазонах сечения плазменного шнура. В частотном диапазоне от 50 кГц доминирующим объектом на спектре является квазикогерентная мода.

По данным спектров были построены графики зависимости частоты и амплитуды колебаний квазикогерентной моды (рис. 6). По полученным данным, можно установить, что частота колебаний ККМ равна $f_{QCM} \approx 89$ кГц, а амплитуда колебаний варьируется от 0.7 до 3.2%.

На основании полученных результатов можно сделать следующие заключения:

- квазикогерентная мода имеет пик интенсивности на периферии плазмы (в радиальном диапазоне $0.8 \leq r_{SV}/a \leq 0.9$) и убывает ближе к ее центру;
- частота колебаний квазикогерентной моды остается постоянной на всем интервале измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы, на токамаке Т-10 с помощью диагностики зондирования плазмы пучком тяжелых ионов, измерены радиальные зависимости интенсивности и частоты квазикогерентной и геодезической акустической мод для двух режимов работы установки. Первый режим отличается относительно слабым магнитным полем на оси $B_t = 1.7$ Тл и низкой среднорядовой электронной плотностью плазмы $n_e = 1.3 \cdot 10^{19}$ м⁻³. Режим с магнитным полем на оси $B_t = 2.4$ Тл стандартный для установки, а плотность плазмы $n_e = 2.7 \cdot 10^{19}$ м⁻³

значительно выше. По полученным данным, установлены основные закономерности поведения геодезической акустической и квазикогерентной мод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Eliseev L.G. et al.* // Plasma Fusion Res. 2018. V. 13. P. 3402106. <https://doi.org/10.1585/PFR.13.3402106>
2. *Drabinskiy M.A. et al.* // J. Phys: Conf. Ser. 2019. V. 1383 (1). P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1383/1/012004>
3. *Arnichand H. et al.* // Nucl. Fusion. 2015. V. 55 (9). P. 093021. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/9/093021>
4. *Lee J.A. et al.* // Phys. Plasmas. 2018. V. 25 (2). P. 022513. <https://doi.org/10.1063/1.5008468>
5. *Vershkov V.A. et al.* // Nucl. Fusion. 1999. V. 39 (11Y). P. 1775–1783. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/39/11Y/318>
6. *Diamond P.H. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47 (5). P. R35.
7. *Fujisawa A. et al.* // Nucl. Fusion. 2007. V. 47 (10). P. 718–726. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/10/S19>
8. *Itoh K. et al.* // Phys. Plasmas. 2006. V. 13 (5). P. 055502. <https://doi.org/10.1063/1.2178779>
9. *Conway G.D. et al.* // Nucl. Fusion. 2022. V. 62 (1). P. 013001. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac0dd1>
10. *Melnikov A.V. et al.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. (11). P. 115001. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa796c>
11. *Melnikov A.V. et al.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57 (7). P. 072004. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5382>
12. *Crowley T.P. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61 (10). P. 2989. <https://doi.org/10.1063/1.1141757>
13. *Hamada Y. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36 (11). P. 1743–1761. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/36/11/004>
14. *Ido T. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70 (1). P. 955–958. <https://doi.org/10.1063/1.1149474>
15. *Melnikov A.V. et al.* // Plasma Fusion Res. 2018. V. 13. P. 3402109. <https://doi.org/10.1585/PFR.13.3402109>

Radial Distribution Measurements of Geodesic Acoustic Mode and Quasi-Coherent Mode Using Heavy Ion Beam Probe in T-10 Tokamak Ohmic Plasmas

Y. M. Ammosov^{1, 2, *}, F. O. Khabanov¹, M. A. Drabinskiy¹, A. V. Melnikov^{1, 3},
L. G. Eliseev¹, N. K. Kharchev^{1, 4}, and S. E. Lysenko¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (NRU), Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

⁴Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: ammosov.yar@mail.ru

Received July 20, 2022; revised July 22, 2022; accepted August 1, 2022

Abstract—Radial distributions of electric potential and plasma density oscillations have been measured in the T-10 tokamak ohmic plasma. Radial distributions of amplitude and frequency of the geodesic acoustic mode are plotted according to the data on the fluctuations of the electric potential of the plasma, and radial distributions of amplitude and frequency of the quasi-coherent mode are plotted according to the data on the fluctuations of the plasma density. Quasi-coherent mode corresponds to a major part of the turbulent flow of particles, geodesic acoustic mode as a high-frequency branch of zonal flows is involved in the regulation of turbulence, which makes these objects very important for plasma physics. The paper presents the results obtained in different operating modes of the T-10 tokamak.

Keywords: quasi-coherent mode, geodesic acoustic mode, zonal flows, plasma turbulence, T-10 tokamak, heavy ion beam probe, plasma electric potential