Письма в ЖЭТФ, том 115, вып. 6, с. 360 – 378

Исследование геодезических акустических и альвеновских колебаний в тороидальных термоядерных установках (Миниобзор)

А. В. Мельников[+*×1)], *В. А. Вершков*[+], *С. А. Грашин*[+], *М. А. Драбинский*[+], *Л. Г. Елисеев*[+], *И. А. Земцов*[+], *В. А. Крупин*[+], *В. П. Лахин*[+], *С. Е. Лысенко*[+], *А. Р. Немец*[+], *М. Р. Нургалиев*[+*], *Н. К. Харчев*[+°], *Ф. О. Хабанов*[+], *Д. А. Шелухин*[+]

[+]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

[*]*Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия*

[×]*Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия*

[°]*Институт общей физики им. А. Н. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 4 февраля 2022 г.
После переработки 4 февраля 2022 г.
Принята к публикации 8 февраля 2022 г.

Изучались геодезические акустические моды (GAM), альвеновские собственные моды (Alfvén Eigenmodes – AE), стационарная и осциллирующая компонента электрического поля и их взаимосвязи с удержанием плазмы. Проверялись теоретические концепции взаимодействия GAM с другими типами плазменной турбулентности. Также рассмотрены сопутствующие вопросы: влияние методов нагрева на удержание и турбулентность плазмы, свойства примесей и пристеночного слоя плазмы. Описаны ключевые диагностики: зондирование пучком тяжелых ионов (HIBP), корреляционная рефлектометрия (CR) и многоцелевой комплекс оптических диагностик. Основные эксперименты проведены на токамаке Т-10, имеющем мощную систему электронно-циклотронного нагрева (ECRH). Поддерживающие эксперименты были проведены на стеллараторе TJ-II в Испании, токамаке COMPASS в Чехии и токамаке STOR-M в Канаде. Результаты экспериментов сопоставлены с аналитическими и численными расчетами.

DOI: 10.31857/S1234567822060040

Введение. Взаимосвязи между удержанием плазмы, турбулентностью и электрическим полем в замкнутых магнитных термоядерных установках – токамаках и стеллараторах активно изучаются мировым термоядерным сообществом. Гирокинетические расчеты предсказывают существование сложных нелинейных связей между зональными потоками (их высокочастотной ветвью – GAM), электрическим полем, турбулентностью, вращением плазмы, переходами между режимами удержания и эффектами самоорганизации профилей макроскопических параметров плазмы. Экспериментальная проверка этих предсказаний чрезвычайно важна для понимания механизмов удержания плазмы.

Альвеновские собственные моды (AE), возбуждаемые быстрыми частицами, представляют опасность для будущего реактора, например, ITER, так как они могут формировать мощный дополнительный канал потерь термоядерных альфа-частиц на стенку реактора. С другой стороны, теория предсказывает, что AE могут также играть стабилизирующую роль за счет возбуждения зональных течений, приводящих к стабилизации турбулентности [1]. В действующих термоядерных установках AE возбуждаются за счет быстрых (надтепловых) ионов, возникающих при нагреве инжекцией нейтрального пучка (NBI), или быстрых электронов, возникающие при электронно-циклотронном нагреве (ECRH). AE существуют как в виде мод с квазипостоянной частотой, так и в виде последовательности вспышек с быстропеременной частотой – чирпированных мод. Дисперсионное соотношение для AE, учитывающее эффекты давления, указывает на взаимосвязь между AE и GAM: частота GAM является нижним пределом для частот AE [2, 3], что определяет единство исследования широкого спектра плазменных колебаний в диапазоне 10–500 кГц [4].

К главной задаче проекта – исследованию свойств GAM и альвеновских мод в их взаимосвязи со свойствами турбулентности и переноса частиц и энергии

1)e-mail: melnikov_AV@nrcki.ru

Таблица 1. Параметры экспериментальных установок

Название, страна	R, м	a, м	B_t, Тл	I_P, кА	n_e, 10^{19} м$^{-3}$	$T_e(0)$, кэВ	$T_i(0)$, кэВ	$E_{\rm HIBP}$, кэВ	Нагрев, мощность, МВт
Т-10 РФ	1.5	0.3	2.1–2.5	300	1–4	1–3	0.7	300 (Tl^+)	OH/EC 0.3/2.0
TJ-II Испания	1.5	0.22	1.0	< 8	0.3–6	1	0.12	130 (Cs^+)	EC/NBI 0.6/1.0
COMPASS Чехия	0.56	0.22	2.1	400	2–8	< 0.8	< 0.6	–	OH/NBI 0.2/0.6
STOR-M Канада	0.46	0.12	0.65	20	3.2	< 0.2	–	–	OH 0.1

в термоядерной плазме, естественно примыкают исследования влияния методов нагрева на удержание и турбулентность, свойств пристеночной плазмы и примесей, взаимодействия плазмы со стенкой и лимитерами из различных материалов с покрытиями, планируемыми для использования в ITER.

Основные эксперименты проведены на Т-10, крупнейшем в России действующем токамаке, работавшем с 1975 по 2018 г. Т-10 оснащен уникальным гиротронным комплексом для нагрева и генерации тока на второй гармонике электронно-циклотронного резонанса (ECRH/ECCD), а также уникальным комплексом диагностик для исследования электрических полей и турбулентности плазмы. Вспомогательные эксперименты по исследованию AE и GAM проводились на установках, оснащенных NBI нагревом: на стеллараторе TJ-II (Испания) и токамаке COMPASS (Чехия), GAM были также исследованы на омическом токамаке STOR-M (Канада).

Условия экспериментов. Т-10 – круглый токамак с лимитером, большой радиус $R = 1.5$ м, малый радиус $a = 0.3$ м, тороидальное поле $B_t = 1.7{-}2.4$ Тл, ток плазмы $I_p \leq 300$ kA, длительность разряда ≤ 1 с, среднехордовая плотность $\bar{n}_e \leq 5 \times 10^{19}$ м$^{-3}$, центральная электронная температура в омическом разряде $T_e(0) \leq 1.2$ кэВ. Мощность дополнительного нагрева (ECRH) на второй гармонике $P_{EC} \leq 2$ МВт.

COMPASS имеет ITERо-подобную конфигурацию плазмы в масштабе 1:10, инжекционный нагрев мощностью $P_{NBI} \leq 0.7$ МВт, энергия пучка $E_{NB} = 40$ кэВ.

STOR-M – небольшой токамак, ориентированный на исследования турбулентности.

TJ-II – четырехпериодный стелларатор с низким магнитным широм, его вращательное преобразование $\iota\!\!\!- = 1/q$ меняется от $\iota\!\!\!-(0) = 1.55$ до $\iota\!\!\!-(a) = 1.65$. Водородная плазма создается и нагревается гиротронами мощностью $P_{EC} =\leq 0.6$ МВт или инжекцией атомов водорода $P_{NBI} \leq 1$ МВт, $E_{NBI} = 32$ кэВ, со скоростью $V_{NBI} \sim 2.5 \times 10^6$ м/с субальвеновского диапазона $V_{NBI} \geq V_A/3$, где V_A – альвеновская скорость:

$$V_A = \frac{B_t}{\sqrt{\mu_0 \sum\limits_i n_i m_i}}, \tag{1}$$

где n_i и m_i – плотность и масса ионов. Параметры установок, на которых проводились исследования, приведены в табл. 1.

Развитие диагностик. Для детальных исследований свойств GAM и турбулентности был развит и модернизирован диагностический комплекс токамака Т-10, рис. 1, 2.

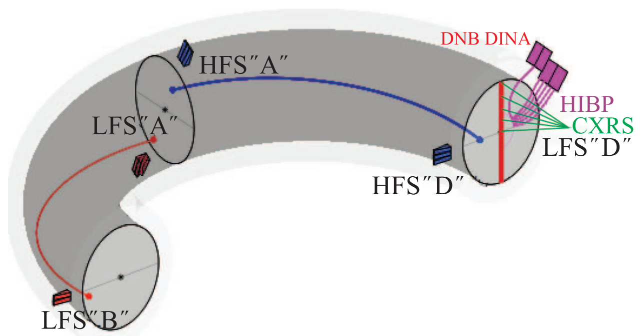

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема эксперимента и размещение корреляционной рефлектометрии (CR), тяжелого пучка (HIBP) и CXRS-диагностики; A, B, D – диагностические сечения Т-10. Красной и синей линией показано распространение флуктуаций вдоль магнитных силовых линий, соединяющих точки наблюдения CR на HFS – стороне сильного поля и LFS – стороне слабого поля [6]

Корреляционная рефлектометрия (CR) [5] была оснащена антенной системой с набором рупоров, установленных на различных полоидальных углах в

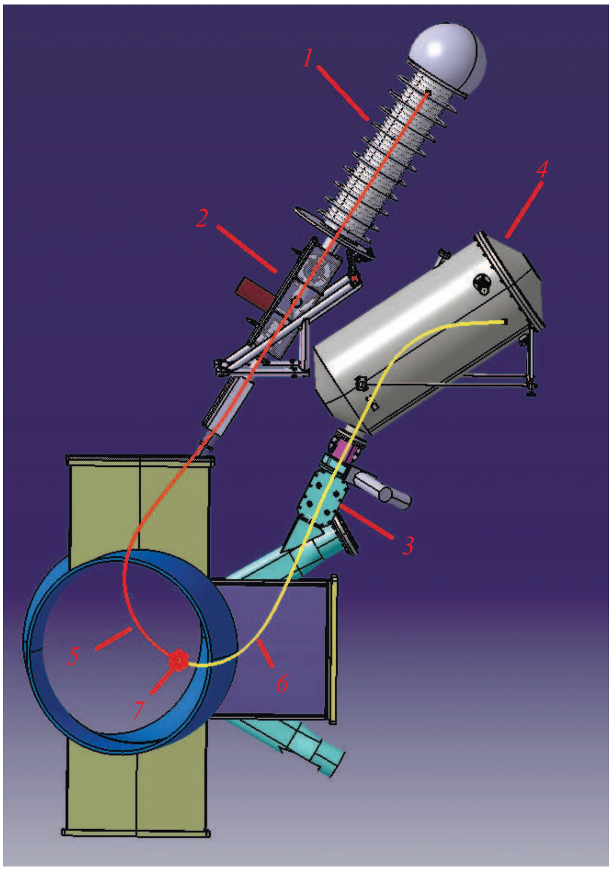

Рис. 2. (Цветной онлайн) HIBP диагностика на Т-10, сечение D. *1* – ускоритель; *2* – первичный ионопровод; *3* – вторичный ионопровод; *4* – анализатор; *5* – траектория первичного пучка (Tl^+); *6* – траектория вторичного пучка (Tl^{++}); *7* – измерительный объем (SV) [7]

трех сечениях по тору, что позволило найти полоидальную зависимость радиальной корреляционной длины различных типов флуктуаций. Дальние корреляции вдоль силовых линий измерялись рефлектометрами в двух поперечных сечениях, сдвинутых на 1/4 тора. Рефлектометры имели одинаковую частоту зондирования обыкновенной волной, что обеспечивало отражение от одной и той же магнитной поверхности. Измерения CR проводились на стороне слабого (LFS) и сильного поля (HFS), включая контрольные опыты с переворотом направления тороидального поля и тока разряда, рис. 1.

Зондирование пучком тяжелых ионов, или Heavy Ion Beam Probe (HIBP) [7, 8], после модернизации [9–15] позволило одновременно измерить флуктуации потенциала и плотности плазмы с частотой до 250 кГц в пяти точках измерений (Sample Volume, SV) с помощью 5-щелевого анализатора энергии в горячей зоне плазмы ($0.08\,\text{м} < r < 0.3\,\text{м}$) [16]. Для исследования полоидальных корреляций и вращения турбулентности была использована информация из полоидально сдвинутых (от 5 до 25 мм) точек измерений [17]. HIBP расположен в диагностическом сечении D, его точки измерений находятся на стороне слабого поля. Здесь же были расположены и рупора корреляционного рефлектометра (CR), зондирующего плазму со стороны сильного поля.

Комплекс спектроскопических диагностик. Для измерений профилей ионной температуры $T_i(r)$ и плотности $n_z(r)$ ядер легких примесей Li, C, N, O использовалась перезарядочно-рекомбинационная спектроскопия (CXRS) на основе инжектора нейтрального пучка водорода DINA-6 с энергией атомов 30 кэВ, имеющая 9 пространственных каналов [18–20]. Эффективный заряд плазмы $Z_{\text{eff}}(r)$ определялся по профилям тормозного излучения в видимой области спектра [21–23].

Профили электронной плотности $n_e(r)$ измерялись 16-канальным интерферометром; электронной температуры $T_e(r)$ – 24-канальной диагностикой электронно-циклотронного излучения (ECE) плазмы, абсолютные значения центральной электронной температуры $T_e(0)$ – по спектру мягкого рентгеновского излучения (SXR), излучение плазмы – болометрами и AXUV-детекторами, параметры пристеночной плазмы – с помощью зондов Ленгмюра [24]. Разработанные диагностики послужили прототипами для диагностического комплекса установки Т-15МД [25].

Исследования GAM и турбулентности.

Свойства и структура турбулентности. Теоретический анализ показывает, что турбулентность замагниченной плазмы имеет сложную радиальную и частотную структуру [26], требующую детальных измерений в широком частотном диапазоне. На Т-10 наблюдалось шесть типов колебаний, различающихся частотной и пространственной структурой: GAM, МГД тиринг-моды, стохастические низкочастотные (Stochastic Low-Frequency, SLF), низкочастотные квазикогерентные (Low-Frequency Quasi-Coherent, LFQC) (рис. 3), а также широкополосные (Broad-Band, BB), и высокочастотные квазикогерентные (High-Frequency Quasi-Coherent, HFQC) моды [27]. Измеренные величины k и ρ_i (k – волновой вектор, ρ_i – ларморовский радиус ионов) и радиальные положения для LFQC и HFQC мод соответствуют теоретическим оценкам для неустойчивостей на градиенте ионной температуры (ITG) и на запертых электронах (TEM) [28]. Моды SLF и LFQC являются одиночными всплесками с полоидальными длинами волн λ, сравнимыми с длинами корреляции λ_{cor} ($\lambda_{\text{cor SLF}} \sim 4\,\text{см}$, $\lambda_{\text{cor LFQC}} \sim 5\,\text{см}$, $\lambda_{\text{SLF}} < 20\,\text{см}$,

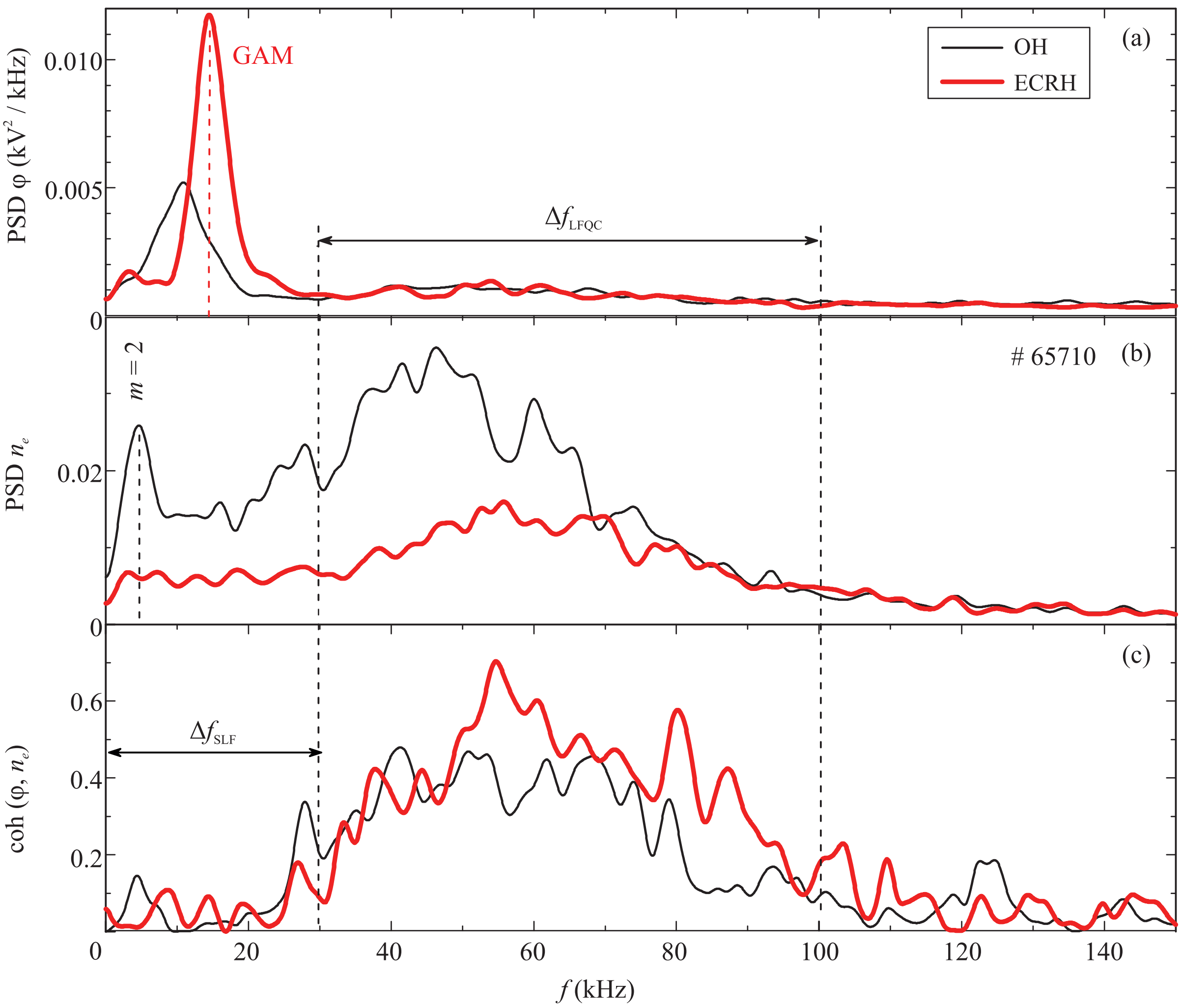

Рис. 3. (Цветной онлайн) Удельная спектральная плотность мощности (Power Spectral Density, PSD) колебаний потенциала φ (a) и плотности плазмы n_e (b), и их когерентность (c) в плазме с омическим (OH) и электронно-циклотронным (ECH) нагревом. При ECRH пик GAM усиливается, но квазикогерентная мода (LFQC) ослабляется [30]. Также показана МГД мода $m = 2$ и стохастическая низкочастотная мода (SLF)

$\lambda_{\mathrm{LFQC}} < 7$ см), и сильно различаются по частотам ($f_{\mathrm{SLF}} \sim 1{-}20$ кГц, $f_{\mathrm{LFQC}} \sim 50{-}120$ кГц) [29].

Биспектральный анализ спектров колебаний потенциала, плотности и магнитного потенциала показал, что GAM связаны с SLF, LFQC и HFQC механизмом трехволнового взаимодействия, рис. 4 [30, 31]. Показано, что наиболее выраженную связь демонстрируют флуктуации плотности, а не потенциала [32, 33].

Скорость полоидального вращения турбулентности V_{turb} оценивалась по наклону двумерного спектра флуктуаций плотности $S(k, f)$, измеренных многоканальным энергетическим анализатором HIBP, рис. 5. Показано, что LFQC всегда вращается в направлении электронного диамагнитного дрейфа (EDD), в то время как SLF также может вращаться в направлении ионного диамагнитного дрейфа (IDD) [6]. В омической фазе разряда Т-10 типичное значение $V_{\mathrm{turb}} = 5.0 \pm 0.5$ км/с согласуется со скоростью $E \times B$ дрейфа, определенной по радиальному электрическому полю $E_r = 100$ В/см, $V_{E\times B} = 4.6 \pm 0.5$ км/с [34].

Прямые измерения турбулентного потока частиц, сделанные с помощью HIBP, показали, что основной вклад в поток дают LFQC, а GAM, как крутильные колебания, напротив, не дают вклада в радиальный поток [35–37].

На стеллараторе TJ-II структура турбулентности исследовалась с помощью диагностики HIBP [38, 39]. Установлено, что уровень широкополосной электростатической турбулентности неоднороден по радиусу и зависит от типа (ECRH, NBI) и мощности нагрева

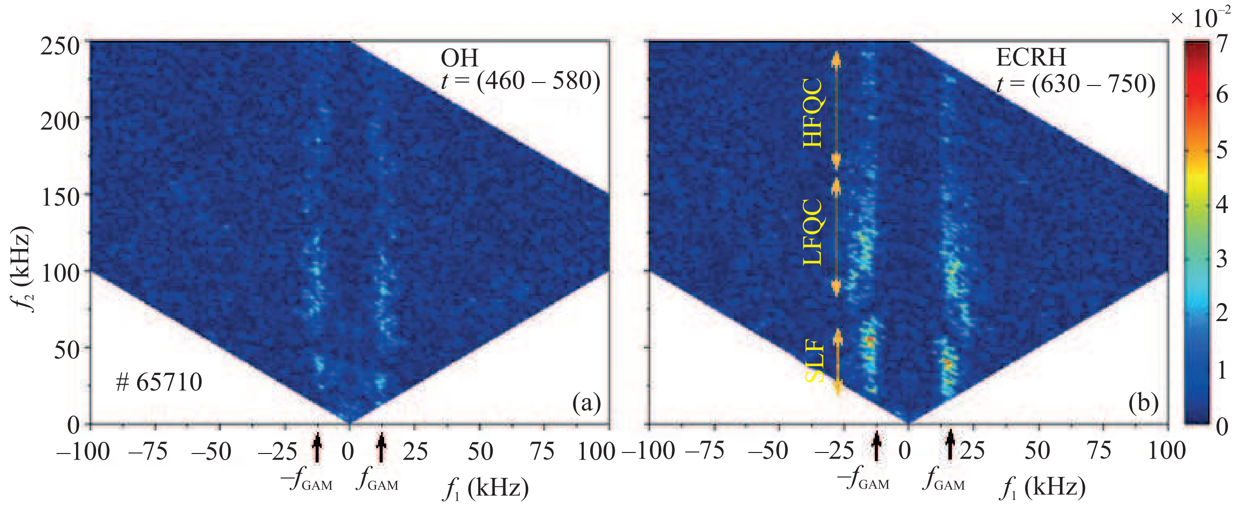

Рис. 4. (Цветной онлайн) Кросс-бикогерентности колебаний потенциала и плотности $b^2_{\varphi,n,n}$ в OH (a) и ECRH (b) плазме, $\rho_{\text{HIBP}} = 0.9$ [30]. Показаны характерные пики и области частот f_{GAM}, SLF, LFQC и HFQC

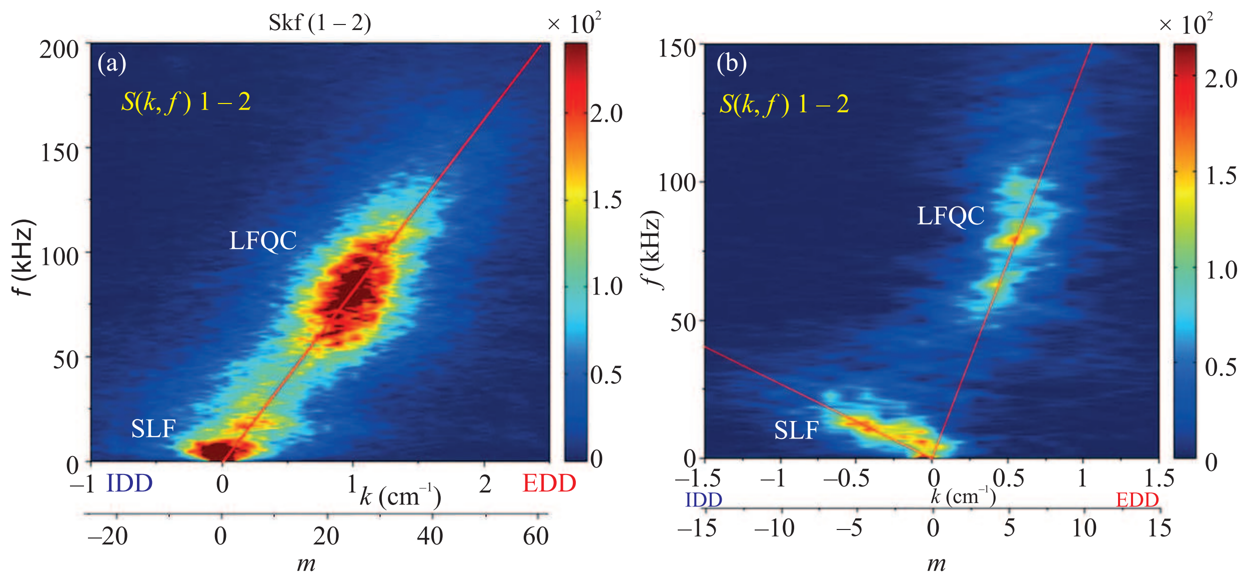

Рис. 5. (Цветной онлайн) (a) – Двумерный спектр мощности флуктуаций плотности $S(k, f)$, определенный по соседним SV 1 и 2 многощелевого анализатора, характеризующий полоидальное вращение в сторону электронного диамагнитного дрейфа (EDD) для стохастических низкочастотных (SLF) и низкочастотных квазикогерентных (LFQC) мод; средняя плотность $\bar{n}_e = 3 \times 10^{19}$ м$^{-3}$, $r_{\text{SV}} = 0.25$ м; (b) – пример полоидального вращения SLF мод в сторону ионного диамагнитного дрейфа (IDD), $\bar{n}_e = 1 \times 10^{19}$ м$^{-3}$. Полоидальный номер моды m вычисляется как $m = k \cdot r_{\text{SV}}/\lambda$, где $r_{\text{SV}} = 0.1$ м, λ – длина волны [34]

[40]. В частотном диапазоне GAM обнаружены квазимонохроматические электростатические моды, локализованные в центральной части шнура [41, 42].

Исследование свойств GAM. Впервые GAM были предложены в 1968 г. в теоретической работе [43] для интерпретации колебаний потенциала периферийной плазмы стелларатора. Особенность GAM как полоидальных крутильных колебаний плазмы делает ее экспериментальное обнаружение и исследование трудной диагностической задачей, которая была впервые решена только в 2003 г. одновременно на токамаках TEXT [44], DIII-D [45] и T-10 [46]. Поскольку GAM рассматриваются как возможный механизм саморегуляции широкополосной турбулентности [47], превращающий радиальный поток на стенку в крутильные колебания, исследования GAM стали чрезвычайно актуальными [48–51].

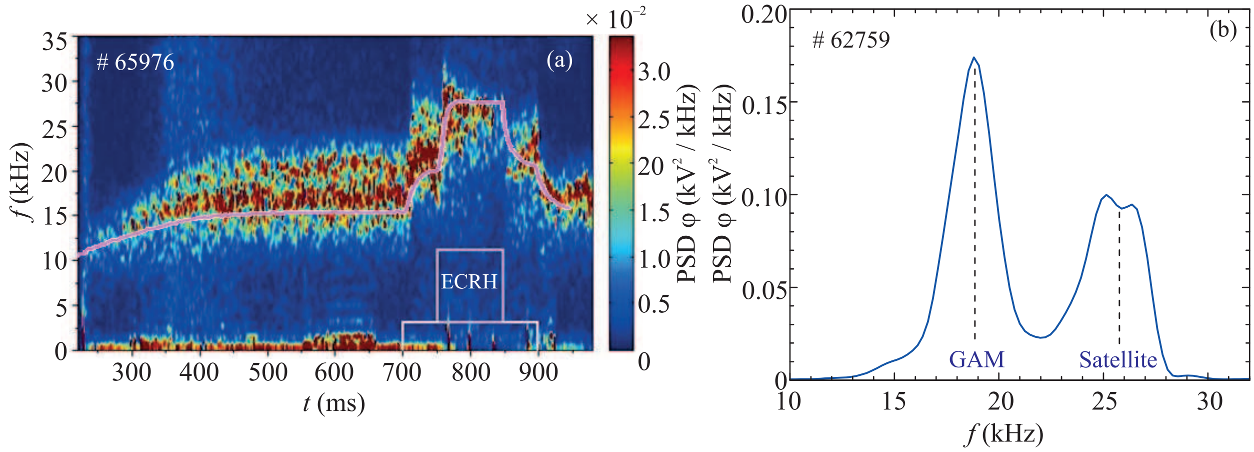

Рис. 6. (Цветной онлайн) (a) – Спектрограмма мощности колебаний потенциала на при ECR-нагреве на токамаке Т-10, $r_{\text{HIBP}} = 0.24$ м. Сплошная линия $\sim\sqrt{T_e}$, измеренной по 2ω ECE на $r = 0.18$ м [7]. Видна перемежаемая структура GAM. (b) – Типичный спектр мощности колебаний потенциала плазмы в омическом режиме показывает наличие высокочастотного сателлита GAM [52]

Свойства и радиальная структура GAM. В двухжидкостном приближении частота GAM описывается локальным дисперсионным соотношением [51]:

$$f_{\text{GAM}}^{ei} = \frac{1}{\sqrt{2m_i}\pi R}\sqrt{T_e + 7/4T_i}. \tag{2}$$

Рисунок 6 показывает, что на Т-10 частота GAM увеличивается с ростом температуры при ECRH [7]. Наилучшее согласие абсолютного значения частоты GAM с экспериментом достигается, когда значения температур в (2) берутся вблизи периферии ($\rho \sim 0.9$). Помимо основного пика, GAM имеет высокочастотный сателлит, частота которого также эволюционирует с температурой.

С помощью сканирования по углу инжекции и энергии пучка HIBP получены радиальные распределения амплитуды GAM [53]. Рисунок 7 показывает, что GAM на Т-10 имеет однородную радиальную структуру во всей области наблюдений ($0.3 < r/a < 1$), т.е. является глобальной собственной модой плазменных колебаний. Рисунок 8 показывает, что корневая зависимость частоты от температуры (2) справедлива для широкого интервала T_e, включая режимы с омическим и ECR-нагревом [54], а также сценарии с импульсной инжекцией примесей благородных газов [55, 56]. Установлено, что частота GAM следует теоретической корневой зависимости от температуры в широком диапазоне параметров плазмы [57].

В квазистационарных режимах амплитуда GAM падает с ростом средней плотности и растет с током плазмы, рис. 9, что согласуется с механизмом продольного столкновительного затухания на запертых

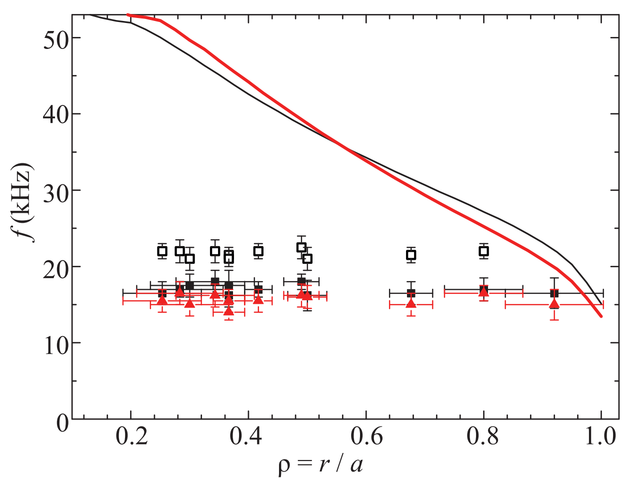

Рис. 7. (Цветной онлайн) Однородная пространственная структура частоты GAM на Т-10 при $B_t = 1.7$ Тл. Сплошные линии – расчет по локальной теории (2); □ – сателлит; ■ и ▲ – основной пик GAM; черные линии и точки – $\bar{n}_e = 1.3 \times 10^{19}$; красные линии и точки – $\bar{n}_e = 2.1 \times 10^{19}$ м$^{-3}$ [53]

электронах [58]. Действительно, решение самосогласованной системы уравнений для двухжидкостной дрейфовой турбулентности дает зависимость амплитуды колебаний на частоте GAM для электрического потенциала A_{GAM} от плотности n:

$$A_{\text{GAM}} \sim 1/n \times (1 - n/n_{\text{cr}})^{1/2}, \tag{3}$$

справедливой для $n < n_{\text{cr}}$, т.е. до максимальной плотности, при которой существует GAM. Полученное совпадение A_{GAM}, измеренной на Т-10 с помощью HIBP и рассчитанной по (3), указывает на

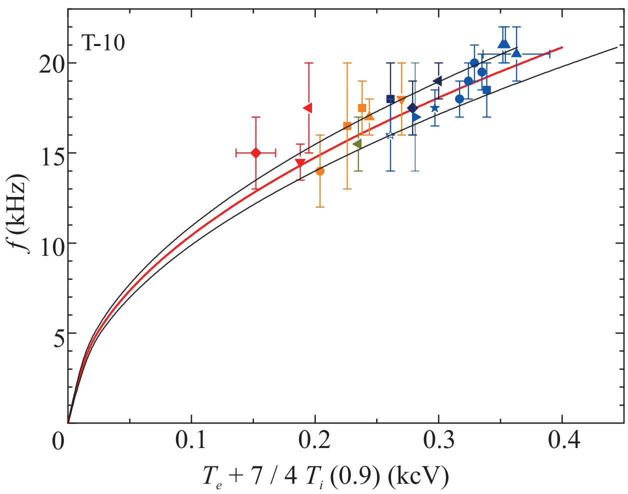

Рис. 8. (Цветной онлайн) Корневая зависимость частоты GAM от температуры на радиусе $\rho = 0.9$ в диапазоне токов $I_p = 170{-}300$ кА, полей $B_t = 1.6{-}2.4$ Тл, плотностей $\bar{n}_e = (1.5{-}6)\times 10^{19}\,\text{м}^{-3}$. Тонкие черные линии соответствуют вариации температуры T_e на 10 %, и T_i на 15 % [54]

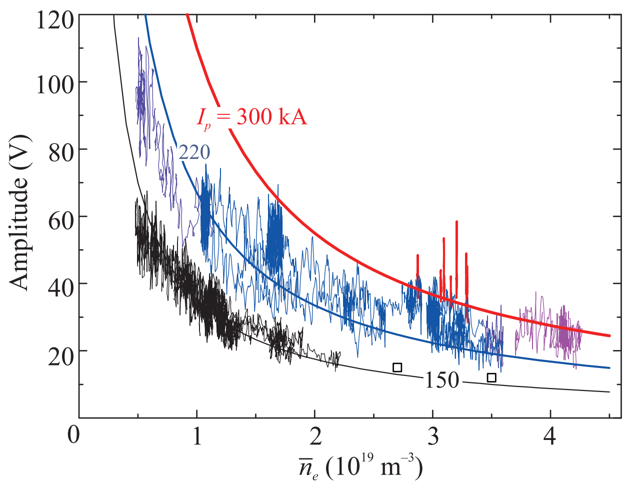

Рис. 9. (Цветной онлайн) Амплитуда GAM на потенциале в разрядах с различной плотностью и током (цифры у кривых): тонкие линии – эксперимент, красные и синие – при $B_t = 2.3{-}2.4$ Тл, черные – при $B_t = 1.6$ Тл, □ – при $B_t = 2.3$ Тл; толстые линии – оценка (3) [58]

столкновительный характер затухания GAM, порождаемой широкополосной турбулентностью, по модели взаимодействия "хищник-жертва". В нестационарных режимах с импульсным напуском благородных газов частота GAM следует (2), а амплитуда – столкновительному затуханию [59–61].

Обнаружены дальние радиальные корреляции между колебаниями потенциала, измеренными HIBP на $r = 18$ см, и ленгмюровским зондом (LP) на $r = 28.8$ см. На частоте GAM (17 кГц) обнаружена высокая когерентность (> 0.5) и кросс-фаза $\sim\pi$ между колебаниями плотности (CR) и потенциала (HIBP), измеренными в точках, сдвинутых на 1/4 тора, рис. 10 [62–64].

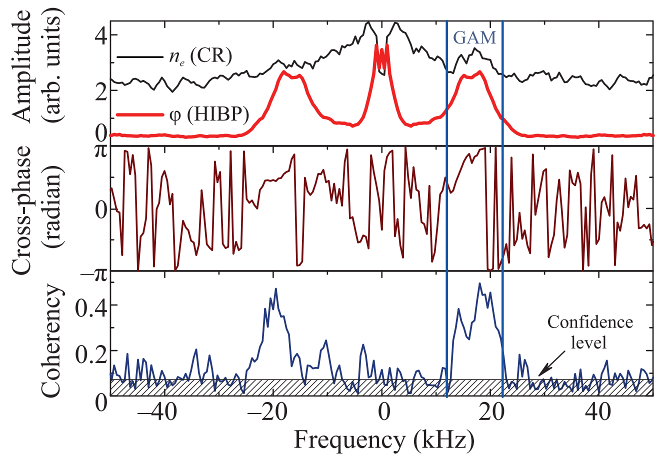

Рис. 10. (Цветной онлайн) Дальние пространственные корреляции потенциал-плотность, измеренные HIBP и рефлектометром (CR) [64, 67]

На стеллараторе TJ-II с помощью диагностики HIBP были обнаружены низкочастотные зональные течения [65] и электростатические моды с признаками GAM [66].

На токамаке COMPASS с помощью прыгающего зонда был измерен радиальный профиль возмущения потенциала плазмы на частоте GAM в диапазоне $0.85 < r/a < 1.05$. В области измерений частота GAM постоянна (34 ± 5 кГц), что существенно отличает ее от предсказаний локального дисперсионного соотношения, рис. 11a [68]. На токамаке STOR-M с помощью подвижного зонда были проведены измерения в радиальном диапазоне $0.88 < r/a < 0.97$, рис. 11b. Показано, что в области измерений частота GAM постоянна (33 ± 2 кГц), хотя электронная температура существенно меняется [69]. Таким образом, глобальный характер GAM, обнаруженный на Т-10, получил дополнительные подтверждения в экспериментах как на D-образном токамаке COMPASS, так и на малом круглом токамаке STOR-M. Также отметим, что на STOR-M обнаружен сателлитный пик GAM, а на COMPASS – трехволновое взаимодействие GAM [68] с широкополосной турбулентностью [69].

На трех рассмотренных установках GAM демонстрирует свойства глобальной моды, что отличается от наблюдений GAM на установках DIII-D, AUG и ФТ-2, где GAM наблюдается только на периферии плазмы, причем на TEXT [70] и ФТ-2 [71] обнару-

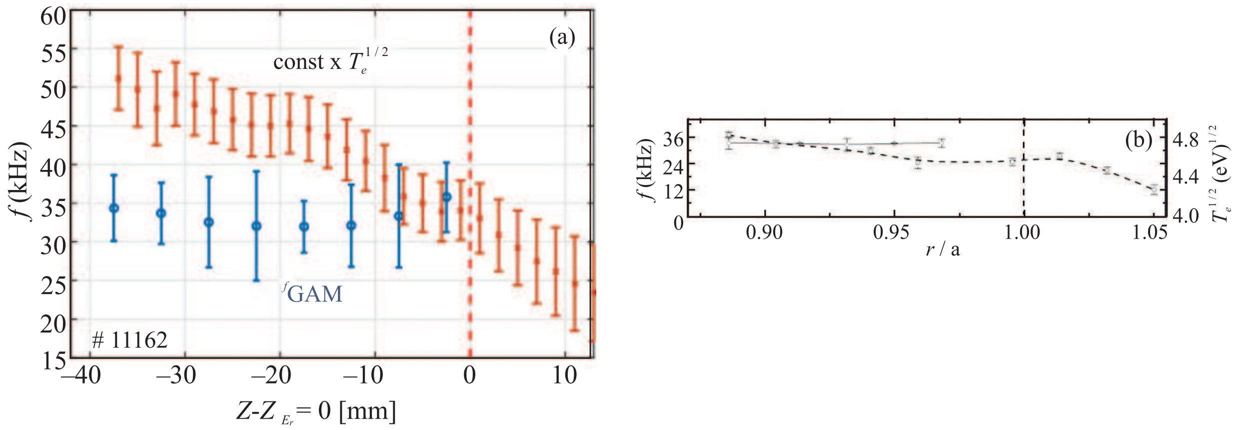

Рис. 11. (Цветной онлайн) Пространственная структура частоты GAM и ее оценка согласно локальному дисперсионному соотношению (2): (a) – на токамаке COMPASS, # 11162, $I_p = 200$ кА, $\bar{n}_e = 8 \times 10^{19}$ м$^{-3}$, $q_{95} = 3.9$ [68]; (b) – на токамаке STOR-M [69]

жен рост частоты GAM к центру в согласии с радиальной зависимостью температуры в (2). На установке TCV было показано, что GAM может быть как глобальной, так и периферийно-локализованной модой, в зависимости от $q(a)$. Наблюдения на Т-10 в широком диапазоне параметров плазмы, а также на COMPASS и STOR-M, показывают, что критерий глобальности GAM, предложенный на TCV ($q(a) < 5$ [72]), неприменим, а феномен GAM как глобальной моды требует теоретического объяснения.

Редуцированные уравнения двухжидкостной гидродинамики Брагинского были модифицированы так, чтобы учесть влияние переменного внешнего электрического поля, локализованного в пристеночном слое токамака. Показано, что электрическое поле, осциллирующее на частоте GAM, при достижении определенной амплитуды способно подавлять турбулентный перенос [73]. Это теоретическое предсказание впоследствии было подтверждено в экспериментах на токамаке STOR-M [74]. Таким образом, делаются первые шаги от наблюдения к активному управлению GAM и турбулентностью.

Взаимодействие GAM и МГД колебаний. На Т-10 в узком диапазоне плотностей и токов ($q(a) \sim 3$) были получены разряды со спонтанными резонансными низкочастотными (1–5 кГц) крупномасштабными МГД тиринг-колебаниями (КТ-модами) с $m < 3$, высоким уровнем флуктуаций плотности (1–4 %), и полоидального поля 7×10^{-4} Тл. Развитие КТ-моды сильно меняет свойства плазмы в разряде, включая характеристики турбулентности, в результате чего ухудшается удержание, уменьшается абсолютная величина отрицательного потенциала плазмы и подавляется GAM [75]. С ростом амплитуды КТ-моды ее вращение становится неравномерным, скорость вращения циклически меняется в согласии с расчетом [76].

Был обнаружен новый режим, в котором плавный рост КТ-моды $m = 2$ сопровождался плавным затуханием GAM и ее сателлита и ростом потенциала плазмы, рис. 12.

На установке STOR-M было показано, что принудительная генерация низкочастотных резонансных магнитных возмущений также может подавить GAM [69].

Теоретический анализ GAM. Кинетическое рассмотрение GAM [77] показало, что первая и вторая гармоники ионно-звуковой моды могут быть связаны между собой за счет геодезического и дрейфового эффектов. Эта связь может возбуждать дрейфовую геодезическую ионно-звуковую собственную моду, которая приводит к расщеплению GAM колебаний потенциала на основной и сателлитный частотные пики, наблюдаемые на Т-10, см. рис. 6b, и на STOR-M.

С помощью полной системы электромагнитных дрейфовых кинетических уравнений для электронов и ионов выведено общее дисперсионное соотношение для геодезических акустических мод, учитывающее электромагнитные эффекты [78]. Показано, что гармоника GAM на плотности с $m = 1$ имеет конечную электромагнитную компоненту. Таким образом, теоретически показана возможность существования магнитной компоненты GAM, которая ранее считалась чисто электростатической модой, в то время как ее магнитная компонента наблюдалась в экспериментах на Т-10 [48], COMPASS [68] и других установках. Также показана принципиальная возможность суще-

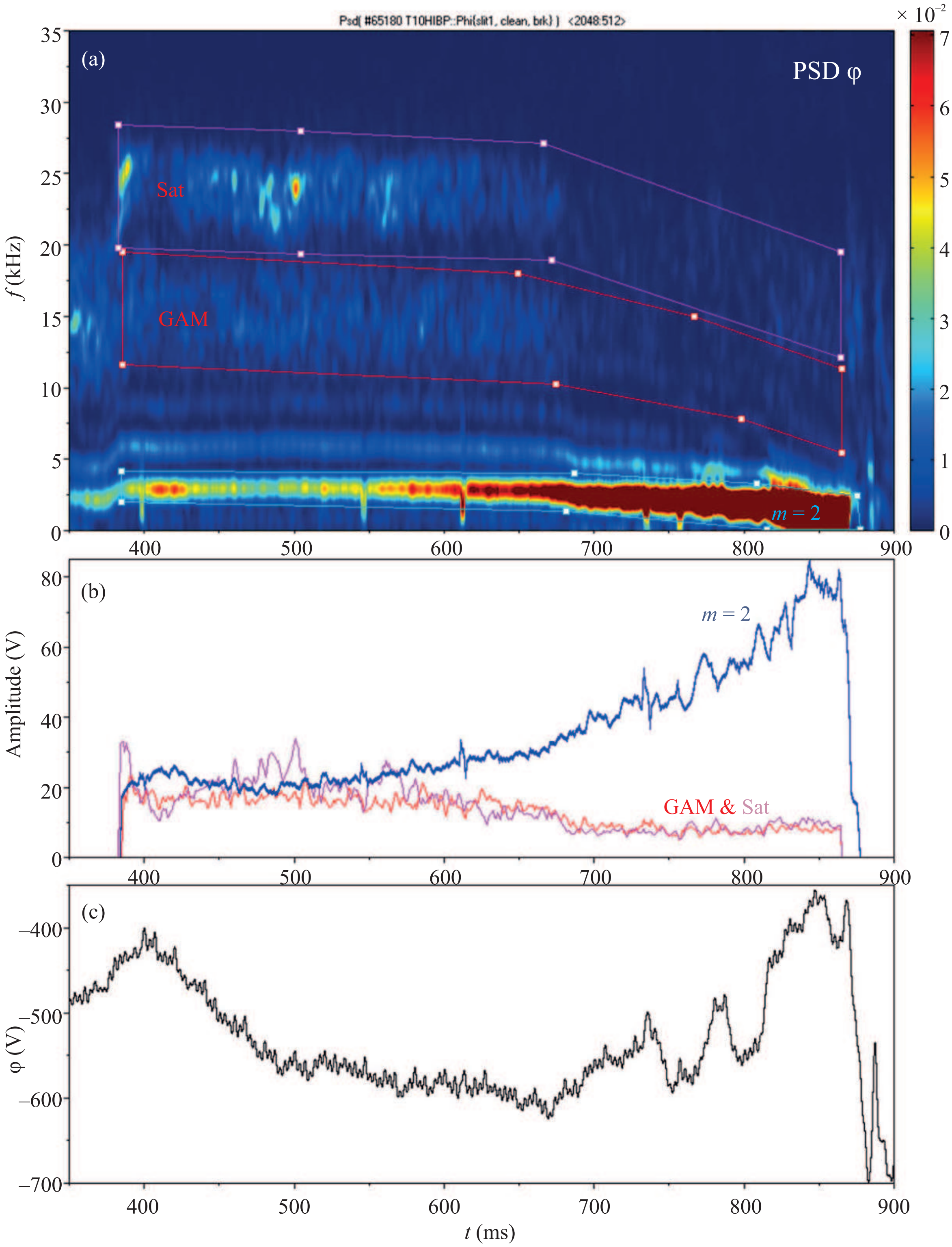

Рис. 12. (Цветной онлайн) (a) – Спектрограмма колебаний потенциала плазмы, полученная HIBP, показывает сосуществование МГД КТ-моды $m = 2$ (3 кГц), ее второй гармоники (6 кГц), GAM (15 кГц) и ее сателлита (25 кГц); (b) – согласованное изменение амплитуд: GAM и сателлита уменьшается, КТ-моды растет; (c) – изменение потенциала плазмы

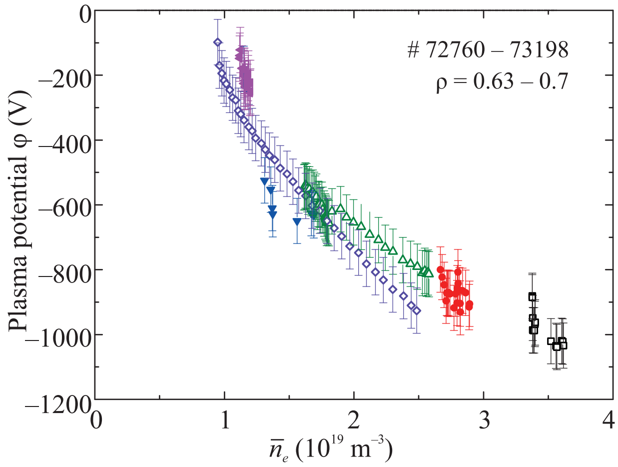

Рис. 13. (Цветной онлайн) Зависимость потенциала, измеренного на Т-10 на средних радиусах ($\rho = 0.63{-}0.7$) от среднехордовой плотности плазмы в серии импульсов # 72760–73198

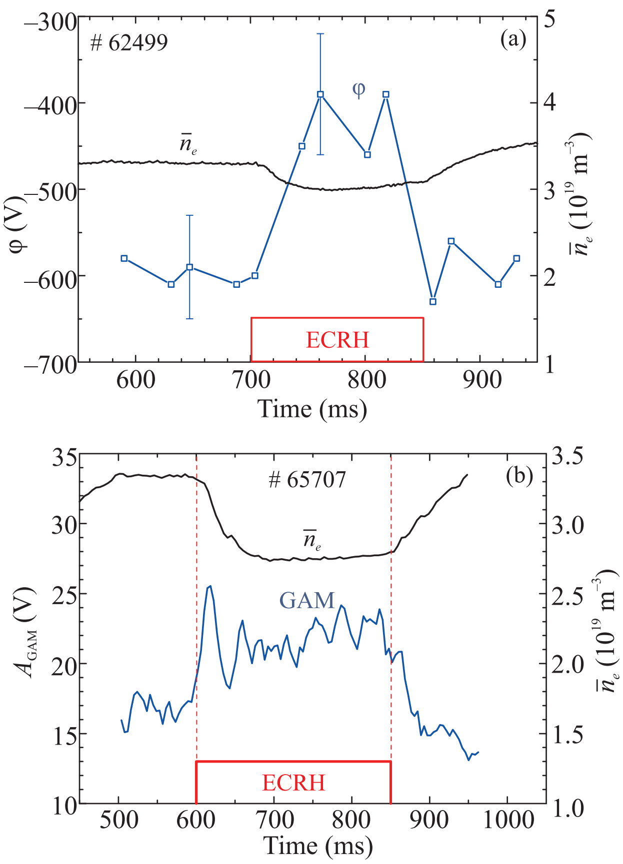

Рис. 14. (Цветной онлайн) (a) – Эволюция потенциала плазмы φ, измеренного HIBP на $r = 0.21$ м, и эффект откачки плотности в типичном разряде с ECRH; (b) – эволюция флуктуаций потенциала в частотном диапазоне GAM и плотности плазмы [81]

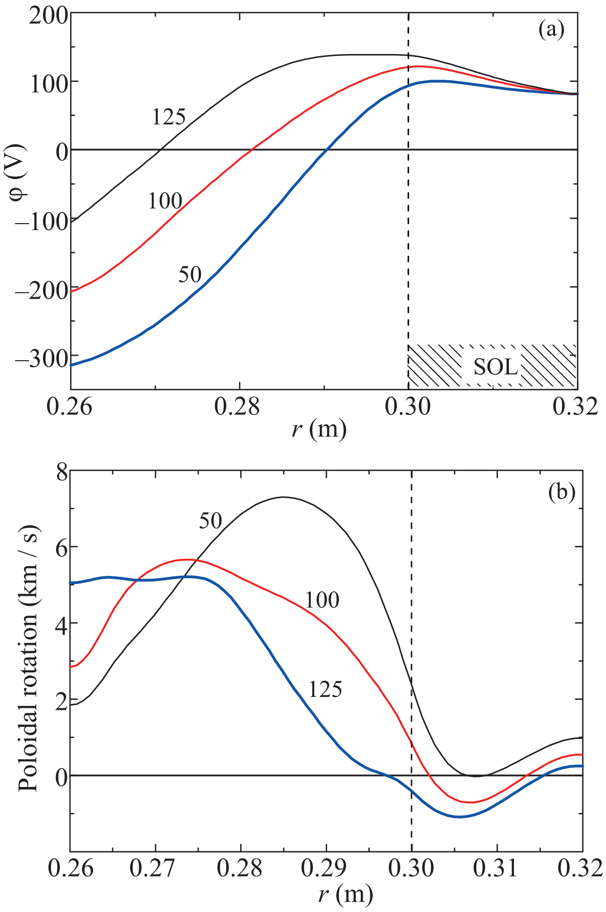

Рис. 15. (Цветной онлайн) Результаты расчетов распределения потенциала (a) и скорости вращения (b) в Т-10 в зависимости от температуры на границе расчетной области в точке $r_0 = 0.26$ м при $T_e(r_0) = 50$, 100 и 125 эВ и плотности $n_e(r_0) = 0.5 \times 10^{19}$ м$^{-3}$; пунктир – положение лимитера, SOL – пристеночный слой

ствования глобальной ГАМ, наблюдаемой в экспериментах на Т-10, COMPASS, и STOR-M [79].

Динамика параметров плазмы в режимах с омическим и дополнительным нагревом.

Исследование электрического потенциала. В омических режимах с нарастающей плотностью в течение импульса, а также при изменении плотности от импульса к импульсу получена зависимость потенциала от плотности на Т-10. Показано, что результаты измерений в обоих типах режимов совпадают: потенциал имеет отрицательный знак, его абсолютная величина имеет масштаб нескольких сотен вольт и растет с плотностью (рис. 13). Центральный ECRH приводит к существенному росту электронной температуры плазмы, вызывающему не только рост энергосодержания плазмы, но и выброс плотности n_e из зоны нагрева на периферию (pump-out), указывающий на ухудшение удержания частиц [80]. Показано, что pump-out усиливается с

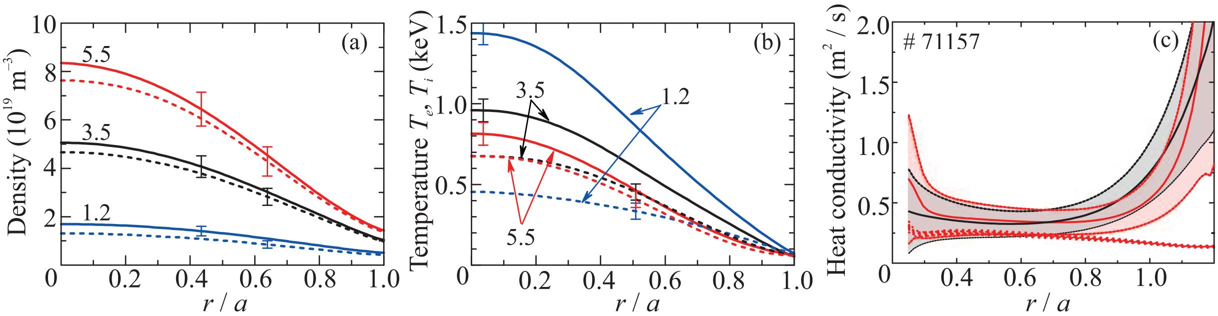

Рис. 16. (Цветной онлайн) Измеренные профили: (a) – плотности электронов и ионов при трех значениях средней плотности; (b) – электронной (сплошные линии) и ионной (пунктир) температуры для тех же импульсов; (c) – электронной (черная линия) и ионной (толстая красная линия) теплопроводности, определенные из энергобаланса с учетом погрешностей эксперимента, и ионная теплопроводность, рассчитанная по неоклассической теории (точки), для омической стадии импульса с $\bar{n}_e = 2.5 \times 10^{19}$ м$^{-3}$, в котором проводились исследования GAM

ростом плотности плазмы до некоторого критического значения, начиная с которого вынос частиц из зоны центрального нагрева уменьшается. Явление pump-out оказалось связанным с динамикой потенциала плазмы и его флуктуаций в диапазоне GAM: при ECRH потенциал уменьшается по абсолютной величине, а амплитуда GAM на потенциале увеличивается, рис. 14 [81].

На основе 5-ти полевой электростатической редуцированной МГД-модели Брагинского в турбулентном режиме проведены расчеты потенциала, электрического поля и скорости вращения периферийной плазмы и SOL на T-10 ($r = 0.26$–0.32 м). Показано, что с ростом температуры, моделирующим ECR-нагрев, потенциал эволюционирует в положительную сторону, а скорость вращения замедляется, что согласуется с результатами экспериментов (рис. 15). Наблюдаемый эффект объясняется различным воздействием электронной температуры на силы, участвующие в генерации полоидальной скорости: силу турбулентного напряжения (Рейнольдса), сильно зависящую от электронной температуры, и геодезическую силу (Стрингера–Винзора) [82]. Показано, что рост плотности приводит к ускорению вращения, а нагрев электронов – к его замедлению, что соответствует результатам экспериментов.

В режимах с ECRH и дополнительным NBI нагревом на стеллараторе TJ-II было показано, что электрический потенциал плазмы уменьшается с ростом плотности и нарастает с ростом электронной температуры в согласии с результатами неоклассического моделирования [83]. Установлены общие свойства потенциала плазмы на токамаке T-10 и стеллараторе TJ-II [84, 85]. Показано, что в полном диапазоне операционных пределов обеих установок центральный потенциал определяется столкновительностью: с ее увеличением меняет знак с положительного на отрицательный и нарастает по абсолютной величине [86].

Ионная температура, концентрация примесей и эффективного заряда Z_{eff} при омическом и ECR нагреве. Для анализа GAM и широкополосной турбулентности, на T-10 проведены измерения и анализ профилей температур T_e, T_i, плотности n_e с учетом Z_{eff}, источников и стоков тепла [87–91]. Показано, что эффективный коэффициент ионной теплопроводности χ_i может иметь аномально высокую величину, существенно превышающую неоклассическое значение (рис. 16). Получен скейлинг для аномальной части ионной теплопроводности в омических разрядах T-10, позволяет предсказывать ионную температуру в зоне $\rho = 0$–0.8 с точностью $\pm 15\,\%$:

$$\chi^{\text{an}}_{i-\text{scal}}(\rho) = 0.05 \bar{n}_e Z_{\text{eff}} \left(\frac{I_p}{220}\right)^{-0.5} \left(\frac{\rho^2}{n_e(\rho)/n_e(0)}\right),$$

где χ_i [м^2/с], I_p [кА], n_e [10^{19} м$^{-3}$]; χ_i^{an} сильно возрастает к периферии плазмы, линейно спадает с плотностью, растет с Z_{eff} и слабо спадает с током I_p.

Сравнение с моделью критических градиентов, вызванных развитием неустойчивости на градиенте ионной температуры (ITG-моды), показало, что измеренный градиент T_i может сильно превышать порог развития ITG-моды [92]. Предварительный анализ скейлингов аномального переноса электронов и ионов показал, что они демонстрируют строго противоположные зависимости как при омическом (от параметров: n_e, Z_{eff} и I_p), так и при ECR-нагреве (от мощности и зоны локализации вкладываемой мощности).

Баланс частиц и энергии. В разрядах с омическим и дополнительным центральным электронно-циклотронным нагревом (ECRH) на T-10 исследовалось поведение мелкомасштабных флуктуаций

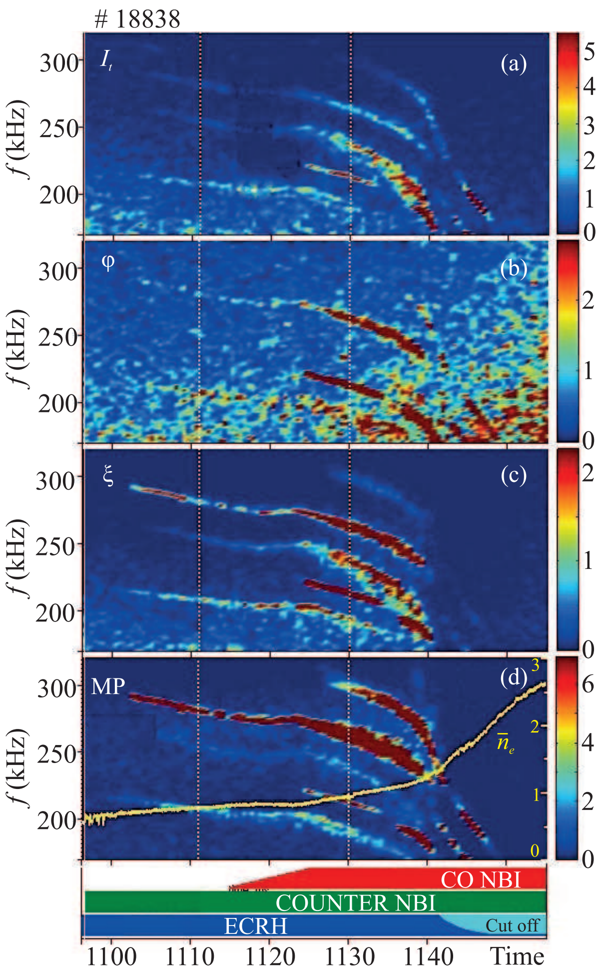

Рис. 17. (Цветной онлайн) Спектрограммы мощности (PSD) колебаний сигналов HIBP ($\rho = -0.5$) и зонда Мирнова (MP) на стеллараторе TJ-II. АЕ видны: (a) – на токе вторичного пучка $I_t \sim n_e$; (b) – на потенциале φ; (c) – на тороидальном смещении вторичного пучка $\zeta \sim B_{\rm pol}$; (d) – на сигнале магнитного зонда MP [7]

потенциала и плотности. Показано, что существует некоторый пикированный "предельный" профиль нормированного давления, при превышении которого наступает резкое ухудшение удержания частиц, проявляющееся в резком спаде плотности в омических режимах и в эффекте выброса плотности "density pump out" при ECRH. Минимальный уровень турбулентности не зависит от мощности нагрева, и он наблюдался при оптимальном профиле давления, который несколько шире предельного профиля. Флуктуации плотности не дают заметного вклада в перенос энергии, но определяют поток частиц, поддерживающий профиль давления. Наблюдаемое поведение плотности n_e описывается моделью канонических профилей, реализованной в транспортном коде ASTRA, описывающей ухудшение удержания при достижении предельного профиля давления [28].

Анализ данных Т-10 и других токамаков показал, что возрастание теплового потока на стенку в результате ECRH или любых других искажений профиля давления внешними факторами снижает номер моды нижней границы турбулентного спектра m и увеличивает плотность теплового потока на стенку, пропорционального $m^{-1.5}$. Для объяснения наблюдаемых эффектов использован "термодинамический" подход к концепции сохранения нормированных профилей давления плазмы, в частности, описывающий эффект pump-out [93, 94].

В омическом режиме Т-10 наблюдались переходы от стандартного к ухудшенному удержанию частиц, подобные эффекту pump-out. При этом, при падении n_e потенциал φ эволюционирует в положительную сторону. Показано, что изменение удержания частиц связано с отклонением радиального профиля электронного давления от оптимального (канонического). С помощью нелинейной модели канонических профилей описан перенос частиц в нестационарных режимах, включая описанные эффекты перехода и L-моду [95–97]. Для токамака COMPASS описан перенос частиц в L- и H-режимах удержания при омическом и инжекционном (NBI) нагреве, в которых обнаружены АЕ [98].

Влияние литиезации на параметры плазмы. На Т-10 проводились исследования свойств плазмы, ограниченной ITER-подобной стенкой: с вольфрамовым лимитером и литиезацией стенок камеры. Источником лития (Li) являлся подвижный литиевый лимитер на основе вольфрамовой капиллярно-пористой структуры. Изменение условий на границе плазмы за счет притока лития, а также его излучение и перенос оказывает существенное влияние как на глобальные характеристики плазмы, так и на свойства ее флуктуаций [99, 100]. Литиезация стенок камеры может значительно снизить уровень примесей, как легких: C и O, так и тяжелых, W, тем самым, значительно влияя на величину $Z_{\rm eff}$ и уровень радиационных потерь [101, 102]. Получены зависимости времени удержания энергии в электронной τ_{Ee} и ионной τ_{Ei} компонентах от электронной плотности в разрядах со значительно меняющимися значениями $Z_{\rm eff}$ и мощностью дополнительного нагрева $P_{\rm EC} < 2$ МВт [103, 104]. Показано, что литий по-разному влияет на удержание ионов и электронов [105, 106]. Отмечено, что большие тепловые потоки, связанные с развитием турбулентности или пучков ускоренных электронов при ЭЦ нагреве, приводили к разрушению вольфрамовых пластин лимитера [107].

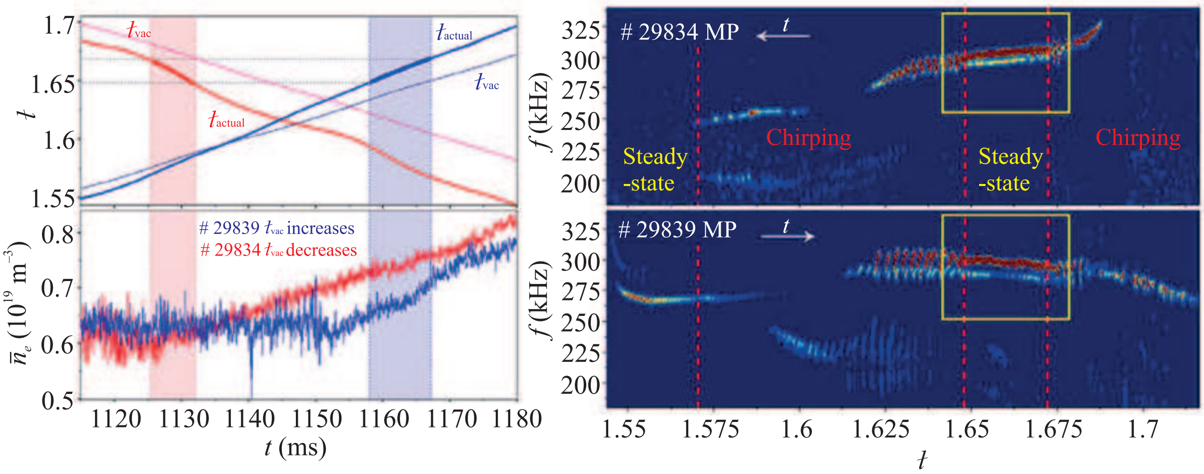

Рис. 18. (Цветной онлайн) (слева) Временная эволюция вакуумного $\iota\!\!\!-_{\mathrm{vac}}$ и реального $\iota\!\!\!-_{\mathrm{actual}}$ вращательного преобразования и плотности при сканировании магнитной конфигурации в сторону увеличения или уменьшения $\iota\!\!\!-_{\mathrm{vac}}$ (синие и красные кривые). Чирпинг-мода трансформируется в моду с непрерывной частотой при одном и том же значении $\iota\!\!\!-_{\mathrm{actual}}$, отмеченного вертикальными цветовыми полосами. Справа приведены магнитные спектрограммы AE мод как функции $\iota\!\!\!-_{\mathrm{actual}}$ и эти значения выделены пунктиром [112]

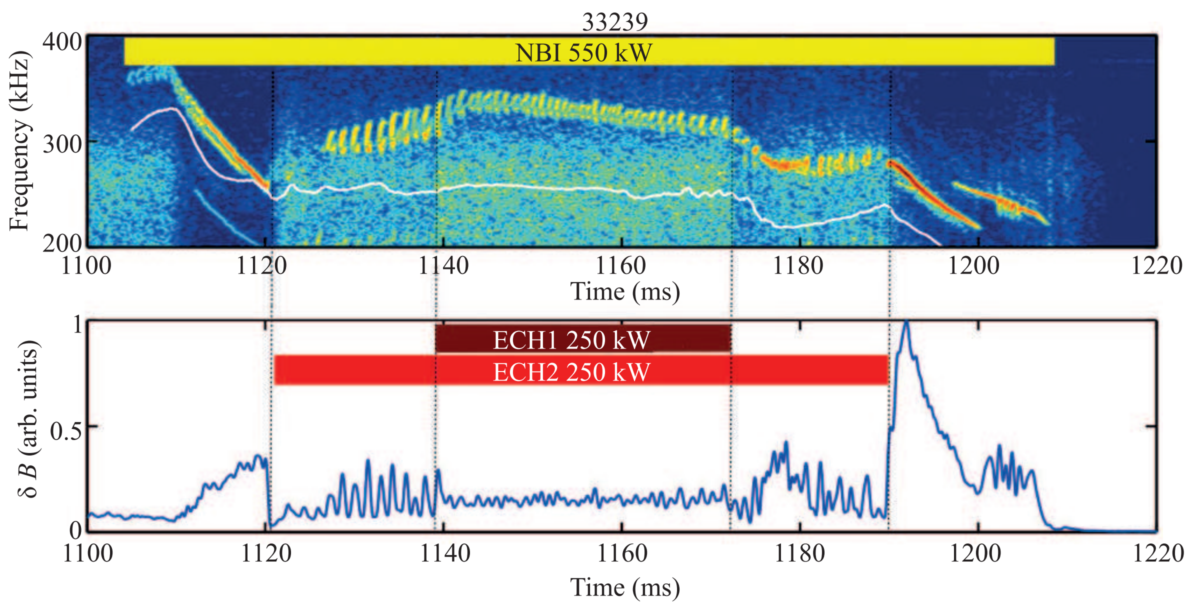

Рис. 19. (Цветной онлайн) Эволюция AE моды из непрерывной формы в чирпинг в разряде TJ-II с увеличением мощности нецентрального ECRH/ECCD. Вверху – магнитная спектрограмма, внизу – амплитуда наблюдаемой моды

Альвеновские моды (AE). Изучение AE и управление ими является одной из ключевых задач термоядерных исследований [108]. AE наблюдаются в виде квазимонохроматических осцилляций, с частотой, эволюционирующей как $n_e^{-1/2}$, рис. 17 [109, 110].

Установлено, что в стеллараторе TJ-II свойства спектрального континуума, частотный интервал и положение "щелей", в которых возбуждаются AE, определяет профиль не вакуумного вращательного преобразования $\iota\!\!\!-_{\mathrm{vac}}(\rho)$, а реального $\iota\!\!\!-_{\mathrm{actual}}(\rho)$, скорректированного влиянием тока плазмы I_p. Показано, что существуют интервалы изменения $\iota\!\!\!-$ – "окна", в которых AE становится чирпирующей, в то время как в других "окнах" ее частота непрерывно меняется в зависимости от тока и плотности плазмы, рис. 18 [111, 112].

Эксперименты на TJ-II показали, что амплитуда чирпинг-мод и периодичность вспышек снижается при увеличении мощности ECRH, рис. 19

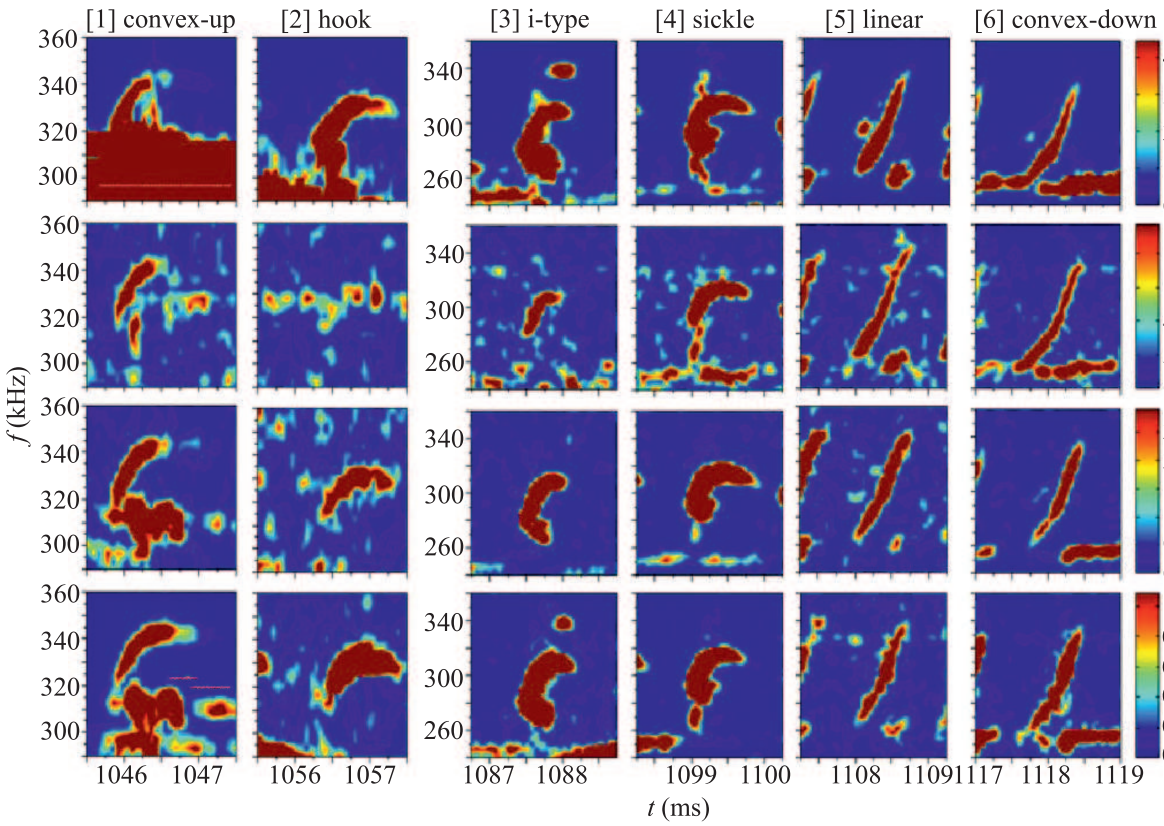

Рис. 20. (Цветной онлайн) Шесть типов чирпинг-мод, обнаруженных на TJ-II. Спектрограммы мощности колебаний магнитного поля (магнитный зонд Мирнова), и трех сигналов HIBP: плотности n, потенциала φ и магнитного поля $B_{\rm pol}$ [113]

[112]. Эти исследования стали основой для разработки методов управления AE с помощью изменения магнитной конфигурации и ECRH/ECCD, так как вклад EC-мощности локализован и хорошо контролируется [108].

На стеллараторе TJ-II обнаружено шесть различных типов чирпинг-мод [113]. Все они наблюдаются на сигналах магнитных зондов, а также на всех трех сигналах HIBP: потенциале, плотности и магнитном поле, рис. 20.

В режиме радиального сканирования HIBP установлено, что чирпинг-моды, как правило, возбуждаются в радиальном интервале $\rho = 0.6{-}0.8$ [114]. В течение одного цикла нарастания частоты они могут перемещаться по радиусу наружу, рис. 21 [113].

С помощью нелинейного МГД-моделирования был рассчитан альвеновский континуум, его щели и наблюдаемый диапазон частот, показанный на рис. 19, воспроизведена экспериментально наблюдаемая трансформация чирпинг-моды в AE моду с непрерывной частотой [115, 116].

На токамаке COMPASS было показано, что при NBI наблюдаются многочисленные квазикогерентные электромагнитные моды с частотами $5\,\text{кГц} < f < 250\,\text{кГц}$, имеющими различную природу и локализацию [117–119]. С помощью анализа магнитных возмущений, низкочастотные моды с $f < 50\,\text{кГц}$ были идентифицированы как тиринг моды с малым полоидальным числом m и винтовые МГД моды, а более высокочастотные моды с $50\,\text{кГц} < f < 250\,\text{кГц}$ идентифицированы как AE, поскольку их частота падала с ростом плотности по альвеновскому закону (1). Обнаружены две ветви AE: более низкочастотные ($\sim 150\,\text{кГц}$) с баллонной и более высокочастотные ($\sim 250\,\text{кГц}$) с антибаллонной пространственной структурой. С помощью линейного МГД-кода KINX был рассчитан альвеновский континуум, его щели, определен частотный диапазон, модовая и пространственная структура наблюдаемых AE. Идентифицированы AE двух типов: тороидальные собственные моды (TAE) с антибаллонной структурой и с m, $n < 9$, и моды, порожденные градиентом давления (Beta Induced Alfvén Eigenmodes – BAE) с баллонной структурой и с $m, n < 5$. Был обнаружен поразительный факт: AE наблюдались, в основном, в H-моде, но не только в возбуждаемой NBI, а также и в омиче-

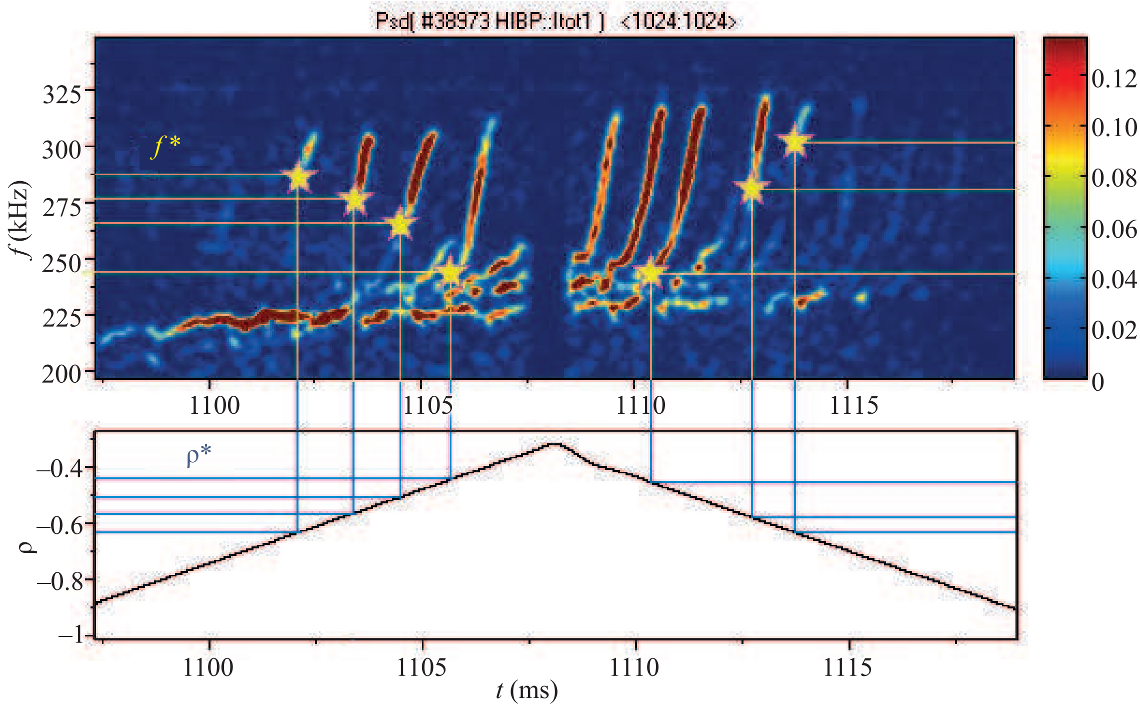

Рис. 21. (Цветной онлайн) Спектрограмма мощности колебаний плотности плазмы, измеренная при радиальном сканировании HIBP на TJ-II, показывающая радиальное распространение чирпинг-моды наружу. Звездочки показывают моменты появления моды на данном радиусе. Зависимость радиуса точки измерения SV от времени показана на нижнем рисунке [113]

ской H-моде [120]. Если в H-моде, возбуждаемой NBI, генерация AE определяется взаимодействием ускоренных ионов с волной по механизму Ландау, то в случае омической H-моды механизм совсем не ясен, поскольку в условиях высокой плотности возбуждение AE ускоренными электронами невозможно [121].

Заключительное замечание. В экспериментах по исследованию свойств AE в зависимости от $\iota\!\!\!-$ на TJ-II был найден ненулевой нижний предел для f_{AE}. Было показано, что таким пределом является частота GAM [122]. Впервые на стеллараторах было показано, что динамика AE вблизи нижнего предела описывается дисперсионным соотношением, полученным в [3]. Таким образом, теоретически предсказанная взаимосвязь между GAM и AE получила экспериментальное подтверждение для стеллараторов.

Исследования, представленные в обзоре, выполнены в рамках проекта Российского научного фонда # 14-22-00193 и 14-22-00193П.

1. A. Di Siena, T. Görler, E. Poli, A. Banon Navarro, A. Biancalani, R. Bilato, M. J. Mantsinen, F. N. de Oliveira-Lopes, F. Jenko (Collaborations the EUROfusion MST1 team and the ASDEX Upgrade team), Nucl. Fusion **59**, 124001 (2019).
2. H. L. Berk, D. N. Borba, B. N. Breizman, S. D. Pinches, and S. E. Sharapov, Phys. Rev. Lett. **87**, 185002 (2001).
3. B. N. Breizman, M. S. Pekker, and S. E. Sharapov, Phys. Plasmas **12**, 112506 (2005).
4. A. V. Melnikov, Nature Phys. **12**, 386 (2016).
5. M. A. Buldakov, V. A. Vershkov, M. Yu. Isaev, and D. A. Shelukhin, J. Phys. Conf. Ser. **907**, 012001 (2017).
6. V. A. Vershkov, M. A. Buldakov, G. F. Subbotin, D. A. Shelukhin, A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, P. O. Khabanov, M. A. Drabinskij, D. S. Sergeev, T. B. Myalton, V. M. Trukhin, A. V. Gorshkov, I. S. Belbas, and G. M. Asadulin, Nucl. Fusion **59**, 066021 (2019).
7. A. V. Melnikov, L. I. Krupnik, L. G. Eliseev et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **57**, 072004 (2017).
8. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, S. E. Lysenko et al. (Collaboration), *1st EPS Conf. on Plasma Diagnostics, (ECPD 2015)*, Frascati, Italy (2015); http://pos.sissa.it/archive/conferences/240/170/ECPD2015_170.pdf.
9. M. A. Drabinskiy, J. Phys. Conf. Ser. **1147**, 012123 (2019).
10. M. A. Drabinskii, P. O. Khabanov, A. V. Melnikov, L. I. Krupnik, A. S. Kozachek, A. D. Komarov, and A. I. Zhezhera, J. Phys. Conf. Ser. **747**, 012017 (2016).

11. M. A. Drabinskiy, L. G. Eliseev, P. O. Khabanov, A. V. Melnikov, N. K. Khartchev, N. S. Sergeev, and S. A. Grashin, J. Phys. Conf. Ser. **1383**, 012004 (2019).
12. Н. К. Харчев, Computational nanotechnology **1**, 58 (2018).
13. М. А. Драбинский, Ф. О. Хабанов, А. В. Мельников, Л. И. Крупник, А. С. Козачек, А. Д. Комаров, А. И. Жежера, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **39**(2), 81 (2016).
14. М. А. Драбинский, Computational nanotechnology **1**, 62 (2018).
15. Ф. О. Хабанов, Computational nanotechnology **1**, 25 (2018).
16. A. V. Melnikov, M. A. Drabinskiy, L. G. Eliseev, P. O. Khabanov, N. K. Kharchev, L. I. Krupnik, J. L. De Pablos, A. S. Kozachek, S. E. Lysenko, A. Molinero, G. B. Igonkina, and M. M. Sokolov, Fusion Eng. Des. **146**, 850 (2019).
17. А. В. Мельников, Computational nanotechnology **1**, 31 (2018).
18. Л. А. Ключников, В. А. Крупин, К. В. Коробов, М. Р. Нургалиев, А. Р. Немец, А. Ю. Днестровский, Н. Н. Науменко, С. Н. Тугаринов, С. В. Серов, Д. С. Деньщиков, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **39**(1), 95 (2016).
19. L. A. Klyuchnikov, V. A. Krupin, M. R. Nurgaliev, K. V. Korobov, A. R. Nemets, A. Yu. Dnestrovskij, S. N. Tugarinov, S. V. Serov, and N. N. Naumenko, Rev. Sci. Instrum. **87**, 053506 (2016).
20. L. A. Klyuchnikov, V. A. Krupin, M. R. Nurgaliev, A. R. Nemets, I. A. Zemtsov, S. N. Tugarinov, and N. N. Naumenko, Rev. Sci. Instrum. **88**, 093508 (2017).
21. А. Р. Немец, В. А. Крупин, Л. А. Ключников, К. В. Коробов, М. Р. Нургалиев, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. **38**(4), 96 (2015).
22. А. Р. Немец, В. А. Крупин, Л. А. Ключников, М. Р. Нургалиев, В. И. Тройнов, И. А. Земцов, И. С. Образцов, Д. С. Сергеев, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **40**(2), 23 (2017).
23. Л. А. Ключников, А. Р. Немец, В. А. Крупин, К. В. Коробов, М. Р. Нургалиев, Н. Н. Науменко, С. Н. Тугаринов, Д. С. Деньщиков, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. **38**(4), 34 (2015).
24. R. Y. Solomatin, V. P. Budaev, S. A. Grashin, E. V. Dzyatko, L. G. Eliseev, A. V. Melnikov, S. V. Perfilov, and V. N. Zenin, *42nd EPS Conf. on Plasma Physics, 22–26 June 2015*, Lisbon, Portugal, Rep. P5.160.
25. A. V. Melnikov, A. V. Sushkov, A. M. Belov et al. (Collaboration), Fusion Eng. Des. **96–97**, 306 (2015).
26. В. П. Пастухов, Физика плазмы **47**, 808 (2021).
27. A. V. Melnikov, L. I. Krupnik, E. Ascasibar et al. (Collaboration), Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 084008 (2018).
28. V. A. Vershkov, D. A. Shelukhin, G. F. Subbotin et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **55**, 063014 (2015).
29. V. A. Vershkov, D. V. Sarychev, G. E. Notkin, D. A. Shelukhin, M. A. Buldakov, Yu. N. Dnestrovskij, S. A. Grashin, N. A. Kirneva, V. A. Krupin, L. A. Klyuchnikov, A. V. Melnikov, S. V. Neudatchin, M. R. Nurgaliev, Yu. D. Pavlov, and P. V. Savrukhin, Nucl. Fusion **57**, 102017 (2017).
30. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, S. E. Lysenko, M. V. Ufimtsev, and V. N. Zenin, Nucl. Fusion **57**, 115001 (2017).
31. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, S. A. Grashin, M. A. Drabinskij, P. O. Khabanov, N. K. Kharchev, L. I. Krupnik, A. S. Kozachek, S. E. Lysenko, and V. N. Zenin, Plasma Fusion Res. **13**, 3402109 (2018).
32. M. P. Gryaznevich, J. Stöckel, G. van Oost, E. Del Bosco, V. Svoboda, A. Melnikov, R. Kamendje, A. Malaquias, G. Mank, R. Miklaszewski (Collaborations) the IAEA CRP and JEs teams, Plasma Sci. Technol. **22**, 055102 (2020).
33. G. A. Riggs, S. Nogami, M. Koepke, A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, S. E. Lysenko, P. O. Khabanov, M. A. Drabinskij, N. K. Kharchev, A. S. Kozachek, M. V. Ufimtsev, and (Collaboration) HIBP Team, J. Plasma Phys. **87**, 885870301 (2021).
34. A. V. Melnikov, M. A. Drabinskiy, L. G. Eliseev, P. O. Khabanov, N. K. Kharchev, and S. E. Lysenko, *46th EPS Conf. Plasma Physics, Milano, 8–12 July 2019*, Rep. P5.1090.
35. L. G. Eliseev, V. N. Zenin, S. E. Lysenko, and A. V. Melnikov, J. Phys. Conf. Ser. **907**, 012002 (2017).
36. L. G. Eliseev, S. E. Lysenko, A. V. Melnikov, L. I. Krupnik, A. S. Kozachek, V. N. Zenin, and (Collaboration HIBP team), Probl. At. Sci. Technol. Ser. Plasma Phys. **107**, 241 (2017).
37. L. G. Eliseev, A. V. Melnikov, S. E. Lysenko, P. O. Khabanov, V. N. Zenin, M. A. Drabinskij, N. K. Kharchev, A. S. Kozachek, L. I. Krupnik, and (Collaboration) HIBP team, Plasma Fusion Res. **13**, 3402106 (2018).
38. A. V. Melnikov, J. M. Barcala, L. I. Krupnik, C. Hidalgo, L. G. Eliseev, A. A. Chmyga, J. Chercoles, A. D. Komarov, A. S. Kozachek, S. M. Khrebtov, J. Lopez, A. Molinero, G. Martin, J. L. de Pablos, S. V. Perfilov, and Yu. I. Taschev, Fusion Eng. Des. **96–97**, 724 (2015).
39. A. I. Zhezhera, A. Chmyga, G. N. Deshko, L. G. Eliseev, C. Hidalgo, S. M. Khrebtov, A. D. Komarov, A. S. Kozachek, L. I. Krupnik, A. V. Melnikov, J. L. de Pablos, and S. V. Perfilov, Probl. At. Sci. Technol. Ser. Plasma Phys. **107**, 261 (2017).
40. R. Sharma, P. O. Khabanov, A. V. Melnikov, N. K. Kharchev, E. Sánchez, A. A. Chmyga, G. N. Deshko, L. G. Eliseev, C. Hidalgo,

S. M. Khrebtov, A. D. Komarov, A. S. Kozachek, L. I. Krupnik, A. Malaquias, B. van Milligen (Collaboration), *45th EPS Conf. on Plasma Physics, 2–6 July 2018, Prague, Czech Republic* (2018), Rep. P5.1061.

41. P. O. Khabanov, L. G. Eliseev, N. K. Khartchev, C. Hidalgo, A. S. Kozachek, A. D. Komarov, L. I. Krupnik, S. E. Lysenko, A. V. Melnikov, A. A. Chmyga, G. N. Deshko, S. M. Khrebtov, A. D. Komarov, A. Molinero, J. L. de Pablos, and (Collaboration TJ-II team), Probl. At. Sci. Technol., Ser. Plasma Phys. **118**, 317 (2018).
42. K. J. McCarthy, N. Panadero, S. K. Combs, N. Tamura, E. Ascasíbar, M. Calvo, A. Chmyga, T. Estrada, J. M. Fontdecaba, R. García, J. Hernández Sánchez, P. Khabanov, M. Liners, A. V. Melnikov, I. Pastor, B. Rojo, and (Collaborations) TJ-II team and LHD experiment group, Plasma Phys. Control. Fusion **61**, 014013 (2019).
43. N. Winsor, J. L. Johnson, and J. M. Dawson, Phys. Fluids **11**, 2448 (1968).
44. P. M. Schoch, K. A. Connor, D. R. Demers and X. Zhang, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1846 (2003).
45. G. R. McKee, R. J. Fonck, M. Jakubowski, K. H. Burrell, K. Hallatschek, R. A. Moyer, W. Nevins, D. L. Rudakov, and X. Xu, Plasma Phys. Control. Fusion **45**, A477 (2003).
46. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, S. A. Grashin, A. V. Gudozhnik, S. E. Lysenko, V. A. Mavrin, S. V. Perfilov, S. V. Soldatov, D. A. Shelukhin, V. A. Vershkov, L. G. Zimeleva, M. V. Ufimtsev, L. I. Krupnik, A. D. Komarov, and A. S. Kozachek, *Proc. 30th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg,* ECA (2003), v. 27A, Rep. P-3.114.
47. P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh, and T. S. Hahm, Plasma Phys. Control. Fusion **47**, R35 (2005).
48. A. V. Melnikov, V. A. Vershkov, L. G. Eliseev, S. A. Grashin, A. V. Gudozhnik, L. I. Krupnik, S. E. Lysenko, V. A. Mavrin, S. V. Perfilov, D. A. Shelukhin, S. V. Soldatov, M. V. Ufimtsev, A. O. Urazbaev, G. van Oost, and L. G. Zimeleva, Plasma Phys. Control. Fusion **48**, S87 (2006).
49. A. Fujisawa, T. Ido, A. Shimizu et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **47**, S718 (2007).
50. В. Н. Зенин, Computational nanotechnology **1**, 108 (2018).
51. G. D. Conway, A. I. Smolyakov, and T. Ido, Nucl. Fusion **62**, 013001 (2022).
52. A. V. Melnikov, L. I. Krupnik, J. M. Barcala et al. (Collaboration), Probl. At. Sci. Technol. Ser. Plasma Phys. **107**, 237 (2017).
53. А. В. Мельников, Л. Г. Елисеев, С. Е. Лысенко, С. В. Перфилов, Р. В. Шурыгин, Л. И. Крупник, А. С. Козачок, А. И. Смоляков, Письма в ЖЭТФ **100**, 627 (2014).
54. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, S. V. Perfilov, S. E. Lysenko, R. V. Shurygin, V. N. Zenin, S. A. Grashin, L. I. Krupnik, A. S. Kozachek, R. Yu. Solomatin, A. G. Elfimov, A. I. Smolyakov, and M. V. Ufimtsev, Nucl. Fusion **55**, 063001 (2015).
55. N. A. Kirneva, G. M. Asadulin, V. M. Bajkov et al. (Collaboration), *45th EPS Conf. on Plasma Physics, 2–6 July 2018, Prague, Czech Republic* (2018), Rep. P4.1081.
56. N. A. Kirneva, K. A. Razumova, V. A. Krupin et al. (Collaboration), *44th EPS Conf. on Plasma Physics, 26–30 June 2017, Belfast, Northern Ireland (UK)*, ECA (2017), Rep. P4.169.
57. V. N. Zenin, G. F. Subbotin, L. A. Klyuchnikov, and A. V. Melnikov, J. Phys. Conf. Ser. **747**, 012005 (2016).
58. L. G. Eliseev, V. P. Lakhin, S. E. Lysenko, A. V. Melnikov, S. V. Perfilov, and V. N. Zenin, *Proc. 43rd EPS Conf. on Plasma Physics* (Leuven, Belgium, 4–8 July 2016) ECA, v. 40A, Rep. P2.030.
59. V. N. Zenin, A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, A. S. Kozachek, L. I. Krupnik, S. E. Lysenko, and S. V. Perfilov, Probl. At. Sci. Technol., Ser. Plasma Phys. **94**, 269 (2014).
60. V. N. Zenin, L. A. Klyuchnikov, A. V. Melnikov, A. Nemets, M. Nurgaliev, and G. Subbotin, *43rd EPS Conf. on Plasma Physics, 4–8 July 2016*, Rep. P2.024.
61. В. Н. Зенин, Л. А. Ключников, А. В. Мельников, А. Р. Немец, М. Р. Нургалиев, Г. Ф. Субботин, Д. А. Шелухин, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **39**(3), 91 (2016).
62. V. N. Zenin, M. A. Drabinskij, L. G. Eliseev, S. A. Grashin, P. O. Khabanov, N. K. Kharchev, and A. V. Melnikov, *45th EPS Conf. on Plasma Physics, 2–6 July 2018, Prague, Czech Republic* (2018), Rep. P2.1090.
63. V. N. Zenin, M. A. Drabinskij, L. G. Eliseev, S. A. Grashin, P. O. Khabanov, N. K. Kharchev, L. I. Krupnik, and A. V. Melnikov, Probl. At. Sci. Technol., Ser. Plasma Phys. **118**, 321 (2018).
64. А. В. Мельников, Л. Г. Елисеев, С. Е. Лысенко, С. В. Перфилов, Д. А. Шелухин, В. А. Вершков, В. Н. Зенин, Л. И. Крупник, А. С. Козачек, Н. К. Харчев, М. В. Уфимцев, (Collaboration) группа “тяжелый пучок”, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **38**, 49 (2015).
65. J. A. Alonso, E. Sanchez, I. Calvo, J. L. Velasco, K. J. McCarthy, A. Chmyga, L. G. Eliseev, T. Estrada, R. Kleiber, L. I. Krupnik, A. V. Melnikov, P. Monreal, F. I. Parra, S. Perfilov, A. I. Zhezhera, and (Collaboration) the TJ-II Team, Phys. Rev. Lett. **118**, 185002 (2017).
66. F. Castejon, A. Aguilera, E. Ascasibar, T. Estrada, C. Hidalgo, A. Lopez-Fraguas, M. Ochando, S. Yamamoto, A. Melnikov, L. Eliseev, and S. Perfilov, Plasma Phys. Control. Fusion **58**, 094001 (2016).

67. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, S. E. Lysenko, S. V. Perfilov, D. A. Shelukhin, V. A. Vershkov, V. N. Zenin, L. I. Krupnik, N. K. Kharchev, and (Collaboration) HIBP team, J. Phys.: Conf. Ser. **591**, 012003 (2015).
68. J. Seidl, J. Krbec, M. Hron et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **57**, 126048 (2017).
69. D. Basu, M. Nakajima, A. V. Melnikov, D. McColl, A. Rohollahi, S. Elgriw, C. Xiao, and A. Hirose, Nucl. Fusion **58**, 024001 (2018).
70. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, A. V. Gudozhnik, S. E. Lysenko, V. A. Mavrin, S. V. Perfilov, L. G. Zimeleva, M. V. Ufimtsev, L. I. Krupnik, and P. M. Schoch, Czech. J. Phys. **55**, 349 (2005).
71. A. D. Gurchenko, E. Z. Gusakov, A. B. Altukhov, E. P. Selyunin, L. A. Esipov, M. Yu. Kantor, D. V. Kouprienko, S. I. Lashkul, A. Yu. Stepanov, and F. Wagner, Plasma Phys. Control. Fusion **55**, 085017 (2013).
72. C. A. de Meijere, S. Coda, Z. Huang, L. Vermare, T. Vernay, V. Vuille, S. Brunner, J. Dominski, P. Hennequin, A. Kramer-Flecken, G. Merlo, L. Porte, and L. Villard, Plasma Phys. Control. Fusion **56**, 072001 (2014).
73. Р. В. Шурыгин, А. В. Мельников, Физика плазмы **44**, 303 (2018).
74. D. Basu, M. Nakajima, A. V. Melnikov, J. J. Martinell, D. McColl, R. Singh, C. Xiao, and A. Hirose, Nucl. Fusion **60**, 094001 (2020).
75. L. G. Eliseev, N. V. Ivanov, A. M. Kakurin, S. E. Lysenko, S. G. Maltsev, A. V. Melnikov, S. V. Perfilov, and V. N. Zenin, *42nd EPS Conf. on Plasma Phys., 22–26 June 2015*, Rep. P5.159.
76. L. G. Eliseev, N. V. Ivanov, and A. M. Kakurin, Phys. Plasmas **22**, 052504 (2015).
77. A. G. Elfimov, A. I. Smolyakov, A. V. Melnikov, and R. M. O. Galvão, Физика плазмы **42**, 434 (2016).
78. M. F. Bashir, A. I. Smolyakov, A. G. Elfimov, A. V. Melnikov, and G. Murtaza, Phys. Plasmas **21**, 082507 (2014).
79. В. П. Лахин, Е. А. Сорокина, В. И. Ильгисонис, Л. В. Коновальцева, Физика плазмы **41**, 1054 (2015).
80. A. V. Melnikov, C. Hidalgo, L. I. Krupnik, E. Ascasibar, A. Cappa, A. A. Chmyga, G. N. Deshko, M. A. Drabinskij, L. G. Eliseev, P. O. Khabanov, S. M. Khrebtov, N. K. Kharchev, A. D. Komarov, A. S. Kozachek, and S. E. Lysenko, EPJ Web of Conf. **149**, 03009 (2017).
81. V. F. Andreev, A. A. Borschegovskij, V. V. Chistyakov, Yu. N. Dnestrovskij, E. P. Gorbunov, N. V. Kasyanova, S. E. Lysenko, A. V. Melnikov, T. B. Myalton, I. N. Roy, D. S. Sergeev, and V. N. Zenin, Plasma Phys. Control. Fusion **58**, 055008 (2016).
82. Р. В. Шурыгин, А. В. Мельников, Физика плазмы **45**, 240 (2019).
83. C. Gutierrez-Tapia, J. J. Martinell, D. Lopez-Bruna, A. V. Melnikov, L. Eliseev, C. Rodriguez, M. A. Ochando, F. Castejón, J. García, and B. P. van Milligen, Plasma Phys. Control. Fusion **57**, 115004 (2015).
84. А. В. Мельников, *Электрический потенциал в плазме тороидальных установок*, ред. С. Е. Лысенко, НИЯУ МИФИ, М. (2015).
85. А. В. Мельников, Computational nanotechnology **2**, 13 (2017).
86. A. V. Melnikov, *Electric Potential in Toroidal Plasmas*, Springer Nature, Switzerland AG (2019).
87. С. В. Серов, С. Н. Тугаринов, Л. А. Ключников, В. А. Крупин, M. von Hellermann, Физика плазмы **43**, 957 (2017).
88. В. А. Крупин, Л. А. Ключников, К. В. Коробов, А. Р. Немец, М. Р. Нургалиев, А. В. Горбунов, Н. Н. Науменко, В. И. Тройнов, С. Н. Тугаринов, Ф. В. Фомин, ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез **37**(4), 60 (2014).
89. В. А. Крупин, Л. А. Ключников, М. Р. Нургалиев, А. Р. Немец, К. В. Коробов, И. А. Земцов, Н. Н. Науменко, С. Н. Тугаринов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **39**(4), 68 (2016).
90. В. А. Крупин, А. Р. Немец, Л. А. Ключников, К. В. Коробов, М. Р. Нургалиев, Н. Н. Науменко, С. Н. Тугаринов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **39** (1), 81 (2016).
91. И. А. Земцов, В. А. Крупин, М. Р. Нургалиев, Л. А. Ключников, А. Р. Немец, А. Ю. Днестровский, Д. В. Сарычев, ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез **40**(2), 30 (2017).
92. X. Garbet, P. Mantica, C. Angioni et al. (Collaboration), Plasma Phys. Control. Fusion **46**, B557 (2004).
93. К. А. Разумова, С. Е. Лысенко, Н. Н. Тимченко, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **39**(4), 78 (2016).
94. К. А. Разумова, А. А. Борщеговский, Е. П. Горбунов и др. (Collaboration), Физика плазмы **43**, 879 (2017).
95. Ю. Н. Днестровский, В. А. Вершков, А. В. Данилов, А. Ю. Днестровский, В. Н. Зенин, С. Е. Лысенко, А. В. Мельников, Д. А. Шелухин, Г. Ф. Субботин, С. В. Черкасов, Физика плазмы **42**, 197 (2016).
96. Ю. Н. Днестровский, В. А. Вершков, А. В. Данилов, А. Ю. Днестровский, В. Н. Зенин, С. Е. Лысенко, А. В. Мельников, Д. А. Шелухин, Г. Ф. Субботин, С. В. Черкасов, Физика плазмы **44**, 3 (2018).
97. Ю. Н. Днестровский, В. А. Вершков, А. В. Данилов, А. Ю. Днестровский, С. Е. Лысенко, А. В. Мельников, Г. Ф. Субботин, Д. Ю. Сычугов, С. В. Черкасов, Д. А. Шелухин, Физика плазмы **45**, 207 (2019).
98. A. V. Danilov, Yu. N. Dnestrovskij, A. V. Melnikov, S. V. Cherkasov, L. G. Eliseev, A. Yu. Dnestrovskij, S. E. Lysenko, G. F. Subbotin, V. A. Vershkov, J. Havlíček, J. Urban, J. Stöckel, P. Bilková, P. Böhm,

and M. Sos, *Proc. 45th EPS Conf. on Plasma Physics, 2–6 July 2018, Prague, Czech Republic*, ECA (2018), v. 42A, Rep. P5.1088.

99. L. Klyuchnikov, V. Krupin, K. Korobov, A. Nemets, M. Nurgaliev, A. Dnestrovskij, A. Barsukov, N. Naumenko, S. Tugarinov, S. Serov, V. Troinov, A. Gorbunov, and D. Denshchikov, *Proc. 42nd EPS Conf. on Plasma Physics, 22–26 June, 2015 Lisbon, Portugal*, ECA (2015), v. 39E, Rep. P5.161.
100. L. A. Klyuchnikov, V. A. Krupin, M. R. Nurgaliev, A. R. Nemets, I. A. Zemtsov, D. V. Ryjakov, and D. V. Sarychev, J. Phys. Conf. Ser. **907**, 012009 (2017).
101. I. A. Zemtsov, V. A. Krupin, M. R. Nurgaliev et al. (Collaboration), *44th EPS Conf. on Plasma Physics, 26–30 June 2017*, Belfast, North. Ireland, Rep. P4.175.
102. I. A. Zemtsov, V. A. Krupin, M. R. Nurgaliev, L. A. Klyuchnikov, A. R. Nemets, A. Yu. Dnestrovskij, G. Asadulin, T. Myalton, D. Sarychev, V. Vershkov, S. Grashin, A. Borschegovskij, D. Sergeev, N. Solovyev, and A. Sushkov, *45th EPS Conf. on Plasma Physics, 2–6 July 2018, Prague, Czech Republic* (2018), Rep. P4.1086.
103. M. R. Nurgaliev, V. A. Krupin, L. A. Klyuchnikov, A. R. Nemets, A. Yu. Dnestrovskij, I. A. Zemsov, D. V. Sarychev, A. A. Borschegovskij, D. S. Sergeev, N. A. Mustafin, N. N. Naumenko, and S. N. Tugarinov, *43rd EPS Conf. on Plasma Physics, 4–8 July 2016, Leuven, Belgium* (2016), Rep. P2.069.
104. М. Р. Нургалиев, В. А. Крупин, Л. А. Ключников, А. Р. Немец, И. А. Земцов, А. Ю. Днестровский, Д. В. Сарычев, В. С. Лисица, С. А. Грашин, Д. В. Рыжаков, Д. С. Сергеев, Н. А. Мустафин, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **40**(2), 36 (2017).
105. V. A. Krupin, L. A. Klyuchnikov, M. R. Nurgaliev, A. R. Nemets, I. A. Zemsov, A. V. Melnikov, T. B. Myalton, D. V. Sarychev, D. S. Sergeev, A. V. Sushkov, V. M. Trukhin, S. N. Tugarinov, and N. N. Naumenko, Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 115003 (2018).
106. V. A. Krupin, M. R. Nurgaliev, L. A. Klyuchnikov et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **57**, 066041 (2017).
107. S. A. Grashin, I. I. Arkhipov, V. P. Budaev, A. V. Karpov, L. A. Klyuchnikov, L. N. Khimchenko, A. V. Melnikov, D. V. Sarychev, N. S. Sergeev, and I. A. Zemsov, Fusion Eng. Des. **146**, 2100 (2019).
108. M. Garcia-Munoz, S. E. Sharapov, M. A. van Zeeland et al. (Collaboration), Plasma Phys. Control. Fusion **61**, 054007 (2019).
109. A. V. Melnikov, M. Ochando, E. Ascasibar et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **54**, 123002 (2014).
110. B. Zurro, J. L. Velasco, E. M. Hollmann, A. Baciero, M. A. Ochando, R. Dux, K. J. McCarthy, F. Medina, I. Pastor, R. J. Hajjar, J. M. Garcia-Regaña, D. López-Bruna, A. V. Melnikov, and L. G. Eliseev, Collaborations HIBP Team and TJ-II team, *42nd EPS Conf. on Plasma Physics, 22–26 June 2015, Lisbon, Portugal* (2015), Rep. P4.160.
111. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, E. Ascasibar et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **56**, 076001 (2016).
112. F. Castejon, D. Alegre, A. Alonso et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **57**, 102022 (2017).
113. A. V. Melnikov, E. Ascasibar, A. Cappa et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **58**, 082019 (2018).
114. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, F. Castejón, C. Hidalgo, P. O. Khabanov, A. S. Kozachek, L. I. Krupnik, M. Liniers, S. E. Lysenko, J. L. de Pablos, S. E. Sharapov, M. V. Ufimtsev, and V. N. Zenin, Collaborations HIBP Group and TJ-II Team, Nucl. Fusion **56**, 112019 (2016).
115. A. Rakha, M. J. Mantsinen, A. V. Melnikov, S. E. Sharapov, D. A. Spong, A. López-Fraguas, F. Castejón, and J. L. de Pablos, *45th EPS Conf. on Plasma Physics, 2–6 July 2018 Prague, Czech Republic* (2018), Rep. P4.1004.
116. A. Rakha, M. J. Mantsinen, A. V. Melnikov, S. E. Sharapov, D. A. Spong, A. López-Fraguas, F. Castejón, A. Gutierrez-Milla, J. L. de Pablos, and X. Saez, Nucl. Fusion **59**, 056002 (2019).
117. M. Gryaznevich, G. van Oost, J. Stöckel, R. Kamendje, B. Kuteev, A. Melnikov, T. Popov, and V. Svoboda, Nucl. Fusion **55**, 104019 (2015).
118. T. Markovic, A. Melnikov, J. Seidl, L. Eliseev, J. Havlicek, A. Havranek, M. Hron, M. Imrisek, K. Kovarik, K. Mitosinkova, J. Mlynar, D. Naydenkova, R. Panek, J. Stokel, J. Varju, and V. Weinzettl, *44th EPS Conf. on Plasma Physics, June 26–30 2017, Belfast, North. Ireland*, ECA (2017), Rep. P5.140.
119. T. Markovic, J. Seidl, A. Melnikov et al. (Collaboration), *42nd EPS Conf. Plasma Physics, 22–26 June 2015, Lisbon, Portugal* (2015), Rep. P4.104.
120. A. V. Melnikov, T. Markovic, L. G. Eliseev et al. (Collaboration), Plasma Phys. Control. Fusion **57**, 065006 (2015).
121. T. Markovic, A. Melnikov, J. Seidl, J. Havlicek, A. Havranek, M. Hron, M. Imrisek, K. Kovarik, K. Mitosinkova, J. Mlynar, D. Naydenkova, R. Panek, J. Varju, and V. Weinzettl, *43rd EPS Conf. Plasma Physics, 4–8 July 2016*, Leuven, Belgium, Rep. P5.005.
122. L. G. Eliseev, A. V. Melnikov, E. Ascasibar et al. (Collaboration), Phys. Plasmas **28,** 072510 (2021).