

УДК 533.93

## ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ ПРИ МНОГОИМПУЛЬСНОМ ЭЦР-НАГРЕВЕ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

© 2022 г. П. А. Нестеренко<sup>1,\*</sup>, В. Д. Борзосекон<sup>1</sup>, В. А. Смирнов<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН И.А. Шербаковым 16.03.2022 г.

Поступило 17.03.2022 г.

После доработки 17.03.2022 г.

Принято к публикации 08.06.2022 г.

Проведен анализ динамики возникновения вихревых структур низкочастотной плазменной турбулентности на основе обработки временных выборок широкополосных зашумленных сигналов, измеренных диагностиками малоуглового и обратного коллективного рассеяния излучения гиротрона на первой гармонике (75 ГГц) при многоимпульсном ЭЦР-нагреве в стеллараторе Л-2М при боронизации внутренней стенки камеры. Представлены результаты высокочастотной фильтрации временных выборок сигналов диагностик, корреляционный анализ, спектральный Фурье-анализ, а также вейвлет-анализ сигналов плазменной турбулентности.

*Ключевые слова:* стелларатор, боронизация, СВЧ-диагностики, низкочастотная плазменная турбулентность, спектральный анализ, вейвлет-анализ

DOI: 10.31857/S2686740022040095

### ВВЕДЕНИЕ

Научная программа исследования удержания высокотемпературной плазмы в тороидальных магнитных ловушках для реализации управляемого термоядерного синтеза (УТС) находится в активной стадии: завершается строительство международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) [1]; введен в эксплуатацию новый отечественный токамак Т15-МД [2]; ведутся обсуждение и разработка демореакторов [3]; вводятся в строй новые установки по всему миру. Изучение процессов, протекающих в плазме таких установок, является ключевым элементом для создания и распространения будущих энергетических реакторов УТС.

Процесс изучения физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза требует одновременного использования различных радиофизических бесконтактных диагностик [4]. Актуальной задачей для анализа удержания плазмы в тороидальных установках является исследование спектральных параметров турбулентности разных масштабов.

В данной работе проведено исследование разномасштабных плазменных турбулентных структур при многоимпульсном ЭЦР-нагреве [5] в стеллараторе Л-2М при боронизации [6] стенки камеры посредством использования программного комплекса в среде Matlab. Широкий спектр возможностей программного комплекса для обработки сигналов (высокочастотная фильтрация входных данных, корреляционный анализ, спектральный Фурье-анализ, вейвлет-анализ) позволяет исследователям получать всю информацию о сигнале, что позволяет на основе полученных данных сделать выводы о состоянии и структуре турбулентности плотности плазмы в стеллараторе [7].

### 1. СТЕЛЛАРАТОР Л-2М И ЕГО ДИАГНОСТИКИ

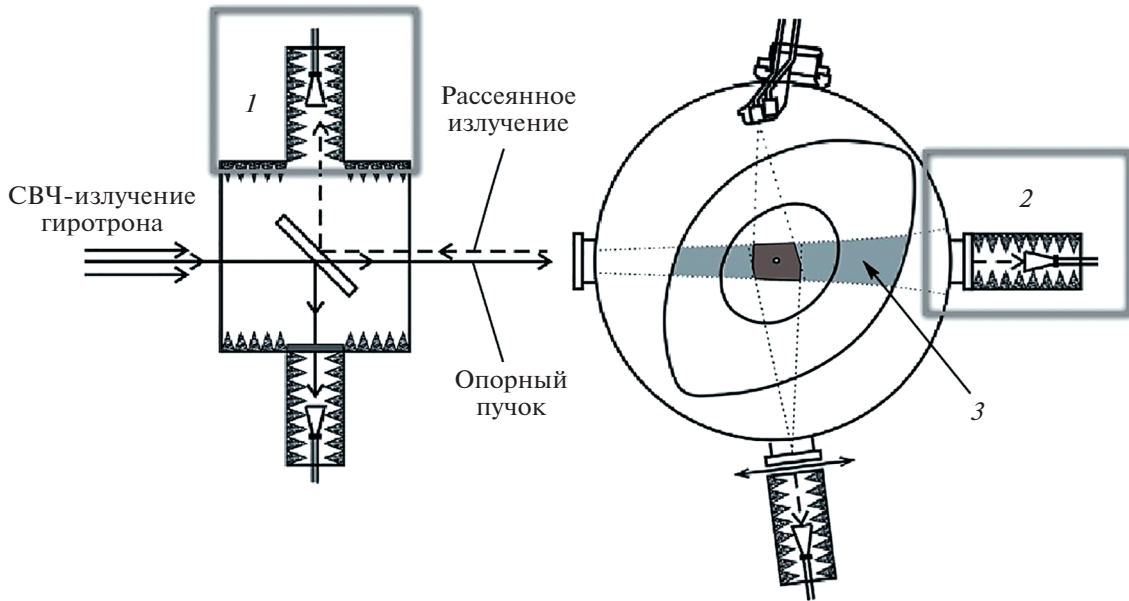
Классический двухзаходный стелларатор Л-2М [8] имеет 28 катушек тороидального магнитного поля и 14 полных периодов винтового поля. Большой радиус тороидальной вакуумной камеры  $R = 100$  см, средний радиус граничной магнитной поверхности  $a = 11.5$  см, значение магнитного поля на оси плазменного шнура в большинстве экспериментов  $B = 1.34$  Тл.

Создание и нагрев плазмы в стеллараторе Л-2М производятся излучением гиротрона на второй гармонике электронно-циклотронной частоты ( $\lambda = 4$  мм,  $f = 75$  ГГц) [9]. Микроволновое

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева,  
Москва, Россия

\*E-mail: polina.nesterenko@fpl.gpi.ru



**Рис. 1.** Диагностики для измерения флуктуаций плотности плазмы во внутренней области шнура в стеллараторе JET. 1 – измерение обратного рассеяния излучения гиротрона, 2 – измерение малоуглового рассеяния излучения гиротрона, 3 – область исследования для диагностик малоуглового и обратного рассеяния на первой гармонике гиротрона.

излучение греющего гиротрона частотой 75 ГГц вводится в вакуумную камеру в виде гауссова пучка с линейной поляризацией. ЭЦР-нагрев происходит в центре плазменного шнура вдали от стенок вакуумной камеры.

Для измерения низкочастотных флуктуаций плотности плазмы во внутренней области шнура используются различные диагностики коллективного рассеяния СВЧ-излучения (брэгговские диагностики) [10, 11].

В рамках сообщения анализ временных выборок флуктуаций плотности плазмы проводился на основе данных, взятых с диагностик малоуглового (МУР) (длинноволновые флуктуации, длина волны  $\lambda \sim 4$  см) [12] и обратного (ОР) (коротковолновые флуктуации, длина волны  $\lambda \sim 2$  мм) [13] рассеяния излучения на первой гармонике гиротрона (рис. 1, табл. 1).

Флуктуации из области исследования для диагностик малоуглового (несколько градусов; требует полноволнового кода оценки длины флуктуаций) и обратного рассеяния (на  $180^\circ$ ; возможна простая оценка) отличаются углом рассеяния.

Связь между компонентами падающего и рассеянного излучения определяется условием Брэгга (1):

$$k = 2k_0 \sin(\varphi/2), \quad (1)$$

где  $k$  – волновой вектор измеряемых колебаний плазмы,  $k_0$  – волновой вектор источника излучения,  $\varphi$  – угол рассеяния.

Диагностики малоуглового и обратного рассеяния излучения гиротрона позволяют измерять длинноволновые и коротковолновые флуктуации плотности соответственно, в основном по всей внутренней области плазменного шнура (табл. 1). По ранее проведенным измерениям и оценкам [14], уровень флуктуаций плотности во внутренней части шнура (в широкой зоне  $r/a = 0-0.9$ ) составляет 10%.

## 2. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА ПЛАЗМЕННЫХ СИГНАЛОВ

Сигнал плазменной турбулентности, как правило, является смесью нескольких шумовых и де-

**Таблица 1.** Диагностики для измерения флуктуаций плотности плазмы во внутренней области шнура в стеллараторе JET

Диагностика	Длина волны $\lambda$ ,	$r/a$	Характер турбулентности
	см		
Обратное рассеяние излучения гиротрона	$\sim 0.2$	0–0.8	Коротковолновая (мелкомасштабная)
Малоугловое рассеяние излучения гиротрона	$\sim (3-6)$	0–0.8	Длинноволновая (крупномасштабная)

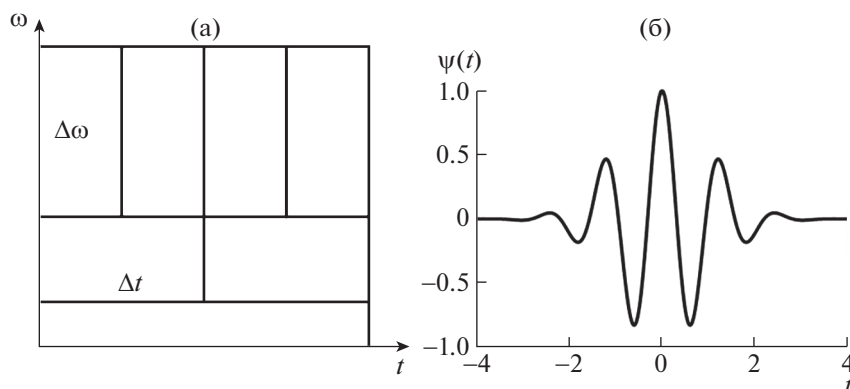


Рис. 2. Частотно-временная локализация (а) значений вейвлет-преобразования, базисная вейвлет-функция Морлет (б).

терминированных сигналов. Для обработки и анализа широкополосных зашумленных сигналов, измеренных диагностиками малоуглового и обратного рассеяния излучения гиротрона в стеллараторе Л-2М, было разработано программное обеспечение в среде Matlab. В программах были использованы численные алгоритмы для получения корреляционных функций, Фурье-спектров и вейвлет-анализа.

Недостатком корреляционного и спектрального Фурье-анализа является то, что данные методы не позволяют проанализировать временные характеристики сигналов, усредняя данные сигналы по длительности временного окна. Фурье-анализ является мощным аппаратом для цифровой обработки реальных сигналов при наличии большого количества шумов в канале, однако преобразованием Фурье отображаются только глобальные сведения о частотах исследуемого сигнала, поскольку базисные функции преобразования определены на бесконечном временном интервале. Для наблюдения поведений стохастического сигнала в частотной области во все моменты времени необходимо проводить Фурье-анализ с бесконечно малым окном и большим перекрытием окон, что является неэффективным и сложным для дальнейшей оценки.

Для точного исследования высокочастотных гармоник временной выборки необходим анализ коротких интервалов, а для низкочастотных составляющих – анализ длинных интервалов. Базисные функции вейвлетного преобразования имеют уменьшающееся с увеличением масштаба временное разрешение и увеличивающееся с масштабом разрешение по частоте, что дает хорошую временную локализацию на малых масштабах и хорошее частотное разрешение при больших масштабах (рис. 2а) [15]. В программах спектрального и когерентного вейвлет-анализа в данной работе была использована базисная вейвлет-функ-

ция Морлет, изображенная графически на рис. 2б, математически описанная выражением (2).

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t). \quad (2)$$

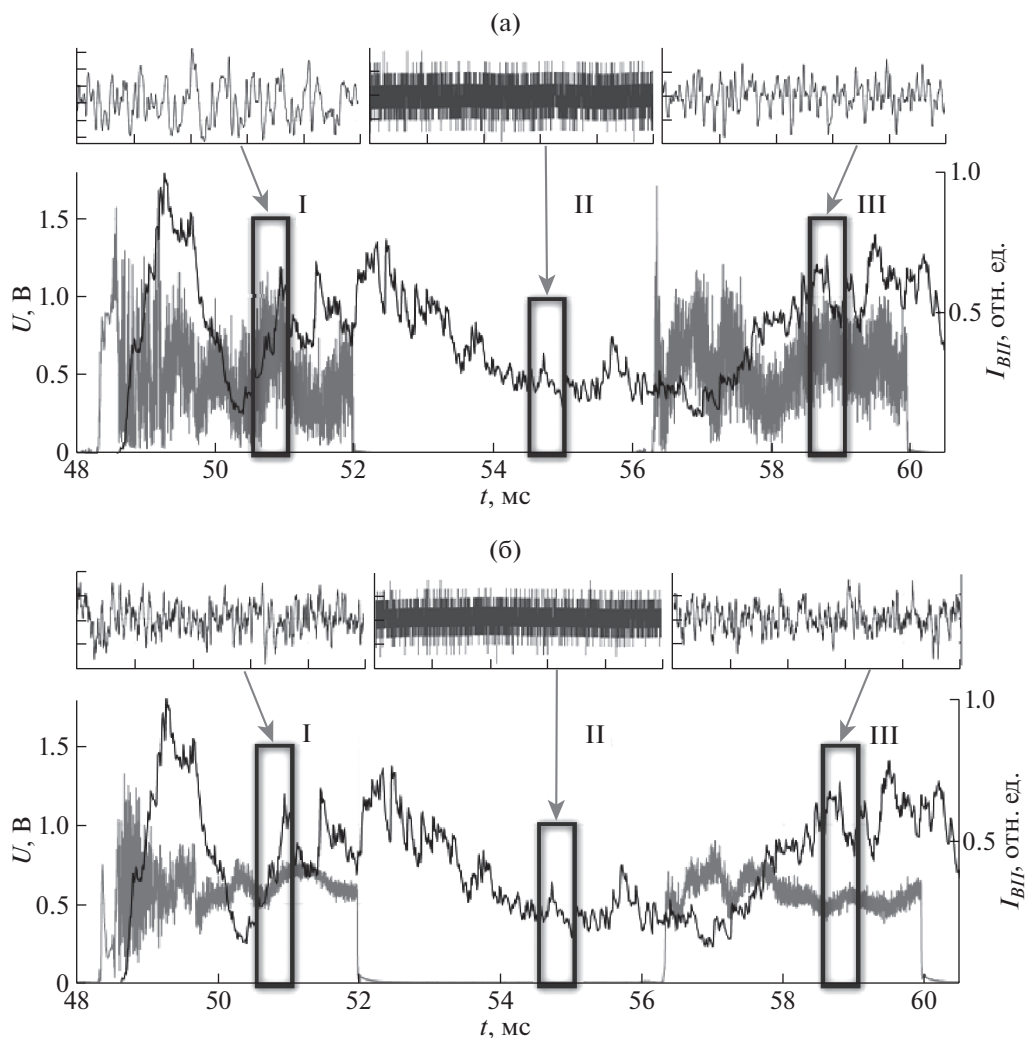
Алгоритмы обработки, разработанные в рамках данной работы, учитывают особенности плазменной турбулентности и позволяют производить анализ данных в различных временных окнах и с различным спектральным разрешением.

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В данной работе для анализа выбраны сигналы диагностик при мощности нагрева плазмы 0.4 МВт и многоимпульсном режиме работы гиротрона из экспериментальной сессии 2017 г. (плазменный разряд № 21374). Многоимпульсный режим подразумевает излучение серии из двух импульсов греющего гиротрона длительностью 4 мс с периодом следования 8 мс.

Временные выборки флуктуаций плотности плазмы сигналов диагностик малоуглового и обратного рассеяния излучения гиротрона представлены на рис. 3а и 3б соответственно (выделенные области отображают структуру сигналов после удаления постоянной составляющей, которая в данной работе вычислялась с помощью фильтра скользящего среднего,  $f_{\text{среза}} = 12.5$  кГц). Область I на данных рисунках соответствует временному окну 50.55–50.8 мс, область II: 54.55–54.8 мс, область III: 58.55–58.8 мс.

Под воздействием высокотемпературной плазмы происходит распыление покрытия внутренней стенки камеры стелларатора, полученного при боронизации [16] и в плазму попадает примесь (бор). Временной ход интенсивности излучения линии иона VII также представлен на рис. 3. В отсутствие СВЧ-импульса гиротрона диагностические измерения рассеянного излучения невозможны (по-



**Рис. 3.** Временная выборка флуктуаций плотности плазмы сигнала диагностики малоуглового рассеяния (а) и обратного рассеяния (б) (серый), временной ход интенсивности излучения линии иона  $BII$  (черный).

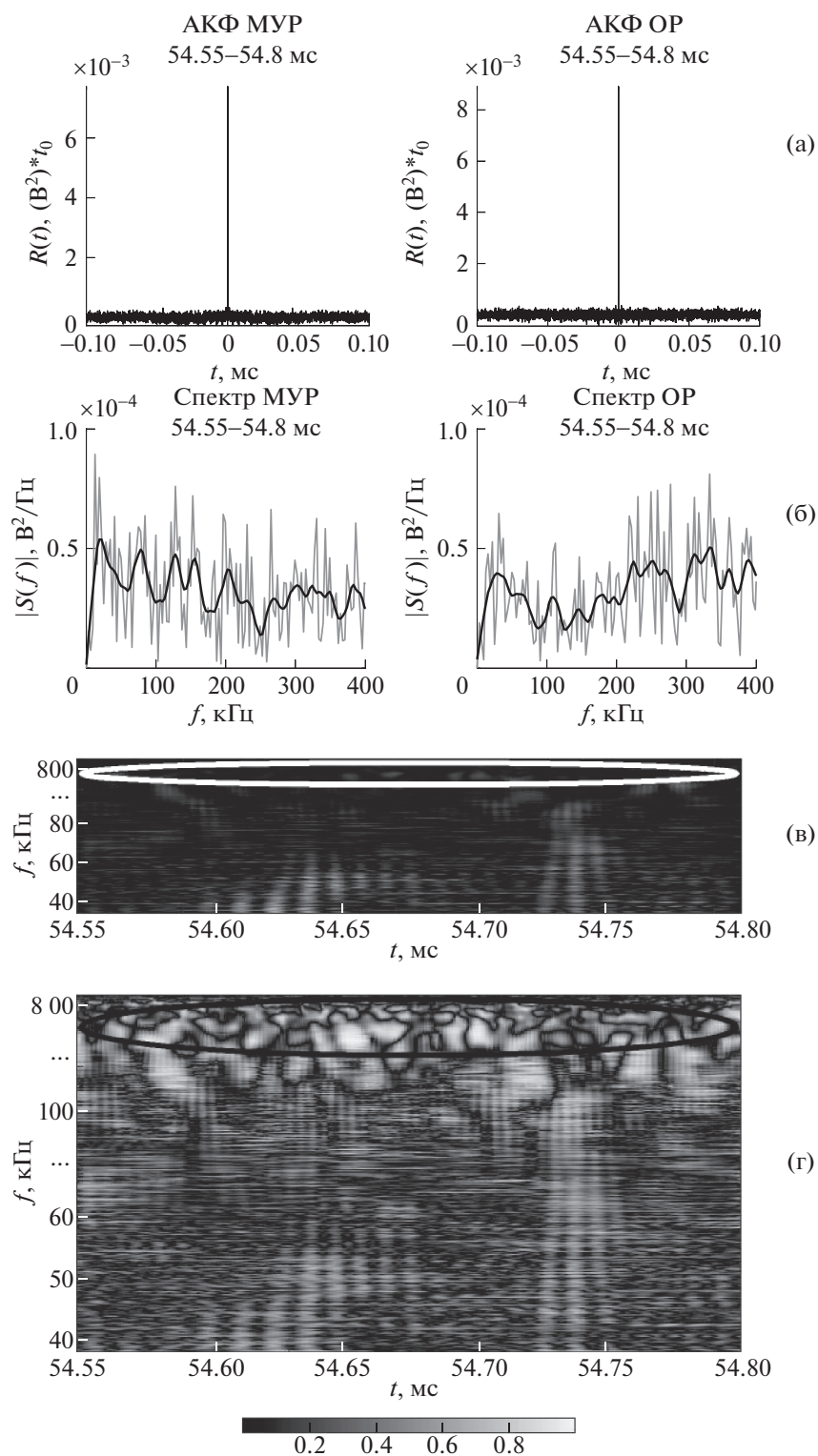
скольку зондирующим излучением является излучение гиротрона), однако плазма продолжает существовать (сохраняется электронная плотность плазмы и до некоторой степени электронная температура). Поэтому неудивительно, что линия иона  $BII$  наблюдается между импульсами СВЧ из плазмы. От разряда к разряду, по мере изменения параметров, меняется количество бора, поступающего со стенок камеры, так же, как и меняется количество накопленного бора внутри самого плазменного шнура, что видно по изрезанной структуре линии иона  $BII$ .

Для расширения обзора и корректного анализа данных проведена оценка шумов в измерительных трактах диагностик, поскольку сигналы плазменной турбулентности имеют широкополосный характер. В качестве исследуемого участка выбран временной отрезок 54.55–54.8 мс, соответствующий

сигналу в момент отсутствия СВЧ-импульса гиротрона (область II на рис. 3а, 3б).

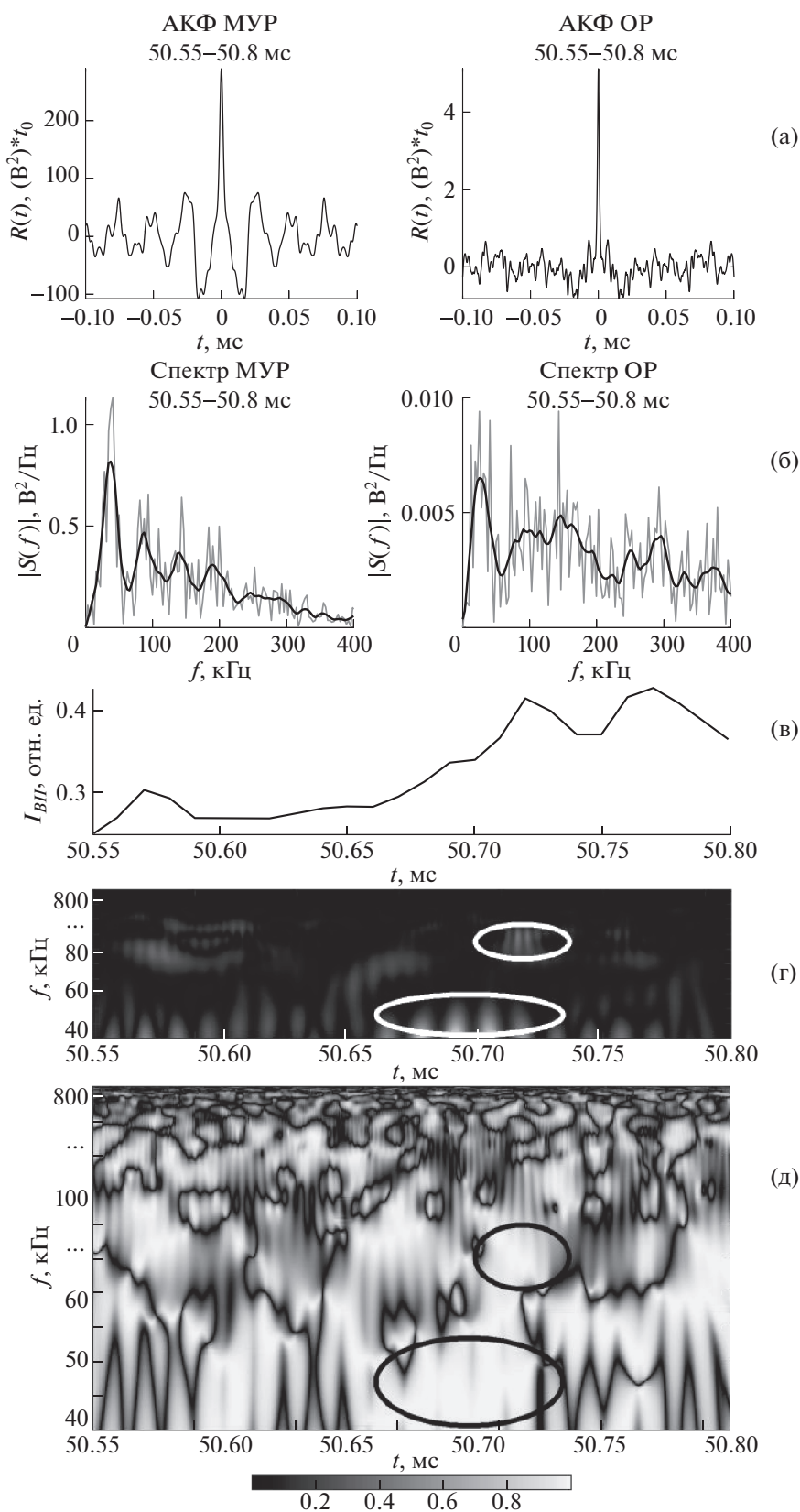
Корреляционные функции сигналов диагностик в момент отсутствия СВЧ-импульса гиротрона (рис. 4а) не имеют низкочастотных флуктуаций или боковых лепестков и носят шумовой характер ( $\sim$  дельта-функция). Фурье-спектры (рис. 4б) являются широкополосными без общих ярко выраженных гармоник. На вейвлет-скалограммах аппаратных шумов диагностик (рис. 4в) наблюдаются локальные максимумы только в области высоких частот (около 1 МГц, область выделена), что подтверждает шумовой характер исследуемых сигналов.

Корреляционные функции стационарных участков сигналов диагностик (области I и III на рис. 3а, 3б) носят шумовой характер без явной огибающей (рис. 5а, 6а), однако также присутствуют долгоживущие разномасштабные негар-

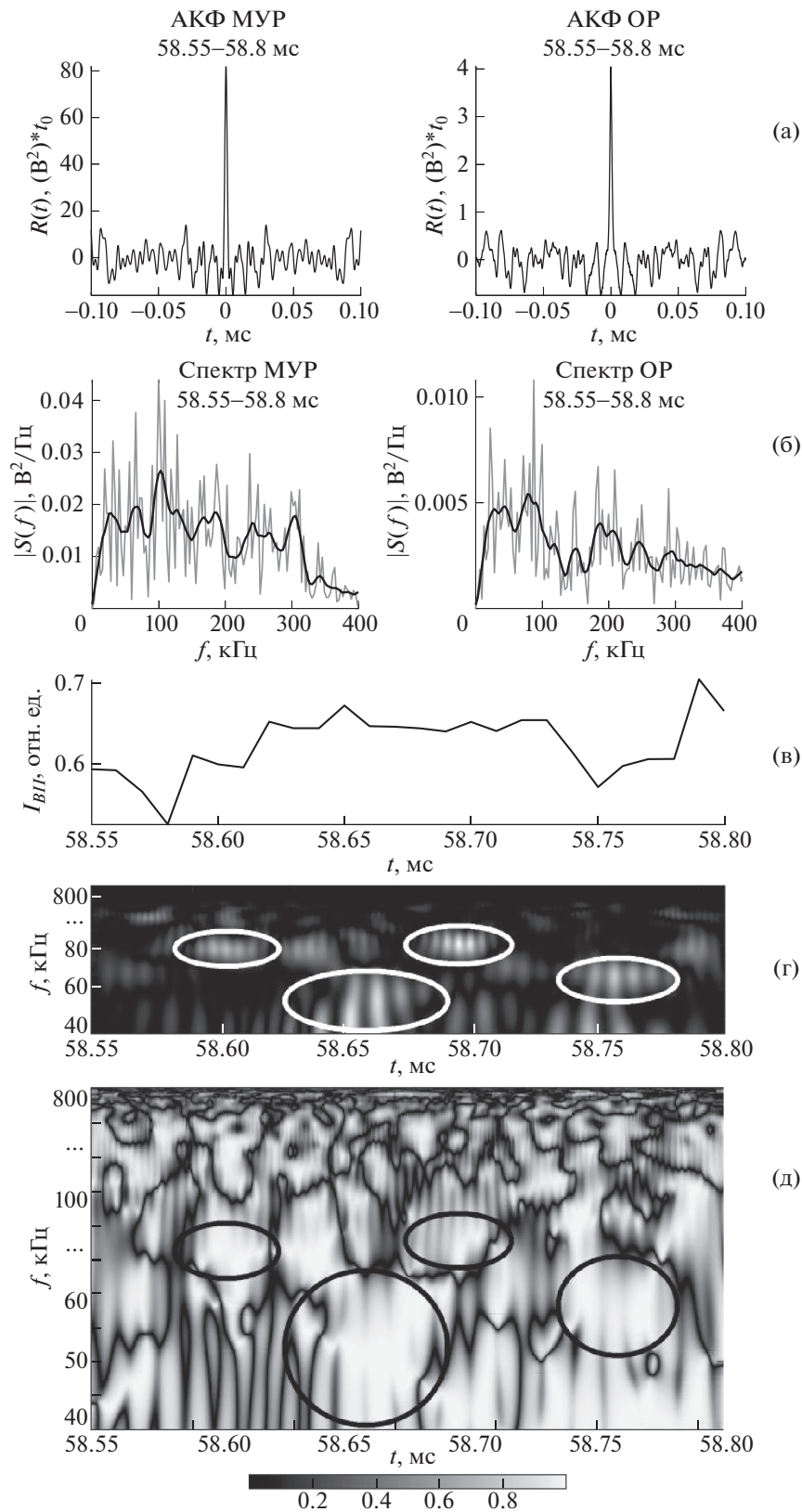


**Рис. 4.** Автоковариационные функции (а) и Фурье-спектры (б) сигналов диагностик МУР (слева) и ОР (справа) на участке 54.55–54.8 мс; черной линией проведено сглаживание по 10 точкам. Вейвлет кросс-спектр (в) и вейвлет-когерентность (г) сигналов МУР и ОР на участке 54.55–54.8 мс.

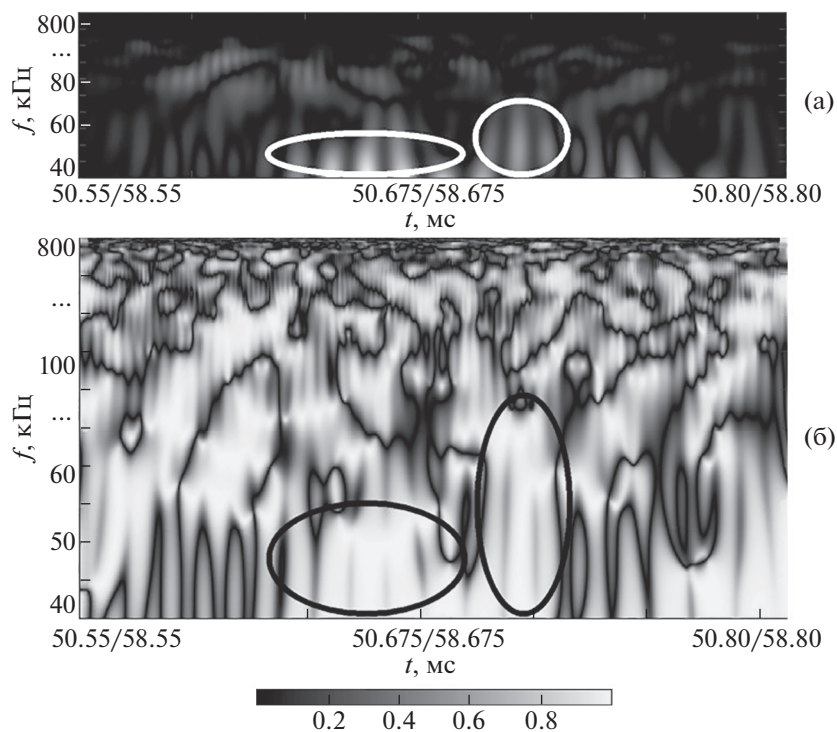




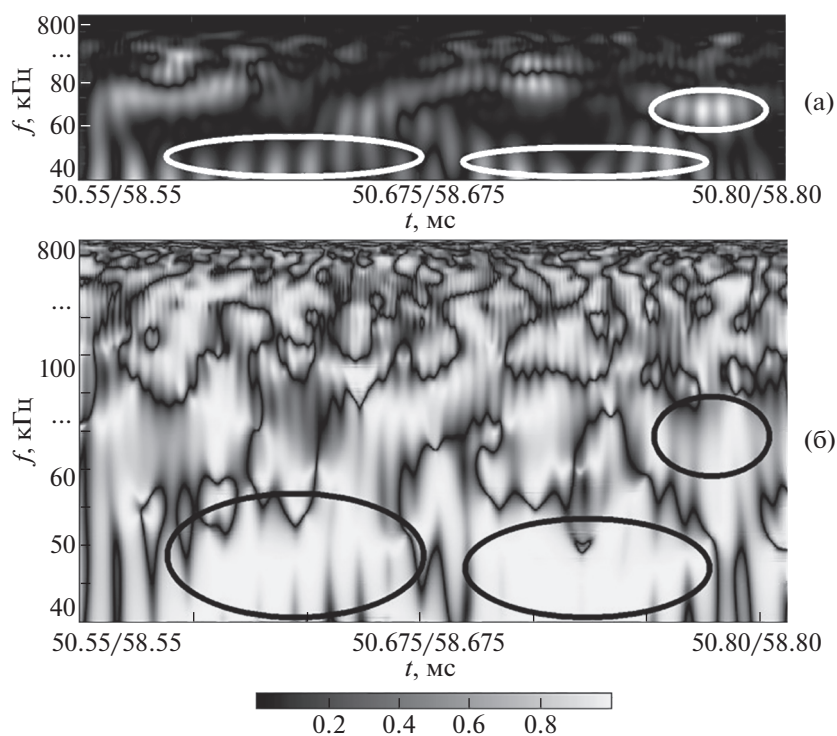
**Рис. 5.** Автоковариационные функции (а) и Фурье-спектры (б) сигналов диагностик МУР (слева) и ОР (справа) на участке 50.55–50.8 мс; черной линией проведено сглаживание по 10 точкам. Временной ход интенсивности излучения линии иона бора  $I_{BII}$  в разряде № 21374 на участке 50.55–50.8 мс (в); вейвлет кросс-спектр (г) и вейвлет-когерентность (д) сигналов МУР и ОР на участке 50.55–50.8 мс.



**Рис. 6.** Автоковариационные функции (а) и Фурье-спектры (б) сигналов диагностик МУР (слева) и ОР (справа) на участке 58.55–58.8 мс; черной линией проведено сглаживание по 10 точкам. Временной ход интенсивности излучения линии иона бора  $I_{BII}$  в разряде № 21374 на участке 58.55–58.8 мс (в); вейвлет кросс-спектр (г) и вейвлет-когерентность (д) сигналов МУР и ОР на участке 58.55–58.8 мс.



**Рис. 7.** Вейвлет кросс-спектр (а) и вейвлет-когерентность (б) двух импульсов (50.55–50.8 мс и 58.55–58.8 мс) диагностики сигнала МУР.



**Рис. 8.** Вейвлет кросс-спектр (а) и вейвлет-когерентность (б) двух импульсов (50.55–50.8 мс и 58.55–58.8 мс) диагностики сигнала ОР.



монические компоненты (боковые лепестки). Фурье-спектры на рабочем участке являются широкополосными, их полуширины превышают основную частоту сигнала ( $\Delta f/f_{\text{осн}} \gg 1$ ), что свидетельствует о том, что сигналы являются стохастическими, а характеристики плазмы сильно турбулентные (рис. 5б, 6б). На вейвлет-скалограммах сигналов диагностик (рис. 5в, 6в) наблюдаются неперiodические широкополосные структуры (на рисунках выделены области общих максимумов), как в длинноволновой, так и в коротковолновой турбулентности. Вихревые структуры миллиметрового (диагностика ОР) и сантиметрового (диагностика МУР) масштабов в сильной плазменной турбулентности коррелируют во времени. Коэффициент вейвлет-когерентности для протяженных во времени (низкочастотных) вейвлетов достигает 90%, что указывает на измерение двумя диагностиками одних и тех же случайно возникающих во времени вихрей.

Ранее была описана связь между структурным турбулентным потоком, определяемым вихревыми плазменными структурами на краю плазмы в стеллараторе Л-2М, и качеством внутренней стенки камеры стелларатора после боронизации [16]. В работе утверждается, что сначала происходит увеличение турбулентного потока на краю плазмы, после чего оптическая диагностика излучения иона *VII* показывает увеличение дополнительной примеси со стенки при истончении защитного слоя. По результату вейвлет-анализа можно сделать вывод, что структурная турбулентность разных масштабов в центре плазменного шнура и изменение количества примеси со стенки связаны между собой (временные окна 50.55–50.8 мс и 58.55–58.8 мс). Следует отметить, что диагностика излучения иона *VII* принимает сигнал со всей ширины плазменного шнура, поэтому измерения данной диагностики не являются пространственно локализованными.

Следует также отметить, что оба импульса сигналов диагностик малоуглового и обратного рассеяния излучения гиротрона имеют схожую структуру (временные и частотные масштабы), что подтверждает высокий коэффициент вейвлет-когерентности низкочастотных флуктуаций плотности плазмы (рис. 7, 8).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обработки данных о плазменной турбулентности была проведена оценка оконных корреляционных функций и Фурье-спектров для сигналов диагностик малоуглового и обратного коллективного рассеяния на первой гармонике излучения гиротрона (75 ГГц) при многоимпульсном режиме ЭЦР-нагрева плазмы гиротроном. Также для оценки стационарности спек-

тральных характеристик был проведен вейвлет-анализ сигналов диагностик с помощью базовой вейвлет-функции Морлет. Показано, что во внутренней области плазменного шнура существуют вихревые структуры, как в длинноволновой, так и в коротковолновой турбулентности, коррелирующие во времени.

С помощью вейвлет-анализа показано, что структурная турбулентность в разных масштабах в центре плазменного шнура и изменение количества примеси вследствие распыления защитного слоя покрытия внутренней стенки камеры стелларатора связаны между собой. Установление причинно-следственной связи между изменением турбулентности и распылением покрытия стенки камеры является существенно более трудной задачей и будет выполнено в последующих работах. Для чего будут использованы данные других диагностик турбулентных флуктуаций и дополнительные базовые вейвлет-функции.

Результаты по появлению и исчезновению турбулентных структур разных масштабов, полученные в ходе данного исследования, могут быть более исчерпывающие, нежели результаты аналитического исследования или численного моделирования. Данный физический эксперимент на стеллараторе Л-2М может стать базой для создания полноценной теории или модели структурной турбулентности высокотемпературной плазмы, так как он позволяет увидеть реальную картину процессов, протекающих в плазме.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научной группе стелларатора Л-2М, в особенности профессору Н.Н. Скворцовой, за помощь в измерениях и обсуждении результатов, а также И.А. Гришиной за предоставленные данные спектроскопии примеси.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы “Физика высокотемпературной плазмы. Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях”, номер темы FFWG-2019-0006.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shimada M. et al.* Progress in the ITER physics basis-Chapter 1: overview and summary // Nuclear Fusion. 2007. V. 47. P. S1–S17.
2. *Khvostenko P.P. et al.* Current status of tokamak T-15MD // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 164. P. 112211.
3. *Federici G. et al.* DEMO design activity in Europe: Progress and updates // Fusion Engineering and Design. 2018. V. 136. P. 729–741.

4. Hartfuss H.J., König R., Werner A. Diagnostics for steady state plasmas // Plasma physics and controlled fusion. 2006. V. 48. № 10. P. R83.
5. Васильков Д.Г., Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Вафин И.Ю., Гребеничиков С.Е., Гришина И.А., Иванов В.А., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Мещеряков А.И., Петрова М.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. В. 3. С. 79.
6. Meshcheryakov A.I. et al. Effect of vacuum chamber boronization on the plasma parameters in the L-2M stellarator // Plasma physics reports. 2005. V. 31. № 6. P. 452–461.
7. Борзосеков В.Д., Смирнов В.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021617541. 17.05.2021.
8. Акулина Д.К., Андрухина Э.Д., Бережецкий М.С., Гребеничиков С.Е., Воронов Г.С., Сбитникова И.С., Федянин О.И., Хольнов Ю.В., Шпигель И.С. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 1022.
9. Батанов Г.М., Белоусов В.И., Бондарь Ю.Ф., Борзосеков В.Д., Васильков Д.Г., Гребеничиков С.Е., Иванов И.А., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Матвеев Н.В., Мещеряков А.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В., Тай Е.М. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 79.
10. Жуковский В.Г. // Флуктуации плотности плазмы // М.: Энергоатомиздат, 1993. 272 с.
11. Froula D.H., Glenzer S.H., Luhmann N.C., Sheffield J. // Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation: Theory and Measurement Techniques // Academic Press (Elsevier). 2011. 497 p.
12. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Колик Л.В., Малахов Д.В., Петров А.Е., Пшеничников А.А., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2011. № 2. С. 70.
13. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Коврижных Л.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. С. 511.
14. Батанов Г.М., Бенинг В.Е., Королев В.Ю., Петров А.Е., Пшеничников А.А., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. Структурная плазменная низкочастотная турбулентность в стеллараторе L-2M // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. С. 974–983.
15. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003. С. 18–41.
16. Meshcheryakov A.I. et al. Effect of vacuum chamber boronization on the plasma parameters in the L-2M stellarator // Plasma physics reports. 2005. V. 31. № 6. P. 452–461.

## WAVELET ANALYSIS OF LOW-FREQUENCY FLUCTUATIONS IN PLASMA DENSITY UNDER MULTI-PULSE ECR HEATING IN THE L-2M STELLARATOR

**P. A. Nesterenko<sup>a</sup>, V. D. Borzosekov<sup>a</sup>, and V. A. Smirnov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*N.N. Andreev Acoustic Institute, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS I.A. Scherbakov

An example of obtaining a physical result based on spectral analysis of broadband noisy plasma signals measured by diagnostics of small-angle and reverse collective scattering of gyrotron radiation at the first harmonic (75 GHz) with multi-pulse ECR heating in the L-2M stellarator during boronization of the inner wall of the chamber is demonstrated. The results of high-frequency filtering of time samples of diagnostic signals, correlation analysis, spectral Fourier analysis, and wavelet analysis of plasma turbulence signals are presented.

*Keywords:* stellarator, boronization, microwave diagnostics, low-frequency plasma turbulence, spectral analysis, wavelet analysis