

На правах рукописи

Шевелев Александр Евгеньевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ
В КОМПАКТНЫХ ТОКАМАКАХ**

Специальность

01.04.08 – Физика плазмы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:	Лебедев Сергей Владимирович доктор физико-математических наук, Зам. директора по научной работе ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Официальные оппоненты:	Саврухин Петр Всеволодович доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела токамаков ККТЭПТ НИЦ «Курчатовский институт» Кашук Юрий Анатольевич кандидат физико-математических наук, Нач. отдела нейтронной и спектроскопической диагностики Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита диссертации состоится « » июня 2019 г. в « » часов на заседании диссертационного совета Д **002.205.03** по физико-математическим наукам (специальность **01.04.08** – Физика плазмы) в главном здании ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, улица Политехническая д. 26, Большой актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, улица Политехническая д. 26, и на сайте:

<http://www.ioffe.ru/>

Автореферат разослан « » мая 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д **002.205.03**,

кандидат физ.-мат. наук

Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

По мере того, как эксперименты по термоядерному синтезу с магнитным удержанием плазмы приближаются к разработке реакторов, таких как экспериментальный реактор ИТЭР и демонстрационный реактор ДЕМО, возникают ключевые технические и научные проблемы. В сочетании с чрезмерными электромагнитными силами, радиационными и тепловыми нагрузками, действующими на компоненты первой стенки камеры токамака, на стадии гашения разряда индуцируются сильные продольные (в тороидальном направлении) электрические поля. Если эти электрические поля достаточно велики, чтобы преодолеть диссипативный эффект кулоновских столкновений, они переводят плазменные электроны в режим неограниченного ускорения (так называемый режим «убегания») [1-4]. Срывы разряда в токамаках часто являются причиной образования популяций высокоэнергичных убегающих электронов (УЭ). Генерация интенсивных пучков УЭ с релятивистскими энергиями наблюдалась во время срывов на токамаках JET [5-9], Tore Supra [10], JT-60U [11] и TFTR [12]. Плотность УЭ, рожденных во время таких событий в больших токамаках, достаточно высока, чтобы обеспечить токи до 60-70% от величины плазменного тока непосредственно перед срывом [8]. Такие интенсивные пучки УЭ представляют собой серьезную проблему для безопасной работы токамаков, т.к. взаимодействие этих пучков с камерой приводит к сильным тепловым нагрузкам, распылению и плавлению материалов первых стенок. В токамаке Tore Supra пучок УЭ повредил активно охлаждаемый лимитер, что стало причиной утечки воды в вакуумную камеру [10]. Моделирование процесса убегания, которое может происходить при значительных срывах в ИТЭР, предсказывает возможность генерации токов УЭ до 10 МА в диапазоне энергий до нескольких десятков МэВ [13]. Локализованное взаимодействие таких интенсивных пучков УЭ с окружающими материалами неизбежно приведет к недопустимым нагрузкам и разрушению первой стенки [14]. Таким образом, контроль генерации убегающих электронов в плазме токамака является необходимым условием для безопасной работы на больших плазменных установках, таких как JET [8,9] или ИТЭР [15,16]. Согласно требованиям ИТЭР к диагностическим измерениям, в плазме реактора должны контролироваться два параметра: максимальная энергия УЭ и переносимый ими ток [15]. Максимальная энергия УЭ должна быть определена с точностью 20% в диапазоне до 100 МэВ. Ток, переносимый пучком УЭ на стадии гашения разряда, должен быть определен с 30% точностью. Временное разрешение для обоих параметров - 10 мс.

Выбор инструментов, позволяющих диагностировать рождение и эволюцию пучка ускоренных электронов в плазме и определять его параметры (энергетическое распределение и ток), ограничен. Гамма-спектроскопия горячей плазмы является фактически единственным методом, позволяющим оценить энергетическое распределение УЭ. Диагностика убегающих электронов в плазменном эксперименте методами гамма-спектроскопии является непростой задачей. Спектрометр должен обеспечивать стабильную работу в широком диапазоне скоростей счета, для работы в условиях высоких потоков нейтронного и гамма-излучения детекторы должны быть радиационно стойкими. Также, измерения проводятся в условиях наличия магнитных полей токамака, поэтому светоприемники детекторов должны быть либо

нечувствительны к их действию, либо хорошо экранированы. Сложность функции отклика спектрометра на гамма-излучение в комбинации с искажением спектра рентгеновского излучения, обусловленным его рассеянием на частицах плазмы и конструкционных материалах стенок и лимитеров, дополнительно усложняют восстановление энергетического распределения электронов в плазме.

Компактные токамаки предоставляют отличную возможность для изучения генерации и эволюции пучка убегающих электронов в режимах с различной плотностью и различными методами нагрева плазмы и поддержания плазменного тока. В имеющихся в ФТИ им. А.Ф. Иоффе токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М электроны могут ускоряться до энергий выше 10 МэВ, вызывая интенсивное тормозное излучение при взаимодействии с материалами лимитера и вакуумной камеры. Разработанные методики регистрации и анализа гамма-излучения могут быть применены и применяются при проектировании диагностических систем крупных плазменных установок, таких как крупнейший действующий токамак JET и токамак-реактор ИТЭР. Таким образом, развитие методов гамма-спектроскопии для диагностики убегающих электронов в компактных токамаках является актуальной научной задачей.

Цель данного исследования: развитие и практическое применение методов гамма-спектроскопии для исследования характеристик убегающих электронов в плазме токамаков.

Для достижения поставленной цели следовало решить следующие задачи:

1. Развить методы гамма-спектроскопии для обеспечения режима непрерывных измерений спектров жесткого рентгеновского излучения в плазменных экспериментах;
2. Разработать и ввести в строй гамма-спектроскопические системы диагностики убегающих электронов на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М для изучения убегающих электронов и их роли в различных физических явлениях;
3. Адаптировать алгоритмы восстановления энергетических распределений убегающих электронов по измеренным спектром жесткого рентгеновского излучения для применения в экспериментах на компактных токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М;
4. Исследовать методами гамма-спектроскопии характеристики убегающих электронов и их влияние на физику удержания плазмы в различных режимах работы токамаков ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Объект исследования - убегающие электроны в плазме токамаков в энергетическом диапазоне от 0,1 до 20 МэВ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- развиты методы спектроскопии гамма-излучения в экспериментах на токамаках;
- разработаны методологические основы спектроскопии гамма-излучения при помощи детекторов со сцинтилляторами $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, включая разработку методов цифровой обработки сигналов, записанных с высокой частотой дискретизации, позволяющие достичь скорости счета в спектроскопическом режиме измерений до 10^7 с^{-1} ;
- развиты алгоритмы восстановления энергетических распределений убегающих электронов по спектрам жесткого рентгеновского излучения, вызываемого взаимодействием электронов с материалами камеры токамака;

- получены новые экспериментальные данные о влиянии неустойчивостей и, в частности, «пилообразной» активности плазмы на удержание убегающих электронов в разрядах на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М;
- получены экспериментальные данные об эволюции энергетических распределений убегающих электронов в разрядах с омическим нагревом плазмы на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М;
- получены экспериментальные данные о влиянии нижнегибридного увлечения тока на поведение убегающих электронов в токамаке ФТ-2.

Практическая ценность полученных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- созданные спектрометры гамма-излучения нашли применение в экспериментальных исследованиях характеристик плазмы на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М;
- разработанные методики цифровой обработки и амплитудного анализа сигнала сцинтилляционных детекторов применяются в экспериментах с термоядерной плазмой на токамаках JET и ASDEX Upgrade;
- разработанные методики регистрации высокоэнергичного гамма-излучения и восстановления энергетического распределения убегающих электронов будут применены при проектировании гамма-спектрометрического комплекса для диагностики плазмы термоядерного реактора ИТЭР.

Положения, выносимые на защиту:

1. На токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе в результате разработки систем детектирования и методик обработки сигналов сцинтилляционных детекторов осуществлен переход от потоковых измерений жесткого рентгеновского излучения к непрерывной регистрации его спектров с временным разрешением $1 \div 5$ мс;
2. Разработана мульти-детекторная гамма-спектрометрическая система на токамаке ТУМАН-3М в составе двух $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и одного $\text{NaI}(\text{Tl})$ спектрометров, позволяющая проводить анализ распределений жесткого рентгеновского излучения при скорости счета квантов до 10^7 c^{-1} ;
3. Проведено численное моделирование методом Монте-Карло спектра тормозного излучения, генерируемого убегающими электронами в токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М, а также функций отклика гамма-детекторов, используемых в измерениях спектров УЭ на данных токамаках;
4. Получены результаты исследования эволюции максимальной энергии убегающих электронов (E_{max}) в различных режимах работы токамаков по спектрам жесткого рентгеновского излучения. Результаты анализа механизмов, ограничивающих E_{max} на токамаках ФТ-2 и ТУМАН-3М;
5. Получены результаты исследования влияния пилообразных колебаний на функцию распределения убегающих электронов. Вывод о превышении E_{max} убегающих электронов в фазе срыва пилы над ее величиной в фазе роста на Глобусе-М и ТУМАН-3М. Оценен коэффициент диффузии убегающих электронов в разрядах с пилообразными колебаниями на токамаке ТУМАН-3М.

Апробация работы

Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены на научных семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на научных семинарах в зарубежных лабораториях: на токамаке ASDEX Upgrade, Институт Физики Плазмы им. Макса Планка, г. Гархинг, Германия; на токамаке JET, Калэмский научный центр, г. Абингдон, Великобритания; на токамаке COMPASS, Институт Физики Плазмы, Прага, Чехия.

Полученные результаты представлены и обсуждены на международных совещаниях экспертных групп ИТРА (International Tokamak Physics Activity) по диагностике (ИТРА Diagnostics Topical Group) и физике энергетических частиц (ИТРА Energetic Particle Physics Topical Group), в которых автор является представителем России.

Результаты и материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в ведущих журналах по физике плазмы и экспериментальной ядерной физике «Nuclear Fusion», «Plasma Physics and Controlled Fusion», «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment», «Review of Scientific Instruments», «Приборы и техника эксперимента», «Физика Плазмы», «Письма в Журнал Технической Физики», и других.

Результаты были представлены на международных и всероссийских конференциях:

- Звенигородская (Международная) конференция по физике плазмы и УТС (2004, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015, 2018 гг.)
- Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (2003, 2007, 2017 гг.)
- EPS Conference on Plasma Physics (1998, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2010, 2001, 2013, 2015 гг.)
- International Conference on Burning Plasma Diagnostics; Varenna, Italy; 24-28 September 2007;
- IAEA Fusion Energy Conference (2010, 2012, 2014, 2016, 2018 гг.)
- International Conference on Fusion Reactor Diagnostics, Varenna, Italy, September 9-13, 2013;
- 2nd European Conference on Plasma Diagnostics, Bordeaux, France, April 18-21, 2017.

Личный вклад автора в решение поставленных задач

Автором лично сформулированы цель диссертационной работы и задачи, которые было необходимо решить для ее достижения; изучено современное состояние проблемы гамма-спектроскопических измерений термоядерной плазмы; осуществлено руководство работами по разработке гамма-спектрометров для диагностики убегающих электронов на компактных токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М; проведено моделирование методом Монте-Карло спектров тормозного излучения, генерируемого энергичными электронами в этих токамаках; проведено моделирование функций отклика детекторов, используемых при обработке измерений жесткого рентгеновского излучения в экспериментах на токамаках ФТИ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 158 страниц текста, включающего 6 таблиц и 72 рисунка.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы работы, сформулированы ее цель и задачи, определен объект исследования, показаны научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, представлены научные положения, выносимые на защиту, описаны апробация работы на семинарах и конференциях различного уровня, личный вклад автора в разработку проблемы, раскрыта структура диссертации, дана характеристика каждой главы.

В первой главе рассмотрены теоретические вопросы, связанные с генерацией убегающих электронов в плазме токамаков, а также факторы, влияющие на их энергетическое распределение. Изучение убегающих электронов в плазме токамака невозможно без исследования механизмов их возникновения. Долгое время появление убегающих электронов считалось хорошо изученным феноменом, и соответствующей причиной, считался один (основной) физический механизм, также называемый «традиционным», «первичным» или «дрейсеровским» [1,2]. Ускорение в этом случае вызвано действием электрического поля. Электрическая сила, действующая на электроны, в этом случае должна превосходить силу трения, действующую на основную массу электронов с тепловыми скоростями. С увеличением скорости электронов сечение взаимодействия их с тепловыми электронами и ионами плазмы падает, что выражается в их неограниченном ускорении. В результате теоретических и экспериментальных исследований было обнаружено, что существует другой, принципиально отличный от традиционного, но зачастую не менее важный механизм генерации быстрых электронов, предположительно особенно значимый для больших установок: «лавинный» или «вторичный» механизм рождения убегающих электронов [16]. В этом случае быстрые электроны, существующие в плазме, передают в результате близких столкновений импульс тепловым электронам и переводят их в режим неограниченного ускорения.

В последнее время, в свете разработки больших токамаков-реакторов ИТЭР и DEMO, внимание ученых привлекли еще два механизма возникновения быстрых электронов термоядерной плазме: электроны, рожденные в результате распада трития с максимальной энергией 18 кэВ, и электроны приобретающие энергию в результате взаимодействия интенсивных потоков гамма-излучения с электронами плазмы и материалов камеры токамака (так называемые «комптоновские» электроны, т.к. основным механизмом взаимодействия гамма-излучения с веществом в области МэВ-ных энергий является комптоновское рассеяние на электронах). Эти два механизма даже в отсутствие условий образования первичных УЭ способны запустить механизм их вторичной генерации [17]. В главе рассмотрены все механизмы генерации быстрых электронов в плазме токамака.

В первой главе также рассмотрены факторы, ограничивающие рост энергии электронов при их ускорении в вихревом электрическом поле: (1) доступное время для ускорения электронов; (2) дрейфовое смещение орбиты, растущее по мере увеличения скорости (энергии) электронов; (3) резонансное взаимодействие с возмущениями магнитного поля, приводящее к ускоренному выходу электронов на стенку; (4) потери энергии на синхротронное излучение; (5) потери энергии на тормозное излучение и (6) развитие плазменных неустойчивостей. Все эти факторы, влияющие на энергетическое распределение УЭ, наблюдаются и могут быть изучены на компактных токамаках.

Во второй главе рассмотрены основные типы детекторов гамма-излучения, которые могут быть применены при измерениях жесткого рентгеновского излучения из плазмы токамаков. В настоящее время есть широкий выбор инструментов для регистрации гамма-излучения в суб-МэВ-ном и МэВ-ном диапазонах энергий. Измерения

пространственного распределения излучения надтепловых электронов с энергией до 300 кэВ производится полупроводниковыми детекторами с кристаллами небольшого объема [18]. Для регистрации жесткого рентгеновского излучения (РИ), генерируемого убегающими электронами с энергией выше 100 кэВ предпочтительным выбором является использование тяжелых неорганических сцинтилляторов [A1, A3]. Недавно разработанные кристаллы $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и CeBr_3 позволяют проводить спектрометрические измерения при скорости счета детектора до 10^7 c^{-1} [A12].

Использование фотоэлектронных умножителей в качестве фотоприемников гамма-спектрометров на сегодняшний день является предпочтительным вариантом при измерениях с высокими скоростями счета. Однако, т.к. измерения гамма-спектров в плазменном эксперименте производятся в условиях высокого магнитного поля, сцинтилляционные детекторы с ФЭУ требуют надежной магнитной экранировки. При невозможности обеспечить магнитную защиту детектирующего устройства используются полупроводниковые фотоприемники, которые пока уступают ФЭУ в предельной скорости счета и иногда демонстрируют нелинейность усиления в зависимости от энергии и загрузки детектора [A7, 19].

В третьей главе приведен обзор разработки систем сбора и обработки информации спектрометрических систем гамма-диагностики, реализованных на компактных токамаках в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М [A1, A2, A3, A5, A6, A10, A12, A14, A15]. Сначала, в диагностических системах использовались сцинтилляционные детекторы с хорошо известными тяжелыми неорганическими кристаллами $\text{NaI}(\text{Tl})$ и BGO [A1, A2]. Сигнал обрабатывался классическими АЦП с буферной памятью, позволявшими записывать за время разряда ограниченное число амплитудных спектров [A2, A3]. Развитие цифровых технологий дало возможность использовать в системах устройства, оцифровывающие сигнал детекторов за все время разряда с высокой частотой дискретизации и записывающие осциллограмму в память персонального компьютера для последующей обработки. Применение новых устройств потребовало проведения разработок новых алгоритмов цифровой обработки сигнала и построения энергетических спектров [A1, A3, A4].

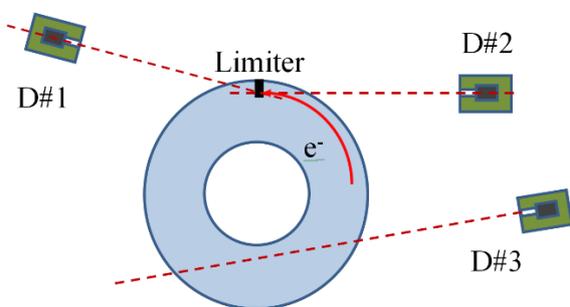


Рисунок 1 – Схема расположения гамма-детекторов вокруг камеры токамака ТУМАН-3М. Вид сверху [A14]

Появившиеся новые сцинтилляторы $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с очень короткой постоянной времени высвечивания ($\sim 16 \text{ нс}$) позволили значительно расширить загрузочный диапазон измерений в спектрометрическом режиме до 10^7 c^{-1} [A12, A14, A15]. Это дало возможность исследовать явления с очень короткими характерными временами, как например, развитие неустойчивости срыва [A14].

В настоящее время на всех токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе проводятся исследования поведения убегающих электронов с использованием самых передовых спектрометров на основе кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с устройствами записи сигнала со скоростью оцифровки 250 МГц и выше. На токамаке

ТУМАН-3М была разработана мульти-детекторная гамма-спектрометрическая система в составе двух спектрометров $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и одного $\text{NaI}(\text{Tl})$ [A14]. Спектрометры $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ направлены на лимитер токамака под различными углами, а $\text{NaI}(\text{Tl})$ просматривает плазму квази-тангенциально. Такая конфигурация расположения спектрометров позволяет проводить спектрометрические измерения РИ в разрядах с различной плотностью плазмы с генерацией пучков УЭ, переносящих значительный ток. Схема расположения детекторов вокруг камеры токамака ТУМАН-3М показана на рисунке 1.

Четвертая глава посвящена решению проблемы восстановления энергетического распределения убегающих электронов по регистрируемому рентгеновскому излучению из камеры токамака. В ФТИ им А.Ф. Иоффе был разработан код DeGaSum [A8, A10, A12], использующий алгоритмы преобразования (деконволюции) спектров гамма-излучения. Алгоритм основан на применении метода максимально вероятной оценки с использованием ожидаемой максимизации (maximum likelihood estimation using expectation maximization, ML-EM), известного так же как метод Ричардсона-Луси [20-22].

Код использует предварительно рассчитанные методом Монте-Карло функции генерации тормозного излучения, вызванного взаимодействием ускоренных электронов с компонентами плазмы или материалами камеры токамака и лимитера, а также функции отклика детектора на моноэнергетическое гамма-излучение. Моделирование производится с помощью кода MCNP (Monte Carlo N-particle code) в диапазоне, максимальная граница которого определяется максимально возможной энергией электронов, достижимой при непрерывном ускорении на данной установке. MCNP моделирование было проведено для реалистичных геометрий экспериментальных установок и гамма-спектрометров, используемых в экспериментах на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М. На рисунке 2 показаны результаты MCNP расчетов энергетических распределений потоков тормозного излучения, излучаемого в поле зрения детекторов, вызываемого взаимодействием моноэнергетических электронов с энергией 5 МэВ с материалом лимитера в направлении детекторов D1 (синяя точечная линия) и D2 (красная линия пунктирная), а также распределение тормозного излучения, испускаемого в направлении D3 (черная линия) из дейтериевой плазмы с примесью углерода на токамаке ТУМАН-3М. Расположение детекторов соответствует схеме, показанной на рисунке 1 [A14].

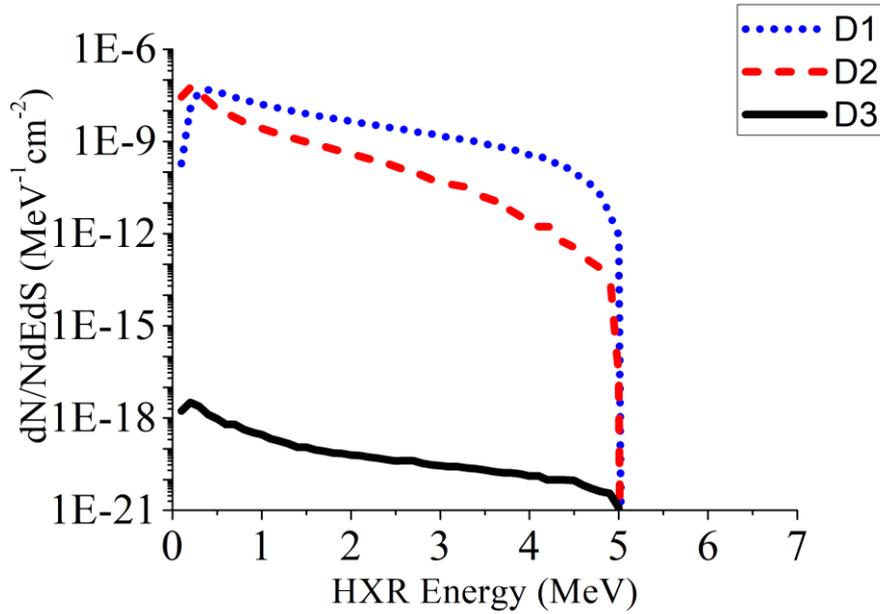


Рисунок 2 – Энергетическое распределение потоков тормозного излучения, испускаемого на токамаке ТУМАН-3М в направлении детекторов D1, D2 и D3, рассчитанное MCNP кодом для энергии электронов 5 МэВ [A14]

На рисунке 3 показаны примеры функций отклика детектора, используемого в гамма-спектрометрических измерениях на токамаке ФТ-2.

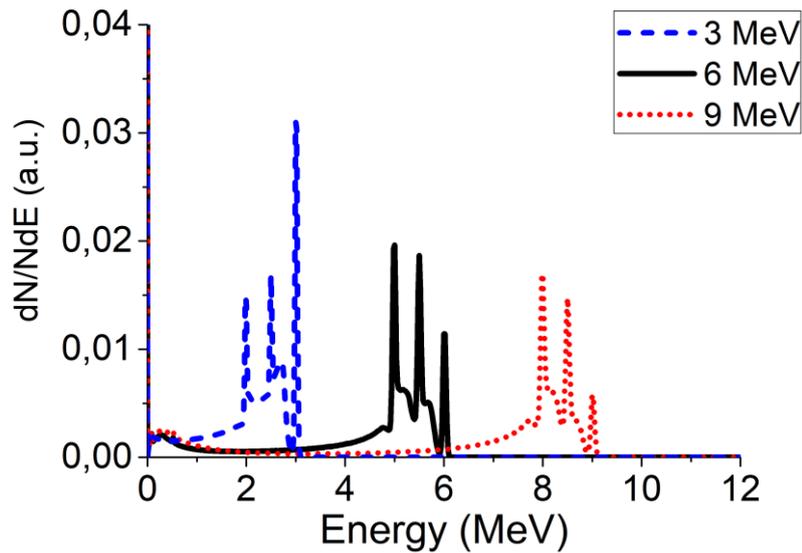


Рисунок 3 – Функции отклика детектора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ $\varnothing 25,4$ мм \times 76,2 мм, использованного в измерениях на токамаке ФТ-2, рассчитанные для моноэнергетических гамма-квантов 3, 6 и 9 МэВ [10]

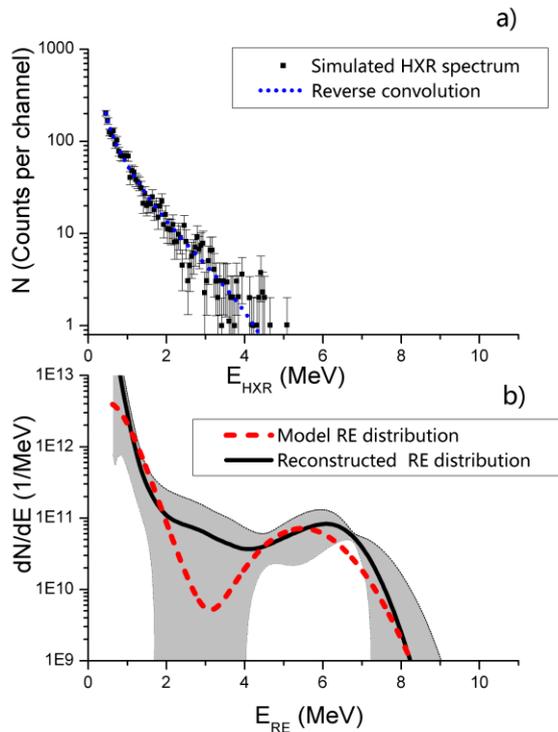


Рисунок 4 - Восстановление ФЭРУЭ по модельному спектру HXR с низкой статистикой: (а) Модельный спектр HXR (черные точки) и результаты свертки полученной ФЭРУЭ с функциями отклика детектора; (б) модельная (красная пунктирная линия) и восстановленная (черная линия) функции распределения убегающих электронов [A15]

Точность восстановления функций энергетических распределений убегающих электронов (ФЭРУЭ) кодом DeGaSum была проверена в серии модельных экспериментов с синтезированными сигналами детекторов, соответствующими заданным распределениям УЭ [A15]. На рисунке 4(а) показан модельный спектр жесткого РИ с низкой статистикой ($2,9 \cdot 10^3$ событий), соответствующий заданному распределению УЭ, приведенному на рисунке 4 пунктирной линией. Результат деконволюции показан на рисунке 4 сплошной линией. Области неопределенностей, полученные методом Монте-Карло при обработке кодом DeGaSum спектра, отмечены затемненной областью. На рисунке видно, что восстановленное распределение в достаточной степени совпало в областях низких и высоких энергий. В области средних энергий полученное распределение имеет большую неопределенность, что можно объяснить недостаточной статистикой модельного спектра. Тем не менее, результат можно признать удовлетворительным, т.к. максимальная энергия электронов была получена с высокой степенью точности, а форма восстановленного распределения близка к заданной функции.

Разработанная методика была проверена в измерениях жесткого РИ в экспериментах на токамаке ТУМАН-3М [A14]. Был проведен анализ одновременных измерений спектров жесткого РИ детекторами D1, D2 (LaBr₃(Ce)) и D3 (NaI(Tl)), расположенными, как показано на рисунке 1. Чтобы получить примерно одинаковую загрузку детекторов D1 и D2, были использованы свинцовые attenuators разной толщины, установленные перед коллиматорами спектрометров. Результаты восстановления ФЭРУЭ для всех трех детекторов представлены на рисунке 5. Спектры жесткого РИ, записанные детекторами D1, D2 и D3 в течение 30-100 мс разряда ТУМАН-3М № 17050310 с низкой плотностью показаны точками на рисунках 5(а), 5(с) и 5(е), соответственно. На рисунках 5(б) и 5(д) представлены энергетические распределения выходящих на лимитер электронов, полученные путем деконволюции спектров РИ, зарегистрированных детекторами D1 и D2, соответственно. На рисунке 5(ф) показано восстановленное энергетическое распределение УЭ, прошедших через видимый детектором D3 объем плазмы. Неопределенности распределений электронов отмечены штрихованными областями. Линиями на рисунках 5(а), 5(с) и 5(е) показаны свертки полученных распределений электронов с функциями отклика детекторов. Поскольку спектры РИ измерялись в течение почти всего времени

разряда (30-100 мс), полученные распределения включают все стадии развития разряда. Форма распределения отражает не только процесс ускорения электронов, но также пространственное распределение электронного пучка и процессы, влияющие на его удержание.

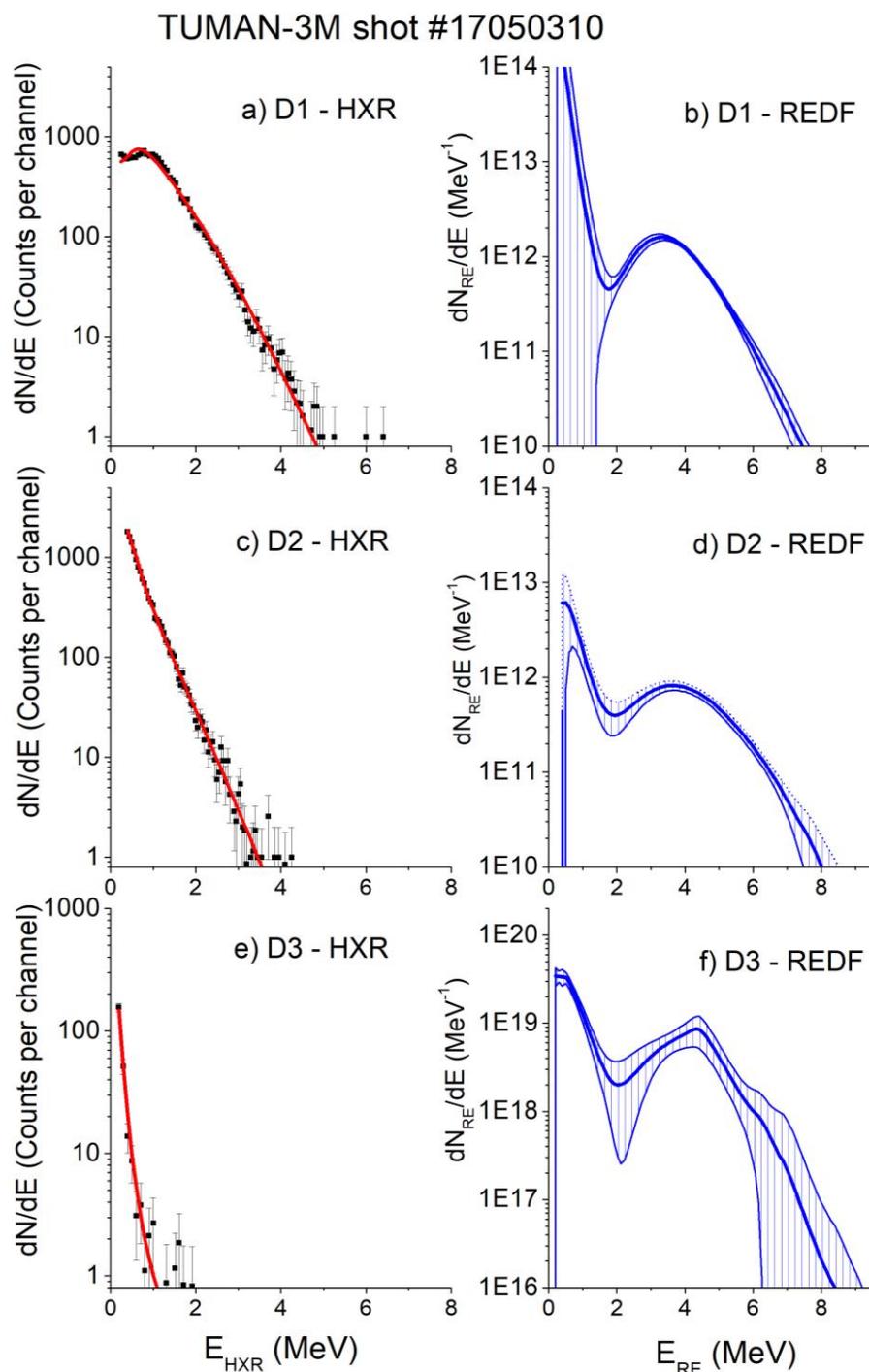


Рисунок 5 - Восстановление ФЭРУЭ по спектрам жесткого РИ, зарегистрированным одновременно детекторами D1, D2 (LaBr₃(Ce)) и D3 (NaI(Tl)) в течение 30-100 мс разряда ТУМАН-3М # 17050310: а) спектр жесткого РИ, D1; б) ФЭРУЭ, D1; в) спектр жесткого РИ, D2; д) ФЭРУЭ, D2; е) спектр жесткого РИ, D3; ф) энергетическое распределение удерживаемых электронов в видимом детектором D3 объеме, [A14]

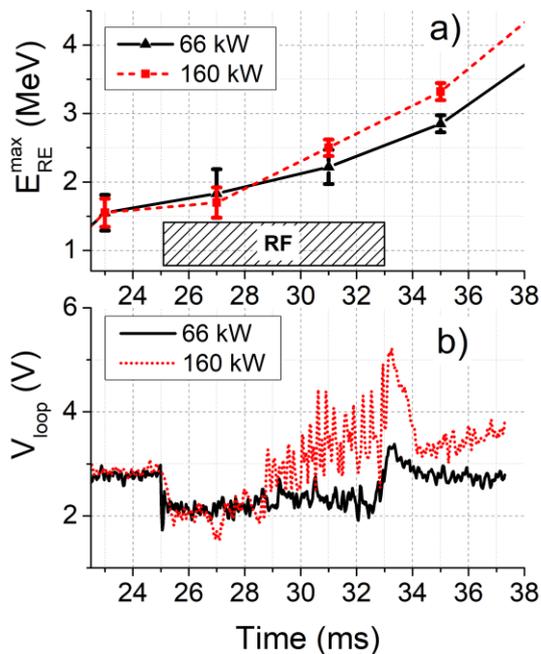


Рисунок 6 - а) Измеренные максимальные энергии электронов, вылетевших на лимитер в разрядах ФТ-2 с различной вводимой нижегибридной мощностью: 66 кВт - треугольники, сплошная линия; 160 кВт - квадраты, пунктирная линия. Импульс НГГТ отмечен заштрихованным прямоугольником; б) V_{loop} – напряжение на обходе в разряде с вводимой ВЧ мощностью 66 кВт (сплошная линия) и в разряде с мощностью 160 кВт (пунктирная линия) [A15]

Спектрометр жесткого РИ был использован для измерения рентгеновского излучения в экспериментах по ВЧ пробую, подъему и поддержанию тороидального тока в сферическом токамаке Глобус-М с помощью волн нижегибридного диапазона частот без приложения индукционного вихревого электрического поля [A9]. Величина полученного тока достигала 17 кА, его направление зависело от направления вертикального магнитного поля. По совокупности экспериментальных данных можно предположить, что основная доля генерируемого тока переносится пучком надтепловых электронов. Максимальная энергия пучка быстрых электронов, рожденных с помощью ВЧ волн, измеренная с помощью спектрометра жесткого рентгеновского излучения, составила 0,9 МэВ.

Анализ разрядов из серии экспериментов на токамаке ФТ-2 с генерацией тока с помощью ВЧ волн нижегибридного диапазона (НГГТ) показал, что ФЭРУЭ, полученная с помощью диагностики жесткого РИ, следует за изменением параметров плазмы ФТ-2 [A15]. Эволюция E_{max} убегающих электронов в разрядах с НГГТ исследовалась с временным разрешением 1÷5 мс, что отвечает требованиям к диагностике УЭ на токамаках (на ИТЭР должно быть обеспечено определение E_{max} с

Пятая глава посвящена результатам применения методов гамма-спектрометрии для диагностики убегающих электронов в компактных токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Использование в измерениях на токамаках ФТИ спектрометров жесткого рентгеновского излучения с высоким временным разрешением, использующих устройства, оцифровывающие сигнал детекторов с высокой частотой дискретизации, дало возможность наблюдать всплески жесткого РИ, коррелирующие с различными модами МГД-активности [A3]. Применение быстрых детекторов LaBr₃(Ce) позволило анализировать энергетическое распределение УЭ во время пилообразных колебаний [A14, A15]. Проведенные измерения продемонстрировали присутствие более высокоэнергичных электронов во вспышках жесткого РИ в фазах срывов «пилы» по сравнению с периодами между срывами (токамаки Глобус-М и ТУМАН-3М). Анализ энергетических распределений УЭ, полученных с помощью кода DeGaSum, позволил оценить время удержания УЭ в ТУМАН-3М во время пилообразной активности ~10 мс, что соответствует среднему коэффициенту радиальной диффузии $D_{yэ} \sim 0,8 \text{ м}^2/\text{с}$ [A14].

временным разрешением не более 10 мс). Во время исследований четкая корреляция между вводимой мощностью НГТТ и E_{max} наблюдалась только при низкой мощности, когда Z_{eff} слабо менялся во время ВЧ импульса. В этом случае замедление нарастания E_{max} обусловлено снижением величины напряжения обхода (см. рисунок 6). Во время импульса НГТТ на сигналах МГД активности, 10 ГГц излучения и жесткого РИ наблюдались вспышки, похожие на пилообразные колебания [A15].

Код DeGaSum был применен для определения максимальной энергии убегающих электронов с помощью восстановления энергетического распределения УЭ, выходящих из плазмы и взаимодействующих с материалами лимитера и камеры токамака в экспериментах на токамаках ФТ-2 и ТУМАН-3М [A10, A12, A14, A15]. Максимальная энергия УЭ E_{max} , полученная с использованием кода DeGaSum, показала достаточно хорошее согласие с результатами численных расчетов динамики ускорения УЭ, проведенных методом пробной частицы. Численные расчеты рождения и ускорения электронов для параметров токамака ФТ-2 также показали, что часть убегающих электронов, рожденных на ранней стадии плазменного разряда, доживает до конца разряда.

Численные расчеты ускорения электронов в разрядах на токамаке ТУМАН-3М вместе с экспериментальным наблюдением показали, что часть убегающих электронов, рожденных на ранней стадии плазменного разряда ($20 \text{ мс} < t < 35 \text{ мс}$), может сразу теряться или их популяция не растет в достаточной мере для преодоления порога чувствительности детектора, что объясняется магнито-гидродинамической активностью на ранней стадии разряда. В то время как УЭ, родившиеся после $t \geq 35 \text{ мс}$, удерживаются в плазме до конца разряда [A14].

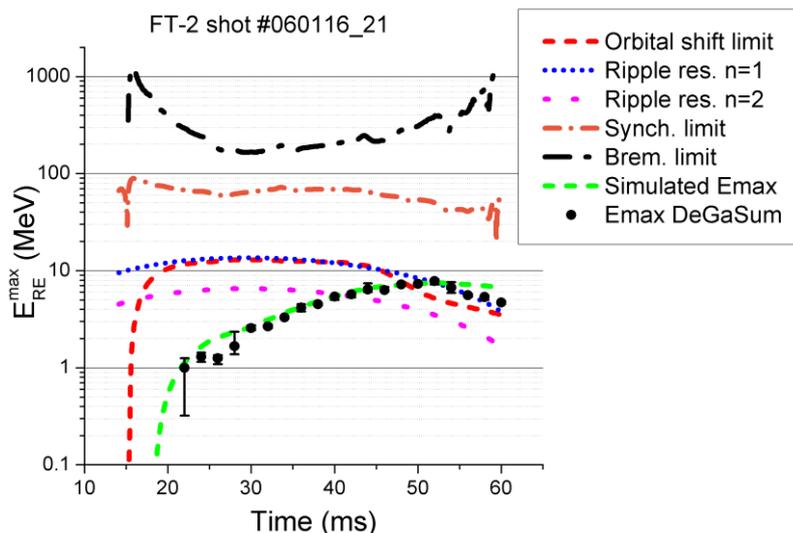


Рисунок 7 – Расчетные пределы максимальной энергии УЭ в сравнении с результатами моделирования и экспериментальными наблюдениями [A15].

На рисунке 7 жирными точками показана эволюция E_{max} УЭ, полученная с помощью кода DeGaSum при обработке спектров РИ, записанных в разряде ФТ-2 [A15]. Для сравнения пунктирной линией показана эволюция энергии электронов, рожденных на 18 мс разряда, рассчитанная с помощью уравнений пробной частицы. Также на рисунке показаны ограничения на рост максимальной энергии УЭ, накладываемые различными процессами в плазме: орбитальным сдвигом дрейфовой траектории электронов (красная

штриховая линия); резонансным $n=1$ и $n=2$ взаимодействием с возмущениями магнитного поля (точечная линия и штриховая линия, соответственно); синхротронным (линия штрих/точка) и тормозным излучением (линия длинный/короткий штрих). Численный анализ и экспериментальное наблюдение с помощью спектрометра жесткого РИ также позволили предположить, что предел, определяемый орбитальным сдвигом дрейфовой траектории, является ограничивающим механизмом ускорения УЭ в токамаках ФТ-2 и ТУМАН-3М [A14, A15]. На токамаке ФТ-2 другим возможным механизмом, ограничивающим рост энергии УЭ, может быть резонансное $n=1$ взаимодействие релятивистских электронов с модуляцией тороидального магнитного поля за счет конечного числа катушек – эффект гофрировки магнитного поля.

В заключении подведены итоги проведенных исследований.

Были получены следующие **результаты**:

1. Разработаны гамма-спектрометрические установки для диагностики УЭ на компактных токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М.
2. Код DeGaSum, разработанный для восстановления энергетического распределения УЭ по измеренному тормозному излучению, адаптирован к обработке сигналов, полученных в экспериментах на компактных токамаках. Для этого проведено моделирование методом Монте Карло процессов генерации тормозного излучения в токамаках и рассчитаны функции отклика используемых в измерениях детекторов, на гамма-излучение.
3. Разработанные гамма-спектрометрические установки и развитые методы гамма-спектрометрии были использованы в экспериментах на токамаках ФТ-2, ТУМАН-3М и Глобус-М. Это позволило наблюдать влияние неустойчивостей на удержание УЭ в токамаках.
4. Применение быстрых детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ позволило проанализировать энергетическое распределение УЭ во время пилообразных колебаний. Проведенные измерения продемонстрировали присутствие более высокоэнергичных электронов во вспышках жесткого РИ во время срывов по сравнению с периодами между релаксациями. Был оценен коэффициент диффузии убегающих электронов в разрядах с пилообразными колебаниями на токамаке ТУМАН-3М $D_{УЭ} \sim 0,8 \text{ м}^2/\text{с}$.
5. Эволюция максимальной энергии убегающих электронов в разрядах с нижнегибридной генерацией тока исследованы с временным разрешением $1 \div 5$ мс. Во время исследований корреляция между вводимой мощностью нижнегибридной генерации тока и E_{max} наблюдалась только при низкой мощности, когда Z_{eff} слабо менялся во время ВЧ импульса. В этом случае замедление нарастания E_{max} было вызвано снижением величины напряжения обхода.
6. Проведено исследование эволюции максимальной энергии убегающих электронов в плазме токамаков ФТ-2 и ТУМАН-3М. Максимальная энергия УЭ, полученная с использованием кода DeGaSum, показала хорошее согласие с результатами численных расчетов динамики ускорения УЭ, проведенных методом пробной частицы. Численный анализ и экспериментальное наблюдение с помощью спектрометра жесткого РИ позволяют предположить, что предел, определяемый орбитальным сдвигом дрейфовых траекторий, является возможным ограничивающим механизмом ускорения УЭ в токамаках ФТ-2 и

ТУМАН-3М. На токамаке ФТ-2 другим возможным механизмом, ограничивающим рост энергии УЭ, может быть резонансное $n=1$ взаимодействие релятивистских электронов с возмущениями тороидального магнитного поля, обусловленными гофрировкой.

Список литературы:

1. Driecer H. Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas. I // Phys. Rev. 1959. – Vol. 115. P. 238.
2. Dreicer H. Electron and Ion Runaway in a Fully Ionized Gas. II // Phys. Rev. 1960. – Vol. 117. P. 329.
3. Harrison E.R. Runaway and suprathermal particles // J. Nucl. Energy. 1960. – Part C 1. P. 105.
4. Harrison E.R. Acceleration of electrons in plasmas // J. Nucl. Energy. 1962. - Part C. Vol. 4. P. 7.
5. Jarvis O.N., Sadler G. and Thompson J.L. Photoneutron production accompanying plasma disruptions in JET // Nucl. Fusion 1988. – Vol. 28. P. 1981.
6. Wesson J.A., Gill R.D., Hugon M., et al. Disruptions in JET // Nucl. Fusion. 1989. – Vol. 29. P. 641.
7. Gill R.D., Alper B., de Baar M., et al. Behaviour of disruption generated runaways in JET // Nucl. Fusion. 2002. – Vol. 42. P. 1039.
8. Plyusnin V.V., Riccardo V., Jaspers R., et al. Study of runaway electron generation during major disruptions in JET // Nucl. Fusion. 2006. – Vol. 46 P. 277.
9. Reux C., Plyusnin V., Alper B., et al. Runaway electron beam generation and mitigation during disruptions at JET-ILW // Nucl. Fusion. 2015. – Vol. 55. 093013.
10. Nygren R., Lutza T., Walsh D., et al. Runaway electron damage to the Tore Supra Phase III outboard pump limiter // J.Nucl. Mater. 1997. – V. 241-243. P. 522.
11. Tamai H., Yoshino R., Tokuda S., et al. Runaway current termination in JT-60U // Nucl. Fusion. 2002. – Vol. 42. P. 290.
12. Fredrickson E.D., Bell M.G., Taylor G. and Medley S.S. Control of disruption-generated runaway plasmas in TFTR // Nucl. Fusion. 2015. – Vol. 55. 013006.
13. Smith H., Helander P., Eriksson L.-G., et al. Runaway electrons and the evolution of the plasma current in tokamak disruptions // Phys. Plasmas. 2006. – Vol. 13. 102502.
14. Bazylev B., Arnoux G., Fundamenski W., et al. Modeling of runaway electron beams for JET and ITER // J. Nucl. Mater. 2011. – Vol. 415. P. S841.
15. Donné A. J. H., Costley A. E., Barnsley R., et al. Chapter 7: Diagnostics // Nucl. Fusion 2007. – Vol. 47. P. S337.
16. Helander P., Eriksson L.-G., Andersson F. Runaway acceleration during magnetic reconnection in tokamaks. // Plasma Phys. Controll. Fusion. 2002. – Vol. 44. P. B247.
17. Martín-Solís J.R., Loarte A. and Lehnen M. Formation and termination of runaway beams in ITER disruptions // Nucl. Fusion. 2017. – Vol. 57. 066025.
18. Саврухин П. В., Шестаков Е. А., Храменков А. В. Пространственно-временная эволюция ускоренных электронов при развитии неустойчивости срыва в плазме токамака Т-10. // Физика плазмы. 2018. - Том 44, № 12. с. 951.
19. Rigamonti D., Broslawski A., Fernandes A., et al. The upgraded JET gamma-ray cameras based on high resolution/high count rate compact spectrometers. // Review of Scientific Instruments. 2018. – Vol. 89. 10I116.

20. Vardi Y., Shepp L.A. and Kaufman L. A Statistical Model for Positron Emission Tomography. // J. Am. Stat. Assoc. 1985. - Vol. 80. P. 8.
21. Richardson W.H., Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration. // J. Opt. Soc. Am. 1972. – Vol. 62 P. 55.
22. Lucy L.B., An iterative technique for the rectification of observed distributions // Astron. J. 1974. – Vol. 79. P. 745.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:
Главы в монографиях, индексируемых в БД “Scopus”

- A1.** Zaveryaev V., Chugunov I., **Shevelev A.**, Kiptily V., Experimental nuclear physics methods. // Monograph. “Fusion Physics”. Edited by Mitsuru Kikuchi, Karl Lackner, Minh Quang Tran. International Atomic Energy Agency. Vienna. 2012. pp. 412-426.

Статьи в журналах, индексируемых в БД “Web of Science” и “Scopus”

- A2.** Есипов Л.А., Итс Е.Р., Киптиль В.Г., ..., **Шевелев А.Е.**, Комбинированная диагностика ускоренных электронов в токамаке ФТ-2 // Физика плазмы. 1998. - Vol. 24, No. 3, стр. 257–261.
- Esipov L.A., Its E. R., Kiptily V.G., Krikunov S.V., ..., **Shevelev A.E.**, A combined diagnostic technique for studying accelerated electrons in the FT-2 tokamak // Plasma Physics Reports, 1998. - Vol. 24, 3, pp. 228-232.
- A3.** **Шевелев А.Е.**, Чугунов И.Н., Гусев В.К., и др. Исследование убегающих электронов на токамаке Глобус-М. // Физика плазмы. 2004. - Том 30, № 2. Стр. 180-184.
- Shevelev A.E.**, Chugunov I.N., Gusev V.K., et al. Studies of Runaway Electrons in the Globus-M Tokamak. // Plasma Phys. Rep., 2004. - Vol. 30, №2. P. 159
- A4.** Гин Д.Б., Чугунов И.Н., **Шевелев А.Е.**, Развитие методики высокоскоростной гамма-спектрометрии // Приборы и техника эксперимента. 2008. т.2 стр. 89-94.
- Gin D.B., Chugunov I.N., **Shevelev A.E.**, Development of a technique for high-speed gamma-ray spectrometry // Instruments and Experimental Techniques. 2008. - Vol. 51. No. 2, pp. 240–245.
- A5.** Gusev V.K., Aleksandrov S.E., Alimov V.K., ..., **Shevelev A.E.**, et al. Overview of results obtained at the Globus-M spherical tokamak. // Nuclear Fusion. 2009. - Vol. 49. 104021.
- A6.** Gusev V.K., Aminov R.M., Berezutskiy A.A., ..., **Shevelev A.E.**, et al. Investigation of beam- and wave-plasma interactions in spherical tokamak Globus-M // Nuclear Fusion. 2011. – Vol.51. 103019.
- A7.** Chugunov I.N., **Shevelev A.E.**, Gin D.B., et al. Development of gamma-ray diagnostics for ITER // Nuclear Fusion. 2011. – Vol.51. 083010.
- A8.** Хилькевич Е.М., **Шевелев А.Е.**, Чугунов И. Н., и др. Применение методов деконволюции к спектрам гамма-излучения термоядерной плазмы. // Письма в Журнал Технической Физики. 2013. - Том 39. №1 стр. 19-27
- Khilkevitch E.M., **Shevelev A.E.**, Chugunov I.N., et al. Application of deconvolution methods to gamma-radiation spectra of thermonuclear plasma. // Technical Physics Letters. 2013. - Vol. 39, №1 pp. 63-67

- A9.** Дьяченко В.В., Гусев В.К., Ларионов М.М., ..., **Шевелев А.Е.**, и др. Безындукционное создание плазмы и генерация тока в сферическом токамаке ГЛОБУС-М. // Физика плазмы. 2013. – том 39. №3. Стр. 219-228
- D'yachenko V.V., Gusev V.K., Larionov M.M., ..., **Shevelev A.E.**, et al. Noninductive plasma generation and current drive in the Globus-M spherical tokamak. // Plasma Physics Reports. 2013. - Vol. 39. 3. pp. 189-198.
- A10.** **Shevelev A.E.**, Khilkevitch E.M., Kiptily V.G., et al. Reconstruction of distribution functions of fast ions and runaway electrons in fusion plasmas using gamma-ray spectrometry with applications to ITER // Nuclear Fusion. 2013. - Vol. 53. 123004
- A11.** Nocente M., Tardocchi M., Chugunov I., ..., **Shevelev A.**, et al. Energy resolution of gamma-ray spectroscopy of JET plasmas with a LaBr₃ scintillator detector and digital data acquisition. // Review of Scientific Instruments. 2010. - Vol. 81, No.10, 10D321.
- A12.** **Shevelev A.E.**, Khilkevitch E.M., Lashkul S.I., et al. High performance gamma-ray spectrometer for runaway electron studies on the FT-2 tokamak // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. - Vol. 830. pp. 102-108.
- A13.** Тукачинский А.С., Аскинази Л.Г., Балаченков И.М., ..., **Шевелев А.Е.** Альфвеновские колебания в омических разрядах с убегающими электронами в токамаке ТУМАН-3М. // Письма в Журнал Технической Физики. 2016. – том 42. Вып. 24. Стр. 72-78.
- Tukachinsky A.S., Askinazi L.G., Balachenkov I.M., **Shevelev A.E.** Alfvén oscillations in ohmic discharges with runaway electrons in the TUMAN-3M tokamak. // Technical Physics Letters. 2016. Vol. 42. 12. pp. 1167-1169.
- A14.** **Shevelev A.**, Khilkevitch E., Tukachinsky A., et al. Study of runaway electrons in TUMAN-3M tokamak plasmas. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2018. - Vol. 60. No. 7. 075009.
- A15.** **Shevelev A.E.**, Khilkevitch E.M., Lashkul S.I., et al. Runaway electron studies with hard x-ray and microwave diagnostics in the FT-2 lower hybrid current drive discharges. // Nuclear Fusion. 2018. - Vol.58. 016034.
- A16.** Nocente M., **Shevelev A.**, Giacomelli L., et al. High resolution gamma-ray spectrometer with MHz capabilities for runaway electron studies at ASDEX Upgrade. // Review of Scientific Instruments. 2018. - Vol. 89, 10. 101124.