



УТВЕРЖДАЮ  
Ректор НИЯУ МИФИ  
доктор физ.-мат. наук

  
В.И. Шевченко  
«22» декабря 2025 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

на диссертационную работу Чукалиной Марины Валерьевны «**Измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики для определения атомной и морфологической (пространственной) структуры материалов и изделий микро- и наноэлектроники**», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» в диссертационный совет 24.1.106.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН).

Диссертация М.В. Чукалиной посвящена развитию вычислительных методов рентгеновской диагностики с целью их применения для исследования атомной структуры природных и новых перспективных функциональных материалов, изучения морфологической структуры изделий микро- и наноэлектроники, проведения метрологического контроля и дефектоскопии готовых изделий. Постоянный рост требований к миниатюризации, надежности и функциональности электронных компонентов обуславливает необходимость в высокоточных и неразрушающих методах контроля их атомной и морфологической структуры. Работа направлена на решение ключевых задач современной диагностики: уточнение атомной структуры новых материалов, определение профилей микропучков и развитие методов рентгеновской томографии в условиях, приближенных к промышленным. Использование уникальных возможностей синхротронного излучения для развития рентгеновских методов в сочетании с современными вычислительными алгоритмами соответствует мировым трендам в области материаловедения и приборостроения и стратегическим направлениям развития микро- и наноэлектроники в России. Все это определяет **актуальность** диссертационного исследования М.В. Чукалиной и обуславливает высокую **практическую значимость** решенных в диссертации задач.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы из 246 источников, списка рисунков и списка

таблиц. Общий объем составляет 327 страниц, включая 211 рисунков и 9 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, приведен обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулирована цель и поставлены задачи работы, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость и изложены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** начинается с обзора математических моделей формирования рентгеновских сигналов и изображений, используемых в различных вычислительных методах рентгеновской диагностики. Далее последовательно излагаются задачи обработки сигналов и построения моделей в области EXAFS спектроскопии (раздел 1.2), модели формирования флуоресцентных сигналов, генерируемых при сканировании ортотропных структур протонными и рентгеновскими бесконечно тонкими пучками (раздел 1.3). В разделе 1.4 дана постановка задачи рентгеновской томографии для восстановления 3D пространственного распределения коэффициента поглощения зондирующего рентгеновского излучения в виде цифрового изображения (визуализации) объекта. Обсуждаются трудности процедуры линеаризации при немонохроматическом зондировании, связанные с тем, что обратная задача (задача реконструкции) может стать некорректно поставленной вследствие зашумления и недостаточного количества измеренных проекций для применения интегрального оператора обращения преобразования Радона. Далее обсуждены модели формирования томографической проекции при использовании рентгеновского бесконечно тонкого пучка для случая поглощения (раздел 1.5) и рентгенофлуоресценции (раздел 1.6). Модель формирования абсорбционной томографической проекции в параллельной схеме измерения на монохроматическом пучке представлена в разделе 1.7, а на полихроматическом излучении – в разделе 1.8. В разделе 1.9 приведена модель формирования проекции в схеме с кристаллом-анализатором, установленным между объектом и детектором. В заключении первой главы (раздел 1.10) заложена теоретическая база для последующих разработок. **Глава 2** посвящена инновационному методу вейвлет-анализа EXAFS- спектров. Предложен подход, позволяющий определять радиусы координационных сфер и элементный состав, а также уверенно разделять вклады легких и тяжелых элементов в первую координационную сферу без трудоемкой процедуры подгонки к экспериментальному спектру, что значительно ускоряет анализ. **Глава 3** содержит методы определения 2D-профилей протонных и рентгеновских микропучков на основе анализа флуоресцентных карт. Эти методы повышают точность сканирующей диагностики и микроструктурирования.

**Главы 4 и 5** охватывают развитие алгебраических методов томографической реконструкции. Рассмотрены задачи работы в условиях низкой дозовой нагрузки, полихроматического излучения, ограниченной памяти и малого числа

проекций. Предложены методы подавления артефактов и автоматической калибровки томографов.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы.

Среди наиболее ярких достижений диссертационной работы, определяющих ее **научную новизну**, отметим следующее:

– Впервые предложен метод вейвлет-анализа EXAFS- спектров, полностью исключаящий трудоёмкую процедуру подгонки параметров модели к эксперименту, которая ранее была обязательной при использовании фурье-анализа в случае присутствия легких и тяжелых элементов в координационных сферах сложных веществ. Введён и теоретически обоснован вейвлет FEFF-Морле, адаптированный под физическую модель одиночного акта рассеяния. Это позволило идентифицировать не только радиусы координационных сфер, но и элементный состав внутри одной сферы за счет построения карты рассеяния одновременно в реальном и импульсном пространстве.

– Впервые разработаны методы двумерного восстановления профиля неосесимметричных протонных и рентгеновских микронзондов, основанные на анализе флуоресцентных карт с использованием ортотропных эталонных структур.

– Разработаны новые методы томографической реконструкции. Методы работают в режиме ограниченной памяти и в условиях малоракурсной съемки, включая нейросетевой регуляризатор, сочетающий физическую модель Радона и машинное обучение.

– Предложены методы уменьшения артефактов.

– Предложена иерархическая модель оценки качества, привязанная к назначению томографа (исследование - дефектоскопия - метрология - часть системы принятия решений). Модель позволяет формализовать переход от экспертной оценки точности конструкции к полностью автоматической, что является важнейшим шагом к индустриальной цифровизации контроля.

Высокий индекс цитируемости основных публикаций автора, посвященных методическим разработкам, свидетельствует о **практической значимости** полученных в работе результатов. К примеру, программное обеспечение, реализующее предложенный новый метод вейвлет- анализа EXAFS- спектров, размещено на официальном сайте Европейского синхротрона ESRF (г. Гренобль, Франция) и уже более 20 лет активно используется учеными разных стран.

Диссертационная работа М.В. Чукалиной прошла многократную **апробацию**: опубликованы 28 статей в российских и международных рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, результаты

диссертационного исследования докладывались и обсуждались на многочисленных российских и международных научных конференциях.

**Обоснованность и достоверность** результатов и выводов, представленных в диссертации, обеспечены как проведением подробного анализа модельных решений с использованием примеров различной сложности, так и взаимной согласованностью данных, полученных разными методами, их хорошей воспроизводимостью и высокой точностью.

При общем положительном впечатлении от диссертационной работы М.В. Чукалиной, имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. Отсутствует детальное описание вычислительной сложности ряда предложенных алгоритмов, что важно для их применения в системах реального времени. К примеру, для некоторых предложенных методов (например, FEFF- Морле, SOFT SIRT с нейросетевым регуляризатором) не приведена асимптотическая оценка сравнения с базовыми алгоритмами по скорости.
2. Не все предложенные алгоритмы протестированы на одном и том же наборе экспериментальных данных, что ограничивает возможность прямой сравнительной оценки их эффективности.
3. В диссертации указан метод минимизации разности двух функций – метод градиентной релаксации. Однако, из представленного текста не ясна размерность пространства, в котором определяется градиент меры отклонения. Этот параметр может быть важен, поскольку в многомерных задачах оптимизации минимизируемая функция может иметь много экстремумов (например, за счет стохастических приборных ошибок экспериментальной функции к которой проводится подгонка), а метод градиентной релаксации определяет только «ближайший» к стартовой конфигурации минимум.
4. Недостаточно подробно рассмотрен вопрос неоднозначности решения в задаче определения состава исследуемых смесей (Гл. 4, 5). Метод разделения смеси по коэффициентам поглощения работает хорошо для двух компонент, но при  $N \geq 3$  задача становится неоднозначной: разные комбинации элементов могут давать близкие спектры коэффициента поглощения  $\mu(E)$ . Нет оценки устойчивости решения к шуму или неточностям в зависимости  $\mu(k, E)$ .
5. Желательно, чтобы в конце каждой из глав были перечислены статьи, где приведенные результаты были опубликованы.

Однако указанные замечания, часть из которых носит характер пожеланий, не снижают общую высокую оценку работы.

Учитывая сказанное выше, можно сделать вывод, что диссертация М.В. Чукалиной является научно-квалификационной работой, в которой решен

значительный комплекс теоретических и прикладных задач, что является крупным научным достижением в области рентгеновской диагностики. Автор демонстрирует глубокую теоретическую подготовку и умение разрабатывать конкурентоспособные алгоритмы, востребованные как в науке, так и в промышленности. Результаты работы имеют выраженную новизну и практическую ценность, а публикационная активность и апробация на международных конференциях подтверждают признание работы научным сообществом. Тема и содержание диссертации соответствует научным направлениям, рассматриваемым на Диссертационном совете 24.1.106.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН). Научные положения, выносимые на защиту, сформулированы правильно и обоснованно. Многочисленные рисунки и графики хорошо иллюстрируют основные результаты и выводы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и представленным в ней основным результатам и выводам.

Результаты, полученные автором диссертации внедрены в программный продукт Smart Tomo Engine научно-производственной компании «Смарт Энджинс Сервис». Данное программное обеспечение может служить платформой для разработки комплексов локального контроля систем в корпусе при отладке производства или инспекции готовых изделий микроэлектроники на предприятиях электронной промышленности. Предложенный метод вейвлет-анализа EXAFS- спектров рекомендуется к использованию в НИЦ «Курчатовский институт», ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Научном центре «Кольцово» г. Новосибирск, международных центрах синхротронных исследований.

### **Заключение**

Принимая во внимание отмеченную актуальность проведенных в работе исследований, новизну, научную и практическую значимость полученных результатов, считаем, что представленная к защите диссертационная работа **«Измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики для определения атомной и морфологической (пространственной) структуры материалов и изделий микро- и нанoeлектроники»** является значительным вкладом в развитие теоретических и прикладных задач в области рентгеновской диагностики и удовлетворяет всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения степеней» (Постановление правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к докторским диссертациям и соответствует паспорту специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» а ее автор – Чукалина Марина Валерьевна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная

компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» за разработку нового метода анализа атомной структуры сложных веществ и комплекса программного обеспечения рентгеновской диагностики микроструктур.

Доклад по диссертационной работе М.В. Чукалиной и отзыв ведущей организации заслушаны, обсуждены и одобрены на совместном заседании кафедры физики твердого тела (№70) и наносистем и научном семинаре и Института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (протокол № 5 от 01.12.2025 г.). Отзыв одобрен единогласно участвовавшими в заседании специалистами путем открытого голосования: «за» - 25 человек, «против» - 0 человек (нет), «воздержались» - 0 человек (нет).

Отзыв составил:

Менушенков Алексей Павлович, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.07. – Физика конденсированного состояния, профессор, профессор кафедры физики твердого тела и наносистем Института лазерных и плазменных технологий Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

01 декабря 2025 г.

Заведующий кафедрой физики  
твердого тела и наносистем,  
№ 70 НИЯУ «МИФИ»  
д.ф.-м.н., доцент


А.П. Менушенков

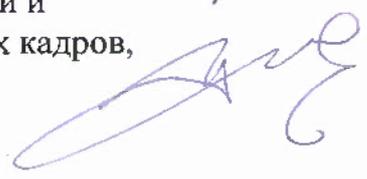
М.М. Маслов

Директор Института лазерных и  
плазменных технологий НИЯУ МИФИ,  
д. ф.-м.н., доцент



А. П. Кузнецов

Председатель Совета по аттестации и  
подготовке научно-педагогических кадров,  
д. ф.-м. н., профессор



Н. А. Кудряшов

Почтовый адрес: 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

Телефон: +7(495) 788 56 99, доб. 9020

Адрес электронной почты: [mmmaslov@mephi.ru](mailto:mmmaslov@mephi.ru)

Организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; web-сайт организации: <http://www.mephi.ru>