

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.106.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИИ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ОСОБОЧИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК
(ИПТМ РАН) ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 23.01.2026 г. № 1-26

О присуждении Чукалиной Марине Валерьевне, гражданке Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики для определения атомной и морфологической (пространственной) структуры материалов и изделий микро- и нанoeлектроники» по специальности 2.2.2 – электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств – принята к защите 22.10.2025 г., протокол № 25-2-Ч, диссертационным советом 24.1.106.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особоочиcтых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6, утвержденным приказом Минобрнауки №105/нк от 11.04.2012 года.

Соискатель Чукалина Марина Валерьевна, 15.03.1965 года рождения, в 1988 году окончила Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-физический институт по специальности прикладная математика, в 1997 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Реконструкция микрорельефа поверхности и состава приповерхностных слоев объектов микроэлектроники по рентгенофлуоресцентному сигналу» в диссертационном совете, созданном на базе ИПТМ РАН. Работает ведущим научным сотрудником Федерального исследовательского центра (ФИЦ) «Информатика и управление» (ИУ) Российской

академии наук (РАН).

Диссертация выполнена в Лаборатории теоретической физики ИПТМ РАН.

Официальные оппоненты: Пунегов Василий Ильич, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Физико-математического института ФИЦ «Коми научный центр Уральского отделения РАН»,

Бушуев Владимир Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения (ФГБОУ) высшего образования (ВО) «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»,

Бессонов Виктор Борисович, д-р технических наук, проректор-директор передовой инженерной школы Федерального государственного автономного образовательного учреждения (ФГАОУ) ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), в своем положительном заключении, подписанном д-ром физ.-мат. наук, профессором Менушенковым А.П., профессором кафедры физики твердого тела и наносистем Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, д-ром физ.-мат. наук, доцентом Масловым М.М., заведующим кафедрой физики твердого тела и наносистем №70 НИЯУ МИФИ, д-ром физ.-мат. наук, доцентом Кузнецовым А.П., директором Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, и д-ром физ.-мат. наук, профессором Кудряшовым Н.А., председателем Совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ, указала, что диссертация соответствует требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Чукалина Марина Валерьевна, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 – электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Недостоверные сведения об опубликованных работах в диссертации отсутствуют. Соискатель имеет 71 работу по теме диссертации в рецензируемых

научных изданиях, из них 28 изданы в периодических научных журналах, рекомендованных ВАК по специальности 2.2.2 (в том числе 26 в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus).

Наиболее значимые публикации по теме диссертации, содержащие ключевые результаты, полученные лично соискателем:

1. H. Funke, A. C. Scheinost, M. Chukalina. Wavelet analysis of extended x-ray absorption fine structure data // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. – 2005. – Vol. 71, no. 9. – P. 094110.
2. H. Funke, M. Chukalina, A. C. Scheinost. A new FEFF-based wavelet for EXAFS data analysis // *Journal of Synchrotron Radiation*. – 2007. – Vol. 14, no. 5. – P. 426–432.
3. M. V. Chukalina, U. Wätjen. Mathematical reconstruction of sample microstructures obtained from PIXE elemental maps // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2001. – Vol. 181, no. 1. – P. 249–253.
4. A. Simionovici, M. Chukalina, F. Gunzler, C. Schroer, A. Snigirev, I. Snigireva, J. Tummler, T. Weitkamp. X-ray microtomography by fluorescence tomography // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2001. – 467, P. 889–892.
5. M. Chukalina, A. Simionovici, A. Snigirev, T. Jeffries. Quantitative characterization of microsamples by x-ray fluorescence tomography // *X-Ray Spectrometry*. – 2002. – Vol. 31, no. 6. – P. 448–450.
6. M. Chukalina, B. Golosio, A. Simionovici, H. Funke. X-ray tomography: how to evaluate the reconstruction quality? // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. – 2004. – Vol. 59, no. 10. – P. 1755–1758.
7. М. Чукалина, Д. Николаев. Восстановление формы рентгеновского зонда по рентгенофлуоресцентным картам // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2011. – Т. 77, № 8. – С. 30–33.
8. Я. Шабельникова, М. Чукалина. Сравнение функции сбора рентгенофлуоресцентного сигнала для двух типов коллиматоров // *Письма в Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 38, № 10. – С. 6–13.
9. M. Chukalina, A. Ingacheva, A. Buzmakov, Yu. Krivonosov, V. Asadchikov, D. Nikolaev. A Hardware and Software System for Tomographic Research: Reconstruction via Regularization // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2019. – No.2. – P. 150–154.
10. M. Chukalina, A. Khafizov, V. Kokhan, A. Buzmakov, R. Senin, V. Uvarov, M. Grigoriev. Algorithm for post-processing of tomography images to calculate the dimension-geometric features of porous structures // *Computer Optics*. – 2021. – Vol. 45, no. 1. – P. 110–121.
11. A. Smolin, A. Yamaev, A. Ingacheva, T. Shevtsova, D. Polevoy, M. Chukalina, D. Nikolaev, V.V. Arlazarov. Reprojection-Based Numerical Measure of Robustness for CT Reconstruction Neural Network Algorithms // *Mathematics*. – 2022. – Vol. 10, no. 22. – P. 4210–1764.
12. M. Grigoriev, D. Zolotov, A. Ingacheva, A. Buzmakov, I. Dyachkova, V. Asadchikov, M. Chukalina. Crystal-analyzer based multispectral microtomography using CCD-sensor // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – P. 1–16.

13. D. Kazimirov, D. Polevoi, A. Ingacheva, M. Chukalina, D. Nikolaev. Adaptive automated sinogram normalization for ring artifacts suppression in CT // Optics Express. – 2024. – Vol. 32, no. 10. – P. 17606–17643.
14. М.В. Чукалина, В.В. Арлазаров, Д.П. Николаев, Д.В. Полевой, В.Л. Арлазаров. Рентгеновская томография для локального контроля компонент и инспекции модулей // Наноиндустрия. – 2024. – Т. 17, S10–2 (128). – С. 662–665.
15. М. Чукалина. К задаче оценки точности в компьютерной томографии // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2025. – № 2. – С. 3–11.

На автореферат диссертации поступило 4 положительных отзыва. В них отмечается актуальность работы, важность полученных результатов и их новизна, а также указано, что автор диссертации заслуживает присуждения искомой степени. В отзыве д-ра физ.-мат. наук Конарева П.В., старшего научного сотрудника Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» в порядке обсуждения отмечено следующее: «1. Было бы интересно увидеть более подробное сравнение вычислительной эффективности предложенных методов с существующими аналогами; 2. Представляется перспективным развитие подходов с использованием современных методов машинного обучения, что частично отражено в работе, но может быть расширено. Неточности технического характера: 1. На рис. 11 не приведен масштаб цветовой гаммы реконструкции сечения микрометеорита Татауин. 2. На рис. 15 подписи на вертикальной оси трудно различимы, по горизонтальной оси не указаны единицы измерений».

Д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН Волков В.А., главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, д-р технических наук, профессор Сергеев В.В., профессор кафедры геоинформатики и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и канд. физ.-мат. наук Купер К.Э., старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, замечаний не отметили.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что ведущая организация – передовое образовательное учреждение, одним из направлений которого является подготовка квалифицированных специалистов в области микро- и нанoeлектроники для отраслевых НИИ и промышленных

предприятий, в задачи которого включены исследование, разработка и применение изделий микро- и нанoeлектроники, а официальные оппоненты являются высокопрофессиональными специалистами в области физики взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, анализа рентгеновских сигналов и изображений, разработки комплексов неразрушающего контроля, что подтверждается авторскими публикациями.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных исследований:

разработаны измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики высокого разрешения для определения характеристик материалов и компонентов изделий микро- и нанoeлектроники;

предложен метод вейвлет-анализа протяженной тонкой структуры спектров рентгеновского поглощения (EXAFS-спектров) с контролем размера ячейки спектральных характеристик, позволяющий при уточнении атомной структуры природных и новых инженерных материалов определять радиусы ближайших координационных сфер в геометрической модели окружения ионизируемого атома, а также элементный состав каждой сферы без привлечения априорной информации об элементном составе;

построен вычислительный метод определения формы микропучков, позволивший восстанавливать пространственную форму неосесимметричных микропучков (протонных и рентгеновских), используемых в сканирующих диагностических методах и методах микроструктурирования поверхностей;

доказана перспективность применения уточненной модели формирования регистрируемых изображений в рентгеновской флуоресцентной томографии: метод реконструкции, разработанный на ее основе, позволяет контролировать локальный элементный состав изделий микроэлектроники не только в приповерхностных, но и в глубоко залегающих слоях;

введены регуляризующие фильтры, использование которых в предложенном вычислительном методе рентгеновской микротомографии снизило требования к числу проекций и экспозиции при выполнении дефектоскопии и метрологического контроля, что позволяет сократить время измерения и дозовую

нагрузку на микроэлектронные компоненты при исследовании их функциональных и эксплуатационных характеристик томографическими методами;

определены факторы, снижающие точность томографической реконструкции, и предложен метод реконструкции, учитывающий форму спектра зондирующего излучения, физические ограничения на коэффициент ослабления и возможные нарушения геометрии измерения, который обеспечивает при равной дозовой нагрузке существенно большую точность по сравнению с ранее известными методами микротомографии в полихроматической моде, использующимися при исследовании пространственных характеристик микроэлектронных компонент.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: разработаны и исследованы новые вычислительные методы рентгеновской диагностики, доказана их применимость в условиях, близких к промышленным, что создает основу для развития методов дефектоскопии и промышленного контроля не только поверхностей, но и внутренних объемов изделий микро- и наноэлектроники без их разрушения;

разработанные вычислительные методы опираются на модели формирования входных сигналов и изображений, существенно уточненных автором в ходе исследований. Эти модели имеют самостоятельную теоретическую значимость, поскольку на их основе создаются другие вычислительные методы, с теми или иными целевыми характеристиками, в том числе современные «физически информированные» нейросетевые методы.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан метод анализа EXAFS спектров, ускоряющий многократно процесс уточнения атомной структуры новых материалов, поскольку метод не требует выполнения этапа подгонки для оценки параметров идентификации центров рассеяния. Это позволяет в целом ускорить оптимизацию технологических процессов, участвующих в создании новых материалов. Авторское программное обеспечение, реализующее предложенный метод,

размещено на официальном сайте синхротрона ESRF (г.Гренобль, Франция) и уже 20 лет активно используется учеными разных стран;

создан метод определения двумерных профилей протонного и рентгеновского микропучков, позволяющий повысить пространственное разрешение сканирующих методов, применяемых для локальной оценки чистоты поверхностей, локального анализа элементного состава поверхностей и приповерхностных слоев изделий. Кроме этого, знание профилей микропучков позволяет проводить оптимизацию процедур микроструктурирования для достижения целевых параметров геометрической модели поверхности;

изучены пределы применимости метода рентгеновской томографии для неразрушающего контроля изделий. Точность работы метода томографии напрямую зависит от интенсивности зондирующего излучения (дозовой нагрузки на изделие). Высокая интенсивность может привести к деградации изделий микроэлектроники. Разработанные в диссертации вычислительные методы томографической реконструкции способны работать в условиях пониженной дозовой нагрузки. Методы обеспечивают большую точность по сравнению с ранее известными за счет уменьшения искажений, обусловленных полихроматическим зондированием, недостаточным уровнем калибровки узлов томографа и наличием сильно поглощающих включений в объекте. Методы способны работать в условиях ограничений на вычислительные ресурсы. Разработанное программное обеспечение может служить платформой для создания комплексов локального контроля «систем в корпусе» при отладке производства или инспекции готовых изделий.

Оценка достоверности результатов выявила:

все результаты и научные выводы базируются на совместном использовании методов численного моделирования и экспериментальных измерительных методов. В работе использованы методы математического анализа, линейной алгебры, элементы теории интегральных преобразований, численные методы, включая методы непрерывной оптимизации. Результаты подтверждаются формально-дедуктивно, численными экспериментами или результатами натуральных измерений. Адекватность уточненных автором моделей подтверждена

результатами измерений. Для всех предложенных методов построены и программно реализованы алгоритмы, их характеристики оценены на реальных данных или данных, полученных методами имитационного моделирования. Программное обеспечение, реализующее предложенные в диссертационном исследовании методы, используется не аффилированными научно-исследовательскими группами в прикладных и научных исследованиях, что подтверждается цитированиями. Результаты, изложенные в диссертации, получены на современном оборудовании исследовательского класса, включая оборудование станций синхротрона ESRF (установки класса «Мегасайенс»). Результаты диссертационного исследования не противоречат результатам, полученным другими авторами.

В диссертации представлены результаты исследований по заявленной теме, полученные самим автором или под его непосредственным руководством. Основные результаты и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

На заседании 23 января 2026 г. диссертационный совет принял решение: за новые научно обоснованные решения, направленные на значительное развитие измерительно-вычислительных методов рентгеновской диагностики высокого разрешения (в т.ч., увеличение глубины контроля рентгеновской флуоресцентной томографии, повышение точности томографической реконструкции, снижение дозовой (радиационной) нагрузки на исследуемые компоненты микроэлектроники), присудить Чукалиной Марине Валерьевне учёную степень доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 – электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств (содержание диссертации соответствует п.4 и п.5 паспорта специальности).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 10 докторов наук по специальности 2.2.2, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 12, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель диссертационного совета
чл.-корр. РАН


Рощупкин Дмитрий Валентинович

Ученый секретарь диссертационного совета

канд. физ.-мат. наук

Коротицкая-Седловец Дарья Михайловна

23.01.2026 г.

Подпись Рощупкина Д.В. и Коротицкой Д.М. заверяю

Ученый секретарь ИПТМ РАН,

канд. физ.-мат. наук



О.В. Феклисова