

Чукалина Марина Валерьевна

**Измерительно-вычислительные методы рентгеновской
диагностики для определения атомной и
морфологической (пространственной) структуры
материалов и изделий микро- и нанoeлектроники.**

Специальность 2.2.2 —
«Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники,
квантовых устройств»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Институте проблем технологии микроэлектроники и
особочистых материалов Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**
доктор физико-математических наук, профес-
сор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник

Фамилия Имя Отчество,
доктор физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Фамилия Имя Отчество,
доктор физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего професси-
онального образования с длинным длинным
длинным длинным названием

Защита состоится DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов на заседании
диссертационного совета Д123.456.78 при Название учреждения по адре-
су: Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Название библиотеки.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учре-
ждения, просьба направлять по адресу: Адрес, ученому секретарю диссер-
тационного совета Д123.456.78.

Автореферат разослан DD mmmmmmmm 2025 года.
Телефон для справок: +7 (0000) 00-00-00.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д123.456.78,
д-р физ.-мат. наук

Sign
Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы. По мере развития микроэлектронной промышленности каскадно осваивается большое количество новых технологических процессов. Из новых материалов создаются компоненты, узлы и изделия, причем функциональные и эксплуатационные характеристики изделий находятся в прямой зависимости от характеристик отдельных компонент и используемых материалов. Поэтому вопрос контроля характеристик критически важен для развития микро- и нанoeлектроники, и не может быть сведен исключительно к выходному тестированию, но должен распространяться на все ключевые технологические процессы на маршруте изготовления изделия. Для этого требуются высокоточные и надежные средства объективного контроля, обеспечивающие как пространственное разрешение, так и разрешение по значениям характеристик, соответствующее необходимой точности изготовления в современных технологиях микро- и нанoeлектроники.

Рентгеновское излучение, благодаря широкому энергетическому диапазону и высокой проникающей способности, является мощным диагностическим инструментом, подходящим для задач микроэлектроники. К настоящему времени уже известен ряд рентгеновских методов исследования материалов и сложных компонент, но их разрешающая способность не во всех случаях соответствует стоящим перед микроэлектроникой задачам. Важная особенность большинства современных методов рентгеновского исследования состоит в том то, что они являются не измерительными, а измерительно-вычислительными методами, то есть определяемые характеристики не измеряются непосредственно, а получаются расчетным способом на основе косвенных измерений. Поэтому принципиальные возможности и точностные характеристики этих методов определяются математическим и алгоритмическим обеспечением в неменьшей степени, чем физическими параметрами измерительной части.

Основным направлением данного диссертационного исследования является развитие вычислительных методов рентгеновской диагностики с целью их применения для исследования атомной структуры природных и новых инженерных материалов, изучения морфологической структуры изделий микро- и нанoeлектроники, проведения метрологического контроля и дефектоскопии готовых изделий. Полученные результаты относятся к областям исследования структуры природных и инженерных материалов с целью разработки новых приборов твердотельной электроники, оптоэлектроники, микро- и нанoeлектромеханических систем; исследования и характеризации сфокусированных микропучков, применяемых в сканирующих диагностических системах и в методах безмасочной литографии; исследования с высоким пространственным разрешением морфологической структуры объектов микронных и субмикронных размеров

неразрушающим (т.е. ограничивающим дозовую нагрузку) методом микротомографии.

Уменьшение размеров ключевых компонентов интегральных схем приводит к необходимости использования новых материалов с высокой проводимостью, термостойкостью, механической прочностью, химической инертностью и пр. Новые материалы, способные преодолеть ограничения полупроводниковой технологической платформы, нужны также для расширения функциональных возможностей новых устройств. В 50-60-е годы И.Б. Боровским, В. А. Батыревым, В.В. Шмидтом и др., было исследовано поведение рентгеновских спектров поглощения во многих металлах и сплавах. В начале 70-х годов прошлого столетия Д.Е. Сауерс, Е.А. Штерн и Ф.В. Литл построили математическую модель EXAFS-спектра и предложили применить Фурье преобразование для определения оценки радиусов координационных сфер. В России в разное время развитием метода EXAFS в части оптимизации измерений и в части интерпретации данных занимались А.И. Костарев, В.П. Саченко, И.Б. Боровский, Ю.А. Бабанов, Р.В. Ведринский и А.В. Солдатов.

Метод EXAFS позволяет для выбранного химического элемента, входящего в исследуемый материал, определить структурные параметры ближнего окружения атомов указанного атомного номера. Метод либо уточняет сведения, получаемые иными методами (например, дифракционными), либо является самостоятельным источником информации о структуре материалов с ближним порядком (металлических, керамических, полимерных, композитных и пр.) Метод используется при изучении свойств материалов с целью разработки новых приборов твердотельной электроники, оптоэлектроники, микро- и нанoeлектромеханических систем, в частности: при изучении процессов суперионной проводимости в бездефектных кристаллах, процессов электронного обмена в соединениях редкоземельных элементов с промежуточной валентностью; при изучении магнитной восприимчивости спиновых стекол при низких температурах; при изучении электропроводности и каталитической активности интеркалированных соединений, образующихся при введении примесных атомов, молекул или комплексов в межслоевое пространство кристаллов со слоистой структурой и пр.

Актуальность применения сканирующих рентгеновских методов, обладающих высокой элементной селективностью, для оценки чистоты поверхности, локального состава приповерхностных слоев, а также их использования для микроструктурирования, трудно переоценить. Чтобы увеличить пространственное разрешение, в этих методах рентгеновское излучение фокусируется. Фокусировка рентгеновского излучения в микронном и субмикронном диапазонах сопряжена с существенными техническими сложностями, и на практике используются пучки со сложным

поперечным профилем, форма которого затем учитывается в вычислительной части метода. Проблемами формирования и оценки размеров рентгеновских микропучков в разное время занимались В.В. Аристов, Б. Ленгелер, Д.В. Рошупкин, С.И. Зайцев, А.А. Снигирев, С.М. Кузнецов, М. Брюнель и В.К. Егоров.

Благодаря высокой способности рентгеновского излучения проникать вглубь материалов, применение рентгеновской вычислительной или, иначе, компьютерной томографии (КТ) позволяет исследовать морфологическую структуру не только отдельных компонентов микро- и наноэлектроники, но и целых изделий. Развитие вычислительных методов КТ связано в России с именами Б.К. Вайнштейна, Н.Д. Введенской, И.М. Гельфанда, В.П. Паламодова, С.Г. Гиндикина, А.Н. Тихонова, А.В. Гончарского, В.В. Пикалова, Е.Н. Симонова, В.Е. Асадчикова, В.В. Арлазарова и А.В. Бузмакова, а в мире – с именами А. Кормака, Г. Хаунсфилда, Ф. Наттерера, Й. Батенбурга и Г. Хермена. И если изначально основными применениями метода являлись медицина и научные исследования, то сегодня КТ рассматривается как инструмент дефектоскопии и метрологического контроля на производстве. В связи с новыми приложениями развитие вычислительных методов КТ продолжается. В диссертационном исследовании рассматриваются проблемы создания методов КТ, способных работать в условиях плохого отношения сигнал-шум и при малом числе проекционных углов, в режиме полихроматического зондирования, при неполной калибровке узлов томографа, в присутствии сильно поглощающих включений в объекте, то есть в условиях, характерных для процессов дефектоскопии изделий микроэлектроники.

Целью данной работы является исследование моделей и разработка измерительно-вычислительных методов рентгеновской диагностики высокого разрешения для определения характеристик материалов и компонентов изделий микро- и наноэлектроники.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**.

1. Разработка метода вейвлет-анализа протяженной тонкой структуры спектров рентгеновского поглощения (EXAFS-спектров), позволяющего определять радиусы ближайших координационных сфер в геометрической модели окружения ионизируемого атома, а также элементный состав каждой сферы без привлечения априорной информации об элементном составе.
2. Разработка метода определения двумерных профилей микропучков, используемых в сканирующих методах исследования изделий микроэлектроники и в методе безмасочной литографии.
3. Уточнение модели формирования регистрируемых изображений в рентгеновской флуоресцентной томографии в части учета поглощения излучения в толще исследуемого образца.

4. Разработка метода рентгеновской флуоресцентной томографии, позволяющего контролировать локальный элементный состав изделий микроэлектроники не только в приповерхностных, но и в глубоко залегающих слоях.
5. Разработка вычислительного метода рентгеновской микротомографии, позволяющего уменьшить время измерения и дозовую нагрузку на микроэлектронные компоненты при исследовании их функциональных и эксплуатационных характеристик томографическими методами.
6. Разработка метода оценки точности результатов томографической реконструкции, с учетом наличия искажений (артефактов), возникающих на реконструированных изображениях в условиях, необходимых для реализации неразрушающего томографического метода исследования и контроля изделий микро- и нанoeлектроники.
7. Разработка метода томографической реконструкции, обеспечивающего при равной дозовой нагрузке существенно большую точность по сравнению с ранее известными методами микротомографии в полихроматической моде, использующимися при исследовании пространственных характеристик микроэлектронных компонент.

Научная новизна:

1. Предложен новый метод анализа протяженной (дальней) тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (EXAFS-спектров), основанный на вейвлет-анализе с контролем размера ячейки спектральных характеристик, впервые позволивший связать базисные параметры материнского вейвлета и параметры геометрической модели окружения ионизируемого атома изучаемого материала.
2. Впервые предложен метод определения двумерного профиля микропучков (протонных и рентгеновских), используемых в сканирующих диагностических методах и методах микроструктурирования поверхностей, основанный на математической обработке карт флуоресцентных сигналов, формируемых при сканировании ортотропных структур на тонкой подложке.
3. Предложен новый вычислительный метод рентгеновской флуоресцентной томографии, позволяющий, в отличие от ранее известных, оценивать пространственное распределение химических элементов в толще образца без систематического занижения значений по причине ослабления сигнала.
4. Предложен новый вычислительный метод рентгеновской томографии алгебраического типа, отличающийся от ранее известных использованием нелинейных регуляризирующих операторов, что

позволяет уменьшать время измерения и дозовую нагрузку на микроэлектронные компоненты при исследовании их характеристик без снижения точности диагностики.

5. Впервые предложен вычислительный метод рентгеновской томографии, позволяющий устанавливать локальный элементный состав многокомпонентного объекта на основе одного стандартного набора томографических измерений в полихроматической моде.
6. Предложен новый метод томографической реконструкции, обеспечивающий при равной дозовой нагрузке существенно большую точность по сравнению с ранее известными методами, что обеспечивается автоматической оценкой условий измерения, затрудняющих томографическое исследование изделий микроэлектроники: полихроматичности зондирующего излучения, наличия сильно поглощающих включений, возможных нарушений геометрии измерения.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость проведенного диссертационного исследования заключается в разработке и обосновании новых вычислительных методов рентгеновской диагностики, что создает основу для развития методов дефектоскопии и промышленного контроля не только поверхностей, но и внутренних объемов изделий микро- и нанoeлектроники без их разрушения. Разработанные вычислительные методы опираются на модели формирования входных сигналов и изображений, существенно уточненных автором в ходе исследовательской работы. Эти модели имеют самостоятельную теоретическую значимость, поскольку на их основе могут создаваться и другие вычислительные методы, с теми или иными целевыми характеристиками, в том числе современные «физически информированные» нейросетевые методы.

Практическая значимость предложенного метода анализа EXAFS-спектров заключается в автоматизации и многократном сокращении сопутствующих временных затрат, поскольку в нем не требуется применения метода подгонки для оценки параметров идентификации центров рассеяния. Это позволяет ускорить процесс изучения атомной структуры новых материалов, ускорить оптимизацию технологических процессов создания новых материалов. Программное обеспечение, реализующее предложенный метод, размещено на официальном сайте синхротрона ESRF (г. Гренобль, Франция) и уже 20 лет активно используется учеными разных стран.

Использование предложенного метода определения двумерных профилей протонного и рентгеновского микропучков позволяет 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.

Точность работы методов рентгеновской томографии прямо зависит от интенсивности зондирующего излучения. Но высокая интенсивность может привести к деградации изделий микроэлектроники. Разработанные в диссертации вычислительные методы томографической реконструкции способны работать в условиях пониженной дозовой нагрузки, что значительно расширяет область применения томографических методов в микроэлектронике. Разработанные методы реконструкции 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.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе рассматриваются существующие и предлагаются новые измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики, пригодные для исследования атомной структуры материалов, для исследования локальной морфологической структуры и проведения диагностического контроля изделий микро- и нанoeлектроники. Значительная часть результатов базируется на совместном использовании методов численного моделирования и экспериментальных измерительных методов. В работе используются методы математического анализа, линейной алгебры, элементы теории интегральных преобразований, численные методы, включая методы непрерывной оптимизации. Результаты подтверждаются формально-дедуктивно, численными экспериментами или результатами натурных измерений. Работа подготовлена в соответствии с паспортом научной специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств». Решаемые в работе задачи относятся к п.4 «Исследование, моделирование и разработка ... методов измерения характеристик и совершенствования изделий по п. 1 [(приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин)]» и п. 5 «... исследование их [изделий] функциональных и эксплуатационных характеристик по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы их эффективного применения».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод вейвлет-анализа протяженной тонкой структуры спектров рентгеновского поглощения (EXAFS-спектров) с

- контролем размера ячейки спектральных характеристик позволяет определять радиусы ближайших координационных сфер в геометрической модели окружения ионизируемого атома, а также элементный состав каждой сферы без привлечения априорной информации об элементном составе.
2. Разработанный метод определения профилей микропучков, используемых в сканирующих методах исследования изделий микроэлектроники и в методе безмасочной литографии, обеспечивает построение двумерных (а не одномерных, как ранее предлагавшиеся методы) профилей, что позволяет использовать не только осесимметричные пучки.
 3. Уточненная модель формирования регистрируемых изображений в рентгеновской флуоресцентной томографии и метод реконструкции, разработанный на ее основе, позволяют контролировать локальный элементный состав изделий микроэлектроники не только в приповерхностных, но и в глубоко залегающих слоях.
 4. Предложенный вычислительный метод рентгеновской микротомографии, использующий регуляризующие фильтры, снизил требования к числу проекций и экспозиции при выполнении дефектоскопии и метрологического контроля, что позволяет уменьшать время измерения и дозовую нагрузку на микроэлектронные компоненты при исследовании их функциональных и эксплуатационных характеристик томографическими методами.
 5. Предложенный метод томографической реконструкции, учитывающий форму спектра зондирующего излучения, физические ограничения на коэффициент ослабления и возможные нарушения геометрии измерения, обеспечивает при равной дозовой нагрузке существенно большую точность по сравнению с ранее известными методами микротомографии в полихроматической моде, используемыми при исследовании пространственных характеристик микроэлектронных компонент.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается формально-дедуктивным выводом. 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 неаффилированными 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.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции производителей рентгеновской техники, Международном научном семинаре и международной молодежной научной школе-семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Международной конференции по техническому зрению (International Conference on Machine Vision, ICMV), Рабочем совещании «Рентгеновская оптика», Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», Междисциплинарной школе-конференции «Информационные технологии и системы» (ИТиС), Европейской конференции по моделированию «European Conference on Modelling and Simulation: Modelling Methodologies and Simulation» (ECMS), Международной научно-технической конференции IEEE «Искусственные интеллектуальные системы и интеллектуальные САПР», Симпозиуме «Нанозфизика и нанозлектроника», Международном совещании «Physics in Signal and Image Processing», Международной конференции по томографии материалов и структур (ICTMS), Российском форуме «Микроэлектроника», Объединенной конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике», Всероссийской научной конференции МФТИ, Международной конференции «Физика конденсированных состояний» (ФКС), Международной конференции по промышленной томографии (iCT).

Личный вклад. 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. Ряд опорных результатов получен совместно с соавторами – независимыми исследователями (С.И. Зайцев, Х. Функе, У. Войтен, В.Е. Асадчиков, Д.В. Рошупкин, Д.П. Николаев, А. Симиновичи, А.А. Снегирев, А.В. Бузмаков, М.В. Григорьев, М.И. Гильманов, И.А. Щелоков) и студентами или аспирантами, работавшими под руководством автора (В.Е. Прун, Д.А. Иванов, Д.Е. Ичалова, Ж.В. Солдатова, П.А. Кулагин, Я.Л. Шабельникова, А.С. Ингачева, Д.Д. Казимиров, А.В. Ямаев, Л.Г. Кочиев, М.С. Шутов, А.В. Хафизов, Э.С. Аллахвердов, А.В. Вацюк), каждому из которых автор выражает искреннюю благодарность.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 71 печатных изданиях, 15 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых RSCI, 26 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 28 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во Введении обосновывается актуальность проводимых в рамках диссертационной работы исследований, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Далее работа организована следующим образом. В первой главе проведен обзор математических моделей формирования рентгеновских сигналов и изображений, используемых в построенных вычислительных методах рентгеновской диагностики. Во второй главе представлен предложенный метод вейвлет анализа EXAFS спектров. При изучении атомной структуры новых материалов метод позволяет в геометрической модели окружения ионизируемого атома определить радиусы ближайших координационных сфер и их элементный состав. В третьей главе представлены построенные методы определения 2D формы сфокусированных протонных и рентгеновских микропучков. Знание формы микропучка позволяет повысить пространственное разрешение в методах сканирующей микроскопии и оптимизировать этапы технологических процессов при микроструктурировании поверхностей. В четвертой и пятой главах описаны предложенные методы томографической реконструкции, позволяющие работать с рентгеновскими томографическими проекциями, регистрируемыми в условиях, отличных от идеальных, в частности, при ограничениях на дозовую нагрузку, на время вычислений или на память вычислителя. Пятую главу завершает исследование предложенной модели оценки точности результатов томографической реконструкции с учетом функционального назначения томографа. Заключение содержит основные результаты диссертации.

В первой главе после описания методов измерения рентгеновских сигналов и изображений и формулировки задач микро- и нанoeлектроники, в решении которых находят применение предложенные в диссертации вычислительные методы (*раздел 1.1*), представлен обзор математических моделей формирования рентгеновских сигналов и изображений. В *разделе 1.2* приведена модель формирования EXAFS спектров. Модели формирования флуоресцентных сигналов, генерируемых при сканировании ортотропных структур протонными и рентгеновскими бесконечно тонкими пучками описаны в *разделе 1.3*. Далее от 2D сканирующего метода переход сделан к 3D методу, позволяющему восстанавливать пространственное распределение характеристик томографируемых образцов. В *разделе 1.4* дана постановка задачи рентгеновской томографии [3]: требуется восстановить 3D пространственное распределение коэффициента ослабления зондирующего рентгеновского излучения из набора собранных под разными ракурсами 2D рентгенографических изображений объекта. Восстановленное распределение называется цифровым изображением

объекта. После линеаризации проекций задача томографии сводится к обращению преобразования Радона. Трудность заключается в том, что процедура линеаризации является самостоятельной задачей при монохроматическом зондировании, в дополнение количество измеренных проекций может оказаться недостаточным для применения интегрального оператора обращения преобразования Радона и проекции могут быть сильно зашумлены, т.е. обратная задача (задача реконструкции) становится некорректно поставленной. Модель формирования абсорбционной томографической проекции для случая использования рентгеновского бесконечно тонкого пучка дана в *разделе 1.5*. Перемещение зонда вдоль горизонтальной плоскости позволяет собрать 2D проекцию сечения для текущего ракурса. После регистрации текущей проекции объект поворачивается на некоторый угол и регистрируется следующая проекция. Такие схемы регистрации проекций используются на станциях источников синхротронного излучения. Схема не требует позиционно-чувствительных детекторов. Добавление в схему детектора с энергетическим разрешением добавляет возможность сбора спектральных проекций. В *разделе 1.6* представлена модель формирования рентгенофлуоресцентной томографической проекции при использовании бесконечно тонкого пучка. Для формирования параллельных пучков в оптический тракт устанавливаются монохроматоры. В *разделе 1.7* представлена модель формирования абсорбционной томографической проекции в параллельной схеме измерения. Параллельный пучок монохроматичен. Для регистрации проекций используется позиционно-чувствительный детектор. Если монохроматор в тракте отсутствует, то зондирование ведется полихроматическим излучением. Модель формирования полихроматической проекции представлена в *разделе 1.8*. Там же модель уточнена для случая зондирования объектов, содержащих сильно поглощающие включения [44]. Следует обратить внимание, что один пиксел детектора регистрирует (суммирует) все энергии спектра. Появившись в 90-е годы, позиционно-чувствительные и одновременно энергодисперсионные детекторы пока не стали настольным оборудованием. Об интерпретации регистрируемых ими сигналов ведутся споры. В диссертационной работе такие детекторы не рассматриваются. В *разделе 1.9* приведена модель формирования проекции в схеме с кристаллом-анализатором, установленным между объектом и детектором, [4; 45]. Данная организация измерительной схемы позволяет получить проекции, содержащие лучи из разных энергетических интервалов зондирующего спектра. Заключение по первой главе дано в *разделе 1.10*.

Во второй главе представлен предложенный в диссертации метод вейвлет анализа протяженной тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (EXAFS спектров). Метод EXAFS спектроскопии используется для изучения атомной структуры природных и инженерных материалов. При использовании предложенного ранее метода преобразования Фурье

для анализа EXAFS спектров трудности возникают в случаях, когда одна координационная сфера содержит разные типы атомов, т.е. под одним пиком в частотном спектре «уложены» процессы рассеяния на разных типах атомов (центральное изображение на рис. 1). Пример такой струк-

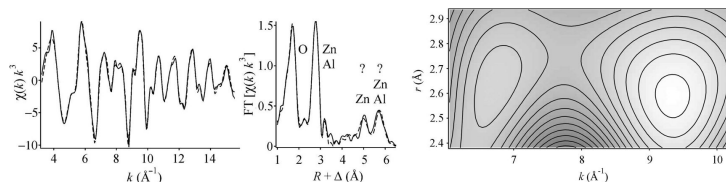


Рис. 1 — EXAFS спектр (слева), модуль Фурье преобразования (по центру), участок вейвлет-карты (справа). Первая металлическая координационная сфера. Параметры Морле $\eta = 30, \sigma = 0.19$.

туры приведен на рис. 2, где представлена модель октаэдрического слоя Zn–Al слоистого двойного гидроксида. Октаэдры $Zn(OH)_6$ показаны зеленым цветом, октаэдры $Al(OH)_6$ показаны желтым цветом. Первые три координационные сферы показаны черными окружностями. Сравнение

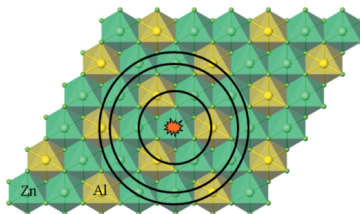


Рис. 2 — Модель атомной структуры.

возможностей инструментов Фурье (рис. 3) и предложенного для анализа вейвлет (рис. 4) подходов на примере модельных сигналов представлено в *разделе 2.1*. В *разделе 2.2* сформулирована задача анализа: в геометрической модели окружения ионизируемого атома определить радиусы ближайших координационных сфер и элементный состав каждой сферы. В диссертации обосновано использование функции Морле в качестве материнского вейвлета [5; 46], рассмотрен вопрос оценки точности [47] и пространственного разрешения вейвлет метода [1]. Участок вейвлет карты для 1-ой металлической координационной сферы (рис. 1), рассчитанной для спектра (слева) представлен справа. Наличие двух максимумов на изображении говорит о наличии двух типов атомов. В *разделе 2.3* представлены результаты анализа локальной структуры Ge-Sb-Te халькогенидных

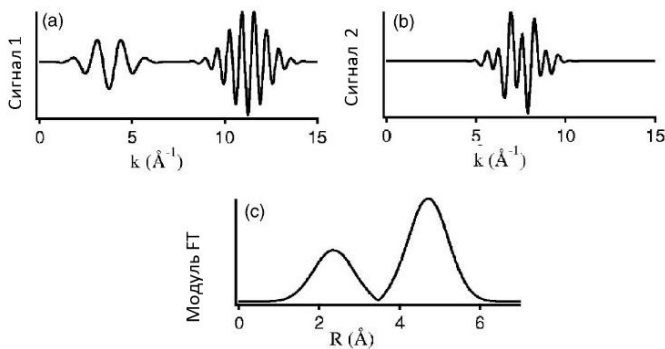


Рис. 3 — Верхний ряд: два сигнала, различающиеся положением центров функций Гаусса. Нижний рисунок: модуль Фурье преобразования для каждого из сигналов.

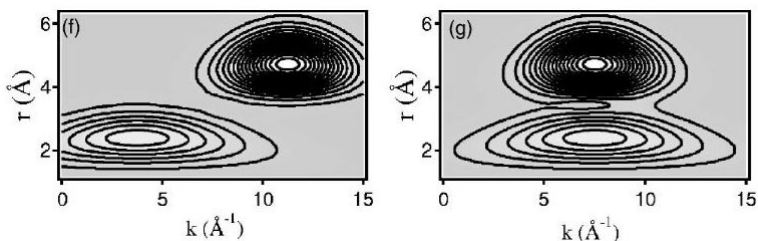


Рис. 4 — Вейвлет карты для двух сигналов, представленных на рис.3. Слева — для Signal 1, справа — для Signal 2.

сверхрешеток с применением предложенного метода [6]. В разделе 2.4 поставлена задача проведения вейвлет анализа спектра в том случае, если пространственное разрешение, определяемое видом материнского вейвлета, не достаточно для вейвлета Морле. Предложено конструировать и использовать материнский вейвлет FEFF-Morlet, основу которого составляет модельный спектр для одиночного акта рассеяния [7]. Описан способ построения вейвлета FEFF-Morlet. Задача анализа переформулируется как задача проверки гипотезы. Для определения атомного состава второй и третьей металлических сфер структуры, представленной на рис. 2, были рассчитаны 4 вейвлет-преобразования с использованием FEFF-Морле вейвлетов, построенных для актов рассеяния Zn-Zn при $r = 6.0 \text{ \AA}$, Zn-Al при $r = 6.0 \text{ \AA}$, Zn-Zn при $r = 5.2 \text{ \AA}$ и Zn-Al при $r = 5.2 \text{ \AA}$ (рис. 5). Для $r = 6.0 \text{ \AA}$ карта показывает максимумы в районе $s = 1$ как для Zn, так и для Al, подтверждая, что оба атома присутствуют на данной координатной сфере. Для $r = 5.2 \text{ \AA}$ максимум присутствует только для

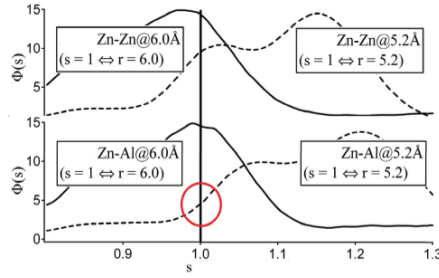


Рис. 5 — Иллюстрация проверки гипотезы для путей Zn–Zn при $r = 6.0 \text{ \AA}$, Zn–Al при $r = 6.0 \text{ \AA}$, Zn–Zn при $r = 5.2 \text{ \AA}$ и Zn–Al при $r = 5.2 \text{ \AA}$.

Zn. В разделе описан метод анализа построенных карт, результат анализа представлен на рисунке 5. Результаты проведенных исследований для нескольких типов образцов [8—11] обсуждаются. Заключение по второй главе, в которой исследован предложенный метод анализа EXAFS спектров, дано в *разделе 2.5*.

В третьей главе представлены предложенные вычислительные методы определения двумерного профля протонных и рентгеновских микропучков, базирующиеся на математической обработке карт флуоресцентных сигналов, формируемых при сканировании ортотропных структур. Использование сфокусированных пучков известной формы (протонного или рентгеновского) позволяет выполнять локальную диагностику состава поверхностей и/или приповерхностных слоев изделий микроэлектроники или проводить микроструктурирование. В *разделе 3.1* рассматривается задача восстановления 2D формы микропучка протонов по флуоресцентным картам. Дана постановка задачи и приведено описание предложенного в диссертации метода восстановления двумерного профиля микропучка [12]. Принципиальная схема измерения представлена на рис. 6а. Пример участка карты флуоресцентных сигналов **S** от референсной структуры (чип микроструктурированного эталонного материала IRMM-301) приведен на рис. 6б. Габаритные размеры чипа составляют около $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Ширина полос пермаллоя 4 микрона. Состав полос пермаллоя $81\%Ni, 19\%Fe$. Толщина линии (высота слоя пермаллоя) составляет 0.5 мкм. Введем декартову систему координат. Ось Z направим вниз, согласовав ее направление с направлением проникновения пучка протонов. Координаты вектора $\mathbf{x}$ задают последовательность положений пучка на плоскости XOY . Пусть для простоты объект бесконечен, т.е. занимает область $A = \{-\infty < x < \infty\}$. Тогда выражение, которое связывает интенсивность флуоресцентного сигнала I_z от элемента с атомным номером Z и величину концентрации

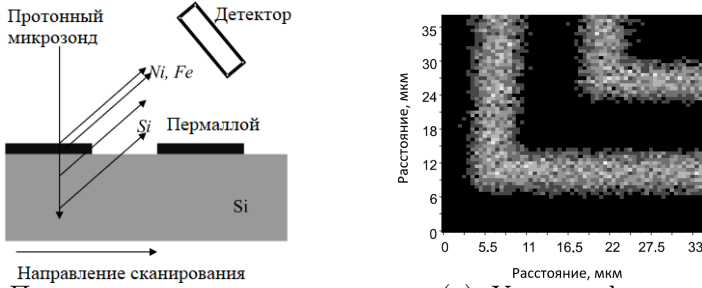


Рис. 6 — Принципиальная схема измерения (а). Участок флуоресцентной карты. Флуоресцентный сигнал Ni (б).

данного элемента N_z , записывается в виде:

$$I_z(x) = N_p(x) \mathcal{E}_d N_z(x) \int_{E_p^0}^{E_p^f} \frac{\omega(Z, E_p) \sigma(Z, E_p, x) T(Z, E_p, x, Det_{E_p})}{S(Z, E_p, x)} dE_p, \quad (1)$$

где x задает положение протонного бесконечно тонкого пучка, N_p – число протонов с энергией E_p^0 , $\mathcal{E}_d$ – чувствительность детектора, $\omega(Z, E_p)$ – флуоресцентный выход, $\sigma(Z, E_p)$ – сечение ионизации, $T(Z, E_p, x, Det_{E_p})$ описывает ослабление флуоресценции на пути к детектору, Det_{E_p} – телесный угол детектора, $S(Z, E_p, x)$ – тормозная способность. Ионизационные потери учтены в пределах интеграла $\{E_p^0, E_p^f\}$. Ослабление характеристического излучения, сгенерированного при взаимодействии с протонами энергии E_p , на пути к детектору рассчитывается согласно закону Бугера - Ламберта - Бера. Принимая во внимание реальный профиль пучка определим число протонов на поверхности N_p как функцию пространственной координаты и перепишем модель формирования флуоресцентного сигнала I_z^{beam} с учетом формы зонда:

$$N_p(x) = N_p^0 B(x); I_z^{beam}(x) = (I_z * B)(x). \quad (2)$$

Здесь N_p^0 определяется свойствами источника и фокусирующей системы, B принимает значения от 0 до 1. Каждое положение зонда на поверхности задает одно уравнение. Количество пикселей флуоресцентной карты определяет число уравнений. Тогда чтобы восстановить $\mathbf{B}$ необходимо найти приближенное решение системы уравнений при наличии ошибки в правой части $\mathbf{Sig}$ (карта измеренных сигналов). Предложено поставить задачу условной оптимизации с ограничениями в виде равенств:

$$\|\mathbf{Sig} - \mathbf{I}_z^{beam}(\mathbf{x})\|_2 \rightarrow \min, |Sig_i - I_z^{beam}(x_i) = 0, i = 1, \dots, N \quad (3)$$

и решать методом множителей Лагранджа. Результат восстановления профиля пучка протонов предложенным методом представлен на рис. 7.

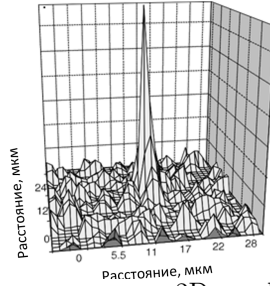


Рис. 7 — Результат восстановления 2D профиля протонного зонда.

Эксперимент проведен на источнике протонов Института референсных материалов и измерений, Гель, Бельгия.

В разделе 3.2 рассматривается задача восстановления формы рентгеновского пучка – пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения в фокальной плоскости фокусирующей системы [48]. Описан предложенный метод сбора и обработки карт флу-

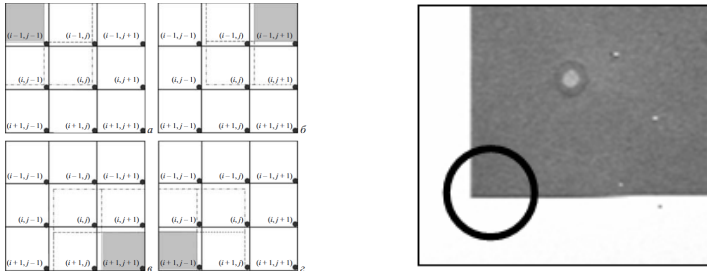


Рис. 8 — Принципиальная схема сканирования. Начальные положения уголка структуры для каждого из 4-х этапов показаны серыми пикселями (а). Пример структуры (б).

оресцентных сигналов, формируемых при сканировании рентгеновским пучком ортотропной микроструктуры. Аналогично модели, приведенной в предыдущем разделе, процесс формирования сигнала для текущего положения рентгеновского зонда на поверхности структуры описывается уравнением типа свертки. Ядром свертки в данном является модель формирования рентгено-флуоресцентного сигнала. Если сканируемый объект сертифицирован, то определить форму зонда можно методом, описанным в предыдущем разделе. Если используемый объект не сертифицирован, то ошибка содержится не только в правой части уравнения, но и в ядре [49]. Для решения задачи определения формы микропучка с использованием не сертифицированной структуры предложено использовать следующий

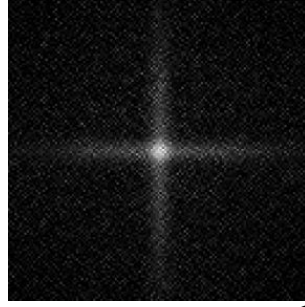
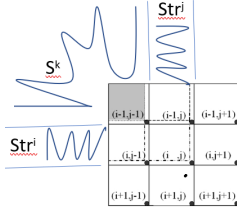


Рис. 9 — Иллюстрация связи схемы сканирования и введенных обозначений (а). Результат работы предложенного метода (б).

метод. Уголок референсной структуры (рис. 8б) вдвигается под пучок с заданным шагом. Шаг оценивается из ожидаемого полного размера фокусного пятна (радиусом виртуальной окружности, покрывающей область фокусировки) и требуемого пространственного разрешения. На рис. 8 слева представлена принципиальная схема предложенной 4-х этапной процедуры сканирования фокальной плоскости пучка ортотропной тонкой структурой [13] и справа – пример структуры. На каждом из 4 этапов, сканирование начинается с одного из углов (рис. 8а). На рисунке серыми пикселями отмечены начальные положения уголка структуры, соответствующие одному из 4 этапов. По результатам сканирования формируются четыре флуоресцентные карты. Индексы, введенные на рисунке 9а, используются в выражениях, описывающих работу алгоритма расчета значений интенсивности в пикселях карты, базирующегося на методе исключений. Пусть верхний индекс, используемый в выражениях далее, указывает этап сканирования (от 1 до 4). Запишем выражение для сигнала S^1 при положении угла референсной структуры в пикселях $(i-1, j-1)$ и $(i-1, j)$ (рис. 9а):

$$S_{i-1, j-1}^1 = S^k + I_{i-1, j-1}^1; S_{i-1, j}^1 = S^k + I_{i-1, j-1}^1 + Str^j + I_{i-1, j}^1. \quad (4)$$

Здесь S^k это часть сигнала, сформированного при положении уголка референсной структуры в пикселе $(i-1, j-1)$. Верхний индекс k подчеркивает лишь, что это текущее, а не только начальное положение. Обратим внимание, что первые два слагаемых суммы повторяют значение сигнала $S_{i-1, j-1}^1$ с точностью до шума. В работе показано, что значение интенсивности в пикселе (i, j) :

$$I_{i, j}^1 \approx S_{i, j}^1 - S_{i-1, j}^1 - S_{i, j-1}^1 + S_{i-1, j-1}^1. \quad (5)$$

После выполнения всех четырех этапов сканирования и расчета значений $I_{i, j}^1, I_{i, j}^2, I_{i, j}^3, I_{i, j}^4$ для каждого из этапов, усредним полученные значения в каждом пикселе. На рисунке 9б приведен результат реконструкции формы предложенным методом. Оценка чувствительности предложенного метода

[50] завершает раздел. В разделе 3.3 приводится заключение по третьей главе.

В четвертой главе описаны методы томографической реконструкции, базирующиеся на алгебраическом подходе. Данный подход позволяет работать с проекциями, содержащими высокий уровень шума. В разделе 4.1 дается описание томографа как аппаратно-программного комплекса. Рассмотрение построенных методов в главе начинается с задачи рентгено-флуоресцентной томографии (раздел 4.2). Она звучит следующим образом: по набору рентгеновских флуоресцентных проекций восстановить пространственное распределение источников флуоресценции (без ограничения на распределение источников) [14; 51; 52]. Другими исследователями задача решалась в постановке, что на распределение источников накладывается следующее ограничение. Распределение описывается набором отдельных включений в однородной (с точки зрения поглощения излучения зонда) матрице. Это строгое ограничение снимается в предложенном методе. Принципиальная схема сбора флуоресцентных проекций представлена на рисунке 10. Зондирование ведется сфокусированным моноэнергетическим

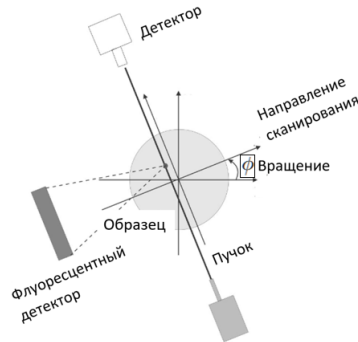


Рис. 10 — Принципиальная схема сбора проекций в рентгеновской флуоресцентной томографии [15].

пучком рентгеновских лучей. Процесс формирования сигнала [16] описывается следующим образом. Рентгеновский микропучок интенсивности $I_0(E)$ энергии E ослабляется на пути L_1 от точки входа в образец до «анализируемой» точки (воксела) — источника флуоресценции внутри объекта согласно закону Бугера-Ламберта-Бера $Tr = \exp(-\sum_0^{L_1} \mu(E, l) \Delta_l)$. Здесь Δ_l — вклад l -го воксела, согласно выбранной модели зонда (бинарной, линейной, площадной, объемной). Пространственное распределение линейного коэффициента ослабления $\mu(E)$ зондирующего пучка материалами, входящими в состав объекта, рассчитывается из собранных проекций «на просвет» с использованием любого алгоритма реконструкции до начала

итерационного процесса реконструкции распределения элементов[17]. Линейный коэффициент ослабления зондирующего рентгеновского излучения $\mu(E)$ есть линейная комбинация вкладов атомов всех типов локального объема вокселя $\mu(E) = \sum_i N_A \frac{\rho_i}{A_i} \sigma_i^{ab}(E)$, где N_A – число Авогадро, ρ_i – оценка плотности, A_i – атомная масса, $\sigma_i^{ab}(E)$ – сечение поглощения для конкретного типа атомов. Генерируемый вокселем флуоресцентный сигнал атомов типа i определяется как $N_A \frac{\rho_i \sigma_i^{em}(E)}{A_i}$, где σ_i^{em} – сечение эмиссии. Интенсивность излучения j -ой характеристической линии атома i -го типа характеризуется значением квантового флуоресцентного выхода конкретной оболочки (или оболочек) ω_i^j в зависимости от спектрального разрешения используемого детектора. Далее будет участвовать только тип атомов без уточнения оболочки. Ослабление флуоресцентного излучения E_i на пути L_2 от места генерации к детектору рассчитывается согласно закону Бугера-Ламберта-Бера $Fl = \exp(-\sum_0^{L_2} \mu(E^i, l) \Delta l)$. Значения линейного коэффициента ослабления $\mu(E_i^j)$, рассчитываются как линейная комбинация вкладов всех типов атомов с использованием значений ρ_i , определенных на предыдущей итерации и табличного значения $\sigma_i^{ab}(E^i)$.

Пусть положение рентгеновского зонда на поверхности объекта, повернутого вокруг оси вращения на угол ϕ , задается координатой ξ , индекс k определяет текущий воксел на отрезке, соединяющем точку входа зонда в образец и точку выхода зонда из образца. Величину рожденного и ослабленного на пути к детектору i -го сигнала запишем в виде:

$$I_i(\phi, \xi) = \sum_{t, \Theta:k} p_i^k(E) Tr^k Fl^k \Delta_k, \quad p_i(E) = I_0 \frac{1}{4\pi} N_A \frac{\rho_i}{A_i} \sigma_i^{em}(E), \quad (6)$$

где $p_i(E)$ характеризует процесс генерации сигнала. Рентгено-флуоресцентная проекция формируется при сканировании сечения объекта сфокусированным пучком. Одно положение зонда формирует одну точку на проекции. Число проекций для одного проекционного угла равно числу регистрируемых флуоресцентных линий. После окончания сканирования объект поворачивается на величину проекционного угла. Каждую точку на проекции опишем уравнением, в котором левая часть – выражение 6, а правая – результат измерения. Полное количество уравнений в системе определяется числом положений зонда, формирующих проекцию, умноженным на число регистрируемых линий спектра и на число проекционных углов. Сведем решение системы нелинейных уравнений к оптимизационной задаче без ограничений:

$$\|\mathbf{S}_i - \mathbf{I}_i\|_2 \xrightarrow{i} \min. \quad (7)$$

Здесь i – компонента флуоресцентного спектра. Итерационно применяется метод обратного проецирования. Одна итерация алгоритма завершается

после того, как коррекция выполнена для всех проекционных углов и положений микропучка. Итерационный процесс останавливается, когда разница m последовательных решений не превышает заданного отклонения по норме. Значение m определяется эмпирически. Алгоритм реконструкции стартует с начального предположения о распределениях элементов, сделанного на основе результата реконструкции без коррекции на поглощение. В разделе обсуждаются результаты экспериментов, проведенных на образцах различной природы [18; 19; 53; 20; 21]. Рассмотрено использование метода с учетом вклада Релеевского рассеяния [15], подход к решению задачи при учете формы зонда [22], сравнение схем сбора сигнала с использованием и без использования коллиматоров [23; 24]. Преимущество

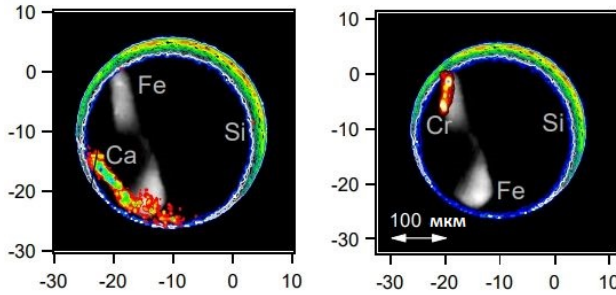


Рис. 11 — Сечение микрометеорита Татауин. Результат реконструкции предложенным методом [54].

метода рентгено-флуоресцентной томографии состоит в том, что метод позволяет восстанавливать взаимное распределение элементов в объеме, что помогает в интерпретации результата. На рисунке 11 представлен результат применения предложенного метода для восстановления распределения элементов в микрометеорите. Эксперимент проводился на станции ID22 источника синхротронного излучения ESRF, Франция.

В разделе 4.3 поставлена и решена задача томографической реконструкции в схеме измерения «на просвет» в условиях высокого уровня шума на проекциях (лабораторный томограф, ограниченная дозовая нагрузка или ограниченное время съемки). Если для зондирования используется параллельный пучок рентгеновских лучей в круговой схеме сбора проекций, то задачу можно решать послойно. Принципиальная схема измерения представлена на рисунке 12а. Постановка задачи. Пусть f – определенная в R^n функция, описывающая распределение линейного коэффициента ослабления монохроматического излучения материалами объекта. Объект поворачивается вокруг оси вращения на угол $\phi_h, h = 1, \dots, K_\phi$ и проецируется вдоль заданного направления. Необходимо восстановить функцию $f(x, y)$ по измеренным проекциям $I(\phi, \xi)$. Линеаризуем

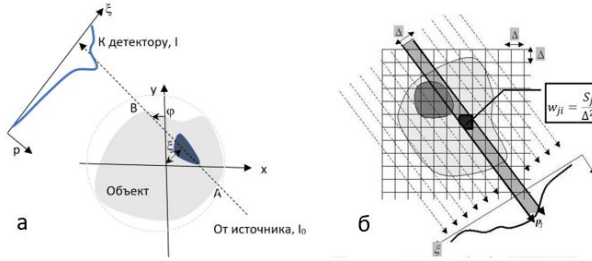


Рис. 12 — (а) Принципиальная схема измерения проекции при использовании параллельного пучка для зондирования в круговой схеме сбора проекций.

результат измерений:

$$p(\phi, \xi) = \ln \frac{I_0(\phi, \xi)}{I(\phi, \xi)} = \iint f(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - \xi) dx dy, \quad (8)$$

где $\delta(x \cos \phi + y \sin \phi - \xi)$ задает направление зондирования относительно f с носителем в Ω^2 (рис. 12а). Преобразование Радона связывает p и f . Нам известны только дискретные значения сигнала I_j , где $j = 1, \dots, M$, $M = K_\phi \times N_s$ (N_s — число ячеек позиционно-чувствительного детектора), $\mathbf{p}$ — вектор линеаризованных измерений с координатами p_j . Покроем Ω^2 квадратной сеткой (рис. 12б) с пикселями Pix_i , $i = 1, \dots, N$, $N = N_s \times N_s$. Будем считать f постоянной в каждом пикселе. Заменим f вектором $\mathbf{X}$, i -ая координата которого x_i равна значению f в i -ом пикселе. Преобразуем интегральное уравнение Радона в систему линейных уравнений. Введем $w_{ji} = L_j \cap Pix_i$ как пересечение зондирующего луча j с пикселем i согласно одной из моделей луча. Введем три модели луча (рис. 13). Ширина полосы — линейный размер ячейки детектора. В 1-ой и 2-ой моделях пучок аппроксимируется отрезком AB , который проходит через середину полосы. В 1-ой модели вклад пиксела в лучевую сумму бинарный. $w_{ji} = 1$, если пересечен пиксел i , и 0, если пиксел не пересечен AB . Во 2-ой модели вклад пиксела учитывается как отношение длины отрезка, пересекающего пиксел, к длине диагонали или длине стороны пиксела в зависимости от диапазона, которому принадлежит угол, под которым луч пересекает пиксел. В 3-ей модели вклад пиксела рассчитывается как отношение площади пиксела, покрытой полосой, к общей площади пиксела (рис. 12б). В численных реализациях предложенных в диссертации методов томографической реконструкции может быть использована любая из моделей. Модель луча выбирается в зависимости от требований по времени или по точности. С учетом обозначения $\mathbf{w}_j = (w_{j1}, \dots, w_{jN})^T$ запишем операцию прямого проецирования:

$$\mathbf{w}_j^T \mathbf{X} = p_j, \quad j = 1, \dots, M. \quad (9)$$

Тогда система линейных уравнений представима в виде:

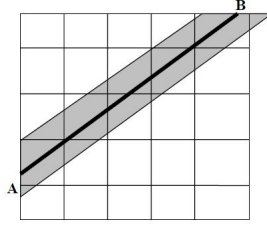


Рис. 13 — Иллюстрация к трем моделям пучка.

$$W\mathbf{f} = \mathbf{p}, \quad (10)$$

где проекционная матрица выглядит следующим образом:

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{M1} & \dots & w_{MN} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Предложено свести решение СЛАУ к следующей задаче безусловной оптимизации [25]:

$$\|W\mathbf{x} - \mathbf{p}\|_2 + \alpha\|R\mathbf{x}\|_2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

где R — нелинейный регуляризирующий оператор. Распишем регуляризирующий член:

$$\|W\mathbf{x} - \mathbf{p}\|_2 + \alpha\mathbf{x}^T(R^T R)\mathbf{x} \rightarrow \min. \quad (13)$$

Обозначим через $\Phi(\mathbf{x}) = \|W\mathbf{x} - \mathbf{p}\|_2$ и запишем решение, полученное методом градиентного спуска:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n - \lambda_n(\nabla\Phi(\mathbf{x}) + 2\alpha R^T R\mathbf{x}), \quad (14)$$

где λ_n задает скорость градиентного спуска. Перегруппировав слагаемые, запишем:

$$\mathbf{x}_{n+1} = (I - 2\alpha\lambda_n R^T R)\mathbf{x}_n - \lambda_n(\nabla\Phi(\mathbf{x})). \quad (15)$$

Тогда шаг градиентного спуска разбивается на два полушага. Первый полушаг по антиградиенту невязки:

$$\mathbf{x}_{n+1}^\nabla = \mathbf{x}_n - \lambda_n(\nabla\Phi(\mathbf{x})), \quad (16)$$

и второй шаг выполняет регуляризацию полученного на предыдущем полушаге решения:

$$\mathbf{x}_{n+1} = (I - 2\alpha\lambda_n R^T R)\mathbf{x}_{n+1}^\nabla. \quad (17)$$

На рис. 14 представлены результаты реконструкции сечения полипропиленовой пробирки, заполненной водой [55]. На левом рисунке результат реконструкции предложенным методом *RegART* (30 итераций), на центральном – методом *FBP*(Filtered Back Projection). На правом рисунке 14а приведен результат измерения на лабораторном томографе. Длина волны рентгеновского излучения $0.7 \text{ \AA}$. По вертикальной оси отложены проекционные углы, по горизонтальной оси – ячейки линейного детектора. Видно, что уровень шума в измеренных сигналах был не ниже 10%. В каче-

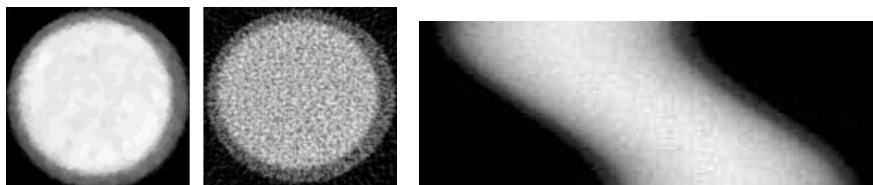


Рис. 14 — Результат реконструкции : *RegART* (левый), *FBP* (центральный). Измеренные значения (правый).

стве нелинейного регуляризирующего оператора использован медианный фильтр с размером окна 3×3 , сохраняющий границы. Средние значения коэффициента ослабления для воды для метода *RegART* и *FBP* равны 0.098 и 0.094, соответственно. Теоретическое значение составляет 0.099. На рис. 15 представлены центральные срезы сечений цифрового изображения полипропиленовой пробирки. На левом рисунке серый профиль – результат применения алгебраического метода без регуляризации ART (Algebraic Reconstruction Technique) (30 итераций). Черный профиль соответствует реконструкции предложенным методом *RegART* (30 итераций). На правом рисунке черный профиль – результат реконструкции предложенным методом *RegART*, серый профиль – результат *FBP*. Исследуются скорость

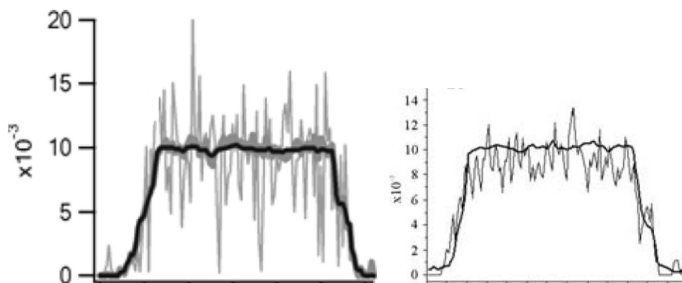


Рис. 15 — Результаты реконструкции (сечения). Справа: предложенный метод(черный) и ART (серый), слева: предложенный метод (черный) и *FBP*(серый).

сходимости метода [26], применение регуляризаторов, учитывающего морфологию объекта [27] и нейросетевого [28]. Поскольку в итерационных методах время расчета прямого и обратного операторов проецирования является узким горлышком, рассмотрены подходы к эффективному вычислению операторов проецирования [29; 30]

В разделе 4.4 представлен предложенный алгебраический метод томографической реконструкции с учетом гетероскедастичности сигналов [31]. Регистрация сигнала в пикселе детектора – стохастический процесс. Событие (регистрация кванта) может наступить, если прилетевший квант зарегистрирован, или не наступить, если прилетевший квант не зарегистрирован, например, попал в мертвое время регистрирующей аппаратуры. Если проводится ограниченное число n независимых испытаний, то вероятность того, что в серии из n испытаний событие наступит k раз приблизительно описывается распределением Пуассона с плотностью вероятности:

$$Pr(I = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad k = 1, \dots, n, \quad (18)$$

где I – регистрируемое пикселем детектора значение сигнала, λ – математическое ожидание равно дисперсии. Тогда линейаризованные значения (компоненты вектора) $\mathbf{p} = \ln(\mathbf{I}_0) - \ln(\mathbf{I})$ в системе (10) – случайные величины, $\mathbf{x}$ – вектор оценок линейного коэффициента ослабления или искомое решение. Поскольку значение $\mathbf{p}$ это результат монотонного преобразования I_1 , то функция распределения дискретных случайных величин не меняется относительно используемой для регистрируемых значений. Тогда математическое ожидание рассчитывается согласно выражению:

$$\mathbb{E} = \sum_{i=1}^{\infty} p_i Pr_i, \quad (19)$$

где индекс i – номер реализации случайной величины. Подставляя в явном виде выражение для плотности вероятности, перепишем выражение для математического ожидания и запишем выражение для дисперсии:

$$\mathbb{E} = \sum_{i=1}^{\infty} (\ln(I_0) - \ln(k_i)) \frac{\lambda^{k_i} e^{-\lambda}}{k_i!}, \quad D = \sum_{i=1}^{\infty} (\ln(I_0) - \ln(k_i) - \mathbb{E})^2 \frac{\lambda^{k_i} e^{-\lambda}}{k_i!}. \quad (20)$$

При проведении измерений значение математического ожидания нам не известно. Заменяв его на среднее арифметическое, воспользуемся значением выборочной дисперсии D :

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2, \quad (21)$$

где Y – измеряемые значения. На рис. 16 приведены результаты сравнения значений дисперсии, рассчитанных с использованием выражения

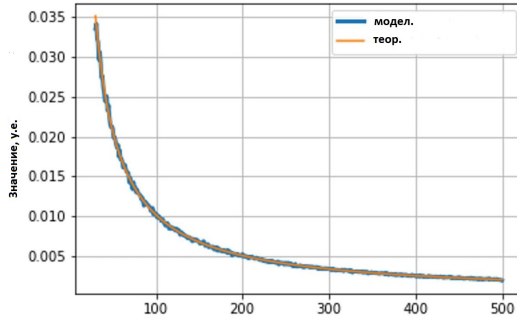


Рис. 16 — Сравнение теоретического результата с результатом моделирования.

(20) (оранжевая кривая), со значениями выборочной дисперсии (голубая кривая). В качестве генератора СВ использовался генератор для распределения Пуассона `numpy.random.poisson` ($\lambda = i$, `size=5000`). Модельные расчеты проводились для значений λ в интервале от 30 до 500 с шагом 0.5. Для каждого значения было сгенерировано 5000 значений. Визуальное сравнение кривых позволяет сделать вывод о корректности выбранного приближения выборочной дисперсии.

Чтобы учесть свойство гетероскедастичности наблюдений при решении задачи реконструкции, припишем вес, равный обратному среднеквадратичному отклонению, каждому регистрируемому значению сигнала на проекции:

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{p} \circ \frac{1}{\sqrt{\mathbf{D}}}. \quad (22)$$

Здесь $\circ$ – оператор поэлементного умножения. Запишем СЛАУ с учетом проведенного взвешивания:

$$\frac{1}{\sqrt{\mathbf{D}}} \circ W\mathbf{x} = \mathbf{p}^*. \quad (23)$$

Предложено решать оптимизационную задачу в следующей постановке:

$$\Phi = \left\| \frac{1}{\sqrt{\mathbf{D}}} \circ W\mathbf{x} - \mathbf{p}^* \right\|_2 \xrightarrow{x} \min. \quad (24)$$

Для иллюстрации работы метода были проведены модельные расчеты с использованием фантома, представленного на рис. 17. Размер фантома 50×50 пикселей, 50 проекционных углов. Модельная синограмма приведена на том же рисунке. На синограмме по горизонтальной оси отложены номера пикселей детектора, по вертикальной – проекционные углы. Представленный пример иллюстрирует ситуацию, в которой половина проекций снята с низкой экспозицией. Реконструкция выполнялась двумя

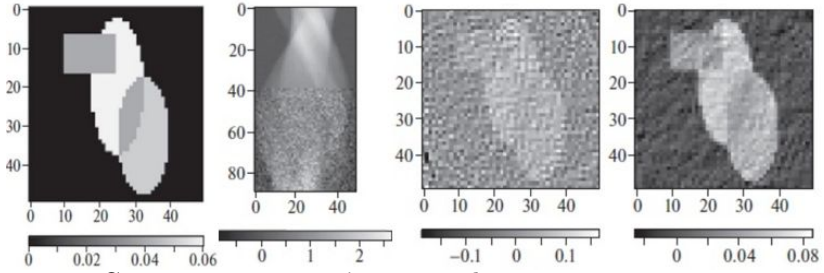


Рис. 17 — Слева-направо: изображение фантома, синограмма, результат реконструкции методом SIRT, результат реконструкции предложенным методом.

методами: алгебраическим методом SIRT и предложенным методом. Метод наискорейшего спуска применялся для решения оптимизационной задачи (24). В обоих методах реконструкции итерационный процесс был остановлен после 50 итераций. Визуальный анализ изображений демонстрирует выигрыш предложенного метода.

В разделе 4.5 рассматривается задача определения локального состава двухкомпонентного материала по набору полихроматических рентгеновских проекций [56]. Запишем модель формирования проекции с учетом линейной комбинации двух коэффициентов ослабления компонент:

$$\mathbf{I} = \sum_j \mathbf{I}_0^j \exp(W(\mathbf{c}_1 \mu_1^j - \mathbf{c}_2 \mu_2^j)) \Delta E, \quad (25)$$

где I – компонента вектора регистрируемых значений, j – индекс значения энергии в спектре, I_0^j – энергитическая компонента первичного зонда, W – элементы проекционной матрицы, c_1 , c_2 и μ_1 , μ_2 – локальные концентрации и линейные коэффициенты ослабления для дискретного значения энергии в спектре для первого и второго материала, соответственно. Будем решать задачу реконструкции как оптимизационную задачу большей размерности. Обозначим через $\mathbf{Q}(c_1, c_2)$ нормированную на величину спектра невязку между результатом измерения $\mathbf{I}^{res}$ и рассчитанными значениями $\mathbf{I}^k$ на k -ой итерации:

$$\mathbf{Q}(c_1, c_2) = \frac{\|\mathbf{I}^{res} - \mathbf{I}^k\|_2}{\sum_j \mathbf{I}_0^j \Delta E}. \quad (26)$$

Будем решать оптимизационную задачу

$$\mathbf{Q}(c_1, c_2) + \beta \|\mathbf{c}_1 \circ \mathbf{c}_2\|_2 + \frac{1}{t} (\ln(-\mathbf{c}_1) + \ln(-\mathbf{c}_2) + \ln(1 - \mathbf{c}_1) + \ln(1 - \mathbf{c}_2)) \xrightarrow{c_1 c_2} \min, \quad (27)$$

в которой ограничения учитываются в виде логарифмических барьеров. Вдали от границы логарифмические штрафы не влияют на оптимизируемый функционал, но быстро растут при подходе к границе, внося необходимые поправки в шаг итерации.

В разделе 4.6 рассматривается задача томографической реконструкции при использовании конического пучка, когда реконструкция не может выполняться послойно. Если требуется высокое пространственное разрешение и высокая точность, проекции имеют большой размер (например 2048×2048), и число проекционных углов велико, возникает ситуация, когда рассчитать одну итерацию на GPU не удастся в силу ограничения доступной памяти, используемой GPU. Предложено [32] разбивать

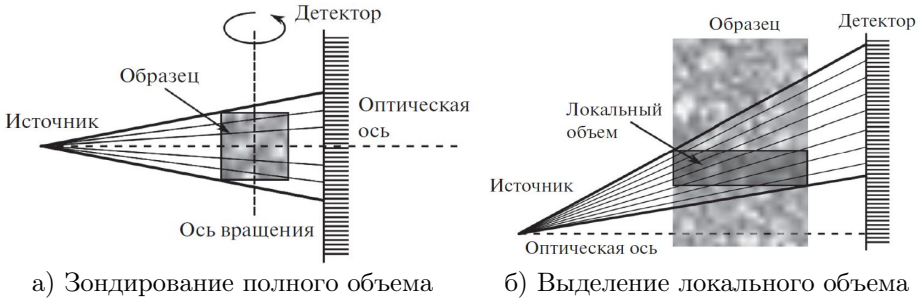


Рис. 18 — Принципиальная схема без разбиения на подобъемы (а) и с разбиением на подобъемы (б).

восстанавливаемый объем на подобъемы и решать задачу в следующей постановке. Пусть $\mathbf{p}$ – вектор линейаризованных измеренных значений, W – проекционная матрица, $\mathbf{x}$ – искомое решение. При отсутствии ограничений на требуемый для вычислений объем памяти задача поиска решения системы линейных уравнений:

$$W\mathbf{x} = \mathbf{p} \quad (28)$$

в диссертации сформулирована, как оптимизационная задача поиска минимума функционала вида

$$\Phi(\mathbf{x}) = (1 - \alpha)\|\mathbf{p} - W\mathbf{x}\|_2 + \alpha R(\mathbf{x}). \quad (29)$$

Здесь α определяет вклад каждого из слагаемых в оптимизируемое выражение, $R(\mathbf{x})$ – линейная комбинация регуляризирующих операторов, область определения которых – векторное пространство решений. После разбиения объема на подобъемы ограниченного размера переформулируем оптимизационную задачу. Введем невязку с учетом значений вектора

решений на $(i - 1)$ итерации:

$$\Delta = \mathbf{p} - W\mathbf{x}^{i-1}, \quad (30)$$

запишем лучевые суммы для пикселей подобъема:

$$SUM_{local}^{i-1} = W^{local}\mathbf{x}^{i-1}. \quad (31)$$

и перепишем систему уравнений:

$$W^{local}\mathbf{x} = \Delta + SUM_{local}^{i-1}. \quad (32)$$

Оптимизационная задача в диссертации решена в следующей постановке:

$$(1 - \alpha)\|W^{local}\mathbf{x} - (\Delta + SUM_{local}^{i-1})\|_2 + \alpha R(\mathbf{x}) \rightarrow \min. \quad (33)$$

Результат решения задачи в данной постановке приведен на рисунке 19. Проведенный томографический эксперимент описан в диссертации.

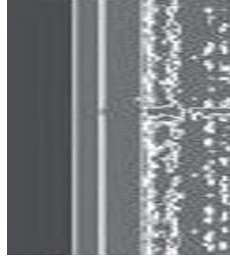


Рис. 19 — Результат реконструкции из измеренных проекций (участок).

В разделе 4.7 проведен анализ методов повышения быстродействия в задаче томографической реконструкции и представлен предложенный метод автоматического определения областей минимальной площади на измеренных проекциях, необходимой для восстановления цифрового изображения объекта без потери деталей области интереса [57]. Цель метода – уменьшить количество данных, передаваемых в реконструктор, без потери точности реконструкции. Входные данные – серия из K 2D томографических проекций $P_k(x,y)$ размера $N \times N$. Размер проекции определяется количеством пикселей позиционно-чувствительного детектора, K – число проекционных углов. Предложено минимизировать разброс яркостей в пределах искомой границы области, т.е. математическая постановка задачи выглядит следующим образом:

$$\sigma(x,y) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (P_k(x,y)^2 - (\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k(x,y))^2)} \xrightarrow{x,y} \min. \quad (34)$$

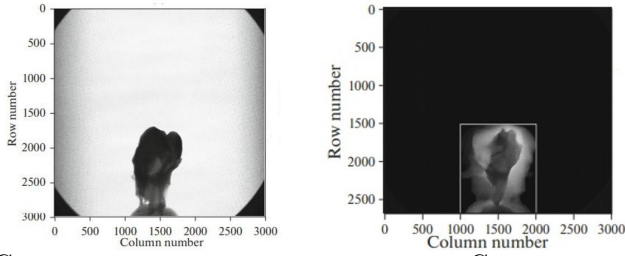


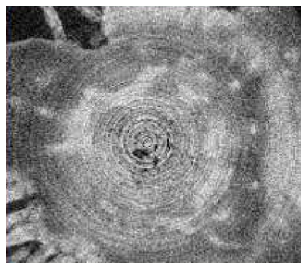
Рис. 20 — Слева: одна из измеренных проекций. Справа: найденная предложенным методом область на суммарной проекции.

Результат решения задачи приведен на рисунке 20. В разделе 4.8 дано заключение по четвертой главе.

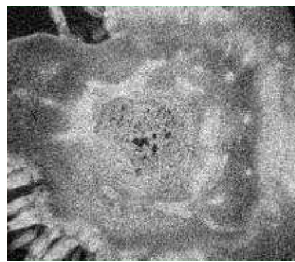
В **пятой главе** рассматриваются методы уменьшения выраженности искажений, возникающих на восстановленном цифровом изображении объекта вследствие отклонений параметров съемки от идеальных, и представлен метод оценки точности результатов реконструкции. В разделе 5.1 проанализированы источники искажений, возникающих на восстановленных изображениях [58], дано описание факторов, влияющих на точность реконструкции [59]. Программный комплекс STE [33; 60] использовался для расчетов. Далее в разделе 5.2 приведена задача уменьшения выраженности искажений, возникающих при малоракурсной съемке. Описан нейросетевой метод, предложенный для уменьшения выраженности искажений, возникающих на изображениях в виде выделенных секторов повышенной яркости, совпадающих с направлениями съемки.

Задача уменьшения выраженности искажений типа концентрических колец (рис. 21а), возникающих на восстановленных изображениях вследствие наличия вертикальных полос на синограммах (рис. 22а), рассматривается в разделе 5.3. Появление вертикальных полос на синограммах обусловлено неоднородностями отклика ячеек детектора вследствие неидеальной их калибровки. Предложенный метод работает с каждой синограммой отдельно. Проводится локализация областей синограммы, содержащих вертикальные полосы, классификация типов полос, выполняется фильтрация в локальной области с учетом типа полосы, попавшей в область. Задача решалась в следующей постановке. В аддитивной модели полосовых искажений рассчитать целевые синограммы, использование которых в алгоритмах реконструкции уменьшит выраженность кольцевых артефактов. Измеренная и нормированная согласно модели измерения (см. разделы 1.7 – 1.9), синограмма $\mathbf{S}$ представляется суммой целевой синограммы $\tilde{\mathbf{S}}$ и компоненты полосового искажения $\mathbf{e}$:

$$\mathbf{S} = \tilde{\mathbf{S}} + \mathbf{e}. \quad (35)$$

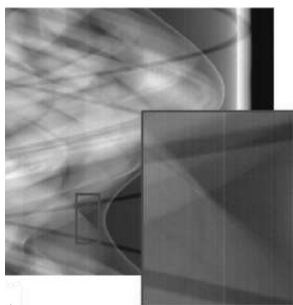


а) По измеренным проекциям

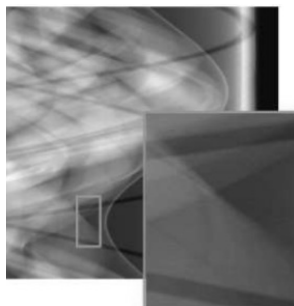


б) После коррекции проекций

Рис. 21 — Участок восстановленного изображения. Реконструкция по измеренным проекция. (а) Реконструкция после коррекции проекций (б).



а) Измеренная синограмма



б) После коррекции

Рис. 22 — Участок синограммы. Измеренная (а) После коррекции (б).

Значения компоненты искажения $\mathbf{e}$ вычисляются как попиксельная разность исходной синограммы с результатом ее нелинейной фильтрации:

$$\mathbf{e} = \mathbf{S} - \mathcal{F}[\mathbf{S}]. \quad (36)$$

Ниже приведено описание метода расчета целевых синограмм, использование которых для реконструкции уменьшает выраженность кольцевых артефактов [34]. Каждая синограмма обрабатывается фильтром с индивидуальными автоматически рассчитываемыми параметрами. Для построения синограмм каждая проекция из измеренного и линеаризованного набора разбивается на строки. Пусть размер проекции $M \times N$, где M – число линеек детектора или число строк проекции, а N – число ячеек (пикселей) в линейке детектора. Строки с выбранным номером для всех проекционных углов последовательно записываются одна под другой, формируя новое изображение, т.е. синограмму размера $K \times N$. Здесь K –

число проекционных углов. Количество изображений (синограмм) в точности соответствует числу строк детектора M . Для расчета каждой целевой

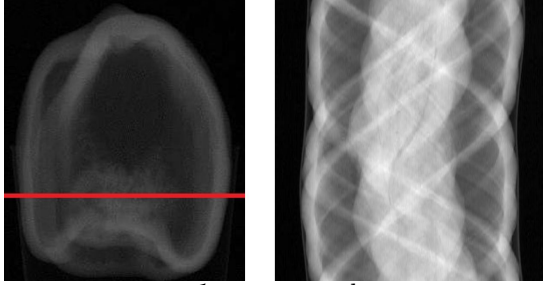


Рис. 23 — Слева: проекция объекта для фиксированного проекционного угла. Справа: синограмма для выделенной красным строки детектора.

синограммы выполняется следующая последовательность шагов.

1. Расчет усредненной строки синограммы $\bar{s}$. В каждый элемент строки записывается значение, усредненное по соответствующему столбцу синограммы.

2. Выполнение медианной фильтрации с целью удалить высокочастотный шум, сохранив границы $Median_{wing=1}[\bar{s}]$. Размер окна фильтра — $2 \cdot wind + 1$.

3. Выполнение билатеральной фильтрации, действующей в двух доменах: пространственном и домене интенсивностей, позволяющей автоматически провести классификацию типов полос $Bilateral_{wing, \sigma_x, \sigma_s}[\bar{s}]$. Здесь значение $wing$ определено как 0.5% эффективной ширины синограммы. Значение среднеквадратичного отклонения в пространственном домене рассчитывается с учетом правила трех сигм, где $\sigma_x = \frac{2wing+1}{6}$. Значение среднеквадратичного отклонения в домене интенсивностей рассчитывается, как

$$\sigma_s = 0.95absmax((Bilateral_{2 \cdot wing, 2 \cdot \sigma_x - \frac{1}{6}, q} \circ Median_{wing=1})[\bar{s}] -). \quad (37)$$

q равен 0,9-квантилю выборки, составленной из значений элементов массива средней строки синограммы.

4. Расчет компоненты полосового искажения e согласно выражению

$$e(j) = \bar{s}(j) - (Bilateral_{wing, \sigma_x, \sigma_s} \circ Median_{wing=1})[\bar{s}](j), \quad (38)$$

где i — индекс элемента массива средней строки синограммы.

5. Удаление ошибочных значений попиксельным вычитанием массива ошибок из каждой строки синограммы:

$$\hat{s}(i, j) = s(i, j) - e(j). \quad (39)$$

Здесь i – номер строки синограммы, он же номер проекционного угла.

6. Заключительным этапом является операция выравнивания контраста:

$$\hat{\hat{s}}(i,j) = \hat{s}(i,j) + \frac{\bar{e}}{M} \cdot s(i,j). \quad (40)$$

В разделе 5.4 рассматривается задача уменьшения выраженности искажений, возникающих при неточных параметрах положения оси вращения, передаваемых в реконструктор. На рис. 24 продемонстрирована проблема. Неточность может возникнуть при неидеальной первоначальной юстировке томографа, юстировка может быть сбита во время установки образца в держатель или при переключении масштаба измерения [61]. По-

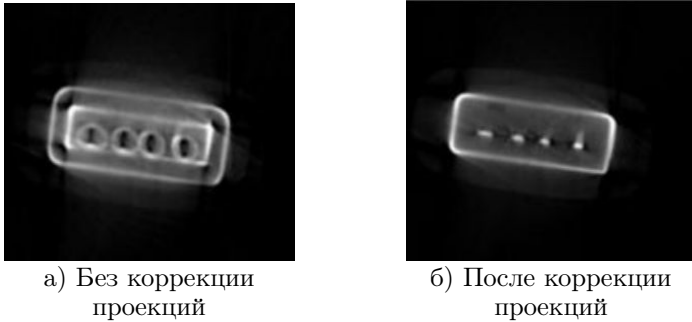


Рис. 24 — Участок восстановленного сечения флэш-накопителя (рис. 25) по измеренным проекция (а). Реконструкция после коррекции проекций (б).

строен метод автоматического определения точных значений параметров, определяющих положение оси вращения, для передачи их в реконструктор с целью уменьшить выраженность артефактов, возникающих при передаче неверных значений. Предложено использовать свойство осевой симметрии

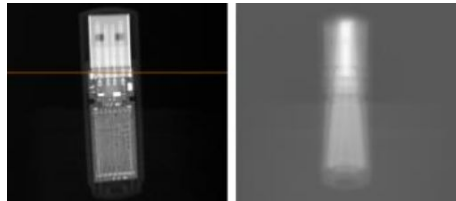


Рис. 25 — Слева: абсорбционная проекция USB-флэш-накопителя. Справа: ее интегральная проекция.

интегральной проекции и решать задачу в следующей постановке. Будем

минимизировать функционал вида [62]

$$\Phi(\alpha, \Delta x) = \|\mathcal{R}_{-\alpha}[\bar{p}] - (\mathcal{S}_{2\Delta x} \circ \mathcal{F} \circ \mathcal{R}_{-\alpha})[\bar{p}]\|_1, \quad (41)$$

где $\bar{p}$ – среднее по всем проекциям, $\mathcal{R}$ – оператор поворота изображения, $\mathcal{S}$ – оператор сдвига в горизонтальном направлении, $\mathcal{F}$ – оператор зеркального отображения в горизонтальном направлении. На рисунке 26 проиллюстрировано взаимное расположение источника, оси вращения и детектора с используемыми в выражении 41 обозначениями. Метод автоматического

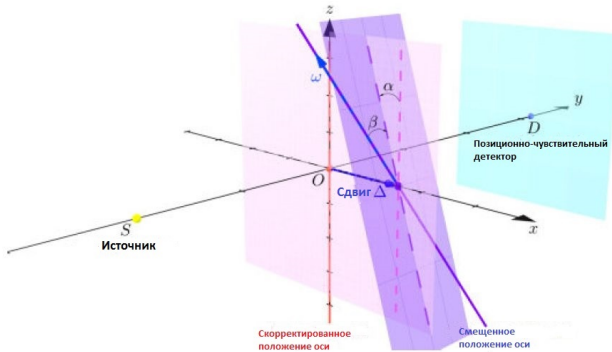


Рис. 26 — Иллюстрация сдвига оси вращения.

определения положения оси вращения представлен в работе [63]

В разделе 5.5 рассматривается задача уменьшения выраженности искажений, возникающих на восстановленном изображении при наличии в томографируемом объекте сильнопоглощающих включений [64]. Сильнопоглощающим будем называть такое включение, при зондировании которого рентгеновский пучок поглощается почти полностью. Т.е. величина сигнала, регистрируемого пикселем детектора, в который приходят лучи, прошедшие через включение, находится на уровне шума. Определение «сильнопоглощающее» относится к паре «материал – энергия зонда». Проблема: при наличии в объекте сильнопоглощающих включений на изображении, восстановленном неадаптированным методом, присутствуют характерные искажения в виде областей тени в районе расположения сильнопоглощающего включения. Если включение протяженное, то нарушается граница области, содержащей включение. Проблема возникает вследствие того, что значение регистрируемого сигнала в пикселе детектора близко к нулю. Предложено решать задачу условной оптимизации с ограничениями в виде неравенств. Пусть $\mathbf{I}$ – вектор измеренных значений, $\mathbf{p}$ – вектор линейаризованных измеренных значений, W – проекционная матрица, $\mathbf{x}$ – искомое решение. Будем решать систему линейных уравнений 28,

минимизируя функционал:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \|T(W\mathbf{x} - \mathbf{p})\|_2 + \alpha\|[QW\mathbf{x} - B]^{-}\|_2, \quad (42)$$

воспользовавшись методом штрафных функций с мягкими ограничения. Здесь $[y]^{-} = \min(0, y)$. T – бинарная матрица, единичные элементы соответствуют индексам, для которых $I_i > 0$. α регулирует эффект сглаживания. Q – бинарная матрица для выделения элементов, соответствующих $I_i = 0$. B – вектор пороговых значений [65].

Задача уменьшения выраженности искажений, возникающих на восстановленных изображениях при полихроматическом зондировании, рассматривается в разделе 5.6. Причиной появления искажений является неравномерное ослабление энергетических компонент полихроматического зонда. Эффект имеет название «ужесточение пучка» или Beam Hardening (ВН). Данные искажения известны под названием «чашевидные артефакты» [66]. Выглядит артефакт как проседание к центру изображения значений усредненного коэффициента ослабления для однородной области. На нижнем рисунке 27 приведены две кривые: синяя и красная. Это сечения восстановленного изображения объекта. Красный профиль – это результат подачи зарегистрированных проекций, полученных при полихроматическом зондировании, в классический реконструктор. Синий профиль – результат применения предложенного и описанного ниже метода автоматической коррекции проекций. Использование аппаратной фильтрации спектра, т.е. установка системы фильтров в оптическом тракте до образца, может приводить к уменьшению контраста на регистрируемых проекциях от локальных областей, слабопоглощающих высокие энергии. Построен автоматический метод обработки регистрируемых проекций, минимизирующий выраженность искажений [67]. Будем решать задачу в следующей постановке [68]. Пусть образец состоит из одного материала, концентрация которого неоднородна по объему. Тогда выражение, которое связывает величину регистрируемого сигнала и распределение концентрации, можно записать в виде

$$I(i, \phi) = \int dE (I_0(i, E) \nu(i, E) \exp(- \int_{L(i, \phi)} dl \mu(E) C(l))). \quad (43)$$

Здесь $I(i, \phi)$ – сигнал i ячейки детектора для проекционного угла поворота ϕ , $I_0(i, E)$ – начальная интенсивность компоненты спектра энергии E , $\nu(i, E)$ – отклик ячейки на прилетевшие кванты энергии E , $\mu(E)$ – линейный коэффициент ослабления материала на энергии E , C – локальная концентрация материала. Предполагая, что распределения ($I_0(i, E)$, $\nu(i, E)$, $\mu(E)$) нам известны из референсных измерений, перепишем выражение 43 в следующем виде

$$\mathbf{I} = f(- \int_{L(i, \phi)} dl C(l)) = f(R(\mathbf{C})). \quad (44)$$

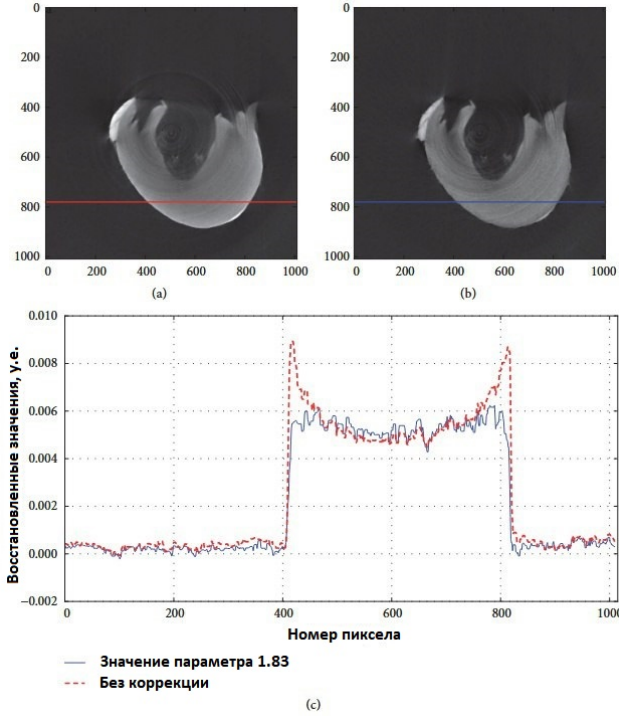


Рис. 27 — Результат реконструкции: (а) без коррекции ВН, (б) с коррекцией ВН, (с) соответствующие поперечные сечения в строке 780 [35].

Здесь R – преобразование Радона. Чтобы восстановить распределение концентрации C необходимо сначала найти преобразование f^{-1} , поскольку

$$R(C) = f^{-1}(I), \quad (45)$$

а затем обратить преобразование Радона. Обобщим приведенные рассуждения на многокомпонентные по составу объекты. Будем использовать класс однопараметрических степенных функций с фиксированным масштабирующим параметром в качестве преобразования [36]. Т.е. если x – восстановленное изображение, то задача реконструкции может быть записана в виде

$$x = R^{-1}(I^*), \quad (46)$$

где

$$p^*(i, \phi) = \left(\ln \left(\frac{\int dE I_0(i, E) \nu(i, \phi, E)}{I(i, \phi)} \right) \right)^\gamma. \quad (47)$$

Воспользуемся Радоновским инвариантом для определения γ . Радоновский инвариант – это равенство суммарных значений, рассчитываемых

по всем пикселям детектора, при монохроматическом зондировании для всех проекционных углов. Рассчитаем суммы p^* по всем пикселям i для каждой полихроматической проекции, т.е. SUM_ϕ , $\phi = 1, \dots, K$. Среднее значение сумм SUM_ϕ близко к Радоновскому инварианту для монохроматического случая. Для расчета оценки γ предложено минимизировать выражение

$$\sqrt{\frac{\sum_\phi (SUM_\phi^\gamma - SUM_\phi^\gamma)^2}{SUM_\phi^\gamma}} \xrightarrow{\gamma} min. \quad (48)$$

На рис. 27b приведен результат реконструкции методом FBP после коррекции полихроматических проекций предложенным методом.

Проблема оценки точности томографической реконструкции [2] рассмотрена в разделе 5.7. Томографы применяются для неразрушающего изучения внутренней структуры неизвестных объектов, проведения дефектоскопии или метрологического контроля готовых изделий [37], изучения динамических процессов, протекающих в природных объектах или изделиях и т.п. Исследование внутренней структуры устройства может проводиться с разным пространственным разрешением [69; 70]. Использование томографов для решения разнотипных задач предъявляет разные требования к алгоритмам реконструкции: по точности, по времени вычислений, по требуемому объему памяти. Ограничения на время или на объем памяти приводят к необходимости оптимизировать алгоритм, что влияет на точность реконструкции, которую необходимо уметь оценивать. Задача оценки точности реконструкции ставится и в методе томографии под контролем реконструкции [71]. Может использоваться оценка, основанная на восприятии человека, восприятии специалиста, работающего в одной из двух областей. Первая связана с производством приборов, формирующих изображение, вторая – с областью использования приборов. Данный подход к оценке не требует обязательного наличия идеального изображения для попарного сравнения, не требует этапа совмещения двух изображений [38], может базироваться на экспертной оценке. В качестве количественного показателя при проведении тестирования на целевой аудитории может использоваться MOS или R-фактор. Оценка проводится по конкретным характеристикам (размытость, шум, артефакты и т.п.). Если контроль выполняется автоматически, то необходимы субъективные критерии оценки точности. Предложено разделить томографические установки в соответствии с их назначением на три группы и применять разные подходы к оценке. Томографы **первой группы** предназначены для построения 3D цифровых изображений томографируемых объектов. Они находят применение в задачах определения структуры неизвестных объектов, в задачах реинжиниринга, задачах организации разномасштабных измерений в одном приборе, задачах организации съемки как изделия в целом, так и его отдельных частей с разных ракурсов

и т.д. Для оценки точности алгоритмов, используемых в таких аппаратно-программных комплексах, применимы два интегральных подхода, в которых суммарно оцениваются отклонений значений яркости вокселей восстановленного объема от значений яркости референсного объема $F^1 : MSE(x_{ideal}, x_{rec}), PSNR(x_{ideal}, x_{rec}), SSIM(x_{ideal}, x_{rec})$ или, если референсный объект не доступен, анализируется суммарная ошибка репроецирования, т.е. отклонение реально измеренных проекций от проекций, рассчитанных с использованием восстановленного распределения значений ослабления рентгеновского излучения материалами изделия. Последний подход легко применим для случаев монохроматического зондирования и требует дополнительных оценок для применения в измерительных схемах с полихроматическим излучением или в томографических схемах с установленными в измерительном тракте оптическими элементами. Ко **второй группе** относятся томографы, применяемые для дефектоскопии или метрологического контроля. Для таких аппаратно-программных комплексов рекомендованы два типа подходов к оценке точности реконструкции. В первом подходе метрика M дополняется частью, связанной с типом дефекта:

$$M(x_{rec}) = \alpha F^1 + \beta F^2. \quad (49)$$

В линейной комбинации первое слагаемое является взвешенной суммарной попиксельной невязкой F^1 значений яркости восстановленного и референсного изображений в пространстве расстояний, а второе F^2 – взвешенной невязкой в параметрическом пространстве моделей дефекта. Веса α и β определяются эмпирически. Анализируется либо полный восстановленный объем, либо его часть, содержащая дефект. Анализ включает несколько этапов: обнаружение дефекта [39; 40], сравнение обнаруженного дефекта с моделью дефекта, принятие решения об отбраковке. Т.е. метод реконструкции из проекций, собранных в конкретных условиях, должен позволять обнаруживать дефект. Локальная область с дефектом формально описывается в терминах модели дефекта. При этом правило обнаружения дефекта и модель дефекта могут быть согласованы или не согласованы, модель дефекта и модель принятия решения об отбраковке должны быть согласованы [41]. Второй подход базируется на использовании индекса структурного сходства на заданном масштабе деталей, например с использованием вейвлет преобразования [42].

К **третьей группе** принадлежат томографы, являющиеся частью многоступенчатой системы принятия решения. Томограф, используемый для изучения движения жидкости или газа через пористую структуру с целью исследования фильтрационных свойств, степени проницаемости или теплопередачи, является примером прибора третьей группы. В таких системах модель оценки точности алгоритмов реконструкции превращается в модель ответа системы принятия решения. Последняя может ограничиваться линейной комбинацией суммарной попиксельной невязки и

невязки в параметрическом пространстве моделей порового пространства, но в некоторых применениях требует дополнения с учетом модели движения [43].

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые формулируются следующим образом:

1. Разработан метод вейвлет-анализа протяженной (дальней) тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (EXAFS-спектров) с контролем размера ячейки спектральных характеристик, позволяющий в геометрической модели окружения ионизируемого атома определить радиусы ближайших координационных сфер и их элементный состав. Предложенный метод исключает этап подгонки параметров геометрической модели, необходимый при использовании для анализа спектров метода Фурье. Использование предложенного метода сокращает в десятки раз время проведения исследования атомной структуры новых материалов, способных преодолеть ограничения полупроводниковой технологической платформы. Использование предложенного метода для анализа EXAFS-спектров позволило уточнить детали атомной структуры выращенной высокотекстурированной эпитаксиальной сверхрешетки $GeTe(1 \text{ нм})/Sb_2Te_3(3 \text{ нм})$. С помощью предложенного метода анализа EXAFS спектров уточнена структура слоистых двойных гидроксидов, используемых в качестве двумерных нанореакторов или в качестве двумерных модельных систем для изучения процессов переноса энергии.
2. Разработан вычислительный метод определения двумерного профиля протонных и рентгеновских микропучков, базирующийся на математической обработке карт флуоресцентных сигналов, формируемых при сканировании ортотропных структур, нанесенных на тонкую подложку, сфокусированными протонными или рентгеновскими микропучками. Знание формы профиля микропучка (пространственного распределения количества протонов или пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения в фокальной плоскости фокусирующей системы) позволяет до 5 раз повысить пространственное разрешение сканирующего метода. При использовании микропучков для оценки чистоты поверхности, исследования локального состава и/или структуры поверхности и приповерхностных слоев повышение пространственного разрешения позволяет уточнить количественные оценки регистрируемых флуоресцентных сигналов, описывающие пространственное распределение и силу источников флуоресценции. При использовании микропучков для микроструктурирования поверхностей в литографии знание формы микропучка

позволяет оптимизировать процессы управления пучком для повышения качества элементов формируемой микроструктуры.

3. Построена параметрическая модель оценки точности результатов томографической реконструкции с учетом функционального назначения томографа. Использование модели позволяет комбинировать метрики оценки качества реконструкции с учетом условий поставленной для томографа задачи: исследование, проведение дефектоскопии, метрологического контроля или использование томографа в качестве одной из частей многоступенчатой системы принятия решения.
4. Разработан вычислительный метод рентгеновской флуоресцентной томографии, базирующийся на модели формирования рентгенофлуоресцентных проекций, уточненной в части учета поглощения излучения в объеме образца, и позволяющий, в отличие от ранее известных методов, оценивать пространственное распределение химических элементов в объеме образца без систематического занижения значений по причине ослабления сигнала. Применение метода для изучения ионных каналов в растениях и их роли в дальнейшем транспорте ионов позволило локализовать каналы для транспорта элементов K, Fe, Cu, As, Y и Zr. В рамках изучения процесса повторного осаждения на краях абляционного отверстия в вулканическом стекле исследовано распределение трех групп элементов: элементов, склонных к лазерноиндуцированному фракционированию, сидерофильных и литофильных элементов, а также летофильных элементов, не демонстрирующие фракционирования, что позволило оптимизировать процесс лазерной абляции.
5. Разработан метод томографической реконструкции цифрового изображения объекта *RegART* с регуляризацией в виде нелинейного оператора. Метод позволил на 7% повысить точность томографической реконструкции при работе с рентгеновскими проекциями, собранными в условиях ограниченной дозовой нагрузки, по сравнению со стандартными методами. Для случаев высокого уровня шума на проекциях предложены формы нелинейных фильтров, при малом числе проекционных углов предложено использовать нейросетевой регуляризатор. Использование предложенного метода регуляризации при малоракурсной съемке, понижающей дозовую нагрузку до 10 раз, позволило повысить точность реконструкции на порядок по сравнению с опубликованной ранее нейросетевой моделью, обученной для задачи реконструкции.

6. Разработан метод томографической реконструкции цифровых изображений объекта для определения локального состава многокомпонентного объекта с использованием одного стандартного набора рентгеновских полихроматических проекций. Ранее для определения локального состава предлагалось использовать сканирование несколькими различающимися по энергетическому составу спектрами. Это в разы увеличивает дозовую нагрузку на изделие, что может приводить к повреждению изделий. На примере двухкомпонентного объекта показано, что применение предложенного метода позволяет восстановить отдельное распределение для каждой из компонент.
7. Разработан метод томографической реконструкции, обеспечивающий 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. Автоматический метод линеаризации полихроматических проекций, не требующий проведения дополнительных референсных измерений, позволяет уменьшить выраженность артефактов типа чаши до 5 раз. Метод автоматической коррекции параметров положения оси вращения позволяет автоматически определять значения параметров с точностью определения параметров вручную. Его использование позволяет избежать размытия границ областей на восстановленном изображении. Метод реконструкции цифровых изображений объектов, содержащих сильно поглощающие включения, уменьшает выраженность артефактов, возникающих в виде ярких полос, расходящихся от места нахождения включения и образующих область тени. Это позволяет анализировать детали изображения, попавшие в область тени.

Публикации автора по теме диссертации

Без соавторов

1. *Chukalina, M.* Data vizualization: From X-ray measurements to the atomic structure via wavelet [Текст] / M. Chukalina // 20th European Conference on Modelling and Simulation: Modelling Methodologies and Simulation Key Technologies in Academia and Industry, ECMS 2006. — 2006. — P. 430—433.
2. *Чукалина, М.* К задаче оценки точности в компьютерной томографии [Текст] / М. Чукалина // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2025. — № 2. — С. 3—11.

В периодических научных журналах, входящих в базы цитирования Web of Science, Scopus и RSCI

3. X-ray tomography: the way from layer-by-layer radiography to computed tomography [Текст] / V. L. Arlazarov [et al.] // Computer Optics. — 2021. — Vol. 45, no. 6. — P. 897—906.
4. Crystal-analyzer based multispectral microtomography using CCD-sensor [Текст] / M. Grigoriev [et al.] // Sensors. — 2023. — Vol. 23. — P. 1—16.
5. *Funke, H.* Wavelet analysis of extended x-ray absorption fine structure data [Текст] / H. Funke, A. C. Scheinost, M. Chukalina // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. — 2005. — Vol. 71, no. 9. — P. 094110.
6. Revisiting the Local Structure in Ge-Sb-Te based Chalcogenide Superlattices [Текст] / B. Casarin [et al.] // Scientific Reports. — 2016. — Vol. 6, no. 22353. — P. 1—8.
7. *Funke, H.* A new FEFF-based wavelet for EXAFS data analysis [Текст] / H. Funke, M. Chukalina, A. C. Scheinost // Journal of Synchrotron Radiation. — 2007. — Vol. 14, no. 5. — P. 426—432.
8. XAFS of Pu LIII Edge in LaBS Glass [Текст] / S. V. Stefanovsky [et al.] // Ceramics for Environmental and Energy Applications. — John Wiley & Sons, Ltd, 2010. — Chap. 3. P. 17—24.
9. Anion and Cation Order in Iodide-Bearing Mg/Zn-Al Layered Double Hydroxides [Текст] / L. Aimoz [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. — 2012. — Vol. 116, no. 9. — P. 5460—5475.
10. *Чукалина, М. В.* Подход к решению задачи анализа EXAFS-спектров на базе использования всплеск-преобразования [Текст] / М. В. Чукалина, Х. Функе // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2005. — Т. 69, № 2. — С. 233—236.
11. *Funke, H.* Wavelet Analysis of Extended X-Ray Absorption Fine Structure Data [Текст] / H. Funke, M. Chukalina, A. Rossberg // Physica Scripta. — 2005. — Vol. T115. — P. 232—234.
12. *Chukalina, M. V.* Mathematical reconstruction of sample microstructures obtained from PIXE elemental maps [Текст] / M. V. Chukalina, U. Wätjen // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2001. — Vol. 181, no. 1. — P. 249—253.
13. *Чукалина, М.* Восстановление формы рентгеновского зонда по рентгенофлуоресцентным картам [Текст] / М. Чукалина, Д. Николаев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2011. — Т. 77, № 8. — С. 30—33.

14. High-Resolution X-Ray Fluorescence Microtomography of Homogeneous Samples [Текст] / A. Simionovici [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2000. — Vol. 47, no. 6. — P. 2736—2740.
15. Internal elemental microanalysis combining x-ray fluorescence, Compton and transmission tomography [Текст] / B. Golosio [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2003. — Vol. 94, no. 1. — P. 145—156.
16. Quantitative characterization of microsamples by x-ray fluorescence tomography [Текст] / M. Chukalina [et al.] // X-Ray Spectrometry. — 2002. — Vol. 31, no. 6. — P. 448—450.
17. Конфокальный коллиматор для радионуклидной диагностики и рентгенофлуоресцентного анализа [Текст] / С. Зайцев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2020. — № 3. — С. 147—151.
18. X-ray microtome by fluorescence tomography [Текст] / A. Simionovici [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2001. — Vol. 467/468. — P. 889—892.
19. X-ray fluorescence micro-tomography of an individual fluid inclusion using a third generation synchrotron light source [Текст] / B. Ménez [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2001. — Vol. 181, no. 1. — P. 749—754.
20. A new nondestructive X-ray method for the determination of the 3D mineralogy at the micrometer scale [Текст] / L. Lemelle [et al.] // American Mineralogist. — 2004. — Vol. 89, no. 4. — P. 547—553.
21. From hard to soft matter using SR X-Ray Micro-Imaging [Текст] / A. Simionovici [et al.] // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2004. — Vol. 68, no. 11. — P. A768—A768.
22. Сопоставление данных рентгеновской микротомографии и флуоресцентного анализа при изучении структурной организации костной ткани [Текст] / В. Е. Асадчиков [и др.] // Кристаллография. — 2012. — Т. 57, № 5. — С. 782—790.
23. Quantitative comparison of X-ray fluorescence microtomography setups: Standard and confocal collimator apparatus [Текст] / M. Chukalina [et al.] // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. — 2007. — Vol. 62, no. 6. — P. 544—548.
24. Шабельникова, Я. Сравнение функции сбора рентгенофлуоресцентного сигнала для двух типов коллиматоров [Текст] / Я. Шабельникова, М. Чукалина // Письма в Журнал технической физики. — 2012. — Т. 38, № 10. — С. 6—13.

25. A Hardware and Software System for Tomographic Research: Reconstruction via Regularization [Текст] / M. V. Chukalina [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2019. — No. 2. — P. 150—154.
26. На пути к контролируемой томографической реконструкции, сравнение сходимости алгоритмов на синтетических данных [Текст] / Ж. Солдатов [и др.] // Труды института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН). — 2022. — Т. 72, № 3. — С. 10—18.
27. Morphological Analysis and Reconstruction for Computed Tomography [Текст] / V. E. Asadchikov [et al.] // International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications. — 2011. — Vol. 3. — P. 7.
28. Neural network regularization in the problem of few-view computed tomography [Текст] / A. V. Yamaev [et al.] // Computer Optics. — 2022. — Vol. 46, no. 3. — P. 422—428.
29. Effective regularized algebraic reconstruction technique for computed tomography [Текст] / V. E. Prun [et al.] // Crystallography Reports. — 2013. — Vol. 58, no. 7. — P. 1063—1066.
30. Complexity-Preserving Transposition of Summing Algorithms: A Data Flow Graph Approach [Текст] / D. Polevoy [et al.] // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 60, no. 4. — P. 344—362.
31. Учет гетероскедастичности в измеряемых томографических проекциях при реализации алгебраического подхода в томографической реконструкции [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Сенсорные системы. — 2022. — Т. 36, № 1. — С. 90—98.
32. Алгебраическая реконструкция в условиях недостатка памяти графического процессора в задаче компьютерной томографии [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Сенсорные системы. — 2019. — Т. 33, № 2. — С. 166—172.
33. Reducing radiation dose for NN-based COVID-19 detection in helical chest CT using real-time monitored reconstruction [Текст] / K. Bulatov [et al.] // Expert Systems with Applications. — 2023. — Vol. 229. — P. 1—14.
34. Adaptive automated sinogram normalization for ring artifacts suppression in CT [Текст] / D. Kazimirov [et al.] // Optics Express. — 2024. — Vol. 32, no. 10. — P. 17606—17643.
35. Анализ результатов томографической реконструкции объектов с сильно поглощающими включениями по проекциям, собранным в полихроматических условиях [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2020. — № 3. — С. 49—61.

36. *Ингачева, А.* Исследование свойств полиномиальной корректирующей функции полихроматических лучевых интегралов в задаче компьютерной томографии [Текст] / А. Ингачева, М. Чукалина, Д. Николаев // Труды института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН). — 2021. — Т. 71, № 1. — С. 92—100.
37. Рентгеновская томография для локального контроля компонент и инспекции модулей [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Наноиндустрия. — 2024. — Т. 17, S10—2 (128). — С. 662—665.
38. Количественное описание свойств протяженных дефектов в кремнии с помощью тока, наведенного электронным и лазерным пучками [Текст] / Я. Шабельникова [и др.] // Физика и техника полупроводников. — 2015. — Т. 49, № 6. — С. 758—762.
39. Algorithm for post-processing of tomography images to calculate the dimension-geometric features of porous structures [Текст] / М. Chukalina [et al.] // Computer Optics. — 2021. — Vol. 45, no. 1. — P. 110—121.
40. Исследование полилактидных матриц методом рентгеновской микротомографии [Текст] / Ю. Кривоносов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2020. — Т. 86, № 1. — С. 26—31.
41. Reprojection-Based Numerical Measure of Robustness for CT Reconstruction Neural Network Algorithms [Текст] / A. Smolin [et al.] // Mathematics. — 2022. — Vol. 10, no. 22. — P. 4210—17643.
42. X-ray tomography: how to evaluate the reconstruction quality? [Текст] / М. Chukalina [et al.] // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. — 2004. — Vol. 59, no. 10. — P. 1755—1758.
43. О проблемах при работе с микротомографическими изображениями пористых структур, используемыми для моделирования процессов протекания [Текст] / М. Григорьев [и др.] // Труды института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН). — 2021. — Т. 71, № 1. — С. 85—91.

В сборниках трудов конференций

44. CT metal artifacts simulation under x-ray total absorption [Текст] / М. Shutov [et al.] // Proc. SPIE. Sixteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2023). Vol. 13072. — 2024. — 130720Z.
45. Обработка сигналов в томографии при использовании различных рентгенооптических схем [Текст] / А. В. Бузмаков [и др.] // Рентгеновская оптика — 2010. Рабочее совещание Черноголовка. — 2010. — С. 168—169.

46. *Шабельникова, С.* Анализ EXAFS-спектров: выбор материнского вэйвлета [Текст] / С. Шабельникова, Х. Функе, М. Чукалина // *Материалы международной научно-технической конференции “Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения”*. — 2006. — С. 143—146.
47. *Павлов, В. Н.* Применение вэйвлет-преобразования для анализа спектров EXAFS-исследование причины появления и анализ артефактов на спектрограммах [Текст] / В. Н. Павлов, М. В. Чукалина // *Информационные технологии и системы ИТиС-2008*. — 2008. — С. 190—193.
48. К задаче об определении формы рентгеновского зонда [Текст] / М. Чукалина [и др.] // *Рентгеновская оптика – 2010. Рабочее совещание. Черногловка*. — 2010. — С. 163—165.
49. *Чукалина, М.* Формирование и обработка изображений лабораторного сканирующего флуоресцентного микроскопа высокого разрешения [Текст] / М. Чукалина, И. Щелоков, Д. Николаев // *Материалы конференций IEEE AIS 06 и CAD-2006. Т. 2*. — 2006. — С. 406—411.
50. *Чукалина, М.* Сканирующая рентгенофлуоресцентная микроскопия на лабораторном источнике: задачи и теоретические оценки [Текст] / М. Чукалина, И. Щелоков, Д. Николаев // *Материалы X Симпозиума Нанофизика и нанoeлектроника (Нижний Новгород, 13-17 марта 2006 г.)* — 2006. — С. 412—413.
51. Рентгенофлуоресцентная томография: особенности решения обратной задачи при учете формы зонда [Текст] / М. Чукалина [и др.] // *Рентгеновская оптика – 2010 Рабочее совещание Черногловка*. — 2010. — С. 177—179.
52. To X-ray fluorescence tomography problem [Текст] / М. Chukalina [et al.] // *1 international Conference on Tomography of Materials and Structures ICTMS 2013, Book of Abstracts, Talks*. — 2013. — P. 15—18.
53. X-ray fluorescence tomography of an Olivine micro-grain: image reconstruction and analysis [Текст] / М. Chukalina [et al.] // *Third Workshop on Physics in Signal and Image Processing*. — 2003. — P. 233—236.
54. New results in x-ray computed fluorescence tomography [Текст] / A. S. Simionovici [et al.] // *Developments in X-Ray Tomography III. Vol. 4503*. — 2002. — P. 222—229.
55. *Chukalina, M.* ART in X-ray tomo: image noise reduction [Текст] / М. Chukalina, D. Nikolaev, A. Simionovici // *Book of Proceedings. 21th European Conference on Modelling and Simulation*. — 2007. — P. 309—312.

56. Нелинейный алгебраический метод компьютерной томографии при немонаохроматическом источнике [Текст] / В. Прун [и др.] // 39-я междисциплинарная школа-конференция Информационные технологии и системы 2015. — 2015. — С. 536.
57. Automated ROI Localization On Tomographic Projections [Текст] / D. Ivanov [et al.] // Proc. 9th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT). — 2019. — P. 1—6.
58. Рентгеновская томография для локального контроля компонент и инспекции модулей [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Российский Форум Микроэлектроника 2023. Сборник тезисов 9-ой Научной конференции ЭКБ и микроэлектронные модули (Парк науки и искусства Сириус, 9-14 октября 2023 г.) — 2023. — С. 739—740.
59. Рентгеновская томография: факторы, влияющие на результат реконструкции [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Сборник докладов Симпозиума Нанофизика и наноэлектроника. — 2005. — С. 294—295.
60. Компьютерная томография для решения задач материаловедения: программа для томографической реконструкции STE [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Третья Международная Конференция Физика конденсированных состояний ФКС-2023, посвящённая 60-летию ИФТТ РАН. — 2023. — С. 36.
61. Томография на разных масштабах как метод неразрушающего рентгеновского контроля в микроэлектронике [Текст] / М. Чукалина [и др.] // Вторая объединённая конференция Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике. КЭЛТ-2023. Черноголовка 13–16 ноября 2023 года). — 2023. — С. 268—269.
62. Mean projection image application to the automatic rotation axis alignment in cone-beam CT [Текст] / D. Kazimirov [et al.] // Proc. SPIE. Fifteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2022). Vol. 12701. — 2023. — 127011G.
63. Robust Automatic Rotation Axis Alignment Mean Projection Image Method in Cone-Beam and Parallel-Beam CT [Текст] / D. Kazimirov [et al.] // Proceedings of Sixteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2023). Vol. 13072. — 2024. — P. 1307212.
64. Рентгеновская томография как метод дефектоскопии: о проблеме сильнопоглощающих включений [Текст] / М. Гильманов [и др.] // Российский форум Микроэлектроника-2024, 10-я научная конференция ЭКБ и микроэлектронные модули. — 2024. — С. 878—879.
65. A Way To Reduce The Artifacts Caused By Intensely Absorbing Areas In Computed Tomography [Текст] / M. V. Chukalina [et al.] // ECMS 2015 Proceedings. — 2015. — P. 527—531.

66. Blind CT images quality assessment of cupping artifacts [Текст] / A. Ingacheva [et al.] // Proc. SPIE 11605, Thirteenth International Conference on Machine Vision. — 2021. — P. 1160516.
67. CT metal artifact reduction by soft inequality constraints [Текст] / M. Chukalina [et al.] // Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015). Vol. 9875. — 2015. — P. 98751C.
68. Automatic beam hardening correction for CT reconstruction. [Текст] / M. V. Chukalina [et al.] // 31st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS). — 2017. — P. 270—275.
69. Факторы, влияющие на разрешение лабораторной рентгеновской микротомографии: от оптической схемы до алгоритмов реконструкции [Текст] / А. В. Бузмаков [и др.] // Доклады шестого международного научного семинара Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики. — 2013. — С. 152.
70. Томограф нового поколения для разномасштабной рентгеновской диагностики [Текст] / М. Чукалина [и др.] // XI Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники, материалы конференции. Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2024. — 2024. — С. 66—69.
71. Аллахвердов, Э. Поиск функции остановки, чувствительной к динамике ошибки в задаче мониторинговой реконструкции [Текст] / Э. Аллахвердов, М. Чукалина, К. Булатов // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. — 2021. — С. 114—115.

Чукалина Марина Валерьевна

Измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики для определения атомной и морфологической (пространственной) структуры материалов и изделий микро- и нанoeлектроники.

Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

