

На правах рукописи



СТАРОВЕРОВ НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

Методы и системы неразрушающего контроля на основе микрофокусных
источников рентгеновского излучения

Специальность 2.2.8

«Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена на кафедре электронных приборов и устройств федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Грязнов Артем Юрьевич, профессор кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Оппоненты:

доктор технических наук, профессор Таубин Михаил Львович, главный научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия "Научно-исследовательский институт научно-производственного объединения «Луч»", г. Москва;

кандидат технических наук Чипига Лариса Александровна, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций ФГБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

АО "Центральный научно-исследовательский институт «Электрон»".

Защита диссертации состоится 15 декабря 2021 года в 12 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 24.2.387.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявления о защитах докторских и кандидатских диссертаций»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан 14 октября 2021 года.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций



Е.А. Семенова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена тем, что на сегодняшний день в промышленном рентгеновском контроле и медицинской диагностике практически в каждом комплексе или системе используется цифровая обработка получаемых снимков. Непрерывно ведется разработка математических моделей и алгоритмического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов, а также совершенствование аппаратуры рентгеновского контроля. Автоматизация методов контроля и диагностики, внедрение цифровых информационных технологий существенно повышают достоверность анализа и оперативность работы операторов-дефектоскопистов и врачей-рентгенологов.

С целью повышения объема и качества получаемой информации (в том числе – в рентгеновском контроле) используется разнообразное программно-техническое обеспечение для обработки рентгеновских снимков: частотные методы, модификации метода эквализации гистограммы, методы локально-адаптивной эквализации гистограммы, методы локального контрастирования изображений и другие.

Все большую популярность для проведения рентгенографического контроля в различных областях промышленности получает метод микрофокусной рентгенографии и создаваемые для его реализации специализированные комплексы и системы. Однако микрофокусные снимки обладают рядом особенностей, поскольку сниженная мощность микрофокусных источников излучения зачастую ведет к меньшим дозам в плоскости приемника, и, как следствие, к увеличению шума при попытках обработки изображений традиционными методами. Кроме того, важной особенностью микрофокусной рентгенографии является частое использование схемы съемки с прямым увеличением, что, вместе с повышением выявляемости дефектов, ведет к появлению геометрических искажений на снимках.

К настоящему времени опубликованы результаты большого количества исследований, посвящённых повышению информативности традиционных методов рентгеновского контроля, однако практически отсутствуют методы, ориентированные на указанные выше особенности микрофокусных снимков. Такая ситуация привела к необходимости научного обоснования методов совершенствования систем микрофокусного рентгеновского контроля и диагностирования в процессе проектирования, изготовления, эксплуатации и анализа получаемых результатов, в том числе автоматизации распознавания объектов на рентгеновских снимках.

Научный задел, созданный благодаря работам Н.Н. Блинова (ст.), Н.Н. Блинова (мл.), А.Ю. Васильева, М.И. Зеликмана, С.А. Иванова, Н.А. Карловой, В.В. Ключева, Б.И. Леонова, А.И. Мазурова, Н.Н. Потрахова, Г.И. Прохвятилова, Н.А. Рабухиной, Р.В. Ставицкого, М.Л. Таубина и др. позволяет решить эту весьма актуальную проблему разработки и внедрения новых методов микрофокусной диагностики, способствующих повышению точности контроля и, как следствие, надежности изделий и увеличения их эксплуатационного ресурса.

Результаты работ последних лет, проводившихся на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при участии автора, позволили сформулировать **цель диссертационного исследования** – совершенствование систем микрофокусного неразрушающего контроля путем разработки алгоритмического и программно-технического обеспечения для повышения информативности микрофокусных снимков и последующего распознавания объектов на них.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **теоретические и практические задачи:**

- провести анализ современной научно-технической литературы в области технического рентгеновского контроля, сравнительные исследования методического и приборного обеспечения рентгенографических систем, обобщить их недостатки в приложении к микрофокусной аппаратуре;

- сформулировать требования к системам микрофокусного рентгеновского контроля в части обработки получаемых рентгеновских изображений, и на их основе разработать новые методы математического и программного обеспечения, позволяющие повысить точность и надежность диагностики;

- с учетом предложенных алгоритмов обработки микрофокусных рентгеновских снимков повысить автоматизацию средств диагностирования, способствующую снижению трудоемкости, увеличению оперативности и достоверности распознавания объектов на технических и медицинских рентгеновских снимках;

- на основе интеллектуального анализа данных создать необходимую базу технических и медицинских микрофокусных рентгеновских снимков и провести с ее использованием проверку предложенных методов повышения качества снимков и распознавания объектов на них;

- внедрить предложенные методы в программно-техническое обеспечение серийно выпускаемых микрофокусных рентгенодиагностических комплексов семейства «Пардус» с целью автоматизации контроля и диагностики.

Объект исследования – методы и системы микрофокусного рентгеновского контроля.

Предмет исследования – методы и средства для контроля и диагностики материалов на основе микрофокусных источников рентгеновского излучения.

При решении поставленных задач применялись следующие **методы исследования**: обобщение данных в области разработки методов цифрового рентгеновского контроля, разработка математических моделей, методического и программного обеспечения, экспериментальные исследования с использованием современной аппаратуры для визуализации рентгеновских изображений.

Результаты исследований согласуются между собой и с экспертными данными, что подтверждает достоверность выводов, сделанных в работе.

В процессе работы были получены новые научные результаты:

- показано, что применение традиционных методов цифровой обработки изображений для микрофокусных снимков существенно увеличивает их зашумленность, снижая точность и достоверность полученных результатов;

- доказана эффективность совместного применения локально-адаптивной эквализации гистограммы и разработанного адаптивного медианного фильтра, эффективно подавляющего импульсные шумы, для обработки микрофокусных рентгеновских изображений с целью повышения чувствительности и информативности систем рентгеновского неразрушающего контроля;

- разработан метод, основанный на морфологической обработке и фильтрации в частотной области, существенно увеличивающий контраст мелких деталей микрофокусного изображения и, как следствие, чувствительность систем неразрушающего контроля и доказано, что его использование в сочетании с модифицированными сверточными нейронными сетями позволяет добиться повышения эффективности автоматического распознавания объектов в системах рентгенографического и томографического контроля.

Практическая значимость определяется тем, что в процессе работы:

- экспериментально подтверждено, что использование разработанных методов обработки микрофокусных рентгеновских снимков повышает информативность промышленного рентгеновского контроля, способствуя повышению надежности и увеличению их эксплуатационного ресурса;

- по результатам апробации обоснована целесообразность интеграции разработанных методов в микрофокусные аппаратно-программные комплексы и создаваемые на их основе системы автоматического контроля и диагностики;

- подтверждено, что комбинация разработанных методов обработки микрофокусных изображений и использование предобученной нейронной сети позволяет существенно снизить трудоемкость, повысить точность, оперативность и достоверность при проведении скрининговых исследований;

- осуществлена практическая реализация предложенных методов в программном обеспечении серийно выпускаемых микрофокусных рентгенодиагностических комплексов семейства «Пардус».

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований на защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Применение традиционных методов обработки результатов рентгеновского контроля к микрофокусным снимкам нецелесообразно, так как приводит к снижению информативности изображения за счет роста зашумленности на 25-50%.

2. Сочетание методов локально-адаптивной эквализации гистограммы и адаптивной медианной фильтрации позволяет в 1.2-1.5 раза повысить резкость и контрастность микрофокусных изображений, увеличивая достоверность оценки и объем диагностической информации.

3. Использование предобученных сверточных нейронных сетей с предварительным применением метода повышения контраста мелких деталей микрофокусных снимков на основе фильтрации в частотной области позволяет повысить на 8-10% точность автоматической классификации в ходе неразрушающего рентгеновского контроля.

Результаты, полученные в ходе диссертационной работы, используются при производстве аппаратуры ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» (СПб), АО «Диагностика-М» (Москва), а также внедрены в учебный процесс подготовки специалистов в области рентгенотехники в СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Апробация работы проводилась на международных, всероссийских и региональных конференциях, съездах и научных форумах, среди которых: VI-VII конференции производителей рентгеновской техники (Санкт-Петербург, 2015-2020), XII Международный конгресс "Невский радиологический форум-2021"(Санкт-Петербург, 2021), XIII и XIV "Российско-Германская научно-техническая конференции по биомедицинской инженерии"(Аахен, Санкт-Петербург, 2018, 2019) и др.

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ (из них 6 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и/или индексируемых в WoS и Scopus), получены 8 патентов и свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (77 наименований) и 5 приложений. Основная часть работы изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные результаты, выносимые на защиту, приведена краткая аннотация содержания диссертации.

Первая глава посвящена описанию и сравнительному анализу современных методов цифровой обработки изображений, применяемых в системах неразрушающего рентгенографического контроля и медицинской диагностики, к которым относятся: пространственная фильтрация (преобразование изображений в пространственной области осуществляется путем двумерной свертки исходного изображения с ядром фильтра); частотная фильтрация (над изображением выполняется операция двумерного преобразования Фурье, затем применяется фильтр, после чего производится обратное двумерное преобразование Фурье); морфологическая обработка изображений (базируется на методах теории множеств); повышение контраста изображения при помощи выравнивания гистограммы (преобразует все значения гистограммы в равновероятные); шумоподавление на основе порядковых статистик (медианный фильтр, фильтры минимума и максимума и т.д.).

Все указанные методы широко применяются для обработки традиционных рентгеновских изображений. Однако на сегодняшний день для рентгеновского контроля объектов малых размеров все чаще используется способ микрофокусной съемки (размер фокусного пятна менее 100 мкм) с увеличением изображения, обладающий рядом особенностей.

Конструкция систем на основе микрофокусных источников обуславливает их меньшую мощность по сравнению с традиционными, что может приводить к снижению объемов получаемой информации за счет высокого уровня шумов на изображении. При этом обычные методы повышения резкости и контраста недопустимо увеличивают зашумленность микрофокусного изображения, не повышая, а понижая информативность и достоверность данного метода контроля. Так, для традиционных методов обработки, использование пространственной фильтрации увеличивает зашумленность в среднем в 1.2-1.5 раза, повышение резкости при помощи фильтрации в частотной области – в 1.3-1.5 раза, использование выравнивания гистограммы – в 1.1-1.4 раза. Использование морфологических операций для выделения объектов и применение медианной фильтрации также не является эффективным из-за специфики микрофокусного рентгеновского изображения.

Вышеизложенное не позволяет рекомендовать использование традиционных методов обработки для микрофокусных снимков, что приводит к необходимости создания новых методов и средств в области неразрушающего рентгеновского контроля, основанного на использовании микрофокусных источников излучения.

Во **второй** главе описаны разработанные математические модели и алгоритмы цифровой обработки результатов рентгеновского контроля с помощью микрофокусных источников излучения. При их создании необходимо было обеспечить выполнение ряда условий: повышение контраста снимка не должно приводить к существенному повышению шумов; должна быть реализована возможность работы методов обработки в режиме реального времени; методы должны показывать одинаково положительные результаты для снимков, полученных на разных приемниках изображения; апробация должна показать их практическую применимость. Повышение точности рентгеновского контроля в части обработки полученных результатов требует решения нескольких основных задач: выравнивание неравномерного фона снимков, подавление шумов, увеличение резкости и контраста изображения.

В традиционной рентгенографии неравномерность фона невелика, тогда как в случае микрофокусной съемки с увеличением может достигать 50%, поэтому для устранения неравномерности предложена искажающая функция (1):

$$g(x, y) = C \left[\left(x - \frac{x_{max}}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{y_{max}}{2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где x, y – координаты пикселя изображения, x_{max} и y_{max} – размеры изображения, C – константа. Для определения константы C по всем сторонам изображения на некотором удалении от края строятся профили, для каждого профиля после проверки на разрывы определяются экстремумы, находится их разность, и константа C определяется по выражению (2):

$$C = \frac{\sum_k^N (a_{k\ max} - a_{k\ min})}{N}, \quad (2)$$

где N – число профилей, $a_{k\ max}$ и $a_{k\ min}$ – максимальное и минимальное значения яркости профиля k соответственно. Пример коррекции показан на рис. 1.

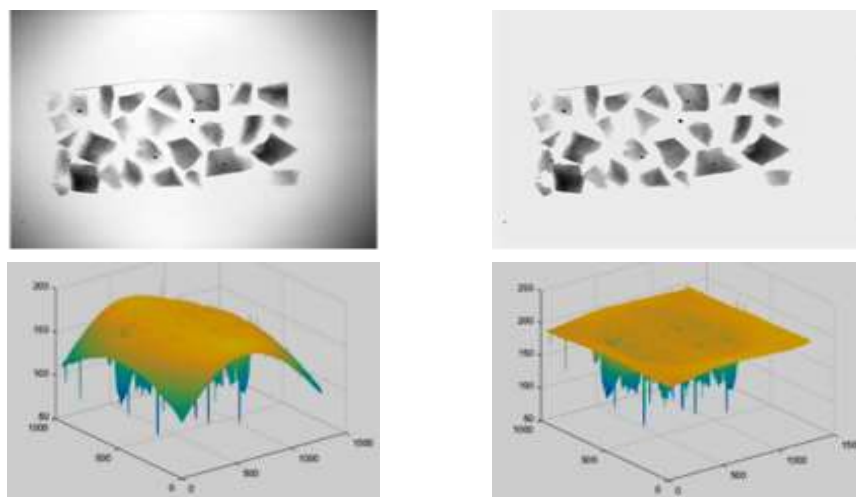


Рис.1 – Исходное и откорректированное изображение тест-объекта

Традиционно используемые для подавления шумов на рентгеновских снимках медианные фильтры относятся к классу нелинейных пространственных фильтров и, в применении к микрофокусным снимкам, имеют значительные недостатки: слабое подавление импульсных шумов и искажение деталей на изображении. Этим недостаткам лишен модифицированный адаптивный медианный фильтр (рис. 2).

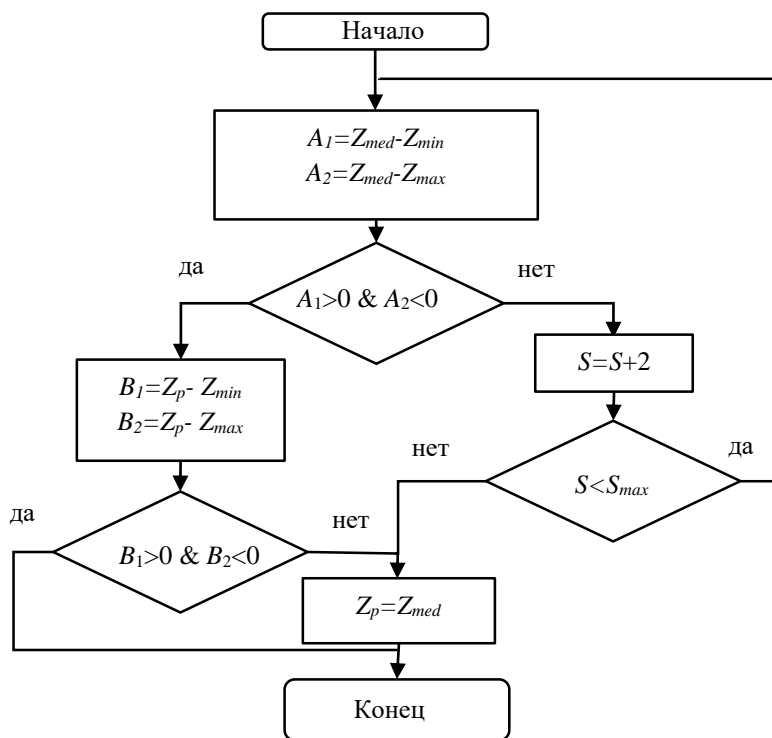


Рис. 2 – Алгоритм адаптивного медианного фильтра

Здесь Z_{min} и Z_{max} – минимальное и максимальное значения яркости в окрестности S , Z_{med} – медиана яркости в окрестности S , Z_p – значение яркости обрабатываемого пикселя, S_{max} – максимально допустимый размер окрестности.

В ходе обработки изображения сначала проводится проверка того, что медиана не является минимумом или максимумом (то есть шумовым значением), затем проверка, что центральный пиксель является шумовым значением и, если оба условия выполняются, то проводится медианная фильтрация, иначе значение яркости не меняется. Для большей эффективности в работе с микрофокусными снимками в блоке проверки центрального значения минимальное и максимальное значения яркости в окрестности S заменяется на значения яркости, идущие после минимума и перед максимумом (второй минимум и второй максимум), соответственно. Предложенный фильтр подавляет шумы и сохраняет значительно больше деталей микрофокусного снимка, чем обыкновенный медианный фильтр (пример работы – рис. 3).

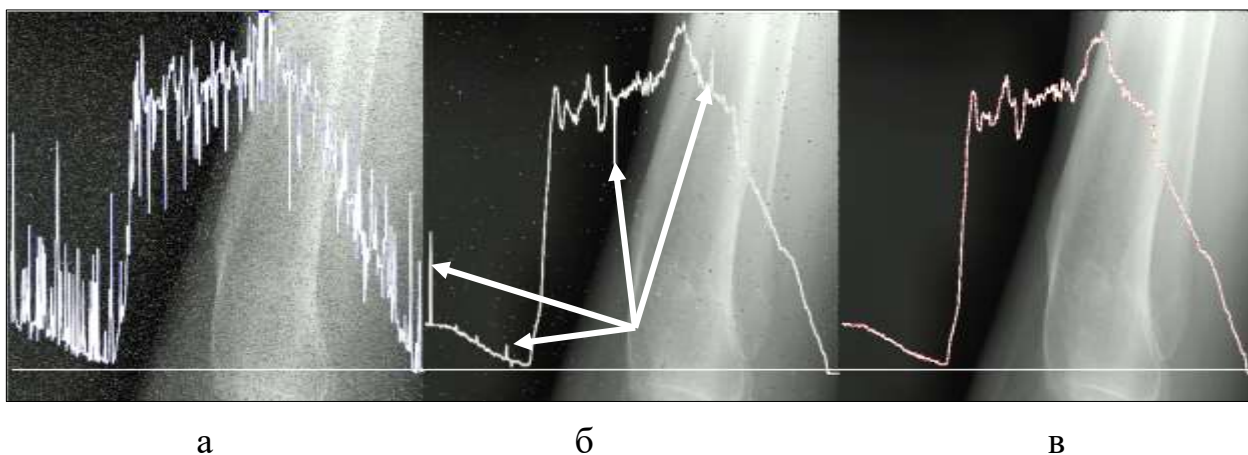


Рис. 3 – а - исходное изображение; б - изображение, обработанное традиционным фильтром; в - изображение, обработанное модифицированным адаптивным медианным фильтром

После выравнивания фона и удаления шума следующим этапом обработки микрофокусных снимков является повышение контраста мелких деталей изображения. Разработанный метод реализует следующую последовательность операций: к исходному изображению применяется фильтрация в частотной области, к полученному результату применяется морфологическая обработка (операция дилатации), далее к исходному изображению добавляется результат высокочастотной фильтрации и вычитается результат морфологической обработки. Для фильтрации в частотной области двумерное преобразование Фурье осуществлялось по формуле (3):

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(ux/M + vy/N)}, \quad (3)$$

где M и N – размеры изображения, x и y – координаты в пространственной области, а u и v – в частотной. Маска высокочастотного фильтра Гаусса вычислялась с помощью выражения (4):

$$H(u, v) = 1 - e^{-(u^2 + v^2)/2D_0^2}, \quad (4)$$

где D_0 – частота среза фильтра. Фильтрация в частотной области повышает резкость снимка, а вычитание результата морфологической дилатации создает двойной перепад яркости на границах деталей, что повышает их контраст.

Разработанные математические модели и алгоритмы могут использоваться не только для промышленного контроля, но и для медицинской диагностики. Для иллюстрации работы алгоритма приведен рентгеновский снимок грудной клетки (рис. 4). Обработка рентгенограммы с использованием разработанного фильтра позволила выделить поражённый опухолью бронх, оконтурировала признаки ателектаза верхнем отделе правого лёгкого и увеличенные лимфоузлы (экспертиза СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница»).



Рис. 4 – Исходное изображение и изображение, обработанное фильтром

Актуальной остается и задача увеличения общего контраста изображения, что, в случае микрофокусных снимков, также вызывает определенные сложности для традиционного метода эквализации гистограммы (5):

$$g(x, y) = \text{floor}(L-1) \sum_{k=0}^{f_{x,y}} p_k, \quad (5)$$

где $g(x,y)$ – пиксель получаемого изображения, L – количество уровней яркости, p_k – k -значение гистограммы. Использование метода может вызывать усиление шума в областях, где яркость изменяется слабо (что характерно для микрофокусных снимков), поэтому требуется ограничение усиления контраста в таких областях. Для модификации метода предложена локально-адаптивная эквализация (применяется не ко всему изображению целиком, а к небольшим участкам, которые потом «сшиваются» интерполяцией), при этом выбор размеров участка и уровень ограничения контраста выполняется автоматизировано на основе измерения дисперсии шума на микрофокусном рентгеновском снимке (пример применения метода – рис. 5).

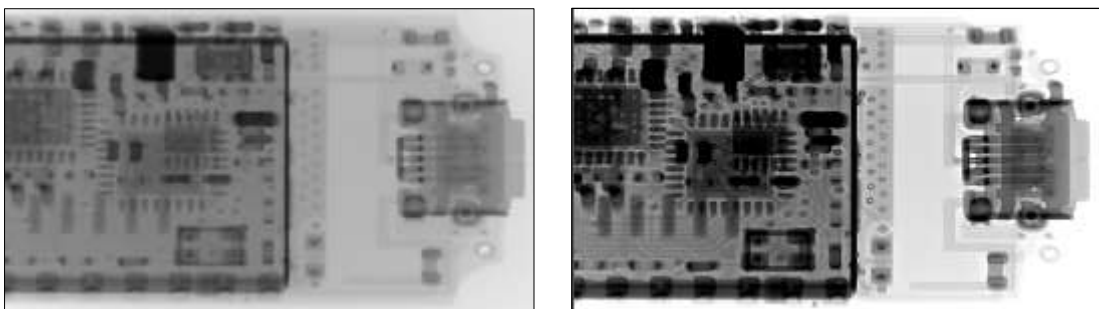


Рис. 5 – Рентгенограмма до и после использования адаптивной эквализации гистограммы

Разработанное методическое и математическое обеспечение систем рентгеновского контроля и диагностирования материалов и изделий позволяет повысить информативность микрофокусных снимков и достоверность контроля, что подтверждается количественно (измерением соотношения сигнал/шум на снимках) и экспертной оценкой (операторами-дефектоскопистами и врачами-рентгенологами, учувствовавшими в апробации методов).

Третья глава посвящена методам автоматизации средств диагностирования, увеличению оперативности и достоверности распознавания объектов на рентгеновских изображениях и классификации рентгеновских снимков. Особенности микрофокусных снимков накладывают свой отпечаток не только на обработку и повышение качества снимков, но и на работу методов распознавания, поэтому требуются специализированные методы для работы с такими изображениями. Для распознавания и классификации объектов на микрофокусных изображениях были исследованы два подхода: алгоритмы на основе градиентных методов и метода связанных компонент; а также методы, использующие сверточные нейронные сети.

Одним из основных этапов автоматического анализа изображений традиционно является сегментация, алгоритмы которой необходимо дорабатывать с учетом особенностей микрофокусных снимков. Ниже (рис. 6) представлен разработанный алгоритм сегментации для микрофокусных рентгеновских изображений.



Рис. 6 – Алгоритм сегментации рентгеновских изображений

На первом этапе выполняется адаптивная медианная фильтрация, алгоритм которой был модифицирован для корректной работы с микрофокусными рентгеновскими изображениями. Далее выполняется коррекция фона изображения путем вычитания искажающей функции. На третьем этапе производится выделение контуров объектов на изображении по методу Кэнни. В классическом алгоритме Кэнни на изображении выполняется подавление немаксимальных точек (точек, не являющихся локальным максимумом в окрестности), что необходимо для утончения контура, однако на микрофокусных снимках алгоритм не всегда эффективно подавляет ложные контуры. В предложенном методе, в дополнение к подавлению немаксимальных точек, используется математическая морфология (операция эрозии). Для бинарного изображения морфологическая эрозия определяется выражением:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\}, \quad (6)$$

Применение эрозии позволяет повысить эффективность работы алгоритма и точность определения границ объектов. После выделения контуров формируется бинарное изображение, на котором выделены только контуры объектов, и выполняется поиск объектов на бинарном изображении с помощью метода связанных компонент. Далее проводится морфологическая операция заливки найденных объектов, позволяющая применить сегментацию с двойным порогом, что существенно проще, чем использование адаптивных алгоритмов.

На заключительном этапе работы алгоритма для поиска дефектов (например, уплотнений и пор на снимках технических изделий) в ходе сегментации с двойным порогом осуществляется заливка областей с яркостью меньше первого (меньшего) порога и с яркостью больше второго (большого) порога. Таким образом создаются два итоговых бинарных изображения: на одном из которых выделены поры, а на втором – уплотнения. Наложение этих изображений на исходное позволяет выделить объекты в удобном для оператора виде (рис. 7).

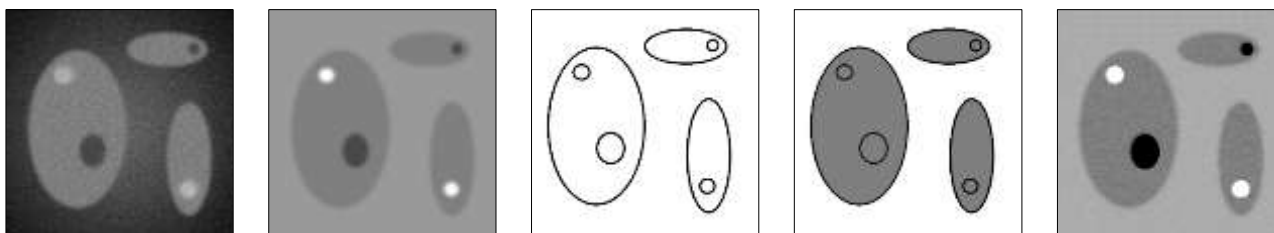


Рис. 7 – К преобразованию изображения при выделении пор и уплотнений (исходное, обработанное, выделенные границы, залитые объекты, выделенные дефекты)

Предложенный алгоритм был применен в задачах автоматизированного неразрушающего контроля электронных компонентов и было установлено, что его применение позволяет улучшить выявляемость дефектов по сравнению с традиционными методами определения объектов на изображениях (рис. 8).

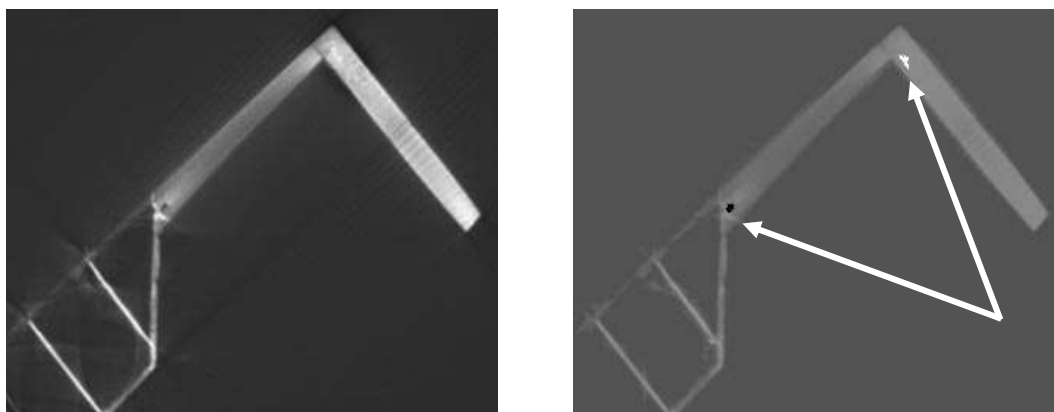


Рис. 8 – Рентгенограмма композита и результат применения разработанного алгоритма

Во второй части третьей главы рассмотрен способ применения сверточных нейронных сетей для классификации микрофокусных рентгеновских изображений, которые являются одним из самых перспективных направлений анализа изображений и широко используются в системах контроля и диагностики на основе интеллектуального анализа данных. В рамках апробации нейронных сетей для анализа микрофокусных рентгеновских снимков они были применены с целью автоматизации контроля и диагностики и подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии.

Для предварительной обработки снимков использовались описанные во второй главе методы повышения резкости и контраста мелких деталей микрофокусных снимков. Для классификации была использована предобученная сеть архитектуры ResNet (так как предобучение на определенных данных позволяет сети обучаться быстрее, чем на параметрах, инициализированных случайными числами). Результаты предварительных исследований показали, что обучать следует только полносвязный слой и последние два сверточных слоя, так как сеть уже была обучена и использовался перенос обучения. Указанный подход позволил повысить скорость обучения сети на 20%.

Так как использование для оптимизации весов нейронной сети традиционного стохастического градиентного спуска не принесло удовлетворительных результатов, был использован оптимизатор Adam, сочетающий возможности накопления движения и слабого обновления весов для типичных признаков. В качестве функции потерь применялась бинарная кросс-энтропия (что позволило использовать нейронную сеть в задаче многоклассовой классификации, так как возможно попадание снимка в два и более класса).

Проверка на тестовой выборке изображений показала, что предложенная модель (табл. 1), например, распознает патологии на рентгеновских снимках легких лучше современных аналогов за счет тщательного отобранного набора обучающих данных.

Таблица 1.

Результаты тестирования модели предобученной нейронной сети

Тип патологии	Результаты (в скобках – данные референсных публикаций)		
	Точность	Полнота	F-мера
Ателектаз	0.887(0.880)	0.855(0.825)	0.870 (0.851)
Пневмония	0.828(0.785)	0.901 (0.867)	0.863 (0.824)
Эмфизема	0.900(0.887)	0.947 (0.911)	0.923 (0.898)

В ходе исследований перспектив применения полученных результатов оказалось возможным использовать созданные модели с целью повышения оперативности и достоверности оценки при решении задачи распознавания объектов в системах контроля на базе микрофокусных томографов. Известно, что выполнение томографических исследований требует существенных временных затрат, поэтому, чтобы сократить время восстановления, можно выполнять восстановление только по области интереса (то есть области, в которой находится объект). Выделение этой области оператором на большом наборе снимков (минимум несколько сотен) затруднительно, поэтому актуальной является задача автоматизированного поиска области интереса на каждом снимке. Для решения поставленной задачи была использована концепция переноса обучения, при этом последний слой сети был модифицирован так, чтобы выходные нейроны предсказывали область интереса на изображении, то есть 4 координаты, описывающие прямоугольник. Апробация алгоритма на тестовой выборке показала, что модель уверенно локализует объект на снимке, при этом разница с определением оператором не превышает 2-3% (рис. 9).

Использование алгоритма в программном обеспечении микрофокусного томографа позволило уменьшить время реконструкции в 4-5 раз.

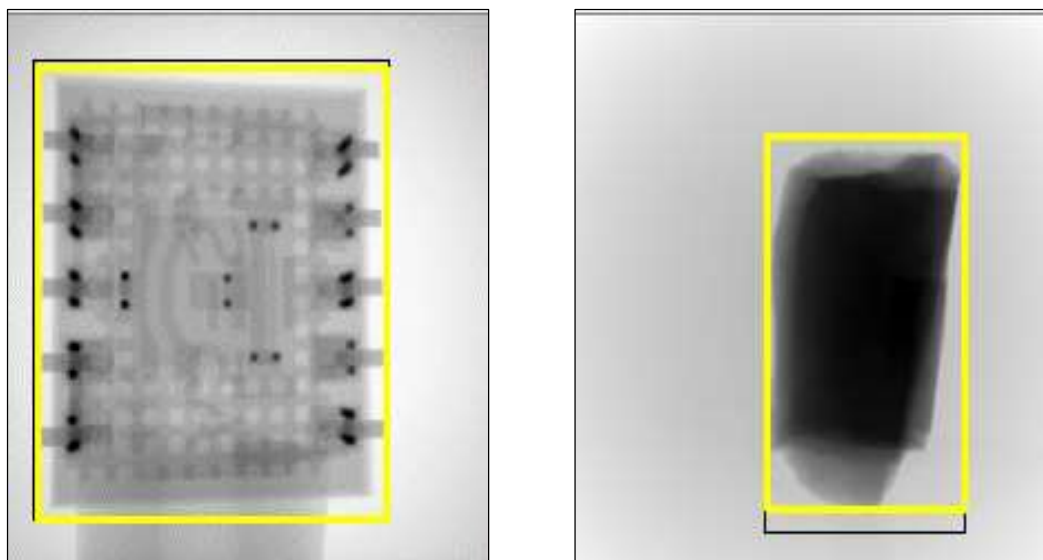


Рис. 9 – Определение области интереса оператором (черная рамка) и сетью (светлая)

Таким образом, показана эффективность использования обоих подходов – алгоритма на основе градиентных методов и моделей на основе сверточных нейронных сетей – для снижения трудоемкости и увеличения информативности при распознавании и классификации микрофокусных снимков, описаны преимущества разработанных методов перед традиционными.

В четвертой главе описано разработанное автором специализированное программное обеспечение, реализующее разработанные методы для систем технического контроля и диагностирования материалов. Программный комплекс (блок-схема приведена на рис. 10) написан на языке программирования Python3.8 с использованием библиотек OpenCV, Numpy, Scipy и PyQT5.

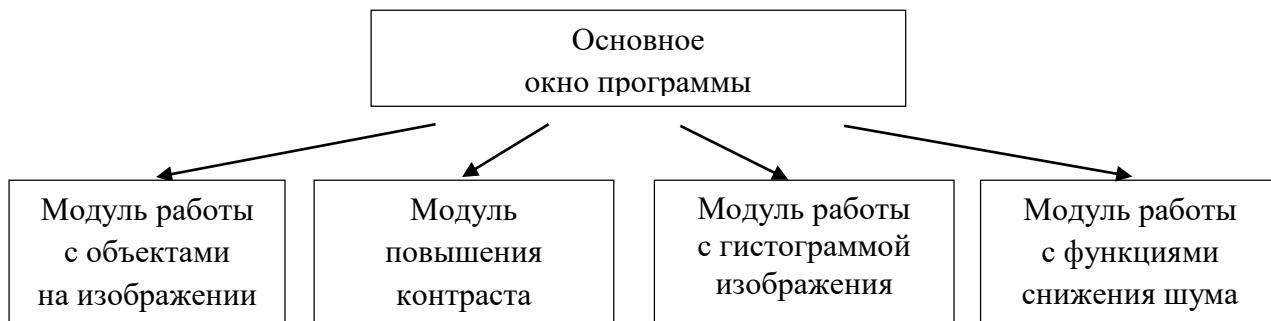


Рис. 10 – Блок-схема программного комплекса

Комплекс имеет графический интерфейс пользователя, позволяет выполнять базовые операции над изображениями, обрабатывать массивы изображений. Для повышения информативности микрофокусных рентгеновских изображений в комплексе реализованы методы, описанные в главе 2. Для выделения объектов и классификации снимков в комплексе реализованы методы, описанные в главе 3. Разработанный комплекс, предназначенный для систем технического рентгеновского контроля и медицинской рентгенодиагностики, встроен в аппаратуру ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» (СПб), АО «Диагностика-М» (Москва), используется для выявления патологий Мариинской больницы г. Санкт-Петербурга. Также комплекс (путем предварительной обработки проекционных данных) используется для автоматизации и повышения производительности при распознавании и классификации объектов в микрофокусных томографах МРКТ-04 производства ООО «МикроКТ».

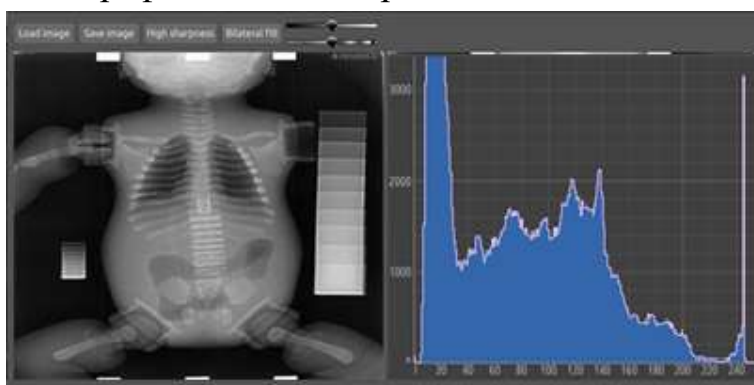


Рис.11 – Рабочее окно программного комплекса

Апробация, испытание и внедрение аппаратно-программного комплекса в различные системы рентгеновского контроля показали, что его применение способствует повышению оперативности и достоверности контроля с одновременным снижением трудоемкости при проведении исследований.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- показано, что традиционные методы цифровой обработки, применяемые в современных системах рентгеновского контроля и диагностики не обеспечивают требуемую точность и достоверность анализа при обработке микрофокусных снимков, (особенно полученных при съемке с прямым увеличением изображения) а, наоборот, снижают качество рентгенографического контроля;

- для применения в системах неразрушающего контроля на основе микрофокусных источников излучения разработан метод выравнивания фона рентгеновских изображений и показана эффективность его использования для коррекции микрофокусных снимков с большим прямым увеличением;

- с учетом малой контрастности и высокой шумности микрофокусных снимков модифицирован метод адаптивной медианной фильтрации;

- разработан метод повышения контраста рентгеновских изображений на основе локально-адаптивной эквализации гистограммы, который может быть применен для обработки микрофокусных рентгеновских снимков с целью повышения чувствительности систем рентгенографического контроля и диагностики с их последующей автоматизацией;

- показано, что применение вышеуказанных методов для предварительной обработки в системах, основанных на сверточных нейронных сетях и интеллектуальном анализе данных, повышает точность автоматического распознавания и классификации снимков;

- разработан метод автоматического выделения объектов на изображениях в ходе микрофокусной рентгенографии и микрофокусной томографии;

- создано программное обеспечение, интегрируемое в аппаратно-программные комплексы для промышленного рентгеновского контроля и медицинской рентгенодиагностики, обеспечивающее внедрение указанных методов в цифровые информационные технологии;

- показано, что использование разработанных методов обработки микрофокусных рентгеновских снимков существенно повышает их информативность и, в потенциале – диагностическую значимость, оперативность и достоверность оценки.

Результаты апробации предложенных методов и использующего их программного обеспечения показывают перспективность широкого внедрения результатов исследования в практику микрофокусной рентгенографии, используемой в различных областях неразрушающего контроля и диагностики.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в Scopus:

1. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D. Digital x-ray image processing with using adaptive histogram equalization and adaptive background correction // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2018. – № 5 – С. 56-58.
2. Staroverov N.E. et al. New Methods for Digital Processing of Microfocus X-Ray Images // Biomedical Engineering. – 2019. – Т. 52. – № 6. – С. 435-438.
3. Arkhipov, M.V., Priyatkin, N.S., Gusakova, L.P., Potrakhov, N.N., Gryaznov, A.Y., Bessonov, V.B., Staroverov, N.E. X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science // Technical Physics. – 2019. – Т. 64. – № 4. – С. 582-592.
4. Karamyshev, A., Trofimuk, L., Priyatkin, N., Arkhipov, M., Gusakova, L., Shchukina, P., Staroverov N., Potrakhov, N. Comparative study of the fullness of dwarf Siberian pine seeds *Pinus pumila* (Pall.) Regel from places of natural growth and collected from plants introduced in northwestern Russia by microfocus X-ray radiography to predict their sowing qualities // Biological Communications. – 2020. – Т. 65. – № 4. – С. 297–306.
5. Evteev A.A., Staroverov N.E., Potrakhov N.N. Analytical techniques and software for the study of intragroup metric variation using principal component analysis // Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris. – 2021. – Т. 33. – № 33 (1). – С. 87–97.
6. Староверов Н.Е. Метод автоматизированного контроля электронных компонентов на микрофокусных рентгеновских снимках. // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 27–36.

В иных изданиях:

7. Staroverov N.E. et al. Microelectronic devices digital X-ray image processing method development // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 967. – № 1. – Art. 012016.
8. Gryaznov, A.Y., Staroverov, N.E., Kholopova, E.D., Guk, K.K. Microfocus X-ray seeds separator // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 967. – № 1. – Art. 012005.
9. Автоматический анализ и классификация цифровых рентгеновских и газоразрядных изображений семян пшеницы, поврежденных клопом вредная черепашка, для прогноза их посевных качеств / Н.С. Прияткин [и др.] // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – 2018. – № 6. – С. 60-67.
10. Staroverov N.E. et al. Recognition of certain types of pathologies on medical x-ray images // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2140. – № 1. – Art. 020076.
11. Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю. Рентгенографическое изучение качества плодов и семян / DOI 10.17581/bbgi2104 // Бюллетень Ботанического Сада-Института ДВО РАН. – 2019. – Вып. 21. – С. 39–57.
12. Грязнов, А.Ю., Гук, К.К., Староверов, Н.Е., Холопова, Е.Д. Метод повышения резкости и контрастности деталей рентгеновских изображений // Физические основы приборостроения. – 2019. – Т. 8. – № 4. – С. 34-37.
13. Gryaznov, A. Y., Staroverov, N. E., Kholopova, E. D., Guk, K. K. Development of the technique for determining the fulfillment coefficient of seeds using microfocus x-ray // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2089. – № 1. – Art. 020011.
14. Васильев А.Ю., Петровская В.В., Ничипор Е.А., Алпатова В.Г., Потрахов Н.Н., Бессонов В.Б., Староверов Н.Е. Сравнительный анализ возможностей различных видов

конусно-лучевой томографии в экспериментальном исследовании корневых каналов зубов до и после заполнения инородными материалами высокой плотности (часть 1) // Радиология-практика. – 2020. – № 5 (83). – С. 46-53.

15. Staroverov N.E. et al. Research of the possibility of using neural networks to identify areas of interest in tomographic data // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – Т. 2250. – № 1. – Art. 020027.

16. Larionov, I.A., Klonov, V.V., Staroverov, N.E., Kiselev, A.S., Alexandrov, I.V. Investigation of the possibility of using x-ray sensitive lines detection technology in microfocus radiography // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – Т. 2250. – № 1. – Art. 020021.

17. Бессонов В.Б., Грязнов А.Ю., Ларионов И.А., Осокин В.М., Староверов Н.Е., Холопова Е.Д. Разработка алгоритма поиска дефектов на томографических срезах для исследования композитных материалов методом микрофокусной томографии // Физические основы приборостроения. – 2020. – Т. 9. – № 4 (38). – С. 60–63.

18. Kholopova, E.D., Gryaznov, A.Y., Staroverov, N.E., Aleksandrova, A.A., Guk, K.K. Research of x-ray optical scheme and operating modes of the x-ray fluorescence separator of gold // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Т. 2356. – № 1. – Art. 020012.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Патент на изобретение №2644824 Способ получения рентгеновского изображения кохлеарного имплантата. Дайхес Н.А, Потрахов Н.Н., Васильев А.Ю., Диаб Хассан Мохаммад Али, Грязнов А.Ю., Иванова И.В., Соколова В.Н., Жамова К.К., Подымский А.А, Староверов Н.Е. заявл. 01.06.2016 зарег. 14.02.2018.

2. Патент на полезную модель №166502 Устройство для получения рентгенографических изображений семян Староверов Н.Е. заявл. 05.07.2016, зарег. 09.11.2016.

3. Свидетельство об офиц. рег. прогр. для ЭВМ №2016663884 Программа для обработки рентгеновских снимков («ImageProcessing-2»). Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Холопова Е.Д., Подымский А.А., Баталов К.С. заявл. 02.11.2016, зарег. 19.12.2016.

4. Свидетельство об офиц. рег. прогр. для ЭВМ №2017663885 Программа для обработки рентгеновских снимков («ImageProcessing-3»). Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Холопова Е.Д., Баталов К.С. заявл. 17.10.2017, зарег. 13.12.2017.

5. Свидетельство об офиц. рег. прогр. для ЭВМ №2017663882 Программа коррекции фона («Background Correction»). Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Холопова Е.Д., Баталов К.С. заявл. 17.10.2017, зарег. 13.12.2017.

6. Свидетельство об офиц. рег. прогр. для ЭВМ №2018661106 Программа для повышения резкости рентгенограмм («ImageSharpness»). Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Гук К.К., Холопова Е.Д. заявл. 03.08.2018, зарег. 31.08.2018.

7. Свидетельство об офиц. рег. прогр. для ЭВМ №2020617834 WorldPCА. Староверов Н.Е., Потрахов Н.Н, Евтеев А.А.. заявл. 02.06.2020, зарег. 15.07.2020.

8. Свидетельство об офиц. рег. прогр. для ЭВМ №2020663175 Программа для определения области интереса в томографической реконструкции («ImageMarkupReson»). Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Холопова Е.Д., Ларионов И.А., Бессонов В.Б. заявл. 21.10.2020, зарег. 23.10.2020.

ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Подписано в печать 14.10.20. Формат 60x84/16

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «КопиСервис»

Печать ризографическая. Заказ № 1/1012

П.л. 1.0. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз.

ООО «КопиСервис»

197028, Санкт-Петербург, Шуваловский пр., д. 74/1, оф. 147

Тел.: (812) 327 5098