

На правах рукописи



Аль Темими Аммар Мудхехер Садек

**Методы и программные средства контроля
медицинских рентгенографических
изображений**

Специальность: 05.13.11 — «Математическое и программное
обеспечение вычислительных машин, комплексов и
компьютерных сетей»

Автореферат
диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Пилиди Владимир Ставрович.

Официальные оппоненты:

Витиска Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, ООО «НИИ МВУС», г. Таганрог, ведущий научный сотрудник

Фисунов Александр Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Радиоэлектронные и электротехнические системы и комплексы», г. Шахты ИСОиП (филиал) ДГТУ.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет».

Защита состоится «21» июня 2019 г. в 14:20 на заседании диссертационного совета Д 212.208.24 при Южном федеральном университете по адресу: г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корп. «И», комн. 347.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 148 и на сайте <http://hub.sfedu.ru/diss/>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:



Кухаренко Анатолий Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обработка цифровых изображений занимает все более важное место в задачах прикладной математики и информационных технологий. Широкое применение этих методов связано с востребованностью возникающих задач в таких разных областях, как, например, системы контроля, видеонаблюдение, медицина.

При этом техническая аппаратура не только постоянно обновляется, следствием чего являются повышение качества и объема получаемой информации. Появляются и совершенно новые сферы применения подобных устройств. С другой стороны существенно повышаются возможности вычислительной техники, что позволяет применять все более сложные алгоритмы обработки для получения результатов высокого качества за приемлемое время. Другими факторами, оказывающими существенное влияние на происходящие в рассматриваемом направлении процессы, являются постоянно растущие возможности запоминающих устройств, повсеместное внедрение высокоскоростных систем передачи информации и Интернета.

Одним из востребованных направлений в обработке цифровых изображений являются визуализация и анализ медицинских изображений. К этому направлению полностью применимо сказанное выше о происходящих изменениях в возможностях технической аппаратуры, систем обработки и передачи информации. Кроме того, и в самой медицинской науке возникают новые подходы и тенденции для анализа изображений.

В настоящее время все большее распространение получает аппаратура, дающая информацию в цифровом виде и постепенно вытесняющая устройства, предоставляющие информацию в аналоговом виде.

Значение рентгенографической диагностики в ближайшем будущем может только возрасти. При этом получаемые на основе цифровой информации методы автоматизированной компьютерной диагностики становятся все более важными. Эти методы могут повысить точность, эффективность, объективность, обеспечить формализацию результатов диагностики, а также, что особенно важно, выявить заболевание на ранних стадиях. Кроме того, они могут быть существенно востребованы при проведении массовых обследований.

Сказанное позволяет сделать вывод, что разработка методов и на их основе программных средств контроля медицинских рентгеновских изображений является актуальной и востребованной задачей.

Цель диссертационной работы. Повышение точности диагностики повреждений суставов конечностей человека по цифровым рентгеновским изображениям.

Объектом исследований являются полутонные медицинские рентгеновские изображения суставов конечностей человека.

Предметом исследований являются методы и алгоритмы цифровой обработки и анализа медицинских рентгеновских изображений.

Научная задача исследования состоит в разработке методов повышения точности распознавания положения суставов длинных костей конечностей и

нахождения референтных линий и углов по медицинским рентгеновским изображениям при заданном времени диагностики.

Для достижения сформулированной цели требуется решить **следующие задачи.**

1. Проанализировать возможности применения медицинских методов диагностики повреждения суставов и длинных костей конечностей человека для компьютерного анализа.
2. Разработать схему анализа цифровых медицинских изображений для реализации метода построения референтных линий и углов длинных костей человека.
3. Разработать методы повышения точности результатов работы алгоритма при заданном времени обработки.
4. Разработать программное обеспечение, реализующее предложенный метод построения референтных линий и углов и провести анализ его эффективности.

Основные положения, выдвигаемые для защиты.

1. Точное выделение контуров костей позволяет реализовать компьютерную диагностику на основе медицинского метода референтных линий и углов.
2. Выбранная комбинация алгоритмов (детектор границ Кэнни, алгоритм водораздела, морфологические операции и найденные для рассматриваемого класса изображений рекомендуемые параметры их настройки по умолчанию) позволяет обеспечить требуемую точность выделения контуров костей для реализации метода референтных линий и углов.
3. Метод упрощения контуров обеспечивает сокращение числа точек контуров и объема вычислений для построения референтных линий и углов на медицинском рентгенографическом изображении, давая достаточную точность диагностики.
4. Используемые интегральные таблицы методы фильтрации изображения и нахождения пороговых значений алгоритма Кэнни позволяют ускорить обработку и повысить точность выделения границ объектов.

Новые научные результаты, выносимые на защиту

1. Метод детектирования границ контуров объектов на медицинских рентгенограммах, использующий комплекс алгоритмов (детектор границ Кэнни, алгоритм водораздела, морфологические операции) для выделения контуров длинных конечностей костей человека, отличающийся от существующих точностью определения контура объекта и скоростью выполнения задачи.
2. Впервые разработаны методы определения на цифровых изображениях референтных линий для длинных конечностей костей человека.
3. Метод уменьшения количества точек контуров искомого объекта для упрощения анализа рентгенографических снимков длинных костей, отличающийся от известных точностью нахождения, скоростью выполнения и уменьшением числа находимых точек.
4. Методы фильтрации и вычисления статистических характеристик изобра-

жения, отличающиеся от существующих более высокой скоростью выполнения.

Степень разработанности темы исследования. Проведенный в диссертации обзор программных средств анализа рентгеновских медицинских изображений показывает, что их целью является визуализация получаемых данных, не содержащая дополнительного нетривиального анализа.

Существующие математические методы детектирования объектов либо требуют для своей работы обучающей выборки, что повышает накладные расходы на подготовку к работе, либо не дают приемлемого для диагностики качества детектирования.

Научная новизна:

1. Метод определения границ контуров длинных конечностей костей человека на медицинских рентгенографических изображениях, использующий комплекс параметризуемых алгоритмов (детектор границ Кэнни, алгоритм водораздела, морфологические операции), отличающийся от существующих большей точностью определения контуров и высокой скоростью обработки.
2. Впервые разработаны методы определения на цифровых рентгеновских изображениях референтных линий и углов для длинных конечностей костей человека.
3. Метод сокращения числа точек контуров искомого объекта для упрощения анализа рентгенографических снимков длинных костей, отличающийся от известных точностью нахождения, скоростью выполнения и уменьшением числа находимых точек.
4. Методы фильтрации и вычисления статистических характеристик изображения, используемые для нового метода нахождения порогов в алгоритме Кэнни, отличающиеся от существующих более высокой скоростью выполнения за счет использования интегральной таблицы.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии метода автоматизированной обработки рентгенографических медицинских изображений на основе построения референтных линий и углов для анализа изображений конечностей человека.

Практическая значимость работы. Разработанные методы, алгоритмы и их программная реализация могут быть использованы для автоматизированного анализа цифровых рентгенографических изображений в условиях большого потока диагностических исследований, требуя вмешательства оператора в пренебрежимо малом числе случаев и давая существенное повышение качества диагностики.

1. Метод определения границ контуров костей человека на медицинских рентгенографических изображениях, использующий комплекс параметризуемых алгоритмов (детектор границ Кэнни, алгоритм водораздела, морфологические операции), увеличивает точность определения контуров приблизительно до 97 % и увеличивает скорость обработки в 5–7 раз.
2. Метод сокращения числа точек контура искомого объекта уменьшает объем вычислений метода референтных линий и углов приблизительно на 20% и обеспечивает высокую эффективность при визуальном анализе.

3. Методы фильтрации и вычисления статистических характеристик изображения для масок размера 3×3 и больше позволяют сократить время расчета (в 3–5 раз).
4. Созданное на основе предложенных методов приложение дает возможность обнаруживать отклонения на ранних стадиях даже в тех случаях, когда это не удастся сделать врачу при визуальном анализе изображения.
5. При использовании программного продукта доля случаев, требующих вмешательства оператора, составляет около 3 %.

Методы и средства исследований. Исследования проводились с использованием теоретических и экспериментальных методов компьютерного зрения, медицинского метода построения референтных линий и углов конечностей человека, математических методов для определения характеристик объектов и математических методов для ускорения процессов вычисления.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

1. Сочетанием теоретических исследований с большим объемом проведенных экспериментов.
2. Использованием для разработки методов и алгоритмов большого числа реальных медицинских рентгенографических изображений.
3. Результатами проведенных испытаний созданного программного продукта.
4. Результатами практического внедрения программного продукта.

Соответствие паспорта специальности. Содержание диссертации соответствует п. 7 («Человеко-машинные интерфейсы; модели, методы, алгоритмы и программные средства машинной графики, визуализации, обработки изображений, систем виртуальной реальности, мультимедийного общения») паспорта научной специальности 05.13.11 — «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

Реализации и внедрение результатов работы. Результаты настоящего исследования были внедрены и апробированы в ортопедической хирургической поликлинике в г. Багдад и МБУЗ «ДГБ» г. Таганрог.

Результаты работы используются в учебном процессе Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета.

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях:

1. Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: XXIII научная конференция; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону. 21-22 апреля. 2016.
2. Современные информационные технологии тенденции и перспективы развития: XXIV научная конференция; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону. 25-26 мая. 2017.
3. Международная конференция: Modern Methods, Problems and Applications of Operator Theory and Harmonic Analysis. Proceedings of the VIII international conference "Modern Methods, Problems and Applications of Operator Theory and Harmonic Analysis VIII" (Rostov-on-Don, 22 - 27 April 2018).

4. Современные информационные технологии тенденции и перспективы развития: XXV научная конференция; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону. 17-18 мая. 2018.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ в журналах и трудах конференции, в том числе 2 в научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для публикации научных положений диссертационных работ, отражающих основное научное содержание диссертаций, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 работы опубликованы в материалах всероссийских научно-технических конференций и 1 работа в материалах международной конференции

Личное участие автора. Автор самостоятельно выполнил теоретические и экспериментальные исследования, разработал методы, алгоритмы и программный комплекс для обработки и анализа рентгеновских снимков. Провел необходимые эксперименты, проанализировал полученные результаты и написал текст диссертации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации изложена на 134 страницах, включает 47 рисунков и 5 таблиц. Список использованной литературы содержит 110 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы диссертации, сформулированы цель исследования и задачи, определена научная новизна и практическая значимость, представлена общая характеристика полученных результатов и приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе обсуждается важность современных технологий в сфере диагностики заболеваний человека, в том числе анализа рентгенографических изображений для обследования состояния пациента с помощью автоматизированного процесса.

Проведен обзор общей структуры медицинской автоматизированной системы, а также рассмотрена взаимосвязь диагностической точности с ключевыми переменными, участвующими в разработке, тестировании и использовании автоматизированной диагностической системы. К этим переменным относятся: компьютерный алгоритм, источник информации, используемой для разработки базы данных, количество и тип исследуемых заболеваний, количество и тип используемых индикаторов, источник тестового образца и метод диагностики.

Обсуждаются задачи, связанные с установлением стандартов, позволяющих интегрировать эти системы для обеспечения адекватной медицинской помощи пациенту.

Приведены описания некоторых известных средств (Электронная медицинская запись — ЭМК, Автоматизированное обнаружение — САД и автоматизированная диагностика — САДх, Система архивирования и передачи изображений — PACS, Графический интерфейс для анализа и симуляций медицинских изображений — GIMIAS и Экспертные системы).

Обсуждаются современные проблемы методов обработки медицинских изображений. Основной задачей является получение максимального объема информации из изображений специального класса. Вследствие этого стандартные алгоритмы обработки обнаружения и анализа могут оказаться недостаточно эффективными. Сужение класса обрабатываемых изображений дает возможность проводить разработку специализированных подходов, а также модификацию и адаптацию известных алгоритмов для улучшения получаемого результата.

Обсуждаются известные методы анализа и обработки цифровых медицинских изображений. Алгоритмы обработки изображений расширились в основном по трем различным, но связанным направлениям исследования: сегментация, регистрация и собственно визуализация. Существуют различные методы для сегментации медицинских изображений, поставляя другим алгоритмам информацию, необходимую для анализа и диагностики. В этой главе представлены основные методы сегментации, в частности, выбор пикселей, метод активных контуров, отслеживание контуров и водораздел.

Технология улучшения изображения играет очень важную роль в обработке изображений. Выделяя некоторую информацию и удаляя другую, она может улучшить визуальный эффект изображения. Обсуждены различные типы шумов в медицинских изображениях, это важный шаг в повышении качества изображения путем восстановления значений пикселей. В диссертации приведены сведения о некоторых видах шума. Обсуждаются некоторые методы удаления шума.

Рассмотрена морфологическая обработка изображения: это инструмент для извлечения или изменения информации о форме и структуре объектов внутри изображения. Описаны основные использованные в диссертации методы (дилатация, эрозия, открытие и закрытие).

В второй главе излагаются используемый медицинский подход к анализу рентгенографических изображений, методы и алгоритмы соответствующей компьютерной диагностики.

Для анализа состояния длинных костей человека медицинскими экспертами разработан так называемый метод референтных линий и углов. В основе метода референтных линий и углов на медицинских изображениях коленного и локтевого суставов лежат геометрические характеристики — механическая и анатомическая оси. Механическая ось кости определяется как прямая линия, соединяющая центральные точки соединения проксимального и дистального суставов (см. рис. 1). Линия анатомической оси может быть прямой во фронтальной плоскости, но изогнутой в сагиттальной (перпендикулярной фронтальной) плоскости.

В этой главе описаны алгоритм построения референтных линий и получения значений углов. Приведем основные шаги применяемого метода.

Сначала выполняется фильтрация нижних частот с целью устранения шума в изображении. При этом может быть произойти некоторая потеря деталей в изображении, поэтому выбор размера фильтра является важным фактором. Параметр используемого фильтра Гаусса найден экспериментальным путем, в программной реализации он может быть изменен в параметрах настройки.

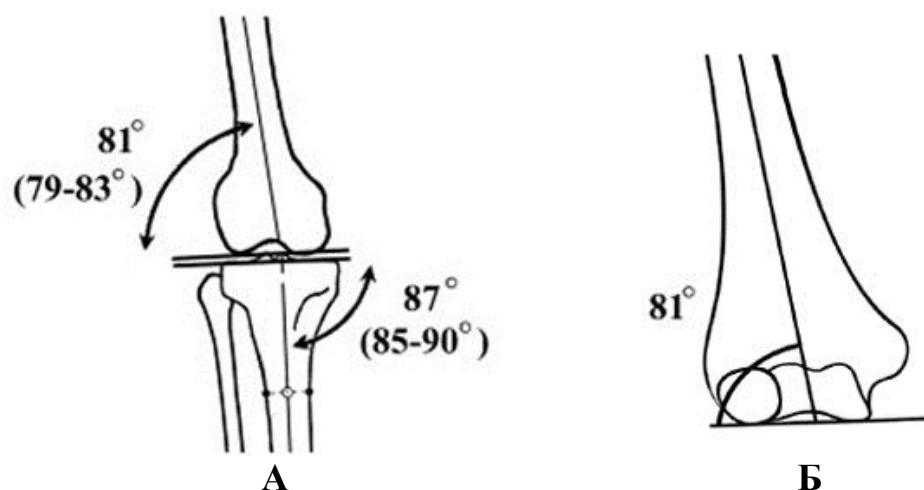


Рис. 1. Референтные линии и углы для коленного сустава (А), для локтевого сустава (Б)

Затем определяются контуры искоемых костей. Применяется детектор границ Кэнни для отфильтрованного изображения, локальные максимумы требуется выделить как границы и подавить те значения пикселей, которые не считаются границей. После применения детектора границ Кэнни получается тонкая линия в изображении. Устранение разрывов полученных границ производится с помощью операции дилатации.

Теперь выполняется инверсия изображения — искомые области станут белого цвета, это позволяет выделить контуры алгоритмом *Border Following*. Алгоритм находит связные границы, выбирая последовательно точки, находящиеся рядом с предыдущей в соответствии с выбранным отношением смежности (8-смежности в рассматриваемом случае). Этот алгоритм может быть эффективно использован при нахождении компонентов на изображении.

Дальнейшему рассмотрению подлежат только большие контуры, а мелкие контуры отсеиваются путем сравнения их периметров с пороговым значением (экспериментальным путем получено значение 200 пикселей).

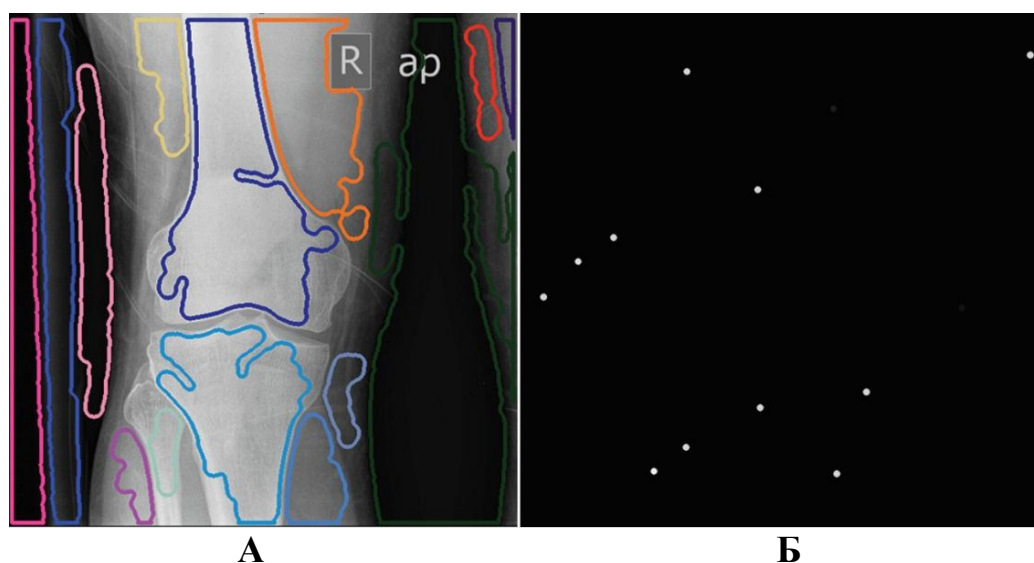


Рис. 2. Крупные контуры (А), центры масс контуров (Б)

Для оставшихся областей вычисляются центры масс, представляющие на следующем шаге роль маркеров для алгоритма сегментации водораздела (см. рис. 2). Запускается алгоритм сегментации по водоразделам. В соответствии с алгоритмом водораздела каждой из полученных областей назначается уникальная метка. С помощью меток искомой области, отбирается та область, которая содержит точку интереса. Эта единственная точка, которая лежит в пределах контуров кости на отцентрированном снимке.

Теперь снова применяется детектор границ Кэнни к области сустава и отфильтровываются области с малым по длине ограничивающим контуром.

На следующем шаге убираются мелкие "дыры" на изображении, с помощью морфологической операции «закрытие». Затем применяется морфологическая операция "дилатация" для получения связности изображения (убирающая крупные разрывы контуров). После этого для возвращения к исходному виду выполняется инверсия изображения. Оставшиеся контуры подвергаются морфологическим операциям "эрозии" для устранения разрывов и дополнительного отделения контуров друг от друга (см. рис. 3).

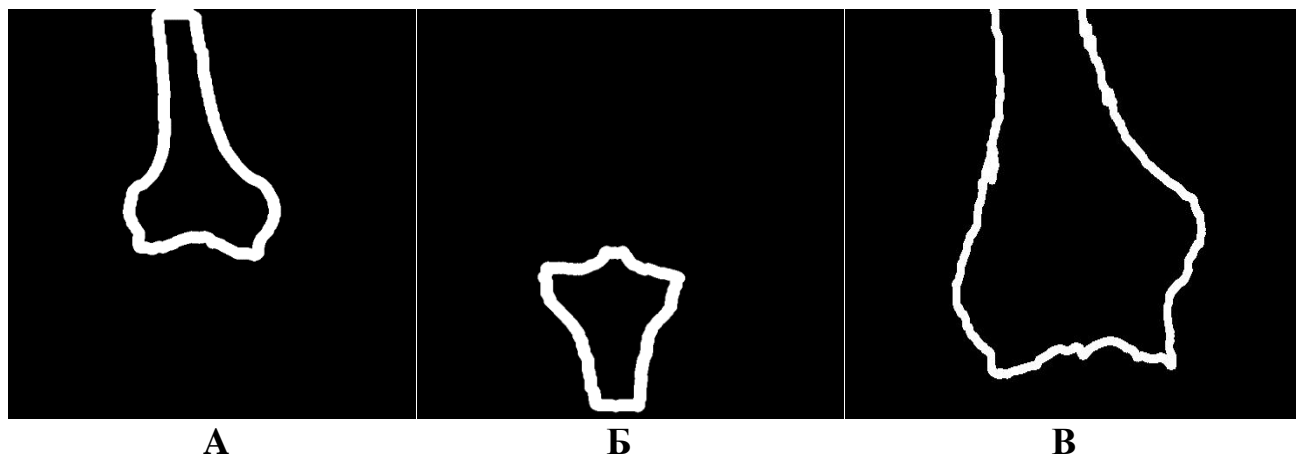


Рис 3. Выделенные контуры в случаях бедра (А), голени (Б), плеча (В)

Для упрощения полученных контуров в программе используется следующий алгоритм. Здесь и далее рассматриваются координатная плоскость и дискретная решетка точек с целочисленными координатами, на которую нанесены точки контура. Ось Ox координатной плоскости предполагается направленной вниз.

Отклонением последовательности точек $M_0, M_1, \dots, M_k, M_0 \neq M_k$ от отрезка называется наибольшее из расстояний точек M_1, M_2, \dots, M_{k-1} от отрезка M_0M_k . Если указанные точки задаются координатами $M_i(x_i, y_i), i = 0, \dots, k$, то отклонение находится по формуле

$$\rho = \max_{1 \leq i \leq k-1} ((-x_i \sin \varphi + y_i \cos \varphi - (-x_0 \sin \varphi + y_0 \cos \varphi)),$$

где значения $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ находятся по формулам

$$\cos \varphi = \frac{x_k - x_0}{\sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2}}, \quad \sin \varphi = \frac{y_k - y_0}{\sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2}}$$

Для последовательности точек контура M_0, M_1, \dots, M_N выбирается подпоследовательность M_0, M_1, \dots, M_k максимальной длины, отклонение которой не превос-

ходит некоторой величины. Ее значение по умолчанию найдено в результате экспериментов и может быть изменено в настройках программы. После этого точки M_1, M_2, \dots, M_{k-1} исключаются и рассматривается последовательность точек, начинающаяся с M_k .

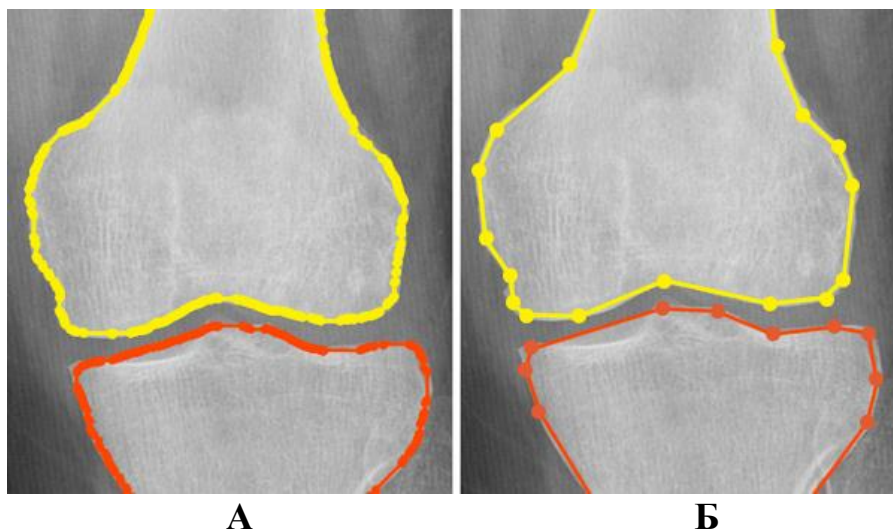


Рис 4. Исходный контур (А), Упрощённый контур (Б)

Уменьшение количества точек с помощью этого алгоритма позволяет упростить потенциально возникающую в случае неудовлетворительного детектирования границ контуров из-за некачественного изображения необходимость ручной коррекции, поскольку сдвигать точки к нужным местам границы контура существенно легче при малом их количестве.

Нахождение референтных линий и углов является следующим шагом. Описание этих методов дается далее.

Для нахождения центров масс контуров используется следующая схема. Рассмотрим, например, верхнюю кость на изображении (рис. 5).

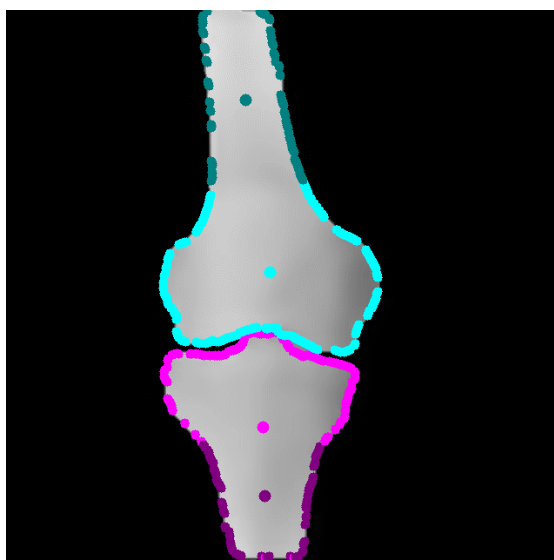


Рис. 5. Центры масс контуров, по которым находятся анатомические линии

Предположим, что точки контура находятся в одномерном массиве размеров N , начиная с левой верхней точки и заканчивая правой верхней. Двигаясь от левой верхней точки, находим максимальную последовательность точек, отклонение которой от отрезка не превосходит некоторой величины. Аналогично находится подобный отрезок, концом которого является правая верхняя точка. Искомый центр масс верхнего фрагмента находится как центр масс четырехугольника в вершинах в концах двух получаемых отрезков.

В случае нижней части кости ее контур имеет сложную структуру, и для нахождения центра масс этой части берутся средние арифметические соответственно абсцисс и ординат точек контура.

Для получения суставной линии бедренной кости (см. рис. 6), используется следующий алгоритм. Выбираются положительные числа δ и Δk . Число δ определяет максимально допустимое отклонение точек контура от находимых в ходе алгоритма прямых, число Δk — приращение углового коэффициента искомой прямой в ходе алгоритма. В программной реализации значения этих параметров найдены в результате экспериментов и не входят в число параметров настройки. В алгоритме используется понятие отклонения точки от прямой, вводимое по аналогии с указанным выше отклонением от отрезка.

Перейдем к описанию алгоритма.

1. Находятся точки контура с максимальной и минимальной ординатой.

Пусть это точки (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Тогда вертикальная прямая $y = \frac{y_1 + y_2}{2}$, обозначаемая далее через l , делит изображение приблизительно пополам.

2. Вводится переменная величина $k = 0$ — угловой коэффициент искомой прямой. Выбирается точка контура с максимальной абсциссой x_{max} . Если таких точек несколько и среди них есть точки, лежащие как слева, так и справа от прямой l , то прямая $x = x_{max}$ есть искомая, работа алгоритма завершена. Если все эти точки лежат с одной стороны от прямой l , берется точка, которая находится ближе всех к этой прямой. Обозначим эту точку через A .

3. Рассматривается проходящая через точку A прямая L с угловым коэффициентом $k = k + \Delta k$ ($k = k - \Delta k$), если эта точка лежит слева (справа) от прямой l .

Возможны следующие случаи.

a. Нет точек контура, отличных от точки A , и отклоняющихся от прямой L менее, чем на величину δ . Тогда производится переход к пункту 3.

b. На прямой L есть только точки контура, лежащие с той же стороны, что и точка A . Тогда точка A заменяется той из них, которая лежит ближе всех к прямой l и производится переход к пункту 3.

c. На прямой L есть точки контура, лежащие со стороны, противоположной точке A . Тогда L есть искомая прямая, и работа алгоритма завершена.

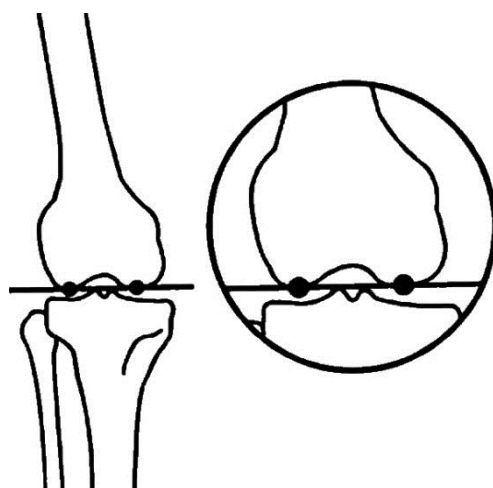


Рис. 6. Точки для суставной линии в колене сустава

Для нахождения суставной линии большеберцовой кости (см. рис. 7) в этом случае используется следующий метод.

Берется наименьшая из абсцисс точек контура (ось абсцисс направлена сверху вниз), пусть она равна x_{\min} . Полагаем $\Delta x > 0$, это приращение значения абсциссы. Ищется количество точек контура, абсциссы которых удовлетворяют неравенствам

$$x_{\min} + k\Delta x \leq x < x_{\min} + (k+1)\Delta x, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Это горизонтальные полосы шириной Δx пикселей. Рассматриваются значения k , начиная с которых число точек резко возрастает вплоть до тех, после которых оно резко убывает. Интересующая нас суставная линия целиком находится в полосах, соответствующей этим значениям k . При этом рекомендуемое значение Δx составляет 2–3 пикселя (в противном случае при наличии некоторого наклона суставной линии максимум может оказаться слабо выраженным). После этого рассматриваются ординаты точек, попавших в выделенные полосы. Рассматриваются промежутки наибольшей длины, целиком лежащие в наборе этих ординат. Правый конец левого промежутка и левый конец правого промежутка являются искомыми точками, по которым строится суставная линия.

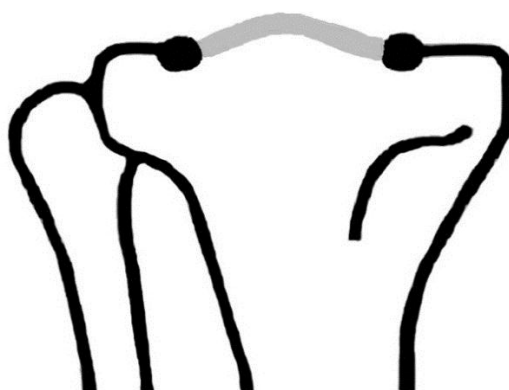


Рис. 7. Верхний «наконечник» кости

Метод, разработанный для получения суставной линии бедренной кости оказался применимым и для получения суставной линии плечевой кости.

В третьей главе анализируются некоторые модификации упомянутых выше алгоритмов, которые повышают качество результатов и позволяют уменьшить количество параметров в настройках программ.

Одним из шагов в рассматриваемом алгоритме является усреднение значений интенсивностей изображения. Оно сводится к замене значений каждого пикселя средним по сумме всех значений, находящихся в подматрице (в маске, используется термин "ядро фильтра") размеров $k \times k$ с центром в рассматриваемом пикселе. При выходе этой подматрицы за пределы изображения недостающие элементы заменяются нулями, это незначительно уменьшает число операций, поскольку количество таких случаев пренебрежимо мало по сравнению с их общим числом, и это уменьшение не учитывается. Такой подход с усреднением будем называть непосредственным. В алгоритме используется метод интегрального изображения (интегральных таблиц, summed-area table). Пусть $I(x, y)$ — интенсивность изображения в точке (x, y) . Интегральным изображением называется массив тех же размеров, что и само изображение, и задаваемый формулой $T(x, y) = \sum I(x', y')$, где суммирование ведется по всем значениям аргументов, удовлетворяющим условиям $x' \leq x, y' \leq y$. По данным построенного массива сумма интенсивностей в любом прямоугольном фрагменте изображения находится с помощью трех операций сложения-вычитания.

При непосредственном подходе к вычислению усреднение по маске размеров $k \times k$ требуется $k^2 mn$ операций сложения и mn операций деления. Расчет с использованием интегральных таблиц требует mn предварительных операций сложения, $3mn$ операций сложения-вычитания и mn операций деления, давая при $k \geq 3$ существенный выигрыш в количестве операций сложения-вычитания.

Время выполнения усреднения интенсивностей пикселей с использованием интегрального изображения составляет приблизительно 78 миллисекунд и практически не зависит от размера ядра фильтра. Время выполнения здесь в 2–5 раз меньше, чем в предыдущем методе.

Другая модификация посвящена разработке в работе алгоритма детектора Кэнни. Анализ градиентов интенсивности изображения является основным этапом этого алгоритма. Качество результата существенно зависит от этих значений. Как мы уже упоминали выше, детектор Кэнни используется дважды, и здесь речь идет о первом (глобальном) шаге.

Основные шаги алгоритма Кэнни состоят в следующем (сглаживание, поиск градиентов, подавление немаксимумов, двойная пороговая фильтрация и трассировка границы). Здесь рассматривается модификацию четвертого шага (двойная пороговая фильтрация).

Проведенные эксперименты показали, что эти пороги можно найти автоматически, используя только статистические характеристики изображения. Это значительно улучшает качество определения границ и в результате потребность в дальнейшей обработке изображения исчезает или существенно уменьшается.

Для ускорения работы программы, учитывая достаточную однородность анализируемых изображений, была сделана попытка найти простой способ находде-

ния этих границ. Сделано предположение, что эти пороги можно задавать в виде $(m \pm \sigma)k$, где m — среднее значение отфильтрованного изображения, σ — соответствующее стандартное отклонение, k — находимый по результатам экспериментов коэффициент. В результате серии экспериментов обнаружено, что наилучшие результаты для изображений рассматриваемого класса дают значения k в пределах от 0.18 до 0.25.

Значение m получается непосредственно из интегральной таблицы, а стандартное отклонение находится с помощью некоторой модификации алгоритма построения интегральной таблицы, несущественно увеличивающей объем вычислений.

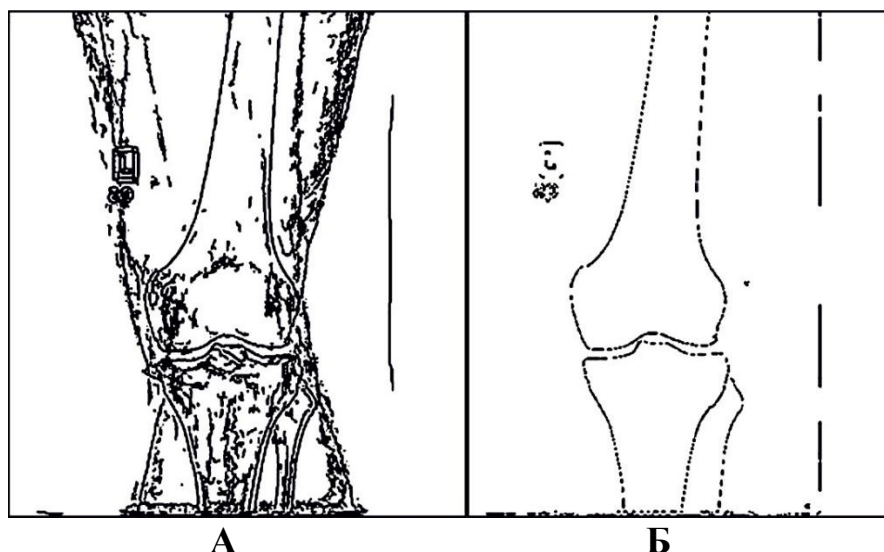


Рис. 8. Результат обработки с порогами «по умолчанию» (А), с адаптивными порогами (Б)

Предложенный метод дает существенно разные значения порогов для разных изображений рассматриваемого класса и результат получается существенно лучше, чем в случае фиксированных порогов. Результаты сравнивались визуально. Было также сопоставлено количество пикселей, полученных после работы «старого» и «нового» подхода.

Оказалось, что важные детали не были повреждены в обоих рассматриваемых случаях, но в новом методе пиксели, представляющие границы контуров, находятся более точно, а количество лишних деталей радикально уменьшается (см. рис.8).

В четвертой главе предоставлен опыт практического применения программного комплекса, сведения о библиотеке OpenCV и сборка Emgu CV используемых для разработанного программного комплекса XRAY.

Приведен пример эксперимента для получения референтной линии и угла рентгеновского снимка плечевой кости. Целью этого эксперимента является проверка производительности и оценка качества обработки одного изображения.

В этой главе также приведен пример неудачного случая определения границ бедра кости. В этом случае не обнаружена часть границы из-за некачественного исходного изображения. Эта часть имеет низкие уровни интенсивности пикселей. Для исправления подобных проблем предусмотрен ручной режим, чтобы имелась

возможность исправить точки границ и сдвигать их позиции и на следующем шаге пересчитывать искомые геометрические характеристики.

В четвертой главе представлена инструкция для использования программного комплекса анализа медицинских рентгенографических снимков XRay.

В конце главы приведены данные экспериментов с программным комплексом XRay и результаты обсуждения с врачом.

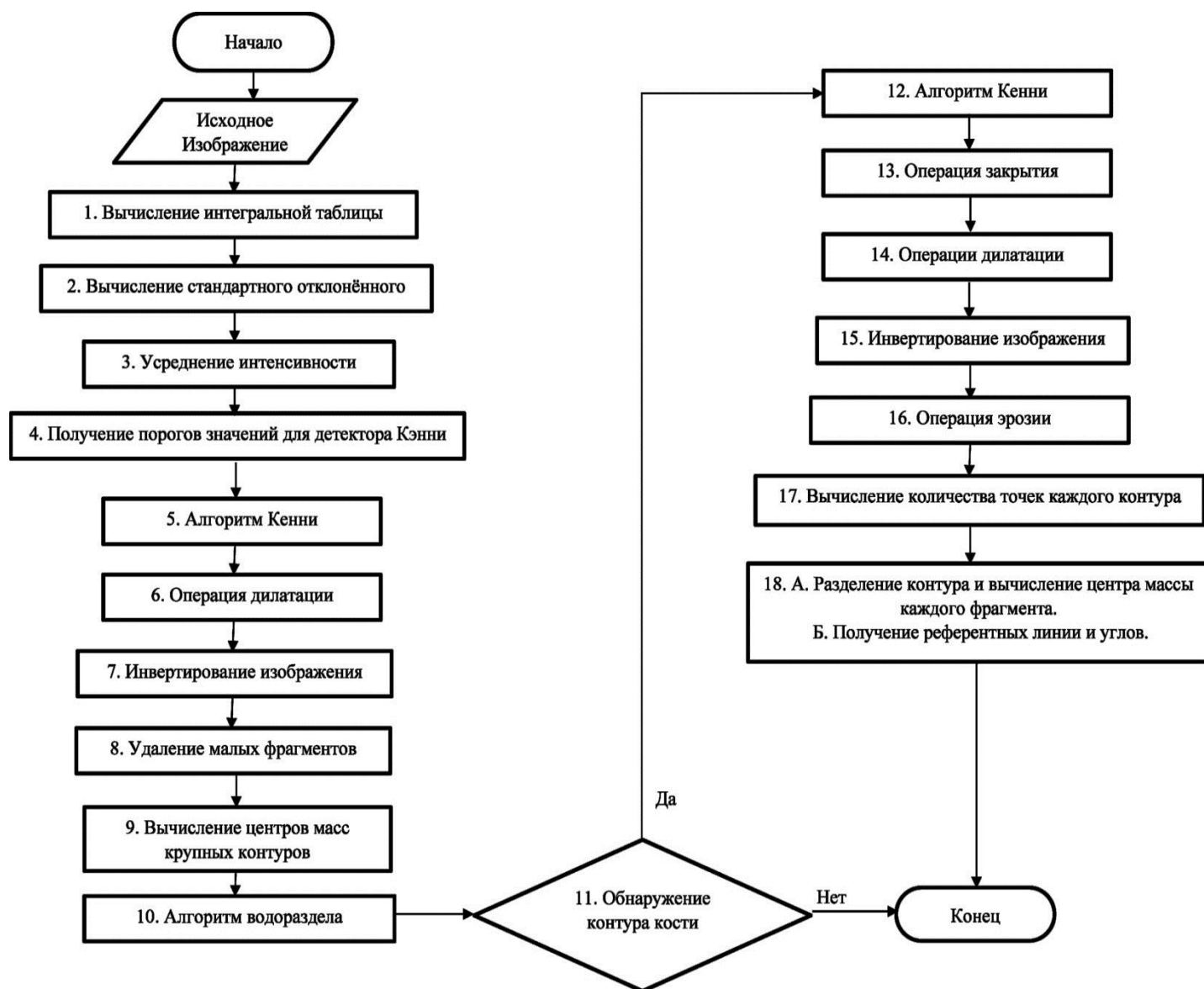


Рис. 9. Схема основных шагов для получения референтных линии и углов

В заключении сформированы основные результаты диссертационной работы, и перспективы дальнейшей разработки темы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена актуальная научная задача, заключающаяся в разработке методов повышения точности распознавания положения суставов длинных костей конечностей и нахождение референтных линий и углов на медицинских рентгенографических изображениях при заданном времени диагностики.

В процессе исследования, получены следующие результаты.

1. **Разработан** метод детектирования границ контуров объекта на медицинских рентгенограммах, использующий комплекс алгоритмов, **отличающийся** от существующих точностью определения контуров объекта и скоростью выполнения (точность распознавания границ контуров объекта составляла до 97% и скорость выполнения выше в 5–7 раз).
2. На основании проведенных экспериментов **предложены** методы нахождения параметров для используемых алгоритмов, в частности, нахождения порогов для детектора Кэнни, позволяющие существенно повысить точность обработки и уменьшить количество лишних деталей (примерно на 50%).
3. **Впервые разработаны** методы определения референтных характеристик на анализируемых цифровых изображениях, продемонстрировавшие при их программной реализации высокую эффективность.
4. **Предложен новый метод** оптимизации количества точек, используемых для задания контура искомого объекта, дающий меньшее количество точек по сравнению с предложенными ранее (примерно на 20%) при сохранении точности результата.
5. **Предложен использующий** интегральные таблицы метод нахождения статистических характеристик изображения, **отличающийся** от существующих скоростью выполнения.
6. **Предложен использующий** интегральные таблицы метод фильтрации, **отличающийся** от существующих скоростью выполнения, которая выше в 3–5 раз.
7. Создан программный комплекс медицинской визуализации и диагностики, реализующий предложенные методы.

Практические результаты исследования состоят в следующем.

1. Анализ рентгеновского изображения с помощью созданного на основе разработанных методов приложения позволяет оперативно получать существенную информацию о состоянии анализируемой области, а в некоторых случаях обнаруживать аномалии, которые специалисту не удастся обнаружить при визуальном анализе снимка.
2. В созданном программном продукте удалось существенно снизить количество параметров настройки, необходимость использования которых возникает только в редких случаях существенного отклонения характеристик анализируемых изображений от среднестатистических.
3. Разработанный комплекс позволяет проводить массовую обработку изображений.
4. Предложенная схема может быть использована для решения подобных задач в случае других областей анализа.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

1. Развитие математического, алгоритмического и программного обеспечения автоматизированного построения референтных линии и углов для тазобедренного сустава.
2. Развитие метода детектирования контуров и получения дополнительной цифровой и графической информации для других устройств, предоставляющих цифровую графическую информацию.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации входящие в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК:

1. *Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С.* Автоматизация процесса определения референтных линий на рентгенографических медицинских изображениях // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]. — 2017. — №1. — Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4007>
2. *Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С.* Об одном алгоритме анализа структуры рентгенографических медицинских изображений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: технические науки. — 2018. — № 1. — С. 23–28.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

3. *Аль Темими А.М.С.* Система анализа рентгенографических изображений коленного сустава. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018610378 / А.М.С. Аль Темими. — Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 10 января 2018г.

Публикации в материалах конференций:

4. *Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С.* Автоматическое нахождение референтных линий и углов на медицинских рентгенографических изображениях // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: материалы XXIII научной конференции; Южный федеральный университет. — Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 21-22 апреля 2016. — С. 47–48.
5. *Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С.* Программа автоматического анализа медицинских рентгенографических изображений плечевой кости // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: материалы XXIV научной конференции; Южный федеральный университет. — Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 25-26 мая 2017. — С. 22–24.
6. *Al-Temimi A. M. S., Pilidi V. S.* On the threshold values for Canny edge detector in the case of medical X-ray images // Modern Methods, Problems and Applications of Operator Theory and Harmonic Analysis, Proceedings of the VIII international conference "Modern Methods, Problems and Applications of Operator Theory and Harmonic Analysis VIII". — Rostov-on-Don, 22 - 27 April 2018. — С.133-135.
7. *Аль Темими А.М.С., Пилиди В.С.* О некоторых модификациях алгоритма обработки рентгеновских изображений // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: материалы XXV научной конференции; Южный федеральный университет. — Ростов-на-Дону: Изд. ЮФУ, 17-18 мая 2018. — С.23-25.