

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Зюзин Василий Викторович

**Разработка и исследование полуавтоматических и
автоматических алгоритмов оконтуривания левого
желудочка сердца на эхокардиографических
изображениях сердца**

05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации
(информатизация и связь)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в учебно-научном центре «Информационная безопасность» Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Поршнеv Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Ильясова Наталья Юрьевна**, доктор технических наук, доцент, Институт систем обработки изображений РАН - филиал федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», г. Самара, старший научный сотрудник лаборатории интеллектуального анализа видеоданных;

Нежевенко Евгений Семенович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник лаборатории информационной оптики;

Ручай Алексей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», г. Челябинск, заведующий кафедрой компьютерной безопасности и прикладной алгебры.

Защита состоится 15 июня 2021 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 05.11.29 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2210>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Болезни сердца являются причинами большого числа скоропостижных смертей, в том числе людей не пожилого возраста. В этой связи врачам кардиологам требуется максимально точная и своевременная информация о состоянии сердечной мышцы пациента, которая во многих случаях позволяет диагностировать ее заболевания и назначить необходимое лечение.

Сегодня одним из наиболее распространенных методов диагностики являются ультразвуковые исследования (УЗИ) сердечно-сосудистой системы (эхокардиография – ЭхоКГ), предоставляющие кардиологам визуальные изображения сердечной мышцы в различных проекциях. Следует отметить, что в задачах кардиологии наиболее часто используется апикальная проекция сердца, которая с точки зрения врачей-кардиологов является наиболее информативной, потому что они имеют возможность провести анализ УЗИ-изображений сердца и построить эндокардиальный (внутренний) контур левого желудочка (ЛЖ). Далее оказывается возможным вычислить количественные показатели, характеризующие состояние сердечной мышцы.

Для проведения ЭхоКГ-исследований сегодня применяют УЗИ-сканеры различных производителей (Philips, Aloka Hitachi, Toshiba, Siemens, General Electric и др.), которые оснащены тем или иным инструментарием для построения контура ЛЖ вручную. Используя данный инструментарий, врачи-кардиологи на основе собственных представлений о форме ЛЖ, зачастую субъективных, строят на УЗИ-изображении контур ЛЖ. (Например, они достраивают границы областей сердца с низкой контрастностью (рис. 1), а также в ряде случаев сглаживают контур ЛЖ, отбрасывая на изображении те или иные области повышенной плотности.) При этом, несмотря на имеющиеся рекомендации американской кардиологической ассоциации, обобщить опыт оконтуривания ЛЖ сердца на УЗИ-изображениях в виде некоторого набора правил врачам-кардиологам не удается.

Известно большое число работ, авторы которых предпринимали попытки реализации алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца с использованием:

- геометрических моделей (M. Mignotte, A. Mishra, O. Gerard, L. Jacobs);
- методов уровневых множеств (N. Lin, J. Yan, F. Galluzzo, C. Fabbri, C. Corsi);
- алгоритмов, основанных на вычислении оптического потока пикселей изображения (J. Pedrosa, J. Nascimento);
- статистических моделей контуров ЛЖ (А. Ятченко, А. Крылов, F. Orderud, M. Stralen, J. Hansegard, D. Barbosa, L. Maes, D. Boukerroui);

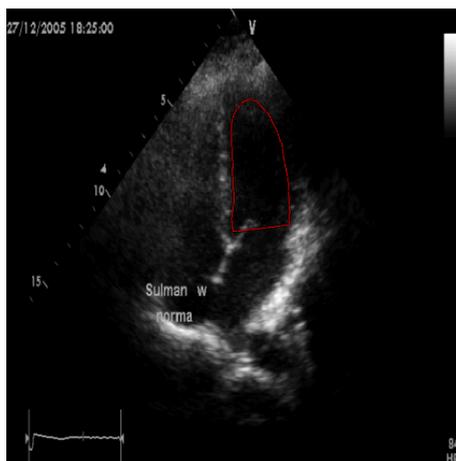


Рисунок 1 — Пример УЗИ-изображения, имеющего области с низким контрастом тканей сердца

- методов морфологической обработки УЗИ-изображений (J. Klinger, M. Choy);
- искусственных нейронных сетей (E. Alcevska, O. Oktay, S. Leclerc, O. Bernard, J. Pedrosa, N. Azarmehr, G. Coppini, A. Ostvik).

Также отметим работы (J. Noble, K. Leung), в которых приведены обзоры наиболее значимых результатов в области разработки алгоритмов оконтуривания ЛЖ на момент написания обзоров. Однако универсальных алгоритмов, пригодных к различным наборам УЗИ-изображений, не существовало. В этой ситуации разработка полуавтоматических и автоматических алгоритмов для построения контуров ЛЖ является актуальной.

Целью данной работы является научно обоснованная разработка математического и алгоритмического обеспечения для полуавтоматического и автоматического оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях апикальной проекции сердца человека на основе обоснованного выбора набора первичных данных, адаптации известных алгоритмов, используемых в задачах компьютерного зрения, к решаемой задаче.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ состояния предметной области и инструментов для оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях, поставляемых с УЗИ-сканерами.
2. Оценка возможности использования доступных наборов УЗИ-изображений сердца для разработки полуавтоматических и автоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ.
3. Разработка полуавтоматических и автоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях апикальной проекции

сердца на основе адаптации и модернизации известных алгоритмов компьютерного зрения к решаемой задаче.

4. Сравнительный анализ точности разработанных полуавтоматических и автоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ.

Объектом исследования являются компьютерные методы обработки и анализа УЗИ-изображений сердца.

Предметом исследования являются полуавтоматические и автоматические компьютерные методы оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца.

Научная новизна:

1. Проведен комплексный анализ доступных наборов данных, содержащих УЗИ-изображения сердца и размеченные экспертами контуры ЛЖ, и обоснована возможность их использования для разработки и исследования полуавтоматических и автоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца человека (соответствует п. 13 паспорта специальности).
2. Разработаны научно-обоснованные полуавтоматические и автоматические алгоритмы оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца на основе адаптации и модернизации известных алгоритмов компьютерного зрения к особенностям решаемой задачи (соответствует п. 5, 12 паспорта специальности).
3. Разработана научно-обоснованная методика количественного сравнения разработанных полуавтоматических и автоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца (соответствует п. 3 паспорта специальности).

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

1. обосновании достаточности использования 9 базовых точек экспертного контура ЛЖ для его восстановления (при этом отличие области ЛЖ, охватываемой восстановленным контуром, от области ЛЖ, охватываемой экспертным контуром, по коэффициенту *Dice* не превосходит 2.0%, а по коэффициенту *Jaccard* – 3.7%);
2. в научно-обоснованном выборе параметров известных и модифицированных полуавтоматических и автоматического алгоритмов оконтуривания ЛЖ, обеспечивающих наилучшее качество оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях по коэффициенту *Dice*;
3. разработке программных реализаций полуавтоматических и автоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца, готовых к использованию врачами-кардиологами.

Методология и методы исследования. В работе использованы теория распознавания образов, методы теории глубоких нейронных сетей,

цифровой обработки сигналов, прикладной математической статистики, методы интерполяции и аппроксимации функций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Работоспособность автоматического алгоритма нахождения реперных точек экспертного контура подтверждена результатами проведенного анализа 1800 УЗИ-изображений сердца.
2. Для восстановления контура ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца достаточно использовать 9 базовых точек, принадлежащих контуру эндокарда.
3. Точность по коэффициенту *Dice* автоматического алгоритма оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях набора данных USEKB с помощью обученной на наборе данных SAMUS сверточной нейронной сети (СНС) с модифицированной архитектурой U-Net, равная 0.854, превосходит на 0.015 аналогичный показатель СНС с оригинальной архитектурой U-Net, а после дообучения на начальных кадрах УЗИ-видеопоследовательностей набора данных USEKB данные показатели достигают значений 0.891, 0.038, соответственно.
4. Из полуавтоматических методов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях наибольшую точность по коэффициенту *Dice* на наборе данных USEKB имеет метод оптического потока Лукаса-Канаде (0.901).

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных математических методов, адекватных задачам исследования, а также их согласованностью с результатами, полученными другими авторами и с экспертными оценками врачей-кардиологов качества контуров ЛЖ на УЗИ-изображениях.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационного исследования используются в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (акт об использовании результатов № 1 от 10.02.2021); федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт иммунологии и физиологии» Уральского отделения Российской академии наук (акт об использовании результатов № 16381.01-69 от 20.02.2021); ООО «Институт информационных датчиков и технологий» (акт об использовании результатов от 23.02.2021).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: 9-я Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», Екатеринбург, Россия, 26–28 сентября 2012 г.; 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные

технологии» (КрыМиКо-2013), Севастополь, Крым, Украина, 8–13 сентября 2013 г.; 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2014), Севастополь, Крым, Россия, 7–13 сентября 2014 г.; 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2015), Севастополь, Крым, Россия, 6–12 сентября 2015 г.; 9-й Открытый немецко-российский семинар «Распознавание образов и понимание изображений» (OGRW-9-2014), Кобленц, Германия, 1–5 декабря 2014 г.; 17-я Всероссийская конференция с международным участием «Математические методы распознавания образов» (ММРО-17), Светлогорск, Калининградская область, Россия, 20–24 сентября 2015 г.; 4-я Международная конференция «Анализ изображений, социальных сетей и текстов» (AIST 2015), Екатеринбург, Россия, 9–11 апреля 2015 г.; 1-й Международный семинар по распознаванию образов (IWPR 2016), Токио, Япония, 11–13 мая 2016 г.; 9-я Международная IEEE научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (DYNAMICS-2018), Омск, Россия, 14–16 ноября 2017 г.; Уральский симпозиум биомедицинской инженерии, радиоэлектроники и информационных технологий (USBEREIT 2018), Екатеринбург, Россия, 7–8 мая 2018 г.; Уральский симпозиум биомедицинской инженерии, радиоэлектроники и информационных технологий (USBEREIT 2019), Екатеринбург, Россия, 25–26 апреля 2019 г.; Уральский симпозиум биомедицинской инженерии, радиоэлектроники и информационных технологий (USBEREIT 2020), Екатеринбург, Россия, 14–15 мая 2020 г.

Личный вклад. Автор обосновал возможность использования наборов данных для решения задач исследования, разработал полуавтоматические и автоматические алгоритмы оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях и их программные реализации, обосновал методику для количественного оценивания точности разработанных алгоритмов и получил соответствующие оценки точности, оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 16 научных статей в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 15 статей в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах Scopus и Web of Science. Имеется 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 5 приложений. Полный объем диссертации составляет 151 страницу, включая 94 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 84 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, а также основные научные результаты диссертации и ее краткое содержание. Приводятся основные положения, выносимые на защиту, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенного исследования.

Первая глава посвящена анализу состояния предметной области, в том числе: проведен анализ состояния предметной области; описана медицинская проблема анализа и идентификации внутренних границ ЛЖ; проведено исследование существующих программно-аппаратных ультразвуковых комплексов для задачи оконтуривания внутренних границ ЛЖ, результаты которого свидетельствуют о необходимости разработки алгоритмов построения контуров ЛЖ.

На основании результатов анализа состояния предметной области сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию наборов данных ультразвуковых изображений и количественному анализу экспертных контуров ЛЖ. В том числе, проведен анализ доступных ЭхоКГ наборов данных CAMUS, USEKB, CETUS, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Обобщенные характеристики наборов данных CAMUS, USEKB, CETUS

	CAMUS	USEKB	CETUS
Количество пациентов	500	94	45
Количество кадров	19232	2771	45
Количество кадров с размеченной областью ЛЖ	1800	2771	15
Тип изображений	2D	2D	3D
Проекции сердца	A2П, A4П	A4П	-
Количество пациентов без паталогий	-	37	5
Количество пациентов с паталогиями	-	57	10
Производитель УЗИ-сканера	GE	GE Philips	GE Philips Siemens

* A2П – апикальная двухкамерная проекция сердца,
A4П – апикальная четырехкамерная проекция сердца.

Из таблицы 1 видно, что общее количество доступных УЗИ-изображений сердечной мышцы составило 22048 (22003 двумерных изображений

и 45 трехмерных изображений). В связи с тем, что набор SETUS содержит только трехмерные изображения, данный набор в дальнейших исследованиях не использовался. Общее количество размеченных экспертами двумерных УЗИ-кадров составило 4571. Распределения по размерам изображений для наборов данных CAMUS и USEKB представлены на рисунке 2. Для набора данных CAMUS эксперты дополнительно оценивали качество размечиваемых ими УЗИ-изображений сердца. Каждое изображение было отнесено к одному из трех классов: 1) изображения хорошего качества (35% от общего количества размеченных кадров в наборе (1800)), 2) изображения среднего качества (46%) и 3) изображения низкого качества (19%).

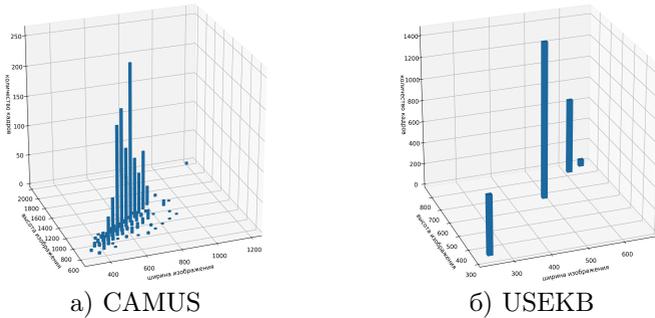


Рисунок 2 — Распределение размеченных изображений по размерам в ЭхоКГ наборах данных CAMUS и USEKB

Проведен анализ экспертных контуров в полярной системе координат, результаты которого позволили обоснованно выбрать 9 минимально необходимых базовых точек, по которым возможно восстановление контура ЛЖ с помощью кубических сплайнов (рис. 3).

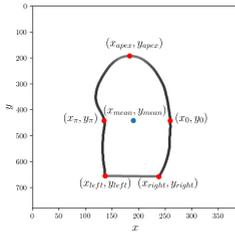
Правильность выбора подтверждена зависимостями коэффициентов *Dice*:

$$Dice(I^t, I^p) = \frac{2 \sum_{i,j} I_{i,j}^t I_{i,j}^p}{\sum_{i,j} I_{i,j}^t + \sum_{i,j} I_{i,j}^p}$$

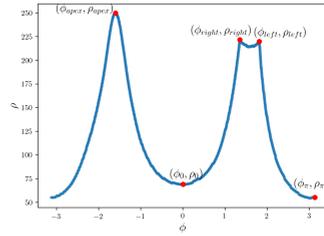
и *Jaccard*:

$$Jaccard(I^t, I^p) = \frac{\sum_{i,j} I_{i,j}^t I_{i,j}^p}{\sum_{i,j} I_{i,j}^t + \sum_{i,j} I_{i,j}^p - \sum_{i,j} I_{i,j}^t I_{i,j}^p},$$

от числа базовых точек, вычисленных на основе сравнения областей ЛЖ, охватываемых экспертным контуром ($I_{i,j}^t$) и восстановленным по базовым точкам контуром ($I_{i,j}^p$) (рис. 4, здесь $Q_{alpha}^{(Dice)}$ и $Q_{alpha}^{(Jaccard)}$ – квантили



а) Контур ЛЖ



б) Сигнатура контура ЛЖ

Рисунок 3 — Контур ЛЖ и сигнатура контура ЛЖ, построенная относительно центра масс контура, с обозначениями, используемыми в обсуждаемом алгоритме

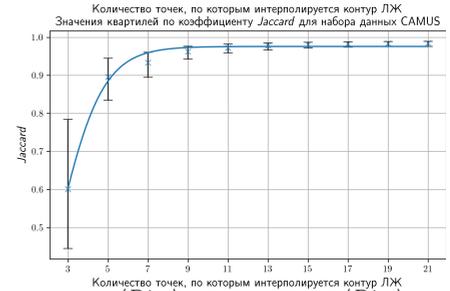
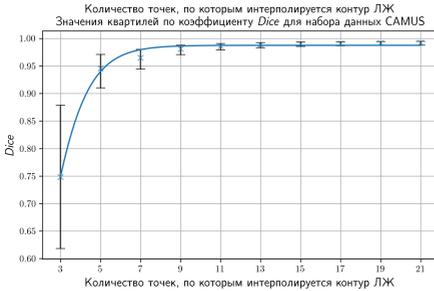
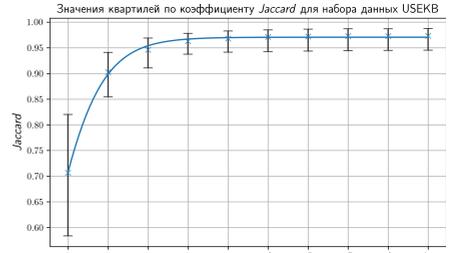
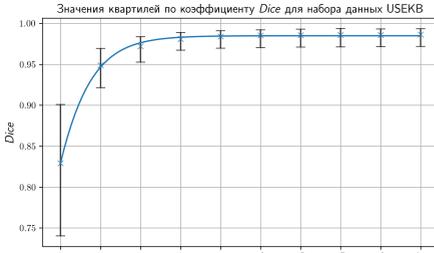


Рисунок 4 — Графики функций $Q_{0.5}^{(Dice)} = Q_{0.5}^{(Dice)}(n)$, $Q_{0.5}^{(Jaccard)} = Q_{0.5}^{(Jaccard)}(n)$ и отрезки $[Q_{0.05}^{(Dice)}(n), Q_{0.95}^{(Dice)}(n)]$, $[Q_{0.05}^{(Jaccard)}(n), Q_{0.95}^{(Jaccard)}(n)]$ для наборов данных USEKB и CAMUS

распределений значений коэффициентов *Dice* и *Jaccard*, соответственно, вычисленных на основе аппроксимации Розенблатта-Парзена плотностей распределений данных коэффициентов).

Третья глава посвящена разработке программной реализации полуавтоматических и автоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца:

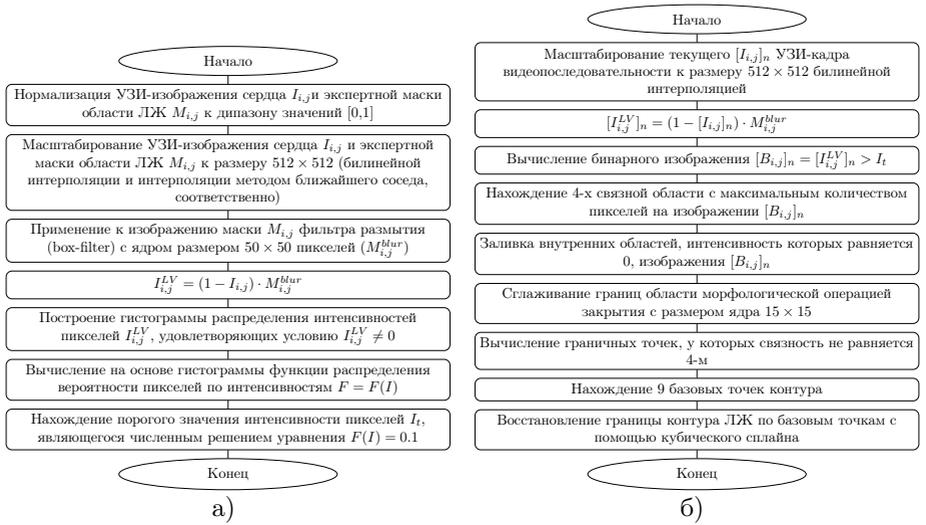


Рисунок 5 — Алгоритм нахождения порогового значения интенсивности (а) и нахождение контура ЛЖ с использованием морфологических операций (б)

1. Разработан полуавтоматический алгоритм определения границ ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца, основанный на использовании морфологических операций, и подтверждена его работоспособность (рис. 5).
2. Разработан полуавтоматический алгоритм определения границ ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца, основанный на использовании уровневых множеств и геодезических активных контуров, и подтверждена его работоспособность (рис. 6).
3. Разработан полуавтоматический алгоритм определения границ ЛЖ на УЗИ-изображениях сердца, основанный на использовании метода оптического потока базовых точек контура, и подтверждена его работоспособность (рис. 7).
4. Для сверточных нейронных сетей (СНС) с архитектурой U-Net (рис. 8) предложена модифицированная архитектура (рис. 9).

В **четвертой** главе проведено исследование реализованных алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображении в соответствии с методикой, реализующейся выполнением следующей последовательности действий.

1. Нахождение на каждом кадре из набора данных USEKB области ЛЖ.
2. Вычисление коэффициента *Dice* для каждого кадра набора данных USEKB на основе сравнения области ЛЖ, отмеченной экспертом, и соответствующей области ЛЖ, найденной соответствующим алгоритмом.

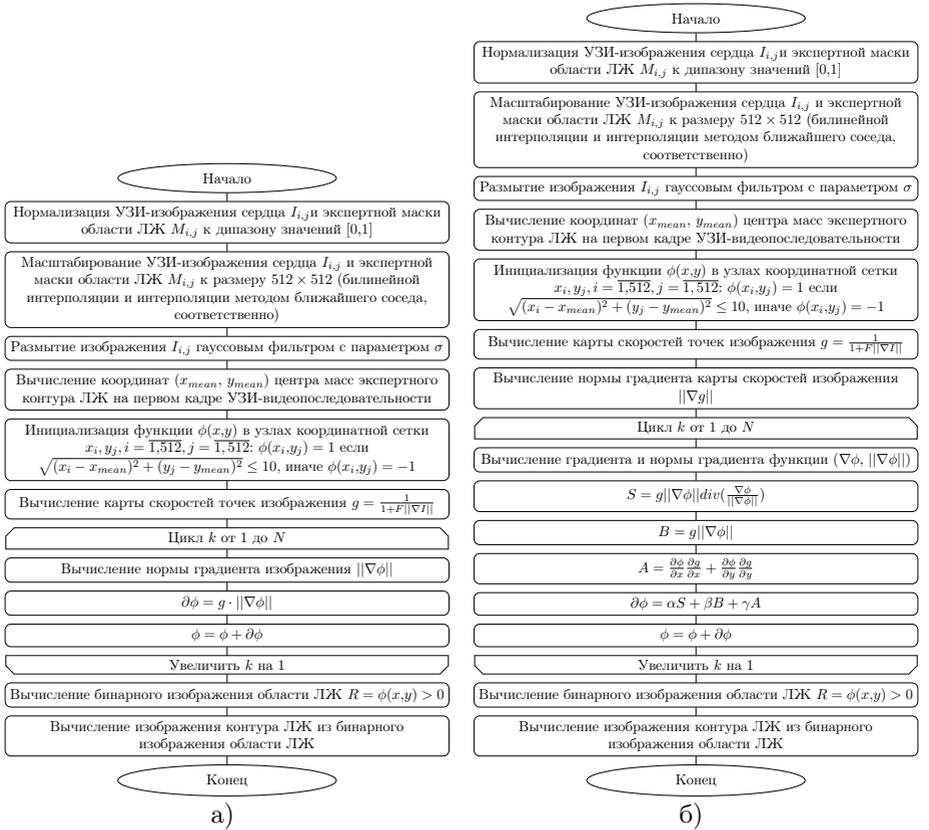


Рисунок 6 — Алгоритм уровней множеств (а) и геодезических активных контуров (б)

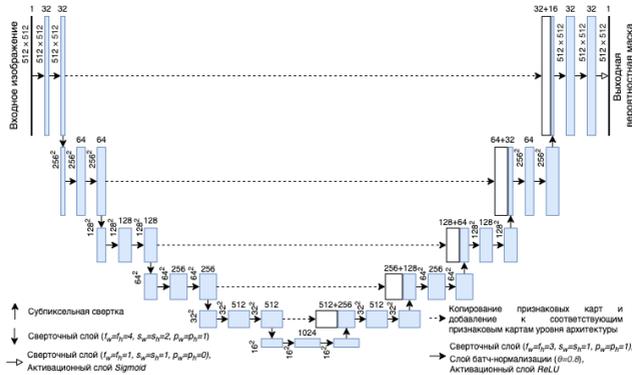
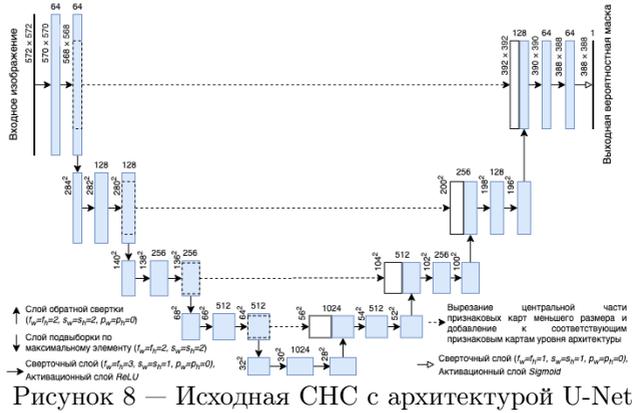
- Анализ статистических характеристик ансамблей значений коэффициента $Dice$ (вычисление аппроксимаций Розенблатта-Парзена плотностей распределений ансамблей значений коэффициента $Dice$ и далее на основе полученных аппроксимаций кварталей распределений на уровнях доверительной вероятностей $Q_{0.05}, Q_{0.50}, Q_{0.95}$ и длины отрезков $[Q_{0.05}, Q_{0.95}]$).

Выбор оптимальных значений параметров алгоритмов уровней множеств и геодезических активных контуров осуществлялся на основе визуального анализа динамики изменения формы контуров и зависимостей значений квантилей распределений коэффициентов $Dice$, вычисляемых на наборе данных USEKB, от числа итераций.

Выбор оптимальных параметров алгоритма оптического потока Лукаса-Канаде осуществлялся на основе визуального анализа динамики



Рисунок 7 — Алгоритм оптического потока Лукаса-Канаде



изменения формы контуров и зависимостей значений квантилей распределений коэффициентов $Dice$, вычисляемых на наборе данных USEKB, от величины окна и от количества уровней гауссовой пирамиды изображения. Оптимальные значения параметров, обеспечивающих наименьшую длину отрезков $[Q_{0.05}, Q_{0.95}]$, представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Оптимальные значения параметров, обеспечивающие наименьшую длину отрезков $[Q_{0.05}, Q_{0.95}]$

Алгоритм	Параметры
Морфологические операции	нет параметров
Уровневые множества	$\sigma = 2, N = 80, F = 2$
Геодезические активные контуры	$\sigma = 2, \alpha = 0.7, \beta = 0.2, \gamma = 0.1,$ $N = 450, F = 2$
Оптический поток	$\omega = \omega_x = \omega_y = 30, L = 1$

Оптимальные значения параметров СНС с оригинальной и модифицированной архитектурами U-Net выбирались на основе анализа кривых обучения СНС, представленных на рисунке 10 (использованная методика обучения СНС подробно описана в разделе 4.2 диссертации).

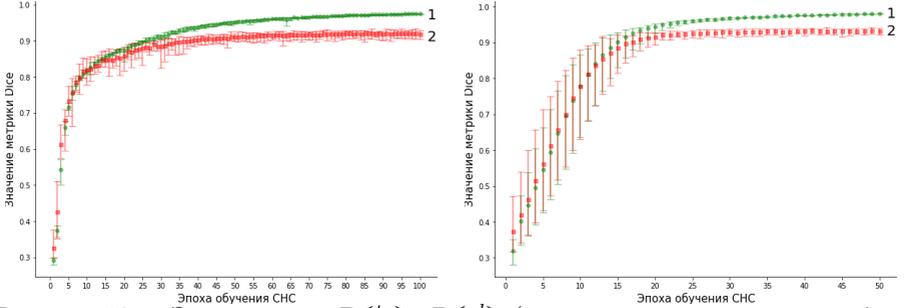


Рисунок 10 – Зависимости $D_n^{<tr>}$, $D_n^{<vl>}$ ($<tr>$ – тренировочная выборка, $<vl>$ – валидационная выборка, n – номер шага обучения), интервалы $[\min(Dice_k^{<tr>}), \max(Dice_k^{<tr>})]$, $[\min(Dice_k^{<vl>}), \max(Dice_k^{<vl>})]$ для оригинальной (слева) и модифицированной (справа) архитектур U-Net (1 – тренировочная выборка, 2 – валидационная выборка)

Из рисунка 10 видно, что асимптотическое значение $Dice$ достигается на ≈ 25 и ≈ 60 эпохах у модифицированной и исходной U-Net архитектур, соответственно.

Для найденных оптимальных значений параметров разработанных алгоритмов в соответствии с вышеописанной методикой проведено сравнение найденных с помощью предложенных алгоритмов областей ЛЖ, с соответствующими областями, отмеченными экспертами на УЗИ-изображениях набора данных USEKB (таб. 3).

Из таблицы 3 видно, что наибольшие значения $Q_{0.05} = 0.8071$, $Q_{0.50} = 0.9013$, $Q_{0.95} = 0.9712$ имеет алгоритм оптического потока Лукаса-Канаде, при этом наименьшая длина отрезка оказывается равной $|Q_{0.05}, Q_{0.95}| = 0.1642$. Также отметим, что близкие к указанным выше значениям оказывается у СНС с модифицированной архитектурой U-Net, дообученной на первых кадрах видеопоследовательностей набора данных USEKB: $Q_{0.05} = 0.7957$, $Q_{0.50} = 0.8910$, $Q_{0.95} = 0.9672$, $|Q_{0.05}, Q_{0.95}| = 0.1715$.

Таблица 3 — Значения коэффициента *Dice* на основе полученных аппроксимаций Розенблатта-Парзена кварталей распределений на уровнях доверительной вероятностей $Q_{0.05}$, $Q_{0.50}$, $Q_{0.95}$ и длины отрезков $|Q_{0.05}, Q_{0.95}|^*$

Алгоритм	$Q_{0.05}$	$Q_{0.50}$	$Q_{0.95}$	$ Q_{0.05}, Q_{0.95} $
Morph	0.7214	0.8798	0.9489	0.2279
LS	0.6635	0.7630	0.8324	0.1689
GAC	0.6505	0.7963	0.8730	0.2225
LK	0.8071	0.9013	0.9712	0.1642
cU-Net (CAMUS)	0.6877	0.8394	0.9116	0.2239
mU-Net (CAMUS)	0.6726	0.8541	0.9117	0.2390
cU-Net (CAMUS+1-USEKB)	0.6840	0.8524	0.9364	0.2524
mU-Net (CAMUS+1-USEKB)	0.7957	0.8910	0.9672	0.1715

* Morph – алгоритм морфологической обработки; LS – метод уровневых множеств; GAC – метод геодезических активных контуров; LK – алгоритм оптического потока Лукаса-Канаде; cU-Net (CAMUS) – оригинальная архитектура U-Net, обученная на наборе данных CAMUS; cU-Net (CAMUS+1-USEKB) – оригинальная архитектура U-Net, дообученная на первых кадрах видеопоследовательностей набора данных USEKB; mU-Net (CAMUS) – модифицированная архитектура U-Net, обученная на наборе данных CAMUS; mU-Net (CAMUS+1-USEKB) – модифицированная архитектура U-Net, дообученная на первых кадрах видеопоследовательностей набора данных USEKB;

Таким образом, наиболее перспективным полуавтоматическим алгоритмом для использования в задаче оконтуривания ЛЖ на УЗИ-кадрах оказывается алгоритм, основанный на оптическом потоке Лукаса-Канаде. Наиболее перспективным автоматическим алгоритмом оконтуривания ЛЖ на УЗИ-кадрах – СНС с модифицированной архитектуры U-Net, обучение которой проводилось на наборе данных CAMUS и первых кадрах видеопоследовательностей USEKB.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Проведен анализ инструментария, поставляемого совместно с УЗИ-сканерами, производителей Philips, General Electric, Canon, Mindray, Siemens, которые не имеет инструментов автоматического оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях.
2. Проведено исследование наборов данных с УЗИ-изображениями сердечной мышцы: USEKB, CAMUS и CETUS и обоснованно возможность их использования для разработки алгоритмов оконтуривания ЛЖ на УЗИ-изображениях.
3. Разработаны полуавтоматические алгоритмы оконтуривания ЛЖ на УЗИ-кадрах апикальной проекции, и их программная реализации, основанные на использовании:
 - морфологических операций;

- уровневых множеств;
- геодезических активных контуров;
- оптического потока Лукаса-Канаде.

и автоматический алгоритм оконтуривания ЛЖ, основанный на использовании СНС с модифицированной архитектурой U-Net.

4. Проведен сравнительный анализ точности нахождения контура ЛЖ предложенных алгоритмов на основе использования коэффициента *Dice*, результаты которого показали, что наилучшим по выбранному коэффициенту оказывается алгоритм автоматического оконтуривания основанный на СНС с модифицированной архитектурой U-Net.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в:

1. разработке 3D акустической модели сердца;
2. разработке методов синтеза УЗИ-изображений на основе использования 3D акустической модели сердца;
3. использовании синтезированных УЗИ-изображений для анализа и дальнейшей модификации автоматических и полуавтоматических алгоритмов оконтуривания ЛЖ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Zyuzin V.** Segmentation of 2D Echocardiography Images using Residual Blocks in U-Net Architectures / **Zyuzin V.**, Mukhtarov A., Neustroev D., Chumarnaya T. // 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). — IEEE. 2020. — С. 499–502 (0,25 п. л. / 0,07 п. л.) (Scopus)
2. **Zyuzin V.V.** Comparison of U-net architectures for segmentation of the left ventricle endocardial border on two-dimensional ultrasound images / **Zyuzin V.V.**, Chumarnaya T.V. // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). — IEEE. 2019. — С. 110–113; (0,25 п. л. / 0,15 п. л.) (Scopus, WoS)
3. Porshnev S.V. Automatic system for estimating the volume of the left ventricle based on two-dimensional MRI images of the heart along the long axis / Porshnev S.V., Bobkova A.O., **Zyuzin V.V.**, Mukhtarov A.A., Chernyshev M.A., Akhmetov D.M. // Journal of Physics: Conference Series. Т. 944 (1). — 2018. — No. 012092; (0,24 п. л. / 0,06 п. л.) (Scopus)

4. **Zyuzin V.** Identification of the left ventricle endocardial border on two-dimensional ultrasound images using the convolutional neural network Unet / **Zyuzin V.**, Porshev S., Mukhtarov A., Chumarnaya T., Solovyova O., Bobkova A., Myasnikov V. // 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). — IEEE. 2018. — C. 76–78; (0,25 п. л. / 0,05 п. л.) (Scopus)
5. Porshnev S.V. Estimation of volume of the left ventricle on MRT-images of a twochamber projection of heart on a short axis based on deep learning / Porshnev S.V., Bobkova A.O., **Zyuzin V.V.**, Mukhtarov A.A., Akhmetov D.M., Chernyshev M.A. // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). — IEEE. 2017. — No. 8239495; (0,25 п. л. / 0,07 п. л.) (Scopus, WoS)
6. Mukhtarov A.A. Usage of fully convolutional neural network for automation of extracting the left ventricle contour on the ultrasonic data images / Mukhtarov A.A., **Zyuzin V.V.**, Bobkova A.O. // CEUR Workshop Proceedings. T. 2005. — CEUR-WS. 2017. — C. 75–82; (0,44 п. л. / 0,15 п. л.) (Scopus)
7. Mukhtarov A.A. The usage of optical flow algorithm to the problem of recovery contour of the left ventricle of the human heart on the ultrasound image data / Mukhtarov A.A., Porshnev S.V., **Zyuzin V.V.**, Bobkova A.O., Labutina A.A. // CEUR Workshop Proceedings. T. 1814. — CEUR-WS. 2017. — C. 91–97; (0,37 п. л. / 0,10 п. л.) (Scopus)
8. Porshnev S.V. The study of applicability of the decision tree method for contouring of the left ventricle area in echographic video data / Porshnev S.V., Mukhtarov A.A., Bobkova A.O., **Zyuzin V.V.**, Bobkov V.V. // CEUR Workshop Proceedings. T. 1710. — CEUR-WS. 2016. — C. 248–258; (0,60 п. л. / 0,15 п. л.) (Scopus)
9. **Zyuzin V.V.** The application of decision trees algorithm for selecting the area of the left ventricle on echocardiographic images / **Zyuzin V.V.**, Bobkova A.O., Porshnev S.V., Mukhtarov A.A., Bobkov V.V., // First International Workshop on Pattern Recognition. T. 10011. — International Society for Optics, Photonics. 2016; (0,25 п. л. / 0,05 п. л.) (Scopus)
10. **Zyuzin V.V.** Studying features characterizing signatures of medical contours of the left ventricle on ultrasound images / **Zyuzin V.V.**, Porshnev S.V., Bobkova A.O., Bobkov V.V. // Pattern Recognition and Image Analysis. — 2016. — T. 26, № 3. — C. 665–672; (0,40 п. л. / 0,10 п. л.) (Scopus)
11. Bobkova A.O. Experience of using of machine learning methods to identify the left ventricle region in echocardiographic records / Bobkova A.O., **Zyuzin V.V.**, Porshnev S.V., Bobkov V.V. // 2016

- IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). — IEEE. 2016. — С. 665—672; (0,44 п. л. / 0,11 п. л.) (Scopus, WoS)
12. Bobkov V. The application of ensemble learning for delineation of the left ventricle on echocardiographic records / Bobkov V., Bobkova A., Porshnev S., **Zuzin V.** // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). — IEEE. 2016. — No. 7818984; (0,25 п. л. / 0,07 п. л.) (Scopus, WoS)
13. Porshnev S.V. Study of the Mass Center Motion of the Left Ventricle Area in Echocardiographic Videos / Porshnev S.V., Mukhtarov A.A., Bobkova A.O., **Zyuzin V.V.**, Bobkov V.V. // CEUR Workshop Proceedings. T. 1452. — 2015. — С. 137—142; (0,31 п. л. / 0,07 п. л.) (Scopus)
14. Bobkova A.O. The analysis of results of the left ventricle contouring using automatic algorithm on ultrasound images for patients with pathologies / Bobkova A.O., Porshnev S.V., **Zuzin V.V.**, Bobkov V.V. // 2014 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. — IEEE. 2014. — С. 1073—1074; (0,12 п. л. / 0,04 п. л.) (Scopus, WoS)
15. Поршнеv С.В. Способ полуавтоматического оконтуривания левого желудочка сердца человека на эхокардиографических изображениях / Поршнеv С.В., Бобкова А.О., **Зюзин В.В.**, Бобков В.В. // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 8-1. — С. 44—48; (0,31 п. л. / 0,07 п. л.)
16. Bobkova A.O. Factor analysis of image features used for automatic analysis of echocardiography results / Bobkova A.O., Porshnev S.V., **Zuzin V.V.**, Bobkov V.V. // 2013 23rd International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. — IEEE. 2013. — С. 1071—1072; (0,12 п. л. / 0,04 п. л.) (Scopus)

Патенты и свидетельства о регистрации программы:

17. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программный экспертный медицинский диагностический комплекс «АвтоДиагност» / Голубятников Т.В., Бобкова А.О., Бобков В.В., **В.В. Зюзин**, Поршнеv С.В.; ООО "АйТи-Мед". — № 2016613583; дата регистрации 30.03.2016; опублик. 20.04.2016 (Российская Федерация).

Другие публикации:

18. **Зюзин В.В.** Анализ результатов оконтуривания левого желудочка сердца на эхографических изображениях у здоровых пациентов с помощью автоматического алгоритма / **Зюзин В.В.**, Поршнеv С.В., Бобкова А.О., Мухтаров А.А., Бобков В.В. // Машинное обучение и анализ данных. — 2015. — Т. 1, № 11. — С. 1529—1538; (0,52 п. л. / 0,15 п. л.)