

На правах рукописи

АНАНЬИН Михаил Александрович

**ФОРМИРОВАНИЕ НАБОРА ПРИЗНАКОВ
ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ
ОЦЕНИВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ
ХАРАКТЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность: 05.13.18 – *Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ*

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук*

Самара - 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» и Учреждении Российской академии наук Институте систем обработки изображений РАН.

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
Виктор Александрович Сойфер

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
Сергей Антонович Прохоров,
кандидат физико-математических наук,
доцент, Михаил Николаевич Осипов

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления сложными системами РАН

Защита состоится 17 декабря 2010 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.05, созданном при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан «16» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

В.А.Фурсов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Диссертация посвящена разработке методов и алгоритмов формирования набора признаков диагностических изображений на основе оценивания геометрических параметров формы характерных деталей для анализа диагностических изображений и созданию на этой основе программного обеспечения автоматизированных систем диагностики для биомедицинских приложений.

Диагностические изображения содержат достаточно полную, существенную информацию об исследуемом объекте, который может находиться в различных состояниях. Анализ диагностических изображений позволяет сделать выводы о фактическом состоянии объекта. Диагностические изображения широко используются в физике, биологии, медицине и технике. В диссертации рассматривается два класса медицинских диагностических изображений, получаемые при исследовании глаза человека оптическим методом: изображение глазного дна и изображение диска зрительного нерва. Объединяет эти два класса изображений наличие в обоих случаях характерных деталей изображений, имеющих смысл кровеносных сосудов. Во втором случае характерной деталью является также диск зрительного нерва, форма которого может быть различна. Именно они – характерные детали изображений – несут достоверную информацию о состоянии исследуемого объекта. Заметим, что на основании исследования кровеносных сосудов врач-диагност делает выводы не только о состоянии глаза, как органа зрения, но и диагностирует различные заболевания, в частности, диабета на ранней стадии.

Актуальность работы определяется наличием на мировом рынке медицинской техники большого спектра офтальмологического оборудования для получения высококачественных снимков глазного дна («Carl Zeiss Jena GmbH», «Topcon Imagenet», «Ophthalmic Imaging Systems»), однако прикладное программное обеспечение у большинства таких систем содержит лишь наиболее общеупотребительные средства для предобработки, повышения визуального качества, маркировки изображений. Одновременно бурно развиваются программно-технические комплексы полной компьютеризации клиник и практик, что должно привести к повышению спроса на программы мониторинга и экспертные системы, оперирующие цифровыми изображениями. На мировом рынке предлагается довольно большое разнообразие компьютерных систем медицинской диагностики, которые позволяют регистрировать диагностические изображения, но не имеют соответствующего программного обеспечения для автоматического анализа изображений, измерения диагностических признаков, постановки диагноза. Одной из таких систем диагностики глазных заболеваний является система Digital Fundus Imager II™ компании Ophthalmic Imaging Systems Inc. Радикальное повышение эффективности в оказании помощи пациентам может быть достигнуто за счет использования современных компьютерных технологий обработки, интерпретации и хранения диагностических данных.

Основой представленных в диссертации методов и алгоритмов анализа диагностических изображений является оценивание геометрических параметров их характерных деталей и использование этих параметров для распознавания и классификации. Традиционно задача распознавания и классификации изображений решается в два этапа. На первом этапе производится выбор и измерение классификационных признаков изображения. Второй этап заключается в построении системы распознавания (классификации) с использованием классической статистической теории. Задача второго этапа к настоящему времени глубоко исследована в работах по теории распознавания как российских так и зарубежных ученых (Ю.И. Журавлев, К. Фу, К. Фукунага, Р. Дуда, Р. Гонсалес и др.) и в настоящей работе не исследуется.

Что касается первого этапа (отбор и оценивание признаков), то к настоящему времени широкое распространение получили различного рода согласованные фильтры, корреляторы, спектро-анализаторы (В.В. Сергеев, В.А. Краковский, В.К. Баклицкий, В.Н. Круглов). Основным недостатком такого подхода является излишнее абстрагирование получаемых признаков (энергетический спектр, корреляционная функция) от физических параметров реальных диагностируемых объектов, что затрудняет интерпретацию полученных результатов для конечного пользователя. Кроме того, размерность пространства признаков при таком подходе очень высока.

Для преодоления первого из указанных недостатков в настоящей работе предлагается использовать *геометрические* параметры диагностических изображений. Эти параметры должны быть физически обоснованными, иметь ясный смысл для исследователя. Для врача-офтальмолога такими признаками являются неравномерность диаметра, кривизна и изви-тость кровеносных сосудов глазного дна, диска зрительного нерва. Принятый в диссертации подход к формированию признаков биомедицинских диагностических изображений на основе измерения геометрических параметров лежит в основе исследований, проводимых учёными школы В.А. Сойфера (А.Г. Храмов, Н.Ю. Ильясова, А.О. Корепанов, А.В. Куприянов и др.). Представленные в диссертации методы и алгоритмы анализа диагностических изображений являются развитием методов, разработанных данной исследовательской группой. Указанный подход к формированию признаков имеет ряд преимуществ. Во-первых, используется опыт исследователя в конкретной прикладной области для формирования диагностических признаков, что позволяет, в конечном счете, использовать экспертный подход к построению систем диагностики. Кроме того, имеется возможность использовать наработанные методики диагностики в конкретных прикладных задачах медицины. Так, представленные в диссертации исследования проводились совместно с сотрудниками кафедры офтальмологии Самарского государственного медицинского университета и кафедры глазных болезней Московского медико-стоматологического университета.

Цель и задачи исследований

Целью настоящей работы является разработка математических моделей двух классов медицинских диагностических изображений, содержащих характерные детали, численных методов и алгоритмов формирования набора признаков на основе оценивания геометрических параметров формы характерных деталей диагностических изображений и созданию на этой основе программного обеспечения автоматизированных систем диагностики для биомедицинских приложений. Для достижения указанной цели в диссертационной работе разрабатываются и исследуются:

1. Математические модели диагностических изображений, полученных при исследовании глаза оптическими методами.
2. Численные методы и алгоритмы оценивания геометрических параметров формы характерных деталей диагностических изображений: выделение трассы и оценивание геометрических параметров сосуда, локализация и аппроксимация области диска зрительного нерва.
3. Информационная технология формирования набора признаков диагностических изображений сосудистой системы глазного дна и диска зрительного нерва.
4. Программное обеспечение для компьютерных систем диагностики заболеваний глаза.

Методы исследований

В диссертационной работе используются методы математического анализа, теории цифровой обработки сигналов и изображений, методы параметрической аппроксимации, численные методы оптимизации, методы имитационного моделирования.

Научная новизна работы

1. В работе рассмотрены и исследованы две математические модели диагностических изображений, содержащие характерные детали двух различных видов: 1) изображение кровеносных сосудов глазного дна, 2) изображение диска зрительного нерва. Новизна параметрической модели изображений сосудов глазного дна состоит в том, что в неё введён новый параметр – кривизна. Новизна модели изображений диска зрительного нерва заключается в описании его внешнего контура эллипсом в отличие от ранее используемой окружности.

2. Задача выделения центральных линий сегмента сосуда глазного дна решена на основе нечеткого поля направлений. Ранее использовался непосредственный анализ функции яркости в окрестности изображения сосуда.

3. Метод формирования пространства признаков, основанный на оценивании кривизны центральных линий сосудов с использованием вейвлет разложения. Ранее параметр кривизны не использовался.

4. Метод оценивания прямолинейности и извитости трассы сосуда с использованием геометрического разделения кривых в отличие от ранее используемой гармонической аппроксимации.

На защиту выносятся

1. Математические модели двух видов диагностических изображений, полученных при исследовании глаза человека оптическим методом.

2. Численный метод и алгоритм выделения трассы сосуда на основе нечёткого поля направлений с использованием алгоритма Дейкстры.

3. Метод оценивания кривизны центральных линий сосудов с использованием вейвлет разложения.

4. Способ оценивания прямолинейности и извитости трассы сосуда с использованием геометрического разделения кривых.

5. Информационная технология локализации и оценивания геометрических параметров диска зрительного нерва.

Практическая ценность работы

Практическая значимость работы заключается в создании численных методов и алгоритмов оценивания геометрических параметров характерных деталей диагностических изображений и разработке информационной технологии анализа диагностических изображений глазного дна и диска зрительного нерва. Разработанные алгоритмы оценивания геометрических характеристик являются достаточно универсальными и могут быть использованы для широкого класса практических задач распознавания и классификации цифровых изображений.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены в рамках ряда госбюджетных НИР в Институте систем обработки изображений РАН, в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева. Разработанные методы и алгоритмы оценивания геометрических параметров легли в основу компьютерной системы ранней диагностики глазных заболеваний на основе анализа изображений глазного дна DIADEL. Используется на кафедре офтальмологии Самарского государственного медицинского университета и кафедре глазных болезней Московского Государственного Медико-стоматологического Университета для научных исследований. Главными заказчиками разрабатываемой автоматизированной системы являются: Самарская областная клиническая больница им. Т.И. Ерошевского, лазерный центр; дорожная клиническая больница ст. Самара, глазное отделение; Московский Государственный Медико-стоматологический Универ-

ситет, кафедра глазных болезней, ООО «Офтальмодел», г. Москва; ООО «Митэкс», г. Самара.

Учреждения Минздрава, с которыми проводятся в данный момент исследования и где внедряется разработка:

1. ГУ МНТК «Микрохирургия глаза» им С.Н. Фёдорова, г. Москва.
2. Московский Медико-стоматологический Университет, кафедра глазных болезней.

Апробация работы

Апробация работы проводилась на следующих региональных, Международных и Всероссийских научных конференциях:

1. 7th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: new information technologies, PRIA-7-2004.
2. 7th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI 2004-Conference), Rennes - Saint-Malo, France, 2004.
3. 15th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2007, Poznan, Poland.
4. Конференция Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине», Москва, 2007.
5. «8th International Conference on PATTERN RECOGNITION and IMAGE ANALYSIS: NEW INFORMATION TECHNOLOGIES» (PRIA-8-2007).
6. XVI международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геологии – 2008», Новороссийск 2008.
7. Международная конференция «Информационные технологии и математическое моделирование систем», Москва, 2008.
8. Конференция Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине», 2008 г.
9. Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «X Королевские чтения», 2009.

Программные продукты, при создании которых использовались результаты диссертационной работы, были представлены на выставках:

1. Международная ярмарка технологических инноваций «BRASILTEC-2004», с 17 по 20 ноября 2004 года (г. Сан-Паулу, Бразилия). Компьютерная система ранней диагностики глазных заболеваний на основе анализа изображений глазного дна.
2. Выставка «Российская академия наук – медицине и здоровью человека» Российской академии наук и комитетов Государственной Думы Российской Федерации, Москва, 27 марта – 1 апреля 2005 год, Компьютерная система ранней диагностики глазных заболеваний на основе анализа изображений глазного дна.
3. Экспертная система ранней диагностики глазных заболеваний была представлена на 4-ой ярмарке бизнес-ангелов и инноваторов «Российским инновациям – Российский капитал», г. Саранск, 25-27 апреля 2006 год, где проект: «Компьютерная система ранней диагностики глазных заболеваний на основе анализа изображений глазного дна» занял 3 место по разделу «IT-технологии».
4. Российская Национальная Выставка 8-13 ноября 2006 г., г. Пекин, Китайская Народная Республика, Китайский центр международной торговли, ул. Цзяньгомэньвай Дацзе, д.1

Личный вклад автора

Решение всех задач, сформулированных в диссертации, получение и интерпретация результатов компьютерного моделирования выполнены автором лично. Постановка задач и разработка методик моделирования выполнены совместно с научным руководителем. В работах в соавторстве диссертанту принадлежит идея и численные методы оценивания геометрических параметров характерных деталей диагностических изображений.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 28 работ в международных и центральных научных

изданиях и трудах конференций, в том числе 5 в изданиях, рекомендованных ВАК, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ.

Исследования по теме диссертационной работы были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-07-08006-оф, 07-08-96611-р_поволжье_a), Американского фонда гражданских исследований и развития (проект CRDF SA-014-02) в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE), а также в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки - медицине» 2004–2010 гг.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 136 наименований и приложения к диссертации, изложенных на 133 страницах. Диссертация содержит 62 рисунка и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, дан краткий обзор научных работ по рассматриваемым вопросам, показана научная новизна полученных результатов и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена математическая модель диагностического изображения, содержащего характерные детали диагностического изображения, его структура и геометрические характеристики, вводятся понятия сегмента и центральной линии сосуда.

Сегмент сосуда является одной из основных деталей, составляющих диагностическое изображение глазного дна. При наличии патологии форма кровеносных сосудов глазного дна относительно нормы значительно отличается. При отсутствии заболеваний кровеносные сосуды глазного дна человека представляют собой протяженные древовидные объекты со слабо искривленными сегментами. При возникновении ряда заболеваний в сетчатке происходят патологические изменения структуры кровеносных сосудов, в частности, приводящие к их извитости. Искривление сосуда может быть как локальным, то есть встречаться в небольшой области сосуда, так и глобальным, то есть покрывать все сосудистое дерево глазного дна. При помощи измерений геометрических характеристик кровеносных сосудов может быть получена информация о степени тяжести заболевания, а также о прогрессировании патологических процессов со временем, как например это было показано в работах William Hart и Enrico Grisan. Этот фактор является важным для ранней неинвазивной диагностики заболеваний, в том числе и не офтальмологического характера. В работах Н.Ю. Ильясовой, А.Г. Храмова предложено использовать следующие параметры сегмента сосуда: средний диаметр, прямолинейность, чёткообразность, амплитуда колебаний толщины, частота колебаний толщины, частота колебаний трассы, амплитуда колебаний трассы, извитость ветви, извилистость трассы. Отметим, что наибольшую информацию для эксперта несут: степень извитости и степень прямолинейности средней линии сосуда. Параметр прямолинейности характеризует степень отклонения функции средней линии сосуда от прямолинейного хода. Извитость характеризует скорость изменения функции средней линии сосуда. К недостаткам методов оценивания данных параметров в работах Н.Ю. Ильясовой, А.Г. Храмова можно отнести значительное влияние выбора начала и конца сегмента сосуда на значение признака, а также отсутствие учёта дугообразного тренда средней линии сосудов глазного дна.

В диссертации предложена более полная математическая модель сосудов глазного дна, расширенная параметром кривизны. Также в диссертации предложена модификация параметров извитости и прямолинейности на основе анализа характерных деталей самого сегмента сосуда.

После ввода диагностическое изображение глазного дна подвергается обработке с целью

получения центральных линий сосудов, например с использованием метода трассировки. Полученное дискретное представление центральной линии сосуда является исходными данными для разработанных методов и алгоритмов.

Исходную непрерывную центральную линию сосуда определим в параметрическом виде: $\vec{y}(t) \in R^2, t \in [t_1, t_2]$. Будем считать, что $\vec{y}(t)$ представляет собой регулярную кривую с натуральной параметризацией. Входные данные - последовательность точек, являющаяся представлением средней линии сосуда после дискретизации: $\{\vec{x}_i\}_{i=1}^N$, где $\vec{x}_i \in R^2$ - координаты точек средней линии после дискретизации, N - количество точек после дискретизации. Следует рассматривать два случая дискретизации исходной кривой: случай дискретизации кривой по параметру и случай дискретизации кривой на прямоугольной сетке (рис. 1).

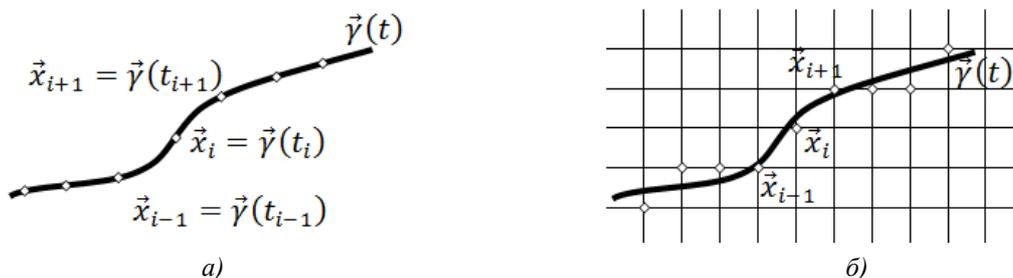


Рисунок 1 – Дискретизация кривой: а) по параметру, б) на прямоугольной сетке

Изображение диска зрительного нерва характеризуется наличием области более яркой по сравнению с фоном. Данная область соответствует одной из характерных деталей данного класса изображений – диску зрительного нерва. Характерными деталями данного класса изображений являются также сосуды диска зрительного нерва, пересекающие его край, представляющие собой протяжённые объекты с яркостью, меньшей яркости фона.

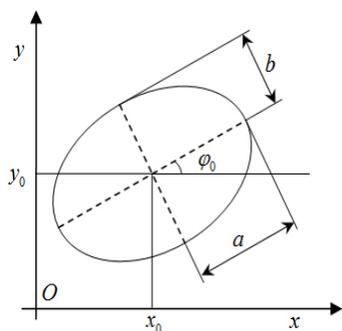


Рисунок 2 – Параметры формы области диска зрительного нерва

В работе Л.Ф. Линник и Е.Э. Иойлевой предлагалось аппроксимировать область диска зрительного нерва окружностью, в диссертации предлагается использовать для этого эллипс с произвольным углом наклона к осям координат (рис.2), это позволяет более точно описать область диска зрительного нерва у пациентов, страдающих глаукомой или другими болезнями, влияющими на форму диска зрительного нерва. Таким образом, параметрами формы области диска зрительного нерва являются x_0, y_0 – координаты центра эллипса, a, b – размеры полуосей и φ_0 – угол наклона эллипса к оси Ox .

Параметрами формы пересекающих край диска зрительного нерва сосудов являются их диаметры, а отношение суммарного диаметра сосудов к длине его контура является диагностическим признаком. В ранее разработанных способах оценивания диаметров сосудов, пересекающих край диска зрительного нерва, предполагалось в качестве оценки диаметров использовать размер области пересечения сосуда с краем диска зрительного нерва, в диссертации предлагается учитывать угол между нормалью к аппроксимирующей область диска зрительного нерва эллипсу и направлением сосуда для корректировки оценки диаметра.

Во второй главе рассмотрены методы и алгоритмы оценивания геометрических параметров формы сегментов сосудов на изображениях глазного дна.

В диссертации предложено два метода оценивания извитости сегмента сосуда. В первом используется оценивание извитости по центральным линиям кровеносных сосудов, предварительно обработанным с использованием сглаживающих фильтров с различной полосой пропускания, что при вычислении дифференциальных характеристик приводит к использо-

ванию вейвлет преобразования. Второй основан на анализе характерных деталей самого сегмента сосуда.

В диссертации предложен метод решения задачи выделения центральных линий кровеносных сосудов на диагностических изображениях, основанный на использовании глобальной оптимизации. Метод использует модифицированный алгоритм Дейкстры поиска кратчайшего пути от одной из вершин взвешенного ориентированного графа без петель и дуг отрицательного веса до всех остальных вершин этого графа, с весами дуг, определяемыми по нечёткому полю направлений исходного изображения.

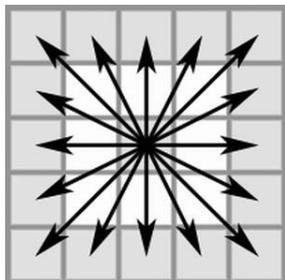


Рисунок 3 – Смежные вершины графа

Пусть исходное дискретное изображение определено в области $R = \{(n, m) : m = \overline{0, M-1} \vee n = \overline{0, N-1}\}$. Рассмотрим обыкновенный взвешенный граф $G = (V, S)$ где $V = \{v_{m,n} : (m, n) \in R\}$ – множество вершин дерева, $S = \{s(v_{m,n}, v_{k,l})\}$ – множество ребер дерева, которые определяются следующим образом. Каждой точке (m, n) из области определения изображения R поставим в соответствие единственную вершину графа $v_{m,n}$. Порядок каждой вершины графа равен 16, при этом для вершины $v_{m,n}$ смежными будут вершины $v_{k,l}$ такие что, $|k - m| = 2 \vee |l - n| = 2$.

Весы ребер графа $w(v_{m,n}, v_{k,l})$ определяются по нечеткому полю направлений, построенному по исходному изображению. При этом вершины $v_{m,n}$ и $v_{k,l}$, инцидентные рассматриваемому ребру $s(v_{m,n}, v_{k,l})$, определяют на плоскости отрезок (направление), характеристическая функция принадлежности которого нечетким множествам направлений в точках (m, n) , (k, l) и определяет вес данного ребра. Весы ребер, инцидентных вершинам, лежащим за пределами области определения изображения, будем считать равными $+\infty$, для того, чтобы сохранить единообразие в описании вершин и исключить возможность построения оптимального пути движения по графу, лежащему вне области определения изображения.

Направление характеризуется парой чисел: углом φ , задающим ориентацию, и весом ρ (выраженность направления) и представимо в виде комплексного числа вида $\psi = \rho e^{-2i\varphi}$. Логическим продолжением идеи поля направлений является построение нечеткого поля направлений, где «нечеткость» возникает вследствие зависимости результата анализа от диапазона анализируемых локальных пространственных частот, что в спектральной области соответствует анализу различных частотных интервалов в пределах некоторого сектора частот. Нечетким направлением называется величина $\psi(\varphi) = \rho(\varphi) e^{-2i\varphi}$, где функция ρ является π -периодичной. Таким образом, нечеткое поле направлений есть некоторая область $\mathbf{D} \subset \mathbf{R}^2$ плоскости, в каждой точке которой определено нечеткое направление $\psi(x, y, \varphi) = \rho(x, y, \varphi) e^{-2i\varphi}$, $(x, y) \in \mathbf{D}$. Понятие нечеткого поля направлений впервые введено в работах Соифера В.А., Храмова А.Г., Корепанова А.О.

В работе использован метод построения нечеткого поля направлений, основанный на вейвлет разложении исходного изображения с неизотопным вейвлетом. В качестве последнего выбран вейвлет Коши, который относится к классу направленных вейвлетов и обладает наилучшей угловой и пространственно-частотной избирательностью в рассматриваемом классе функций. В результате работы метода в каждой точке (m, n) области определения изображения R будет сформировано нечеткое множество направле-

ний $\psi(m, n, \varphi_k) = \rho(m, n, \varphi_k) e^{-2i\varphi_k}$, $k = \overline{1, 8}$. Для исключения влияния выраженности (четкости) сосуда на результат формирования оптимального пути движения по графу нормируем характеристическую функцию нечеткого поля направлений в каждой точке по следующему правилу:

$$\rho_n(m, n, \varphi) = \frac{\rho(m, n, \varphi) - \min_{\varphi} \rho(m, n, \varphi)}{\max_{\varphi} \rho(m, n, \varphi) - \min_{\varphi} \rho(m, n, \varphi)}.$$

Такая нормировка выражает тот факт, что важным является только наличие структурной похожести анализируемого объекта на сосуд, который характеризуется наличием ярко выраженных хорошо согласованных направлений (вдоль центральной линии сосуда) независимо от его четкости. То есть нам важны не сами веса направлений в отдельно взятой точке, а связь направлений в соседних точках и возможность обнаружения протяженной структуры.

Для ребра, инцидентного вершинам $v_{m,n}$ и $v_{k,l}$ определим вес следующим выражением:

$$w(v_{m,n}, v_{k,l}) = \left(1 - \max(\rho_n(m, n, \varphi_{m,n,l,k}), \rho_n(k, l, \varphi_{m,n,l,k}))\right) \sqrt{(m-k)^2 + (n-l)^2},$$

где $\varphi_{m,n,l,k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{n-l}{m-k}\right)$ при $m \neq k$ и $\varphi_{m,n,l,k} = \frac{\pi}{2}$ при $m = k$. Отметим, что вес ребра тем меньше, чем больше выраженность направления между соответствующими точками исходного изображения, а также вес ребра увеличивается линейно с увеличением расстояния между точками соответствующими вершинам данного ребра.

Для описания степени извитости кривой используется оценка кривизны, которая представляет собой дифференциальную характеристику кривой, отражающую степень изогнутости кривой в локальной окрестности каждой точки. Кривизна гладкой регулярной параметрической кривой в непрерывном случае определяется формулой:

$$k(t) = \frac{x'(t)y''(t) - x''(t)y'(t)}{(x'(t)^2 + y'(t)^2)^{\frac{3}{2}}}, t \in [0, L].$$

Величина кривизны в каждой точке определяется локальной изогнутостью кривой в малой окрестности данной точки, и некоторая ее интегральная величина отражает извитость сосуда. Для выявления геометрической информации о центральной линии сегмента кровеносного сосуда глазного дна, соответствующей различным частотным диапазонам колебания центральной линии, используется низкочастотная фильтрация для различных значений ширины полосы пропускания. Для того чтобы нивелировать или ограничить действия шумов, проявляющихся вследствие целочисленности трассировки или сдвига опорной точки, на значение кривизны проводим сглаживание кривой после равномерной дискретизации. В качестве фильтра при сглаживании воспользуемся функцией Гаусса с параметром s : $g_s(t) = (2\pi s^2)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{t^2}{2s^2}}$. Сглаживание кривой проводится с помощью свертки с функцией Гаусса: $u_s(t) = x(t) * g_s(t)$ и $v_s(t) = y(t) * g_s(t)$. После сглаживания получается новая непрерывная кривая, имеющая вид: $r_s(t) = (u_s(t), v_s(t))$. Для фиксированного значения масштаба s для сглаженной кривой производится расчет значений кривизны. При этом первые и вторые производные кривой сглаженной гауссовым фильтром, прямо пропорциональны коэффициентам вейвлет преобразований WAVE-вейвлета и МНАТ-вейвлета соответственно.

Аналогичные выражения получены для дискретного представления центральной линии сосуда, при этом оценку значения кривизны для n -ого отсчёта для масштаба s обозначим $k_s(n)$. Рассчитанные значения кривизны нормируются по следующей формуле: $\tilde{k}_s(n) = s \cdot k_s(n)$. Такое преобразование сделает пространство кривизны более удобным для анализа. $\tilde{k}_s(n)$ используется в смысле первичного пространство признаков локальной многомасштабной кривизны трассы сосуда. Вторичное пространство признаков – набор интегральных характеристик первичного пространства признаков:

$$K_s = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N [\tilde{k}_s(i)]^2}{\sum_{i=1}^N \tilde{k}_s(i)}$$

Вектор признаков $\vec{K} = (K_1, K_2, \dots, K_s)$ сформирован, чтобы усилить влияние максимальных (пиковых) значений на результирующее значение интегральной характеристики кривизны. В результате он характеризует не только глобальное искривление кровеносного сосуда, но также отражает все локальные всплески.

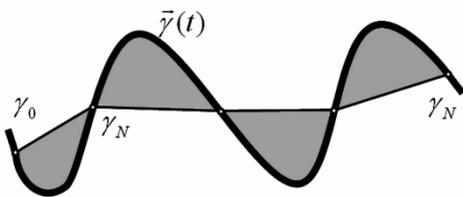


Рисунок 4 – Пример кривой, разделённой на лепестки

$H = \{H_n\}_{k=1}^{N-1}$ и $E = \{E_n\}_{k=1}^{N-1}$ – соответственно номеров начальных и конечных точек лепестков в последовательности.

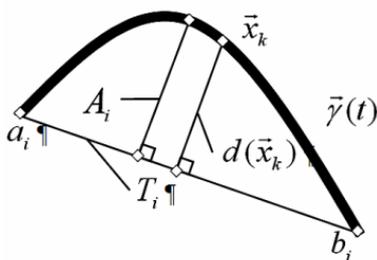


Рисунок 5 – Пример лепестка центральной линии

В диссертации предложен подход оценивания признаков прямолинейности и извитости, основанный на анализе характерных деталей сегмента сосуда. Лепестки – это области ограниченные кривой $\vec{\gamma}(t)$, заданной на отрезке $t \in [a, b]$, между двумя соседними точками разбиения и отрезком, соединяющим эти две точки (рис. 4).

Для дискретного представления центральной линии сосуда использованы последовательности

Первой точкой i -ого лепестка будем называть точку $a_i = \bar{x}_{H_i}$, последней точкой – $b_i = \bar{x}_{E_i}$. Отрезок $\overline{a_i b_i}$ будем называть основанием i -ого лепестка, а его длину $T_i = |\overline{a_i b_i}|$ полупериодом лепестка (рис.5).

Максимальное значение расстояний от точек лепестка до его основания назовём амплитудой лепестка A_i . В работе также оценивались величины L_i – длина дуги лепестка и S_i – площадь лепестка, имеющие очевидный смысл.

Для вычисления геометрических параметров лепестков использовалась линейная интерполяция отсчётов кривой, что позволило существенно упростить расчёты при сохранении приемлемой точности. В работе дополнительно использовались величины:

$\tilde{T}_i = \frac{\pi S_i}{2A_i}$; $\tilde{A}_i = \frac{\pi S_i}{2T_i}$, соответственно, значение полупериода лепестка синуса, амплитуда которого A_i , а площадь – S_i , и значение амплитуды лепестка синуса, полупериод которого T_i а площадь – S_i .

На основе геометрических параметров лепестков были разработаны новые признаки Pr_1 , Pr_2 , I_{11} , I_{12} , I_{21} и I_{22} , первые два из которых характеризуют прямолинейность, а остальные характеризуют извитость. Эти признаки могут быть вычислены по следующим формулам:

$Pr_n = \frac{\bar{L}_v}{\bar{T}_n}; I_{mn} = \frac{\pi \bar{A}_m}{\bar{T}_n}$, где $m, n \in \{1, 2\}$, \bar{L}_v – средняя длина дуги лепестков; \bar{T}_1 и \bar{T}_2 – средние полупериодов T_i и \tilde{T}_i соответственно; а \bar{A}_1 и \bar{A}_2 – средние амплитуды A_i и \tilde{A}_i соответственно.



Рисунок 6 – Структура системы анализа области сосудов на уровне края диска зрительного нерва

В третьей главе рассматривается метод анализа диагностических изображений диска зрительного нерва. Описаны методы и алгоритмы выделения области ДЗН, методы и алгоритмы обнаружения и оценивания диаметра сосудов на уровне края диска зрительного нерва, а также метод оценивания диагностических параметров. Представлен метод оценивания толщины сосудов, основанный на анализе локальных минимумов полутонового профиля обрабатываемого изображения. Метод используется в компьютерной системе измерения геометрических параметров биомедицинских изображений.

Задача анализа ДЗН состоит из следующих этапов обработки изображения глазного дна: выделение области ДЗН, построение профиля вдоль края области ДЗН, обнаружение сосудов на уровне края ДЗН, оценка их локальных признаков (направление и диаметр), вычисление диагностических параметров. Этап предобработки необходим для получения бинарного изображения области ДЗН и получения параметров аппроксимирующего край ДЗН контура.

Используя данные исходного полноцветного изображения и полученные параметры контура ДЗН, можно построить профиль вдоль его края и осуществить последующую его обработку сглаживающим фильтром. Алгоритм получения бинарного изображения можно разбить на три этапа: яркостной срез функции яркости для получения бинарного препарата, ранговая фильтрация бинарного изображения, удаление крупных шумовых фрагментов. Для получения параметров края ДЗН был использован алгоритм, основанный на приближении края диска эллипсом минимальной площади, который охватывает область ДЗН. Пятимерная область, определяющая множество возможных значений параметров a, b, x_0, y_0, φ , разбивается прямоугольной сеткой. В узлах сетки рассчитывается значение площади и проверяется условие охвата. Основными этапами алгоритма являются: 1) перебор значения x_0, y_0, φ ; 2) нахождение для заданной тройки (x_0, y_0, φ) значений полуосей a и b эллипса минимальной площади, охватывающего ДЗН. Результат выделения области ДЗН и получения параметров описывающего её эллипса представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Выделения области ДЗН: исходное изображение; вид после яркостного среза; контур области ДЗН и его аппроксимация эллипсом

Обнаружение сосудов проводилось на основе анализа полутонового профиля, представляющего собой развертку функции яркости вдоль найденного контура области ДЗН. Одной из задач предварительной обработки профиля цветного изображения является приведение его к полутоновому виду, преобразуя R-, G-, B-составляющие пикселей исходного изображения в соответствующие им значения яркости. В ходе экспериментальных исследований

было установлено, что большую часть информации о фоне и сосудах несут красная и зеленая составляющие, а достаточным для анализа является использование L компоненты цветовой модели Lab . Поэтому в качестве результирующего значения яркости текущей точки профиля использовалось преобразование исходного профиля в профиль интенсивности L цветового пространства Lab . Для подавления шума используется усредняющий фильтр. Метод обнаружения сосудов на краю ДЗН основан на анализе локальных минимумов функции яркости полученного профиля. При этом использовался метод скользящей локальной аппроксимации многочленом второго порядка. Поиск минимумов, соответствующих центрам сосудов, осуществляется аналитическим способом с последующим отсеиванием ложных минимумов. Границы сосуда в алгоритме оценивания толщины определяют точки перегиба профиля, ближайšie к его центру. Усреднённое значение относительных смещений центров сосудов на соседних N эллипсах (подобных исходному с коэффициентами, близкими к 1) позволяет определить направление сосуда. Усреднение проводится в окрестности центра сосуда на основном профиле. Оценка толщины сосуда корректируется умножением на косинус угла между найденным направлением сосуда и нормалью к контуру ДЗН.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований формирования набора признаков диагностических изображений в условиях случайных возмущений на имитационных моделях и изображениях сосудистой системы глазного дна и диска зрительного нерва для анализа работоспособности предложенных методов и алгоритмов.

В диссертации были проведены исследования разработанных методов и алгоритмов на синтезированных центральных линиях сосудов. Анализировалось влияние параметров моделей на ошибку оценивания морфологических параметров. Для проведения экспериментальных исследований требовалось создание тестовых центральных линий сосудов, которые отличаются по морфологическим параметрам и для которых возможно оценить значения разработанных признаков при известных параметрах модели. В работе использовались модели центральных линий сосудов, состоящих из последовательностей лепестков определённого вида (формы). В зависимости от вида входящих в состав центральной линии лепестков были выделены модели: «синус» и «эллипс». Каждый из этих видов лепестков можно задать двумя параметрами, один из которых будем называть амплитудой, и обозначать A , второй – полупериодом и обозначать T .

В работе проведён ряд экспериментов для определения величины ошибок оценивания морфологических характеристик по дискретным аналогам кривых. Теоретические значения геометрических характеристик синтезируемых кривых могут быть вычислены по известным параметрам амплитуды A и полупериода T .

В работе проведены исследования по определению средней относительной ошибки оценивания геометрических характеристик кривых в зависимости от параметров синтезированных кривых. Для каждой из моделей лепестков синтезировались кривые, состоящие из пяти лепестков, с амплитудами от одного до 24 с шагом один и с полупериодами от четырёх до 124 с шагом шесть. Синтез кривых производился с дискретизацией по параметру, с равным единице шагом по хорде. Таким образом было получено 992 тестовых кривых. Для каждой из них было известно теоретическое значение геометрических параметров и оценены соответствующие параметры с использованием разработанных алгоритмов. Затем определялась средняя относительная ошибка ε_{cp} оценивания морфологических характеристик. На рисунке 8 представлены соответственно графики зависимостей средней относительной ошибки оценивания площади $\varepsilon_{cp}(S)$ от величины амплитуды моделированных кривых и амплитуды $\varepsilon_{cp}(A)$ – от величины полупериода.

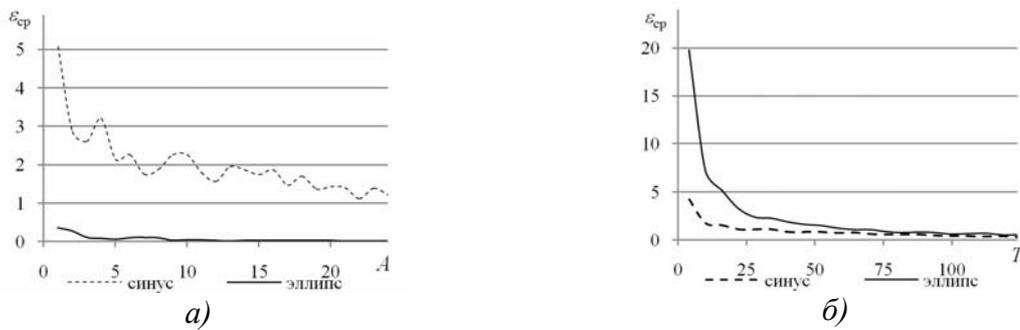


Рисунок 8 – Зависимость а) $\varepsilon_{cp}(S)$ от амплитуды б) $\varepsilon_{cp}(A)$ от полупериода.

Из результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод, что значение ошибки оценивания параметров разработанными методами уменьшается с увеличением полупериода моделированных кривых, последнее эквивалентно уменьшению шага дискретизации. Результаты исследований показали, что отклонение оценённых значений от теоретических связано с ошибкой дискретизации кривых и не вносит значительного влияния на вычисление морфологических характеристик выбранным методом.

В главе описаны разработанные программные комплексы, проведённые экспериментальные исследования и их результаты. Исследования показали, что разработанные пространства признаков позволяют эффективно классифицировать сегменты сосудов по классам «норма» и «патология», а также что представленные методы построения пространства признаков сегментов сосудов инвариантны к сдвигу начальной и конечной опорных точек, устойчивы к изменению масштаба и углу поворота кривой и могут быть эффективно использованы как при эквидистантной дискретизации кривой, так и при дискретизации кривой на прямоугольной сетке.

Заключение

В диссертационной работе разработаны математические модели диагностических изображений глазного дна, содержащих характерные детали: изображение кровеносных сосудов и изображение диска зрительного нерва, а также методы, алгоритмы и информационные технологии формирования набора признаков диагностических изображений, и на их основе создано программное обеспечение автоматизированных систем диагностики. Получены следующие основные результаты:

1. Разработаны математические модели изображений кровеносных сосудов глазного дна и изображений диска зрительного нерва, полученных оптическим способом, описывающие объекты более полно, чем введенные ранее модели, и создающие предпосылки для более достоверной диагностики.

2. Задача выделения трассы центральных линий сегмента сосуда глазного дна решена на основе анализа нечеткого поля направлений. При наличии оценки нечеткого поля направлений задача выделения трассы центральных линий по заданным опорным точкам сводится к задаче нахождения минимального расстояния между двумя вершинами графа, которая была эффективно решена с использованием алгоритма Дейкстры.

3. Определение степени извитости сосуда осуществлено на основе оценивания многомасштабных значений кривизны сглаженного дискретного представления сосуда. Сглаживание, нахождение оценок первой и второй производных дискретного представления центральной линии сегмента сосуда было сведено к нахождению вейвлет образов дискретной кривой. Сформированный, как интегральная характеристика многомасштабных значений кривизны, вектор признаков отражает не только глобальное искривление кровеносного сосуда, но также отражает локальные всплески значений кривизны.

4. Задача оценивания признаков «прямолинейность» и «извитость» решена с использо-

ванием разбиения центральной линии сосуда на лепестки и оцениванием их геометрических характеристик. При этом полученное пространство признаков сегментов сосудов инвариантно к сдвигу начальной и конечной опорных точек, устойчиво к изменению масштаба и углу поворота кривой и может быть эффективно использовано как при эквидистантной дискретизации кривой, так и при дискретизации кривой на прямоугольной сетки.

5. Исследования показали, что разработанное пространство признаков позволяет эффективно классифицировать сегменты сосудов по классам «норма» и «патология», при этом достоверность классификации на контрольной выборке составила не ниже 95%.

6. Разработан способ оценивания диагностических параметров сосудистой системы диска зрительного нерва, основанный на анализе геометрических характеристик его капилляров. Построена информационная технология локализации и аппроксимации области диска зрительного нерва.

7. Создано программное обеспечение компьютерной системы диагностики глазных заболеваний по изображениям кровеносных сосудов глазного дна и диска зрительного нерва.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Ананьин, М.А.** Метод оценивания морфологических параметров сосудов на изображениях глазного дна на основе матриц видимости кривых / М.А.Ананьин, Н.Ю. Ильясова // Вестник СГАУ. – 2008. – С. 258-261.
2. **Ананьин, М.А.** Измерение биомеханических характеристик сосудов для ранней диагностики сосудистой патологии глазного дна / М.А. Ананьин, Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, Н.А. Гаврилова // Сборник научных трудов. Компьютерная оптика. – Выпуск №27. – 2005. – С. 165-170.
3. **Ананьин, М.А.** Оценивание диагностических параметров сосудов на изображениях глазного дна в области диска зрительного нерва / Куприянов А.В., Ильясова Н.Ю., Ананьин М.А., // Институт систем обработки изображений РАН // Компьютерная оптика.– №29. – 2006. – С. 141–146.
4. **Ананьин, М.А.** Формирование признакового пространства на основе оценивания кривизны центральных линий сосудов в задаче анализа патологических изменений структуры сосудистой системы глазного дна / М.А. Ананьин, А.О. Корепанов // сб. Компьютерная оптика. – том 31, N1. – 2007. – с. 52-57.
5. **Сойфер, В.А.** Методы компьютерного анализа диагностических изображений глазного дна / В.А. Сойфер, Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, А.Г. Храмов, М.А.Ананьин // «Технологии живых систем», издательство «Радиотехника»: научно-техническая литература, спец.выпуск. – том 5, № 5-6. – 2008. – С.61-71.

Свидетельства о государственной регистрации программного обеспечения:

6. Компьютерная система ранней диагностики глазных заболеваний на основе анализа изображений глазного дна, 2006 г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006610764, Ананьин М.А. , Куприянов А.В., Малафеев А.М.
7. Модуль расчета диагностических признаков диска зрительного нерва на изображениях глазного дна, 2009 г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009610166 // Правообладатель: ИСОИ РАН; Авторы: Ананьин М.А., Ильясова Н.Ю., Куприянов А.В.

Публикации в прочих изданиях:

8. **Ананьин, М.А.** Метод оценки направлений сосудов диска зрительного нерва на биомедицинских изображениях глазного дна / М.А. Ананьин, Н.Ю. Ильясова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, СГАУ, Самара. – 2004. – С.45-47.
9. **Ilyasova, N.Yu.** Estimation of Geometrical Diagnostic Features on the Optical Disk Images, Proceedings of 7th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: new information technologies / N.Yu. Ilyasova, A.V. Kupriyanov, A.V. Ustinov, M.A. Ananin, N.A. Gavrilova // PRIA-7-2004, 18-23 October. – vol.III. – 2004. – P. 695-699.
10. **Ananin, M.A.** The Optical Disk's Vessels Direction Estimation on the Fundus Images / M.A. Ananin, N.Yu. Ilyasova // Proceedings of 7th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: new information technologies, PRIA-7-2004, 18-23 October. – vol.III, – 2004. – P. 607-610.

11. **Ananin, M.A.** The Development of Computer Method for Studying The Retinal Image, Pathologies / M.A. Ananin, N.Yu. Ilyasova, I.N. Adamenko, V.V. Yatulchik, N.N. Gavrilova // Proceedings of 7th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: new information technologies, PRIA-7-2004, 18-23 October. – vol.III. – 2004. – P. 692-695.
12. **Ananin, M.A.** Measuring Biomechanical Characteristics of Blood Vessels for Early Diagnostics of Vascular Retinal Pathologies / M.A. Ananin, N.Yu. Ilyasova, N.A. Gavrilova, A.V. Kupriyanov // 7th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI 2004-Conference), Rennes - Saint-Malo, France, September 26-30. – Part II. – 2004. – P 251-258.
13. **Ilyasova, N. Yu.** The development of a computer method for studying retinal image pathologies / N. Yu. Ilyasova, I. N. Adamenko, M. A. Ananyin, V. V. Jatulchik, and N. A. Gavrilova // Pattern Recognition and Image Analysis, MAIK "Nauka/Interperiodica". – Vol. 15, No. 3. – 2005. – pp. 599–601.
14. **Ananin, M.A.** Estimation of geometrical diagnostic features the optical disk images Recognition and Image Analysis / M. A. Ananin, N. Yu. Ilyasova, A. V. Kupriyanov, A. V. Ustinov, and N. A. Gavrilova // MAIK "Nauka/Interperiodica". – Vol. 15, No. 3. – 2005. – P. 602–605.
15. **Anan'in, M.A.** Method for estimation of directions of the optical disk's vessels in the fundus images / M.A. Anan'in and N.Yu. Il'yasova // Pattern Recognition and Image Analysis. – Vol. 15, No. 2. – 2005. – P. 500–502.
16. **Kupriyanov, A.V.** Geometrical Parameters Estimation of the Retina Images for Blood Vessels Pathology Diagnostics / A.V. Kupriyanov, N.Yu. Ilyasova, M. A. Ananin // Proceedings of 15th European Signal Processing Conference September 3-7 2007, EUSIPCO 2007, Poznan, Poland. 1251-1254.
17. **Anan'in, M.A.** Estimating Directions of Optic Disk Blood Vessels in Retinal Images / M. A. Anan'in, N. Yu. Il'yasova, and A. V. Kupriyanov // Pattern Recognition and Image Analysis, MAIK "Nauka/Interperiodica". – Vol. 17, No. 4. – 2007. – P. 523-526.
18. **Сойфер, В.А.** Математические методы классификации изображений для экспертной оценки патологии сосудистой системы глаза / В.А. Сойфер, Н.Ю. Ильясова, А.Г. Храмов, А.В. Куприянов, М.А. Ананьин, А.М. Малафеев // Труды конференции Президиума РАН "Фундаментальные науки - медицине" (3-4 декабря 2007, Москва). – С. 90-91.
19. **Ильясова, Н.Ю.** Математические модели и методы оценивания диагностических параметров древовидных структур: учеб. пособие / Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, М.А. Ананьин – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, ISBN 978-5-7883-0621-6. – 2007. – 104 с.
20. **Ильясова, Н.Ю.** Методы обработки и анализа изображений диагностических кристаллограмм: учебное пособие / Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, М.А.Ананьин // Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2007. – 156 с.
21. **Malapheev, A.** The analysis of the retina vessels images based on the self-organized Kohonen's map / A. Malapheev, M. Ananin, A. Kupriyanov, N. Ilyasova // Proceedings of "8th International Conference on PATTERN RECOGNITION and IMAGE ANALYSIS: NEW INFORMATION TECHNOLOGIES" (PRIA-8-2007). — 2007. — P. 331-334.
22. **Ананьин, М.А.** Разработка и исследование методов оценивания геометрических параметров сосудов глазного дна / М.А. Ананьин, А.М. Малафеев // Труды Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «IX Королевские чтения». – 2007. – С. 275.
23. **Ananin, M.** Eye-ground vessels morphological parameters estimating method based on curves partitioning / M. Ananin, N. Ilyasova // Proceedings of the 9th International conference on pattern recognition and image analysis: new information technologies (PRIA-9-2008). – Nizhni Novgorod 2008. – Vol. 1. pp. – P.7-10.
24. **Сойфер, В.А.** Оценивание патологических изменений сосудистой системы на основе морфологического анализа многоцветных изображений глазного дна / В.А. Сойфер, А.Г. Храмов, Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, М.А.Ананьин // Труды конференции Президиума РАН "Фундаментальные науки - медицине". – 2008.
25. **Ананьин, М.А.** Использование вихревых фильтров для обработки биомедицинских изображений / М.А. Ананьин, С.Н. Хонина // Труды Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «X Королевские чтения». – 2009. – С. 308-309.
26. **Сойфер, В.А.** «Компьютерная система рентгенологической диагностики и локализации внутриглазного инородного тела» / В.А. Сойфер, Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, М.А.Ананьин, А.Г. Храмов // Труды конференции Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине». – 2009. – С. 103-104.
27. **Ананьин, М.А.** Метод обнаружения и анализа аномальных структур на изображениях глазного дна / М.А. Ананьин, Н.Ю. Ильясова, И.Н. Адаменко, А.В. Куприянов, А.В. Устинов А.В., В.В. Ятульчик // Межвузовский сборник научных трудов N 4, (специальный выпуск - Актуальные проблемы современного естествознания). – 2003. – С. 75-81.