

На правах рукописи

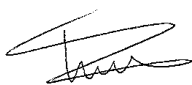
Тихонов Иван Анатольевич

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ПО ИНФРАКРАСНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ СОСУДИСТОГО РУСЛА

05.13.19 - методы и системы защиты информации,
информационная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2013

Диссертационная работа выполнена во ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт проблем вычислительной техники и информатизации» (ФГУП ВНИИПВТИ).

Научный руководитель: доктор технических наук,
научный руководитель ФГУП ВНИИПВТИ
Конявский Валерий Аркадьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
директор департамента таможенной инфраструк-
туры Евразийской экономической комиссии
Скиба Владимир Юрьевич

доктор технических наук, старший научный
сотрудник, профессор кафедры «Управляющие
интеллектуальные системы» НИЯУ МИФИ
Кулик Сергей Дмитриевич

Ведущая организация: ОАО «Концерн «Системпром»

Защита состоится «06» ноября 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.08 при ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

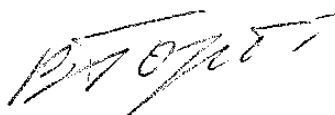
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью, просьба выслать по указанному адресу.

Автореферат разослан « »

2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



В.С. Горбатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время информационные системы (ИС) различного масштаба стали неотъемлемой частью базовой инфраструктуры государства, бизнеса, гражданского общества. Все больше защищаемой информации переносится в ИС. Современные информационные технологии обеспечивают не только новые возможности организации бизнеса, ведения государственной и общественной деятельности, но и создают значительные потребности в обеспечении безопасности для защиты конфиденциальной информации.

Известно, что более 25% злоупотреблений информацией в ИС совершается внутренними пользователями, партнерами и поставщиками услуг, имеющими прямой доступ к ИС. До 70% из них – случаи несанкционированного получения прав и привилегий, кражи и передачи учетной информации пользователей ИС, что становится возможным из-за несовершенства технологий разграничения доступа и аутентификации пользователей ИС¹. Совершенствование методов системы разграничения доступа и регистрации пользователей информационных ресурсов является одним из приоритетных направлений развития ИС.

Основными процедурами регистрации пользователей в ИС являются процедура идентификации – получение ответа на вопрос «кто Вы?» и аутентификации – доказательства того, что «Вы именно тот, кем представляетесь». Несанкционированное завладение злоумышленником доступа к ИС связано в первую очередь с нарушением процедуры аутентификации. В зависимости от типа данных, которые используются для проверки подлинности пользователя, выделяют три фактора аутентификации: на основе знаний чего-либо, на основе обладания чем-либо и на основе биометрических характеристик.

Наиболее распространенным методом аутентификации пользователей на основе знаний чего-либо является аутентификация с использованием пароля. Чем длиннее пароль, тем он более стойкий, но, во-первых, длинные и сложные пароли труднее запомнить, во-вторых, требуется больше времени для ввода пароля. К тому же, существует более десяти методологических и организационных способов атак на системы, в которых используется аутентификация на основе пароля. В настоящее время системы аутентификации на основе знания чего-либо являются самыми ненадежными².

¹ 2011 Data Breach Investigations Report [Электронный ресурс] – Электрон. дан. (1 файл) – Режим доступа: http://www.verizonbusiness.com/resources/reports/rp_data-breach-investigations-report-2011_en_xg.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

² Аутентификация. Теория и практика обеспечения безопасного доступа к информационным ресурсам. Учебное пособие для вузов / А.А. Афанасьев [и др.] ; под ред. А.А. Шелупанова, С.Л. Груздаева, Ю.С. Нахаева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – Гл. 1

При аутентификации на основе обладания чем-либо пользователь подтверждает свою подлинность тем, что предоставляет системе некий физический носитель, например, USB-ключ или смарт-карту. Но данный вид аутентификации обладает сходными с парольной аутентификацией недостатками, а физический носитель может быть передан, скопирован, украден и т.д.

В последнее время все больше внимания уделяется аутентификации на основе биометрических характеристик. В отличие от физического ключа, биометрическую характеристику невозможно передать и существенно сложнее подделать. Биометрическая идентификация является перспективным направлением развития процедур аутентификации в ИС, позволяющим устранить и решить ряд проблем аутентификации на основе более привычных и традиционных факторов.

История биометрии и биометрической идентификации в мировом научном сообществе опирается своими истоками на труды ученых Альфонса Бертильони (антрополог, служащий полиции, 1890 г.), Генри Фулдса (врач-физиолог, 1880 г.), Фрэнсиса Гальтона (исследователь, антрополог, 1880 г.), Карла Пирсона (математик, 1903-1905 гг.). На сегодняшний день крупный вклад в развитие систем аутентификации пользователей на основе биометрических признаков и исследования человека с точки зрения его индивидуальных физиологических и поведенческих черт внесли такие известные ученые, как академик Ю.В. Гуляев, д.т.н. Спиридонов И.Н., д.т.н. Урмаев О.С., Кухарев Г.А., Jain A.K., Vasss J.R. В сфере биометрических систем работают крупнейшие международные компании: Fujitsu, Sony, Hitachi, Futronic.

Наиболее широкое применение в биометрической аутентификации получили следующие биометрические характеристики: отпечаток пальца, радужная оболочка глаза, геометрия лица, сетчатка глаза, голос, динамическая подпись³.

Однако в ряде случаев применение перечисленных биометрических характеристик человека (БХЧ) осложнено. БХЧ геометрия лица обладает низкой уникальностью и, как следствие, значительными ошибками биометрической системы. Для получения шаблона на основе сетчатки и радужной оболочки глаза требуется дорогостоящее оборудование, а процедура регистрации является болезненной. Параметры голоса и подписи характеризуются низкой стабильностью и в некоторой степени зависят от эмоционального состояния пользователя. Дактилоскопические системы в настоящее время широко используются в криминалистической практике, в связи с чем вызывают неприятие и обладают низкой лояльностью среди пользователей ИС. При использовании контактных сканеров отпечатков пальцев возникают вопросы гигиены контактных площадок и соблюдения санитарных норм.

³ Jain A. K. Handbook of Biometrics / A. K. Jain, P. Flynn, A. A. Ross., Springer, 2008, 566p.

Устранить недостатки существующих методов биометрической аутентификации пользователей информационных процессов позволит разработка новых бесконтактных устройств и методов с использованием тех БХЧ, которые ранее не применялись в криминалистике, отличаются низкой стоимостью конечного решения и не подвергают пользователя риску причинения вреда здоровью, одновременно с этим характеризуются высокой уникальностью, собираемостью и стабильностью биометрического шаблона.

К подобным новым методам биометрической аутентификации пользователей ИС относится, в первую очередь, биометрическая аутентификация по инфракрасному (ИК) изображению сосудистого русла, полученному на основе ИК визуализации тканей человека. Устройство визуализации является бесконтактным, а процедура регистрации БХЧ не вызывает у пользователей негативной реакции.

Тем не менее, современные системы биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла обладают существенными недостатками, такими как отсутствие формализованного комплекса идентификационных характеристик сосудистого русла (КИХСР), отсутствие критериев качества ИК изображений сосудистого русла, требований к параметрам зондирующего излучения и условиям регистрации ИК изображения.

Возникает противоречие между потребностью общества в надежной бесконтактной и лояльной системе биометрической аутентификации пользователей ИС и практической возможностью создания и внедрения подобных систем. Данное противоречие может быть снято разработкой моделей и алгоритмов биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображениям сосудистого русла, формализацией КИХСР и требований к параметрам зондирующего излучения устройства визуализации сосудистого русла.

Таким образом, разработка моделей и алгоритмов биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка моделей и алгоритмов биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Сформировать комплекс морфологических параметров сосудистого русла (КМПСР) и разработать адекватный ему комплекс идентификационных характеристик сосудистого русла.
2. Разработать алгоритмы автоматизированного вычисления комплекса идентификационных характеристик сосудистого русла.

3. Разработать критерии качества инфракрасных изображений сосудистого русла для целей биометрической аутентификации пользователей информационных систем.
4. Разработать требования к параметрам зондирующего излучения устройства визуализации сосудистого русла (ВСР) для биометрической аутентификации пользователей информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла.
5. Создать и апробировать макет аппаратно-программного комплекса биометрической аутентификации пользователей информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла.

Методы исследования

Исследование проводилось в соответствии с ключевыми положениями системного анализа, теории вероятности, теории матриц, теории распознавания образов, методов математической статистики, теории оптического моделирования, теории информационных систем, методов проектирования программного и информационного обеспечения, технологии объектно-ориентированного программирования.

Диссертационная работа по своему содержанию соответствует пунктам 2 и 11 Паспорта специальности 05.13.19.

Научная новизна

1. Впервые для целей биометрической аутентификации пользователей и субъектов информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла предложена и обоснована морфологическая модель сосудистого русла, в которой структура и форма сосудов представлены в виде неполного графа, а вершинами графа являются контрольные точки сосудистого русла.
2. Выявлены значимые характеристики качества инфракрасных изображений сосудистого русла, используемых для целей биометрической аутентификации пользователей информационных систем. На основе геометрической модели бифуркации сосуда и модели зрительного распознавания изображений сформированы и обоснованы требования к ним.
3. Разработана спектральная модель формирования инфракрасного изображения сосудистого русла, на основе которой сформированы требования к длине волны зондирующего излучения устройства визуализации сосудистого русла для биометрической аутентификации пользователей информационных систем.
4. Выполнены эмпирические исследования стабильности комплекса морфологических параметров сосудистого русла и вариабельности комплекса идентификационных характеристик сосудистого русла и показана целе-

сообразность их применения в процедурах биометрической аутентификации пользователей информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке требований к параметрам зондирующего излучения устройства ВСР, составу и последовательности этапов автоматизированного вычисления КИХСР в процедурах аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла.

Исследованные особенности ИК изображений сосудистого русла и алгоритмы автоматизированной обработки изображений позволяют значительно повысить скорость обработки информации и достоверность получаемых результатов, снизить субъективность не только в системах биометрического назначения, но и в медицинских системах визуализации и оценки параметров структуры и формы сосудистого русла.

Разработанный КИХСР позволяет стандартизировать набор обрабатываемых данных и обеспечить совместимость процедур биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображениям сосудистого русла на национальном и международном уровнях.

Предложенная морфологическая модель сосудистого русла позволяет представлять информацию о структуре и форме сосудов в виде упорядоченного набора аналитических данных, за счет чего возможно значительное снижение объема хранимой информации без потери семантических сведений.

Соответствие ИК изображений сосудистого русла разработанным критериям качества повышают достоверность результатов автоматического вычисления КИХСР и снижают ошибки системы биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла.

Требования, разработанные к основным блокам устройства визуализации сосудистого русла на основе формализованных критериев качества ИК изображения, позволяют значительно снизить временные затраты при проектировании и внедрении систем биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображениям сосудистого русла.

Результаты работы позволяют рекомендовать аппаратно-программный комплекс биометрической аутентификации пользователей по ИК изображениям сосудистого русла к применению в системах местного, регионального и федерального значения для разграничения доступа к информационным ресурсам различного вида ИС.

Положения, выносимые на защиту

1. Для целей биометрической аутентификации пользователей информационных систем структура и форма сосудистого русла могут быть представлены в виде неполного графа, описываемого матрицей координат и матрицей смежности. Вершинами графа являются контрольные точки трех типов: окончание, изгиб и бифуркация, а форма сосуда может быть аппроксимирована сплайн-функцией третьего порядка.
2. Значимыми характеристиками качества инфракрасных изображений сосудистого русла кисти руки, используемых для целей биометрической аутентификации пользователей информационных систем, являются пространственное разрешение и контраст. Пространственное разрешение изображения должно быть не менее 79 т/дюйм, контраст не менее 0,125.
3. Для регистрации инфракрасного изображения сосудистого русла со значением контраста не менее 0,125 максимум спектра зондирующего излучения должен лежать в диапазоне 690–900нм с шириной спектра по уровню 0,5 не более 100нм.
4. Изменения комплекса морфологических параметров сосудистого русла в течение 6 месяцев являются статистически незначимыми.

Апробация работы

Основные положения работы доложены и обсуждены на IX МНТК «Физика и электроника в медицине и экологии ФРЭМЭ'2010», XII Международной научно-технической конференции «Медико-экологические информационные технологии - 2009» (г. Курск, 2009), X РНТК «Медико-технические технологии на страже здоровья» (г. Монастир, Тунис, 2008), VI международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника в медицине - 2005» (г. Москва, РФ).

Реализация результатов исследования

Результаты диссертационной работы в части исследования оптических свойств биологических тканей в видимом и ИК диапазонах длин волн использованы в учебном процессе факультета №3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Частные формы предложенных в работе моделей и алгоритмов внедрены в исследовательскую практику отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения ФГБУ РДКБ №1, применены в деятельности некоммерческого партнерства «Русское общество содействия развитию биометрических технологий, систем и телекоммуникаций» (НП «Русское биометрическое общество»), что подтверждено соответствующими актами о внедрении результатов диссертационной работы.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, и 6 тезисов докладов на научных конференциях.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 129 страницах. В приложения вошли результаты экспериментальных исследований. Список литературы включает 131 библиографический источник. Диссертация проиллюстрирована рисунками, таблицами, графиками.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы цели и задачи, положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

В первой главе представлен обзор методов, средств и факторов аутентификации пользователей в ИС. На основе сравнительного анализа обоснована актуальность применения биометрической аутентификации. Выполнен сравнительный анализ БХЧ и обосновано применение структуры и формы сосудистого русла в качестве биометрической характеристики для аутентификации пользователей ИС. Сформирован КМПСР.

По данным научной литературы, проведены исследования в области генетики и анализа процессов нормального развития сосудов у эмбриона человека и установлено, что сосудистые предшественники начинают формировать разветвленные сосудистые сплетения на основе полученного генетического кода, а финальные значения морфологических параметров сосудистого русла предопределены комбинациями генетического программирования и внешними влияниями, такими, как гипоксия, токсическое отравление и т.д.⁴ Наличие генетических программ формирования сосудистого русла показывает, что структура и форма сосудов, описываемые КМПСР, являются уникальными для каждого человека, поэтому могут быть использованы в процедурах биометрической идентификации.

Для формирования КМПСР выполнен анализ и обобщение научной литературы, на основе которого было установлено, что КМПСР включает диаметр и средний диаметр сосуда, среднюю протяженность сосудов, коэффициент извитости, углы сосудов, плотность сосудистого русла, длину сосудов.

⁴ Endothelial cells and VEGF in vascular development / L. Coultas, K. Chawengsaksophak, J. Rossant // Nature 1438. – 2005. – № 7070. – P. 937-945.

Обзор и систематизация научно-технической литературы показали, что существуют четыре основных группы инструментальных методов исследования структуры и формы сосудистого русла: ультразвуковые, рентгеноскопические, томографические и оптические, включающие ИК визуализацию сосудистого русла. На основе сравнительного анализа инструментальных методов исследования структуры и формы сосудистого русла и критериев сбора данных для биометрической аутентификации пользователей ИС по сосудистому руслу установлено, что для сбора данных о структуре и форме сосудистого русла в системах аутентификации пользователей ИС наиболее целесообразно применять метод ИК визуализации тканей человека и выполнять регистрацию венозных сосудов ладони или тыльной части кисти руки.

На основе патентного анализа, анализа отчетов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, анализа научной литературы, публикаций тезисов докладов на международных конференциях, исследовании состояния международного рынка установлено, что в настоящее время существуют следующие устройства ИК оптической визуализации сосудистого русла: PalmSecure (Fujitsu), mofiriaTM (Sony), MorphosmartTM (Safran), Hybrid Finger Identification (NEC), VeinID (Hitachi). Анализ технической документации, руководств, отчетов показал, что современные системы обладают общими существенными недостатками, такими как отсутствие формализованного КИХСР, отсутствие критериев качества ИК изображений сосудистого русла, требований к параметрам зондирующего излучения и условиям регистрации ИК изображения. Отсутствует возможность сопряжения устройств разных производителей в единую информационную систему.

Вторая глава посвящена семантическому анализу ИК изображений сосудистого русла, формированию КИХСР, адекватного КМПСР, разработке морфологической модели сосудистого русла и автоматизации вычисления КИХСР.

Для формирования КИХСР выполнен семантический анализ ИК изображений сосудистого русла, в результате которых установлено, что на ИК изображении сосудистого русла присутствуют следующие особые области: область окончания сосуда, область бифуркации сосуда, область изгиба сосуда (таблица 1). В окрестностях особых областей локализуются соответствующие им контрольные точки (КТ). Плоская проекция сосудистого русла однозначно определяется взаимным расположением и типом КТ в окрестности особых областей.

КТ объединены семантическими связями, которые характеризуются остовом сосуда. Множество точек, образующих остов сосудистого русла A может быть выражено с использованием операции эрозии и размыкания⁵:

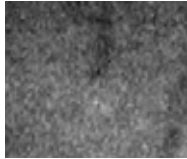
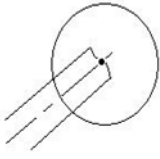
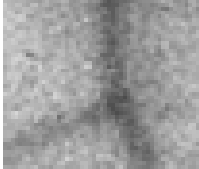
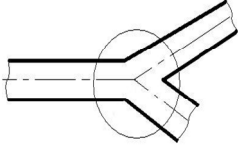
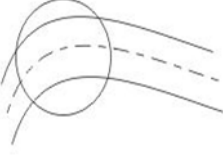
⁵ Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – С. 780-783.

$$S(A) = \bigcup_{k=1}^K S_k(A),$$

$$S_k(A) = \frac{(A \ominus kB)}{((A \ominus kB) \circ B)}, \quad (1)$$

где B – морфологический примитив скелетизации. Запись $(A \ominus kB)$ обозначает k последовательных применений операции эрозии к множеству A .

Таблица 1 – Особые области ИК изображений сосудистого русла

№	Изображение особой области	Схематическое представление	Тип особой области	Описание особой области
1			Окончание	Область, в окрестности которой сосуд прерывается, вследствие выхода сосуда из регистрируемого объема тканей
2			Бифуркация	Область, в окрестности которой сосуд разделяется на два сосуда, или в окрестности которой два сосуда объединяются в один
3			Изгиб	Область, в окрестности которой кривизна сосуда превышает пороговое значение

Подмножество КТ типа бифуркация $B(A)$ множества точек остова сосудов $S(A)$ формируется из граничных условий остова:

$$B(A) = \left\{ \left\{ b \mid b \in S_k(A) \cap S_l(A) \cap S_m(A) \right\} \right. \\ \left. k \neq l \neq m = 1, 2 \dots K \right\} \quad (2)$$

где K - количество подмножеств множества $S(A)$.

Подмножество $B(A)$ может быть также выражено из числа ненулевых соседей элемента множества $S(A)$:

$$B(A) = \{ b \mid b \in S(A), N(b) = 3 \} \quad (3)$$

где $N(b)$ – число ненулевых соседей элемента b .

Подмножество КТ типа окончание $T(A)$ определяется следующим выражением:

$$T(A) = \{ t \mid t \in S(A), N(t) = 1 \} \quad (4)$$

где $N(t)$ – число ненулевых соседей элемента t .

Форма остова сосуда на длине между КТ типа бифуркация и окончание может быть представлена кусочно-непрерывным сплайном третьего порядка, аппроксимирующим остов сосуда на заданном участке. Набор базовых точек сегментов сплайн кривых образует множество $P(A)$ – множество КТ сосудистого русла, объединяющее подмножество точек бифуркации $B(A)$, подмножество точек окончания $T(A)$ и подмножество точек изгиба $C(A)$. Тогда точками изгиба являются базовые точки набора сплайн кривых за вычетом множества точек бифуркации и множества точек окончания:

$$C(A) = \{c \mid c \in P(A) \setminus (B(A) \cup T(A))\} \quad (5)$$

Преобразование остова (1), выражения (3) – (5) позволяют локализовать КТ в матрице координат P :

$$P = \wp[T(A), B(A), C(A)] = \wp[P(A)] = \left[\begin{matrix} x_i(t) \\ y_i(t) \end{matrix} \right]_{t=t_i}, \quad 1 \leq i \leq N \quad (6)$$

где $\wp$ – оператор преобразования координат локализации над множествами КТ $T(A)$, $B(A)$, $C(A)$ в матрицу координат; N – количество КТ.

Таким образом, структура сосудистого русла представляет собой локализованную матрицу координат КТ и связей между ними и может быть описана в виде неполного плоского графа. Тогда узлами графа являются элементы множества $P(A)$, а форма ребер графа аппроксимирована сплайном.

Для полного представления структуры в виде графа введена матрица смежности M , отображающая связи между узлами графа:

$$M_{p_i p_j} = \begin{cases} 0, \mu(p_i, p_j) = 0 \\ \omega_{p_i p_j}, \mu(p_i, p_j) \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

где $\mu(p_i, p_j)$ – мера связи между точками графа p_i и p_j , $\mu(p_i, p_j) = 0$, если $i = j$ или p_i и p_j не смежные; $\omega_{p_i p_j}$ – мера, характеризующая толщину участка сосудистого русла (вес ребра графа).

Таким образом, КИХСР представляет собой набор КТ определенного типа, описываемый матрицей координат и матрицей смежности.

Для автоматического вычисления КИХСР по ИК изображениям сосудистого русла разработаны алгоритмы и реализовано программное обеспечение, включающие следующие этапы обработки изображений:

- Обнаружение сосудистого русла.
- Распознавание сосудистого русла, построение и аппроксимация остова сосудистого русла.
- Классификация КТ, определение типа КТ и формирование матрицы координат и матрицы смежности.

Для оценки эффективности примененных алгоритмов выполнены исследования обобщенного показателя ошибки обнаружения КТ. На основе проведенных исследований 80 изображений различного качества, получена эмпирическая зависимость показателя от вероятности зрительного распознавания КТ (рис. 1).

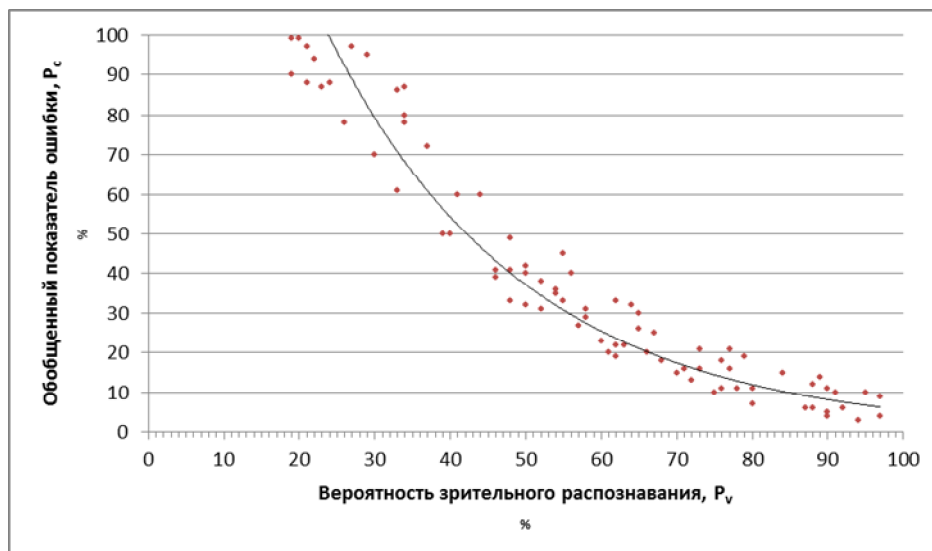


Рис. 1 – Обобщенный показатель ошибки обнаружения КТ

Вероятность зрительного распознавания объекта P_v на зарегистрированном изображении зависит от параметров аксиологической информации и структурных характеристик ⁶:

$$P_v = \exp \left[- \left(\frac{Bm}{2N_c d_{\min} \sqrt{CD_c}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

где B – коэффициент формы объекта, принятый в настоящем исследовании равным 0,4; m – масштаб изображения, принятый равным 1; N_c – разрешение изображения; $d_{\min}$ – размер минимально разрешаемого элемента; D_c – средняя оптическая плотность, равная 3 для большинства современных мониторов; C – контраст изображения.

Таким образом, обобщенный показатель ошибки обнаружения КТ зависит от качества исходного изображения. Поэтому для автоматизированной обработки с заданным значением обобщенного показателя ошибки обнаружения КТ необходимо оценить качество ИК изображений сосудистого русла и сформировать требования к нему.

Третья глава работы посвящена выявлению значимых характеристик качества ИК изображений сосудистого русла и формированию на их основе критериев качества.

⁶ Спиридонов, И.Н. Морфометрия сложноструктурированных медико-биологических изображений / И.Н. Спиридонов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 59 с.

На основе литературных исследований выявлены следующие характеристики изображения, отражающие его качество: пространственное разрешение, контраст, неравномерность освещенности, средняя яркость. Для определения значимых характеристик ИК изображения сосудистого русла разработана методика экспертной оценки влияния значения характеристики изображения на визуальное качество изображения. В результате проведенных исследований в соответствии с разработанной методикой, предполагающей выявление значимости различий в группах при изменении характеристики изображения с помощью непараметрического критерия Краскела-Уоллиса, установлено, что значимыми характеристиками являются пространственное разрешение и контраст (таблица 2).

Таблица 2 – Значимость характеристик качества ИК изображения сосудистого русла

Характеристика	Значение критерия Краскела-Уоллиса	Критическое значение критерия Краскела-Уоллиса	Значимость характеристики
Пространственное разрешение	34,50	7,81	Значимый
Контраст	36,09		Значимый
Неравномерность освещенности	6,72		Незначимый
Средняя яркость	0,46		Незначимый

Пространственное разрешение характеризует размер реальных объектов, которые можно различить на изображении. Для формализации требований к пространственному разрешению разработана геометрическая модель бифуркации сосуда как наиболее важного семантического элемента изображения (рис. 2, а).

Для вычисления спектра сигнала изображение рассмотрено как детерминированный процесс. Построено распределение яркости изображения бифуркации вдоль оси Z – оси наиболее вероятного обнаружения высоких частот в спектре изображения бифуркации. В качестве аппроксимирующей функции распределения яркости вдоль оси сечения бифуркации Z выбрана кривая Гаусса (рис. 2, б):

$$F(z) = Ke^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} + Ke^{-\frac{\left(z - 2r \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \mu\right)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

где $\sigma = \frac{d}{\sqrt{-8 \ln\left(\frac{1}{2}\right)}}$ – коэффициент, характеризующий толщину вены; d – диаметр

вены; r – радиус особой области бифуркации; α – угол бифуркации; K – коэффициент амплитудной нормализации, характеризующий контраст вены.

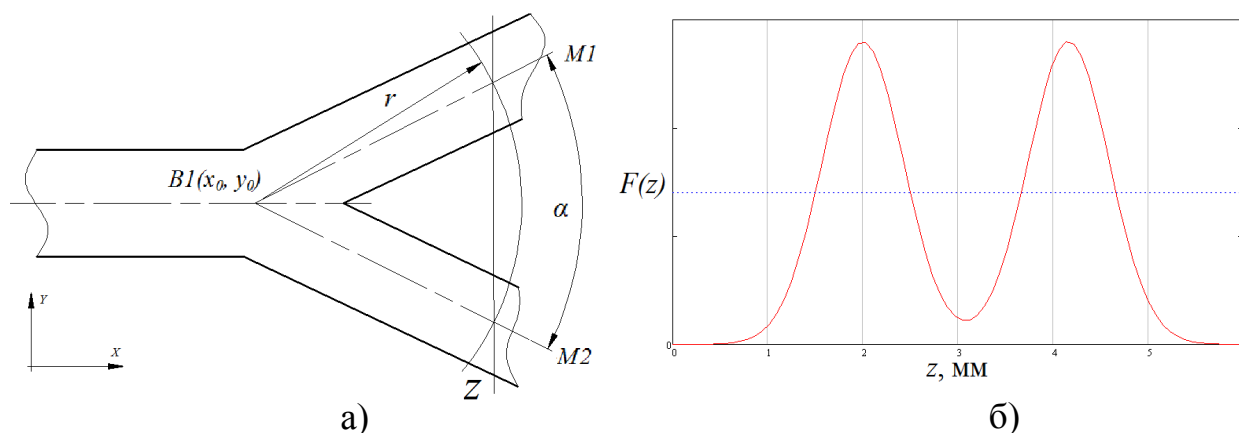


Рис. 2 – Геометрическая модель бифуркации сосуда: а) визуальное представление; б) распределение яркости вдоль линии сечения Z .

Для определения минимально допустимого разрешения изображения по геометрической модели бифуркации использован метод оценки нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) восстановления ограниченного пространственно-частотного спектра (ПЧС) сигнала. Расчеты показали, что НСКО не превышает 5% при граничной частоте в ПЧС изображения $0,89 \text{ мм}^{-1}$. С учетом поправки на бесшумовое изображение, коэффициентом запаса и теоремой Котельникова минимально допустимое разрешение изображения составляет 79 т/дюйм.

На основе принятой 90% вероятности зрительного распознавания КТ и выражения (8) сформированы требования к минимальному значению контраста изображения сосудистого русла, которое должно составлять 0,125.

В соответствии с принципами оптической визуализации сосудистого русла, контраст регистрируемого изображения зависит от длины волны зондирующего излучения. Падающее на объект излучение взаимодействует с клеточными структурами: поглощается или рассеивается. Разность интенсивностей остаточного пучка, отраженного от различных областей кожных покровов формирует контрастное изображение сосудистого русла. Определяющее значение в формировании изображения вносит процесс поглощения, величина которого существенно различается для разных тканей, в зависимости от концентрации основных элементов в ткани, участвующих во взаимодействии с зондирующим излучением: воды, меланина, оксигемоглобина и дезоксигемоглобина. Интенсивность остаточного излучения, отраженного от участков тканей с повышен-

ным содержанием деоксигемоглобина (венозный сосуд), за счет его большего поглощения, существенно ниже интенсивности остаточного излучения, отраженного окружающими венозный сосуд мягкими тканями, поглощающими зондирующее излучение в меньшей степени. Поэтому на изображении участки с венозным сосудом затемнены.

Контраст регистрируемого изображения определяется следующим выражением:

$$C = f(\lambda) = \frac{I_h(\lambda) - I_v(\lambda)}{I_h(\lambda) + I_v(\lambda)} \quad (10)$$

где $I_h(\lambda)$ – интенсивность излучения, отраженного участком тела, не содержащим сосудов; $I_v(\lambda)$ – интенсивность излучения, отраженного от участка тела, содержащего венозный сосуд.

В соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера и на основе метода моделирования Монте-Карло для распространения излучения в случайно-неоднородных многослойных рассеивающих свет средах получаем выражения для интенсивностей отраженного излучения:

$$\begin{aligned} I_h(\lambda) &= I_0(K_{atsk} + (1 - K_{atsk})e^{-2\mu_{sk}x_{sk}}K_{skst} + \alpha(1 - K_{atsk})e^{-2\mu_{sk}x_{sk}}(1 - K_{skst})e^{-2\mu_{st}x_{st}}) \\ I_v(\lambda) &= I_0(K_{atsk} + (1 - K_{atsk})e^{-2\mu_{sk}x_{sk}}K_{skst} + \\ &+ \alpha(1 - K_{atsk})e^{-2\mu_{sk}x_{sk}}(1 - K_{skst})e^{-2\mu_v x_v}e^{-2\mu_{st}(x_{st} - x_v)}) \end{aligned} \quad (11)$$

где I_0 – интенсивность зондирующего излучения; K_{atsk} , K_{skst} – коэффициенты отражения на границах раздела сред «атмосфера – кожа» и «кожа – мягкие ткани» соответственно; μ_{sk} , μ_{st} – коэффициенты поглощения слоя кожи и слоя мягких тканей соответственно; x_{sk} , x_{st} – толщина участвующего во взаимодействии с излучением слоя кожи и мягких тканей соответственно; α – коэффициент диффузного отражения излучения в тканях.

В соответствии с выполненными расчетами, контраст сосудистого русла в монохроматическом зондирующем излучении достигает своего максимума на длинах волн – 680нм и 720нм.

Для учета полихроматичности источника излучения введена аддитивная компонента принимаемого излучения, аппроксимирующая спектр Гауссом с заданной шириной полосы на уровне 50%. Выполненные расчеты показали, для получения ИК изображения сосудистого русла с установленным значением контраста не менее 0,125, максимум спектра зондирующего излучения должен лежать в диапазоне 690–900нм с шириной спектра по уровню 0,5 не более 100нм (рис. 3).

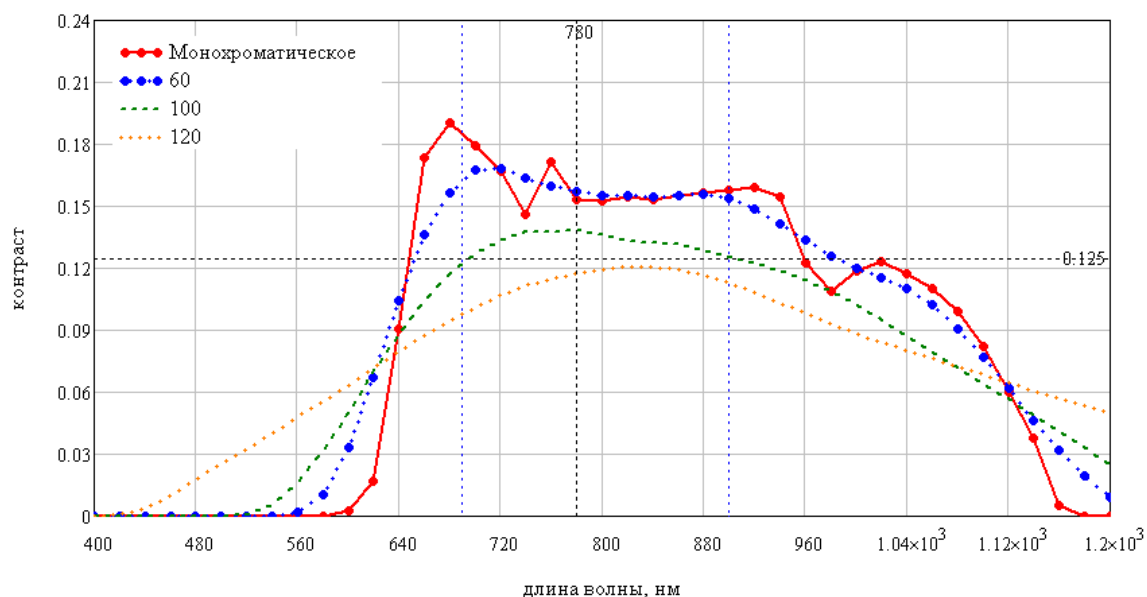


Рис. 3 – Зависимость контраста изображения от длины волны и ширины спектра зондирующего излучения, набор аналитических кривых

В четвертой главе приведены результаты создания и исследования макета аппаратно-программного комплекса (АПК) биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображениям сосудистого русла.

Макет АПК аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла состоит из следующих основных блоков (рис. 4): устройство ВСП, персональный компьютер (ПК), устройство сопряжения, устройство ввода/вывода информации, исполнительный механизм.

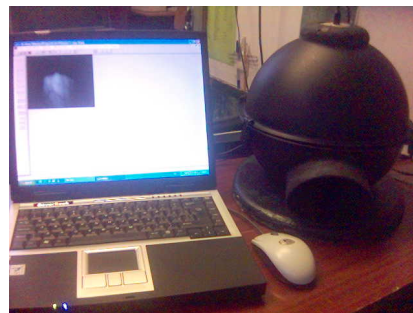


Рис. 4 – Схема структуры макета АПК аутентификации пользователей ИС по ИК изображениям сосудистого русла

На рис. 5 приведены изображения устройства ВСП и макета АПК. Расчет и выбор осветителя устройства ВСП произведен в соответствии с требованиями, сформированными к зондирующему излучению источника. В основу конструкции положен закрытый кожух, обеспечивающий защиту от внешней засветки. Устройство ВСП позволяет выполнять регистрацию ИК изображения сосудистого русла ладони и тыльной части кисти руки.



а)



б)

Рис. 5 – Система биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла: а) устройство ВСП; б) макет АПК.

Для разработки модулей и сервисов специального программного обеспечения (СПО) системы использован язык программирования С#, реляционная модель БД.

С помощью созданного макета АПК выполнена верификация спектральной модели формирования ИК изображения сосудистого русла. Проведенные расчеты и исследования показали, что при значении контраста более 0,125 (рабочий диапазон контраста) теоретическая оценка контраста при моделировании шириной спектра 60нм не выходит за пределы доверительного интервала 3σ для данных, полученных в результате эмпирических исследований.

Параметры сосудистого русла кисти руки могут меняться в незначительных пределах. Для оценки значимости этих изменений проведены исследования стабильности КМПСР в течение длительного промежутка времени и краткосрочные изменения КМПСР при воздействии внешних факторов.

Оценка стабильности КМПСР в течение длительного промежутка времени выполнена на основе выявления трендов критерием серий. В основном исследовании приняли участие 14 испытуемых, для каждого из которых с периодом 3-8 дней производилась регистрация изображения сосудистого русла кисти руки и расчет КМПСР. Длительность исследования составила 170 дней. Проведенные расчеты показали отсутствие тренда, следовательно, изменения в группах признаков можно считать статистически незначимыми, а КМПСР стабильным.

Краткосрочные изменения КМПСР кисти руки исследовались путем воздействия на организм человека внешних факторов: физическая нагрузка; химическая нагрузка, вызванная курением; тепловая нагрузка – охлаждение регистрируемой части тела. Дискретные пробы были разделены на две группы – до воздействия и после воздействия. Всего в исследовании приняло участие 5 человек, для каждого из которых получено 20 изображений. Оценка значимости краткосрочных изменений выполнена на основе парного критерия Стьюдента. В результате проведенных расчетов и статистической обработки экспериментальных данных установлено, что при уровне значимости 0,05 влияние внешних факторов статистически незначимо и КМПСР можно считать стабильным.

Для определения идентификационных характеристик макета АПК и применимости КИХСР в качестве биометрического шаблона были выполнены исследования вариабельности КИХСР на основе оценки ошибок первого и второго рода для нулевой гипотезы – «человек – доверенное лицо системы» (рис. 6, а). Построена рабочая характеристика системы, позволяющая выполнить оптимальный выбор значения критерия для решения конкретной биометрической задачи (рис. 6, б).

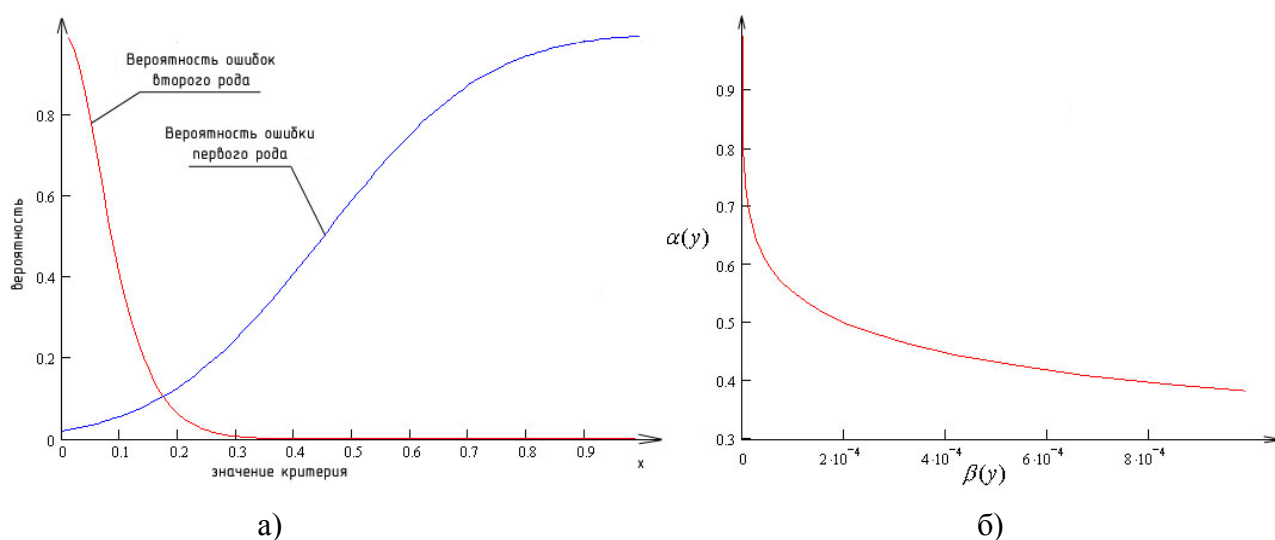


Рис. 6 – Идентификационные характеристики системы: а) ошибки первого и второго рода; б) рабочая характеристика системы

В соответствии с проведенными исследованиями при значении ошибки второго рода 6×10^{-4} , ошибка первого рода составляет 0,42.

Полученные результаты эмпирических исследований подтверждают целесообразность применения КИХСР в качестве биометрического шаблона в процедурах биометрической аутентификации пользователей ИС по ИК изображению сосудистого русла.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате анализа научно-технических данных и современного состояния проблемы показана актуальность, практическая и социальная значимость разработки моделей и алгоритмов аутентификации пользователей ИС по ИК изображениям сосудистого русла.
2. На основе результатов семантического исследования ИК изображений сосудистого русла разработана и предложена морфологическая модель сосудистого русла, в которой структура и форма сосудов представлены в виде неполного графа. Вершинами графа являются контрольные точки типа окончание, бифуркация и изгиб. Сосуд на длине между контрольными точками может быть аппроксимирован сплайн-функцией третьего порядка.
3. На основе исследований научно-технических данных, характеристик изображений, характеристик визуального восприятия качества изображений, экспертной оценки, установлено, что значимыми характеристиками качества ИК изображений сосудистого русла являются пространственное разрешение и контраст.
4. В результате исследований разработанных математических моделей сформированы требования к значениям пространственного разрешения и контраста ИК изображения сосудистого русла кисти руки. Пространственное разрешение должно быть не менее 79 т/дюйм, контраст – не менее 0,125.
5. На основе анализа научной литературы установлено, что контраст ИК изображения сосудистого русла зависит от длины волны зондирующего излучения. Разработана спектральная модель формирования ИК изображения сосудистого русла, в результате исследования которой установлено, что для получения ИК изображения сосудистого русла, с установленным значением контраста не менее 0,125, максимум спектра зондирующего излучения должен лежать в диапазоне 690–900нм с шириной спектра по уровню 0,5 не более 100нм.
6. Установлено, что изменения параметров структуры и формы сосудистого русла в течение 6 месяцев и краткосрочные изменения параметров при воздействии внешних факторов, таких как тепловая нагрузка, химическая нагрузка, физическая нагрузка статистически незначимы.
7. Разработан макет аппаратно-программного комплекса аутентификации пользователей ИС, в ходе апробации которого на верифицированной выборке показана различимость групп «свой»–«чужой» в процедурах биометрической аутентификации пользователей ИС по признакам комплекса идентификационных характеристик сосудистого русла.

Результаты диссертационной работы в части требований к качеству инфракрасных изображений сосудистого русла использованы в деятельности некоммерческого партнерства «Русское общество содействия развитию биометрических технологий, систем и телекоммуникаций» (НП «Русское биометриче-

ское общество») при разработке методик оценки качества инфракрасных изображений сосудистого русла и исследовании биометрических сканеров инфракрасных изображений сосудистого русла в чем выдана соответствующая справка.

Предложенная морфологическая модель сосудистого русла и алгоритмы вычисления КИХСР позволяют унифицировать запись биометрического шаблона сосудистого русла, а также выполнять автоматическое вычисление комплекса морфологических параметров не только в целях биометрической идентификации, но в исследовательской практике медицинских учреждений, что подтверждено соответствующим актом о внедрении результатов диссертационной работы в исследовательскую практику отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения ФГБУ РДКБ №1.

Разработанная спектральная модель формирования ИК изображения сосудистого русла может быть применена в учебном процессе, что также подтверждено соответствующим актом о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс факультета №3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ:

1. Тихонов, И.А. Морфометрия изображений сосудистого русла в ИК области / И.А. Тихонов, А.А. Хрулев, И.Н. Спиридонов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2006. – № 10. – С. 27-31. (0,2 п.л.)
2. Тихонов, И.А. Инфракрасная визуализация кожных покровов / И.А. Тихонов, И.Н. Спиридонов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2010. – № 9. – С. 26-32. (0,4 п.л.)
3. Тихонов, И.А. Информативные параметры биометрической аутентификации пользователей информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла / И.А. Тихонов // Безопасность информационных технологий. – 2011. – №4. – С. 61-68. (0,45 п.л.)

Тезисы докладов и материалов конференций:

4. Тихонов, И.А. Информативные признаки в методе аутентификации личности по ик-изображению сосудистого русла кисти руки / И.А. Тихонов // 6-я международная конференция радиоэлектроника в медицине: сборник докладов. – М.: НТОРЭС им. А.С. Попова, 2005. – С. 77-80. (0,1 п.л.)
5. Тихонов, И.А. Разработка формализованного описания ИК-изображения сосудистого русла / И.А. Тихонов, И.Н. Спиридонов // Фотометрия и ее метроло-

- гическое обеспечение: Тез. докл. XVII РНТК. – М.: ВНИОФИ, 2008. – С. 242-244. (0,1 п.л.)
6. Тихонов, И.А Контрольные точки сосудистого русла / И.А. Тихонов, И.Н. Спиридонов // : Сб. докладов X РНТК, г. Монастир (Тунис), 28 сентября – 05 октября 2008 г. – М.: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – С.96 – 97. (0,1 п.л.)
7. Тихонов И.А. Морфометрия ИК изображений сосудистого русла в современной медицине / И.А. Тихонов, И.Н. Спиридонов // Медико-экологические информационные технологии – 2009: сборник материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2009. – С.203-205. (0,1 п.л.)
8. Тихонов И.А. Оценка качества инфракрасных изображений сосудистого русла / И.А. Тихонов, И.Н. Спиридонов // Медико-технические технологии на страже здоровья: Сб. докладов XI РНТК, Черногория, 19–26 сентября 2009 г. – М.: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С. 124-126. (0,1 п.л.)
9. Тихонов И.А. Технология биометрической идентификации по ИК изображениям сосудистого русла кисти руки / И.А. Тихонов // Научно-молодежная школа по биометрическим технологиям для медико-биологических анализов и функциональной диагностики в рамках 9ой МНТК «Физика и электроника в медицине и экологии ФРЭМЭ'2010»: Материалы. – Владимир, 2010. – С. 124-128. (0,1 п.л.)