

На правах рукописи

САГАЙДАЧНЫЙ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МЕТОДЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО АНАЛИЗА
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ
ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА И ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ**

**03.01.02 «Биофизика»
01.02.08 «Биомеханика»**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Саратов – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского» на кафедре медицинской физики и кафедре физики твердого тела

Научные руководители:

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор
Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор
Скрипаль Анатолий Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Ульянов Сергей Сергеевич (ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»)

доктор медицинских наук, профессор
Бугаева Ирина Олеговна (ГОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Росздрави»)

Ведущая организация:

Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН (ИБФРМ РАН),
г. Саратов.

Защита диссертации состоится 10 декабря 2010 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.243.05 по специальности 03.01.02 – биофизика, по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке СГУ им. Н.Г. Чернышевского (г. Саратов, ул. Университетская д. 42)

Автореферат разослан "8" ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



Дербов В.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время тепловизионные методы исследования находят широкое применение при изучении биофизических явлений в сложных системах. Тело человека является примером такой системы и относится к открытой неравновесной термодинамической системе. Находясь в постоянном взаимодействии с окружающей средой, изменяющей свою температуру, влажность и другие параметры, тело человека поддерживает постоянную температуру центральной области тела за счет изменения температуры периферических областей [1]. Таким образом, открытые периферические участки тела характеризуются повышенной динамикой температуры. При реализации физической терморегуляции проявляются такие биофизические явления как изменение объема и скорости движения крови в поверхностных сосудах, выделение и испарение жидкости с поверхности кожи, и поверхности глаз. Указанные процессы приводят к температурным изменениям на поверхности тела, которые с помощью современных тепловизионных методов могут быть не только визуализированы, но и охарактеризованы количественно.

Современное динамическое тепловидение является высокотехнологичным методом получения функциональной информации о биообъекте, который позволяет регистрировать распределение температуры с разрешением до $0,001^{\circ}\text{C}$, пространственным разрешением до 30 мкм и скоростью съемки до 1000 кадров/с [2]. С использованием методов статического тепловидения детально описаны особенности термограмм при наличии различных стадий рака молочной железы и патологий вен нижних конечностей [3, 4]. Однако, в данных областях тела человека при нормальных условиях не обнаруживается значительной динамики температуры. Возможности современного динамического тепловидения раскрываются наиболее полно при анализе зон поверхности тела человека, отличающихся ярко выраженными колебаниями температуры. К таким зонам, малоизученным с позиции динамики температуры, можно отнести кисти рук, активно участвующие в физической терморегуляции и зону глаз, непосредственно контактирующую с окружающей средой.

Остается открытым вопрос о причинах температурных изменений и роли сосудистых реакций, а так же биологических жидкостей, таких как кровь и слеза, в установлении температурного режима верхних конечностей в нормальных условиях и при наличии внешнего механического воздействия, приводящего, например, к частичной или полной остановке движения крови. Для объяснения возникающих при этом температурных эффектов могут применяться гидродинамические модели, рассматривающие распространение объемов жидкости с различными температурами.

На поверхности тела человека проявляются не только временное изменение, но и пространственное перераспределение значений температур. В настоящее время количественный анализ динамических термограмм, отображающих изменение пространственной неоднородности распределения температуры, в большинстве случаев проводится с помощью математических методов, учитывающих статистику значений температур, но не пространственные координаты и взаимное расположение изотермических точек. Использование количественной меры неоднородности пространственного распределения температуры позволило бы описать, например, особенности динамики распределения слезной пленки на поверхности глазного яблока или характеристики пятнистого распределения температуры кожи при обильном потоотделении.

В практическом отношении детальное изучение пространственно-временных температурных эффектов, проявляющихся под воздействием нагрузочных факторов, позволит определить параметры динамики температуры, соответствующие нормальному функционированию сосудистой регуляции тока крови, выделению и испарению слезной и потовой жидкостей. Отклонение параметров динамики от нормы позволит проводить диагностику патологий вегетативной регуляции кровотока, нарушений слезной гидродинамики и потоотделения.

В связи с вышесказанным совершенствование и новые применения тепловизионных методов анализа пространственно-временной динамики температуры являются актуальными как для биофизики, так и для решения различного рода практических задач медицинской диагностики.

Цель диссертационной работы: разработка новых тепловизионных методов, основанных на количественном анализе пространственно-временной динамики температуры поверхности тела человека при нормальных условиях и при внешнем нагрузочном воздействии, а также поиск диагностических применений данных методов.

Задачи исследования:

1. Выделить и описать области поверхности тела человека с ярко выраженной пространственно-временной динамикой температуры.
2. Исследовать динамику температуры в этих областях в состоянии покоя, установить основные причины изменения температуры.
3. Разработать модели, описывающие температурную реакцию исследуемых областей на изменение режима циркуляции биологических жидкостей, ввести параметры, характеризующие временную динамику температуры.
4. Предложить метод количественной оценки пространственно-временной неоднородности температуры исследуемых областей, опреде-

лить сферы практического применения результатов пространственно-временного анализа.

5. Апробировать методы диагностики, использующие разработанные модели температурной динамики.

Научная новизна

Предложена модель, описывающая вид временных зависимостей температуры дистальных фаланг кисти при кратковременной остановке кровотока в области плеча (при создании окклюзии).

Показано, что во время полной остановки естественного кровотока в плечевой артерии ниже манжеты, сдавливающей плечо, происходит не только пассивное остывание конечности, но и медленное вытеснение объемов крови из сужающихся артерий в вены, что оказывает существенное влияние на динамику температуры.

Приведена модель динамики температуры на поверхности глазного яблока, учитывающая процесс моргания. На основе данной модели установлено существенное влияние распределения и испарения слезы на температурные параметры поверхности глазного яблока.

Предложен метод оценки неоднородности пространственного распределения температуры на поверхности объекта, основанный на построении кратчайшего незамкнутого пути. Возможности метода продемонстрированы на примере анализа неоднородности распределения температуры поверхности глазного яблока во время моргания и поверхности торса во время физической нагрузки.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Достоверность количественных результатов диссертации подтверждается использованием для температурных измерений тепловизора ThermoCAM SC3000, имеющего сертификат калибровки, выданный предприятием изготовителем FLIR Systems, Швеция. Для измерения температуры учитывался коэффициент излучения кожи $\varepsilon=0.97$, соответствующий характеристикам кожи в диапазоне 8-9 мкм и являющийся одинаковым для лиц мужского и женского пола, темно- и светлокожих людей. Обработка термограмм выполнялось с помощью профессионального программного обеспечения ThermoCAM Researcher Pro 2.8.

При проведении измерений предпринимались меры по обеспечению нормальных условий окружающей среды.

Взаимосвязь температуры с различными сосудистыми реакциями устанавливалась с использованием стандартных методов измерения характеристик гемодинамики: фотоплетизмографии, ультразвуковой доплерографии и импедансной реографии.

Выводы о применимости разработанных тестов в области функциональной диагностики основываются на анализе групповых измерений с численностью групп от 15 до 95 человек.

Практическая значимость

Динамическая модель, описывающая вид временных зависимостей температуры дистальных фаланг кисти во время кратковременной остановки естественного кровотока в области плеча, может быть использована для разработки методов диагностики нарушений регуляции кровотока в периферических сосудах. Основным преимуществом таких методов является контроль состояния конечности при отсутствии пульсирующего кровотока, малое время их проведения и аппаратурная простота измерений. Использование температурных методов тестирования состояния сердечно-сосудистой системы позволяет дополнить стандартную процедуру измерения артериального давления по методу Короткова информацией о регуляции периферического кровотока.

Установленные закономерности изменения температуры во время проведения пробы с остановкой кровотока (окклюзионной пробы) могут быть использованы для расширения знаний о реакции организма на кратковременное состояние ишемии и особенностях развития постокклюзионной гиперемии.

На основе предложенной модели динамики температуры поверхности глазного яблока могут разрабатываться методы температурного контроля состояния глаз, учитывающие влияние на результаты измерений процессов распределения и испарения слезы.

Предложенный метод количественной оценки неоднородности распределения температуры на термограммах, реализуемый с помощью построения кратчайшего незамкнутого пути, может быть использован для исследования характеристик пятнисто-сетчатого рисунка, появляющегося на поверхности тела человека во время физических и термических нагрузок. Измерение динамики пространственного распределения температуры на поверхности глазного яблока может применяться для диагностики патологий глаз, связанных с нарушением однородности поверхностного распределения слезы.

Положения, выносимые на защиту:

1. В начальный период искусственно созданной остановки кровотока в области плеча (плечевой окклюзии) в предплечье происходит одновременное увеличение температуры в области вен и уменьшение температуры в области артерий, обусловленные преимущественно увеличением диаметра вен, уменьшением диаметра артерий и перераспределением температуры от более нагретых участков к менее нагретым.

2. Скорость изменения температуры дистальных фаланг кисти во время кратковременной, искусственно созданной остановки кровотока в области плеча определяется преимущественно уменьшением сосудистого просвета артерий и закрытием капилляров фаланг кисти, что является реакцией на снижение артериального давления на участке ниже области сдавливания, после восстановления кровотока – определяется преимущественно увеличением сосудистого просвета артерий в ответ на поступление дополнительного объема крови в артерии, суженные во время отсутствия кровотока.
3. Динамика температуры поверхности глаз определяется процессом испарения слезы в состоянии открытого века и нагревом поверхности в состоянии закрытого века. В связи с этим состояние роговицы в наибольшей степени характеризуется температурой, измеряемой в момент времени непосредственно перед рефлекторным закрытием века при моргании, когда уменьшение толщины слезной пленки максимально.
4. Динамика пространственной неоднородности распределения температуры биообъекта может быть описана изменением длины кратчайшего незамкнутого пути, объединяющего изотермические точки термограммы данного биообъекта.

На защиту также выносятся способы, на которые получены положительные решения о выдаче патента.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская научная школа-семинар «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2008», 3-5 июля 2008 г., Саратов, Россия.
2. Всероссийская научная школа-семинар «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2009», 1-3 июля 2009 г., Саратов, Россия.
3. «13-я международная конференция молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике SFM 2009», 21-24 сентября 2009 г., Саратов, Россия.
4. «Всероссийская молодежная выставка-конкурс прикладных исследований, изобретений, и инноваций», 27-28 октября 2009 г. Саратов, Россия.
5. III Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010», 21-25 июня 2010 г., Москва, Россия.
6. 49th Annual Meeting of the European Society for Pediatric Endocrinology (ESPE), September 22-25, 2010, Prague, Czech Republic.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении договорных НИР в ГОУ ВПО СГУ им. Н.Г. Чернышевского аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы, тема «Разработка научно-методического

обеспечения скрининг - диагностики функционального состояния обучающихся для выявления опасности развития коллапсоидальных осложнений на основе специализированных аппаратно-программных комплексов»).

Экспериментальные исследования выполнялись совместно с кафедрами ГОУ ВПО «Саратовского государственного медицинского университета им. В.И. Разумовского Росздрава»: кафедрой факультетской педиатрии, кафедрой пропедевтики детских болезней, детской эндокринологии и диабетологии, кафедрой глазных болезней.

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, **опубликовано** 12 работ, в том числе 2 статьи в журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 учебно-методическое пособие, тезисы 8 докладов на всероссийских и международных конференциях. Также получено 2 положительных решения о выдаче патента на изобретение.

Личный вклад автора состоит в:

- проведении критического анализа литературных данных по теме диссертации;
- выполнении экспериментальных работ, связанных с температурными измерениями;
- выявлении закономерностей, определяющих вид временных зависимостей температуры дистальных фаланг во время окклюзии плечевой артерии;
- разработке модели динамики температуры глаз с учетом процесса моргания;
- разработке алгоритма построения кратчайшего незамкнутого пути, программ обработки тепловизионных данных;
- сопоставлении температурных данных с результатами измерений методами фотоплетизмографии, доплерографии и реографии;
- анализе полученных результатов и участии в формулировании научных положений.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста, включая 40 рисунков, 1 таблицу, 1 приложение. Список литературы содержит 108 наименований и изложен на 11 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, описана практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первом разделе описаны зоны поверхности тела человека, отличающиеся высокой информативностью температурных измерений, приведен критический анализ современного состояния исследований температурной динамики верхних конечностей и области глаз, обосновано использование тепловизионного метода для анализа пространственно-временной динамики температуры.

Во втором разделе приведены результаты исследований динамики температуры кистей верхних конечностей в состоянии покоя, изучены особенности температурной динамики конечностей, связанной с состоянием ишемии и гиперемии во время проведения окклюзионной пробы.

В результате, с помощью обработки динамических термограмм кистей, регистрируемых в течение интервалов времени длительностью 17-30 мин, проанализированы спектры колебаний температуры конечностей (рис. 1, а). Установлено, что спектры колебаний температуры содержат гармоники в диапазоне частот 0,003-0,006 Гц (период ~ 3 -5 мин).

Получены карты распределения амплитуд колебаний температуры кистей с помощью вычисления в каждой точке термограммы средней мощности спектра в полосе 0.001 - 0.01 Гц методом быстрого преобразования Фурье (рис. 1, б).

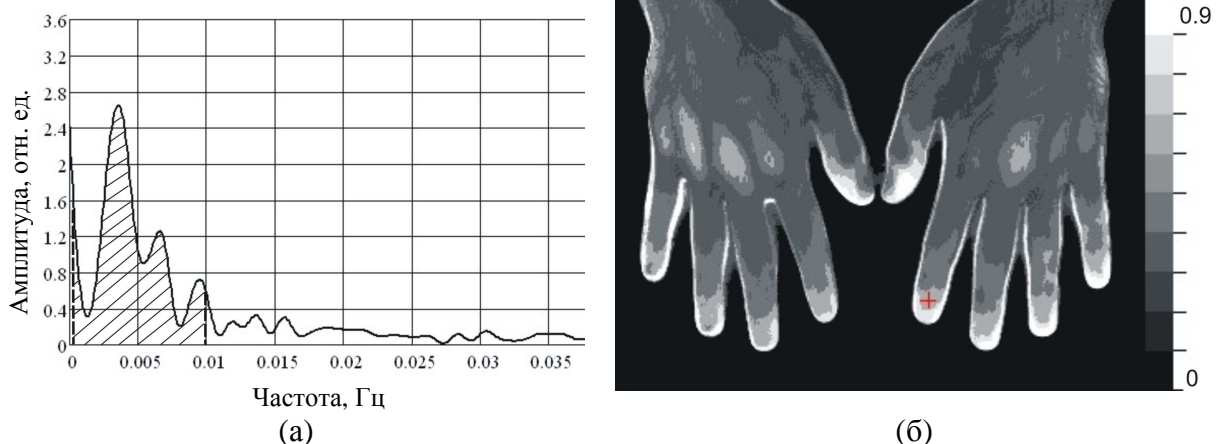


Рис. 1. Иллюстрация спектрального анализа термограмм, а– спектр колебаний температуры в точке пальца, отмеченной знаком “+”, б –карта распределения колебаний температуры

Для здорового испытуемого карта колебаний температуры (рис. 1, б) показывает симметричное распределение амплитуды для левой и правой кистей, пространственное распределение колебаний демонстрирует мак-

симальную амплитуду в области дистальных фаланг пальцев и постепенно уменьшающиеся значения амплитуды в проксимальном направлении. В связи с этим при разработке методов диагностики, основанных на регистрации динамики температуры кистей, целесообразно проводить измерения именно на дистальных фалангах пальцев.

Изучены особенности нормальной температурной реакции кистей рук на окклюзионную пробу (рис. 2), заключающуюся во временном пережатии плеча манжетой (создании окклюзии). При этом происходит нарушение кровоснабжения конечности, что провоцирует возникновение сосудистых реакций, изменение параметров кровотока и соответствующие температурные изменения на поверхности кожи.

Окклюзионная проба выполнялась при полном пережатии артерий и вен манжетой с давлением выше систолического (около 160 мм.рт.ст.), длительность предокклюзионного периода составляла 30-180 с, окклюзионного – 120 с, постокклюзионного – 120-180 с.

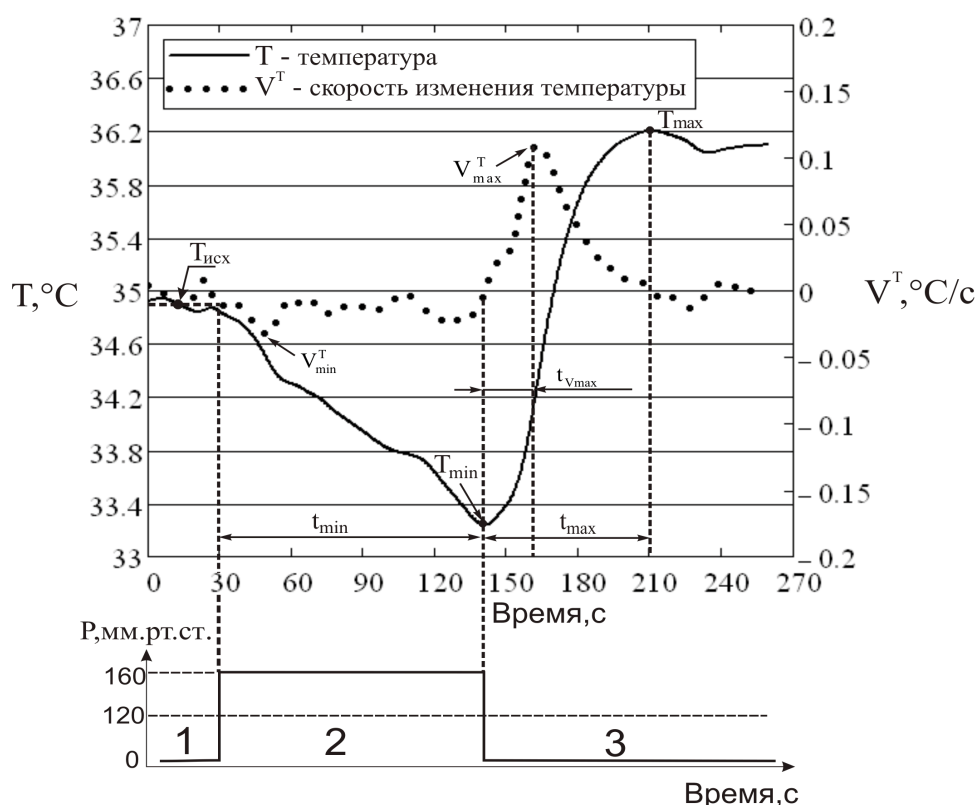


Рис. 2. Параметры временной зависимости температуры фаланг пальцев при проведении окклюзионной пробы. На графике снизу обозначено изменение давления манжеты в периоды: 1 – предокклюзионный, 2 – окклюзионный, 3- постокклюзионный

Для количественной оценки динамики температуры использовались значения исходного уровня температуры фаланг в предокклюзионный период, минимальной температуры в период окклюзии, и максимальной температуры в постокклюзионный период, а также разности этих температур, вычислялись скорости изменения температуры V^T в различные периоды проведения окклюзионной пробы (рис. 2).

В предокклюзионный период измерялась температура, характерная для состояния покоя, при нагнетании воздуха в манжету и полном пережатии плеча, наступало состояние ишемии, после снятия манжеты к тканям поступал новый объем крови с температурой около 37°C , что в норме провоцировало развитие состояния гиперемии с открытием большого числа резервных капилляров, избыточным заполнением тканей кровью и повышением температуры конечности выше исходной.

Таким образом, окклюзионная проба представляет собой последовательную смену физиологических состояний покоя, ишемии и гиперемии. В отличие от таких методов функциональной диагностики как спектральная ультразвуковая доплерография, импедансная реография, сфигмография и фотоплетизмография температурные измерения позволяют проводить непрерывный мониторинг состояния конечности в течение всей пробы, даже в отсутствие пульсирующего характера кровотока. По сравнению со многими методами функциональной диагностики преимуществом тепловизионных измерений температурной динамики конечностей является их бесконтактность, пренебрежимо малая тепловая инерционность датчика, воз-

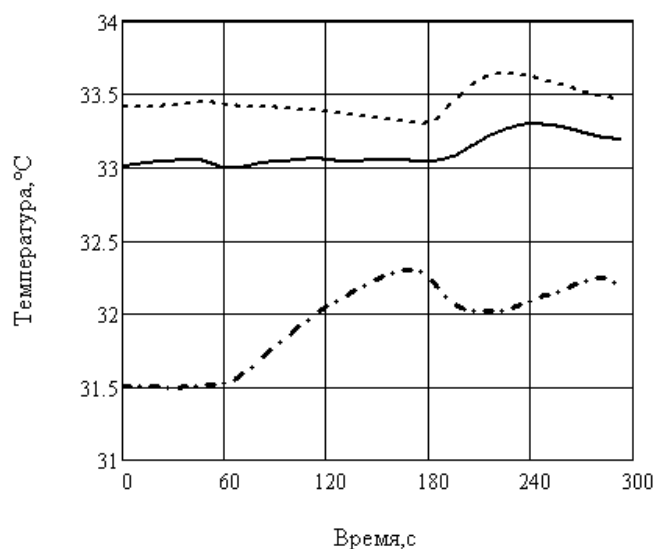


Рис. 3. Динамика температуры в области предплечья.

- температура кожи между артерией и веной,
- температура кожи в зоне проекции артерии,
- .- температура кожи в зоне проекции вены

можность измерения в градусах - единицах, имеющих четкий физический смысл, и позволяющих проводить объективное сравнение параметров между различными испытуемыми.

Одновременные измерения колебаний пульсового кровенаполнения методом фотоплетизмографии и температуры фаланг пальцев во время окклюзионной пробы показали согласованное изменение объемного кровенаполнения фаланг пальцев и температуры, изменение температуры происходит с задержкой 20-30с., что обусловлено инерционно-

стью передачи тепла от крови к поверхности кожи. Таким образом, во время проведения окклюзионной пробы изменение объемного кровотока является главной причиной изменения температуры на поверхности кожи.

Температурные процессы во время кратковременной остановки кровотока

Во время окклюзии динамические температурные процессы могут наблюдаться не только в области фаланг пальцев, но и в области проекции вен и артерий на поверхность кожи (см. рис. 3). На приведенных зависимостях видно, что до окклюзии температура артерий предплечья выше температуры окружающих тканей, температура вен ниже температуры окружающих тканей, так как кровь возвращается из дистальных отделов конечности.

Во время окклюзии температура артерий снижается, температура вен растет. Это может происходить вследствие отдачи тепла артерий к окружающим тканям, а тепла окружающих тканей - к венам. Другой причиной изменения температуры во время окклюзии может быть изменение кровенаполнения артерий и вен во время окклюзии.

Ультразвуковые измерения во время окклюзионной пробы показали, что ниже манжеты во время окклюзии происходит уменьшение диаметра артерий и увеличение диаметра вен. Зарегистрировано также увеличение сопротивления дистальных фаланг пальцев переменному току, что является показателем постепенного уменьшения кровенаполнения тканей фаланг.

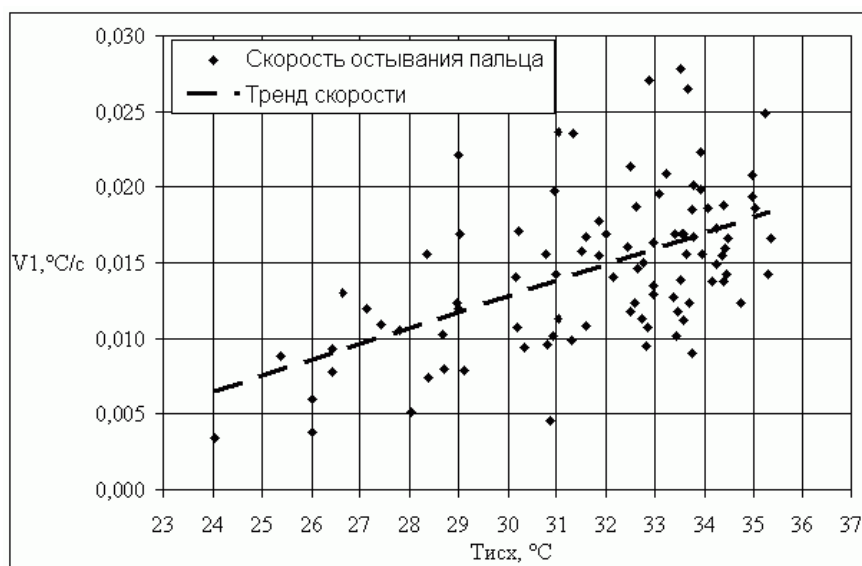


Рис. 4. Распределение средней скорости остывания фаланг пальцев по мере возрастания исходной температуры при проведении окклюзионной пробы для 95 пациентов

Это доказывает, что во время окклюзии в конечности ниже манжеты протекают медленные гемодинамические явления, заключающиеся в закрытии капилляров фаланг пальцев, уменьшении диаметра артерий, увеличении диаметра вен. Во время окклюзии перечисленные процессы способствуют увеличению температуры кожи в зоне проекций вен и уменьшению – в зоне проекций артерий.

На группе из 95 человек проанализировано соответствие процесса остывания фаланг пальцев закону остывания Ньютона, в соответствии с которым скорость остывания тела пропорциональна разности температур окружающей среды и данного тела.

Закон остывания описывается следующим выражением:

$$-\frac{dT(t)}{dt} = k(T(t) - T_{\text{среды}}), \quad (1)$$

где $T_{\text{среды}}$ - постоянная температура окружающей среды, коэффициент $k = \frac{hS}{cm}$, где h - коэффициент теплоотдачи [Дж/(с м²К)], S – площадь анализируемой поверхности [м²], c – удельная теплоемкость тела [Дж/(К кг)], m - масса охлаждаемого объема тела [кг].

Решение уравнения (1) может быть записано в следующем виде:

$$T_{\text{тела}}(t) = T_{\text{среды}} + (T_{\text{тела}}^0 - T_{\text{среды}}) \cdot e^{-kt}, \quad (2)$$

где $T_{\text{тела}}^0$ - температура тела в начальный момент времени.

Температура более горячего тела с течением времени экспоненциально приближается к температуре окружающей среды. В соответствии с законом (1) скорость остывания фаланг пальцев должна быть пропорциональна разности температур между фалангами пальцев и окружающей средой. По условиям эксперимента $T_{\text{среды}} = const$, поэтому скорость остывания должна зависеть только от начальной температуры фаланг.

Анализ распределения скоростей остывания фаланг (рис. 4) для испытуемых с различной исходной температурой фаланг показал наличие тенденции к увеличению скорости остывания при увеличении исходной температуры, что согласуется с законом остывания тел Ньютона. Большинство значений скоростей сосредоточено в диапазоне 0.07-0.2 °С/с. Разброс значений скоростей относительно линейной зависимости можно объяснить индивидуальной сосудистой реакцией на окклюзию. Данная реакция приводит к зарегистрированному уменьшению наполнения тканей кровью, что уменьшает теплоемкость и ускоряет процесс остывания.

В результате показано, что во время окклюзии происходят медленные гемодинамические явления, вследствие индивидуальных сосудистых реакций. Эти реакции уменьшают кровенаполнение дистальных фаланг пальцев и вносят дополнительный вклад в процесс их остывания. Таким

образом, во время периода окклюзии индивидуальность сосудистых реакций проявляется в различной скорости остывания фаланг пальцев, что позволяет использовать скорость остывания пальцев в качестве дополнительного диагностического параметра.

Температурные процессы после восстановления кровотока

В постокклюзионный период после открытия кровотока постепенно наступает состояние гиперемии, в основном, вследствие повышенного механического воздействия пульсирующего кровотока на суженную стенку артериальных сосудов. Воздействие осуществляется в поперечном и в продольном направлениях, данное воздействие стимулирует расширение сосудов, повышение кровенаполнения крупных артерий и микроциркуляторного русла. Описанные процессы приводят к резкому повышению температуры пальцев кисти в постокклюзионный период (см. рис. 2). По мере расширения сосудов оказывается всё меньшее механическое воздействие на стенку сосуда, одновременно снижается активность выработки веществ - дилататоров, нормализуется величина сосудистого просвета. Монотонное возрастание объемного кровотока и температуры во время гиперемии сменяется появлением колебаний температуры фаланг пальцев.

Рассмотрение особенностей температурных процессов верхних конечностей в покое и во время проведения окклюзионной пробы для нормальных испытуемых позволило провести исследование и интерпретацию реакции на окклюзию у пациентов с возможным нарушением регуляции тонуса сосудов.

Исследование реакции на прерывание и восстановление естественного кровотока у пациентов с нарушениями регуляции тонуса сосудов

Проведены исследования группы из 15 пациентов с нарушениями вегетативной регуляции тонуса сосудов, сочетающейся с недифференцированной дисплазией соединительной ткани (НДСТ). Зависимости температуры от времени теста анализировались с использованием ранее введенных параметров динамики температуры. Результаты исследований приведены в таблице.

В случае сосудистых нарушений данные таблицы показывают сниженный уровень исходной, минимальной и максимальной температур (параметры $T_{исх}$, T_{min} , T_{max}) по сравнению с контролем. Также снижена средняя скорость изменения температуры в постокклюзионный период (параметр V_2) и динамика температуры в окклюзионный и постокклюзионный периоды (параметры $\Delta T_{1,2}$, $\Delta T_{2,3}$), значение максимальной температуры в постокклюзионный период ниже исходной температуры (параметр $\Delta T_{1,3}$).

Таблица

Параметры зависимостей температуры от времени проведения окклюзионной пробы

	$T_{исх}, ^\circ C$	$T_{min}, ^\circ C$	$T_{max}, ^\circ C$	$\Delta T_1, ^\circ C$	$\Delta T_2, ^\circ C$	$\Delta T_3, ^\circ C$	$V_2, ^\circ C/c$
Контрольная группа (n=10)	32,49±2,42	30,92±2,58	34,38±1,36	1,57±0,49	3,46±1,66	1,9±1,42	0,056±0,019
Пациенты с НДСТ (n=15)	27,47±3,54	26,32±3,02	27,06±3,32	1,14±0,8	0,73±0,88	-0,4±0,88	0,02±0,033

В таблице представлены средние значения \pm среднеквадратичное отклонение. Здесь $\Delta T_1 = T_{исх} - T_{min}$, $\Delta T_2 = T_{max} - T_{min}$, $\Delta T_3 = T_{max} - T_{исх}$, $V_{2,3} = (T_3 - T_2)/t_{2,3}$.

Анализ температурной динамики у пациентов с сахарным диабетом показал наличие корреляции скорости возрастания температуры после снятия окклюзии со степенью выраженности периферической сенсомоторной нейропатии. С увеличением степени нейропатии наблюдалось снижение скорости возрастания температуры V_2 .

Таким образом, на основе результатов исследований температурной динамики конечностей во время проведения окклюзионной пробы был разработан и апробирован способ диагностики функционального состояния периферических сосудов.

В третьем разделе приведена модель динамики температуры поверхности глазного яблока с учетом процесса моргания.

Предварительно для изучения особенностей температурной динамики во время открытия и закрытия век строились зависимости средней температуры области роговицы от времени проведения теста с опусканием-подниманием век в случае отсутствия глазных болезней (рис. 5). На зависимости температуры от времени (рис.5) выделялось несколько характерных временных интервалов. В начальный интервал времени (интервал *A*) измерялся исходный уровень температуры роговицы. Затем глаза закрывались веком и регистрировалась температура века в течение интервалов *B* и *B*. Интервал *B* соответствует времени стабилизации температуры века. В конце интервала *B* глаза снова открывались и регистрировался процесс восстановления температуры до исходного уровня в интервалах *Г*, *Д*. Изменение температуры в течение интервала *Г* связано со стабилизацией распределения слезы по поверхности роговицы, интервал *Д* определяет время восстановления температуры до исходного уровня.

Температура в начале интервала *B* определяет температуру поверхности века. При выполнении условия выравнивания температур глазного яблока и века (интервал *B*) температура в начале интервала *Г* соответствует температуре конъюнктивы века.

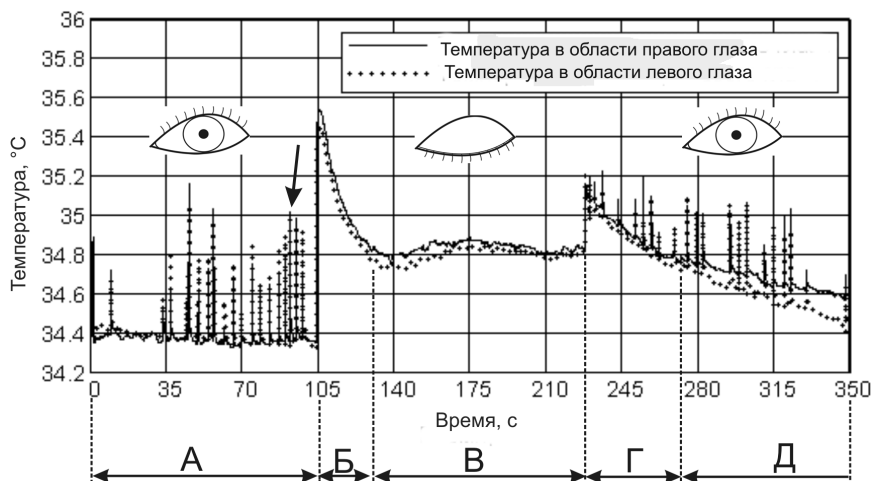


Рис. 5. Зависимость средней температуры в области глаза от времени теста для человека без глазных патологий

Дополнительный вклад в значение измеряемой температуры дают процессы распределения и испарения слезы во время моргания, которые приводят к изменению температуры роговицы. Поэтому для повышения точности и надежности контроля температуры необходимо осуществлять динамическую тепловизионную съемку полного акта мигания и измерять температуру склеры или роговицы в конце акта мигания перед очередным закрытием века, в момент стабилизации температуры поверхности глазного яблока. Процесс измерения температуры у группы пациентов проводился с учетом указанных особенностей.

Тепловизионные измерения группы пациентов проводились до операции, на 1 и 3 дни после операции по замене хрусталика интраокулярной оптической линзой. В послеоперационном периоде пациентам назначались антибактериальные, противовоспалительные глазные капли. Съемку осуществляли в процессе проведения теста с опусканием – подниманием век. Время регистрации начального уровня температуры открытых глаз составляло 30 с, время, в течение которого веко закрыто - 90 с, время наблюдения после открытия век – 60 с. По данной зависимости определялась исходная температура в области роговицы, температура открытого, закрытого века, а также температура конъюнктивы века.

Использование модели температурной динамики глаз с учетом процесса моргания позволило разработать тепловизионный метод контроля эффективности медикаментозного воздействия на состояние глаз.

В четвертом разделе описаны особенности неоднородных термограмм, предложен метод обработки динамических термограмм, предназначенный для количественного описания пространственно-временного распределения температуры, приведены примеры обработки термограмм с описанием изменения пространственной неоднородности температуры с

течением времени. Для оценки неоднородности распределения температуры строился кратчайший незамкнутый путь (КНП) для интересующего диапазона температур. Этот путь соединяет линиями точки поверхности с близкими значениями температуры. С увеличением неоднородности пространственного распределения температуры точки с близкими температурами будут распределяться по поверхности объекта, и длина кратчайшего незамкнутого пути будет возрастать.

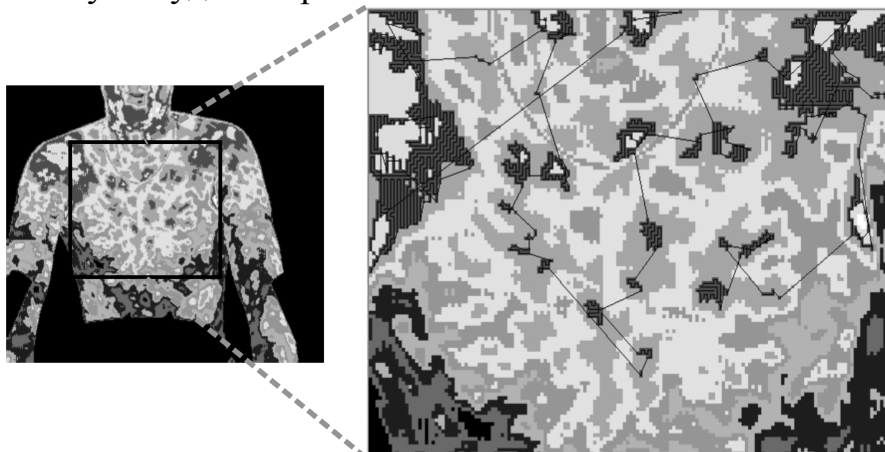


Рис. 6 Построение КНП в области груди

Таким образом, изменение длины КНП может быть связано с изменением неоднородности пространственного распределения температуры. На рис. 6 представлено построение КНП в области груди для человека, проходившего тренировку на велотренажере. На рисунке темные области соединены линиями, составляющими кратчайший незамкнутый путь.

Среднее межпиксельное расстояние \bar{L}_m , характеризующее пространственную неоднородность распределения температуры, определялось следующим образом:

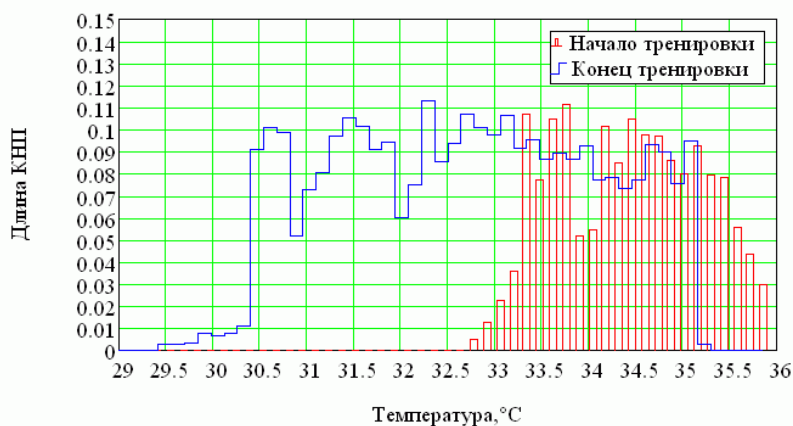
$$\bar{L}_m = \frac{1}{N^m - 1} \cdot \sum_{i=1}^{N^m - 1} l \min_i^m, \quad (3)$$

$$l \min_i^m = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}, \quad (4)$$

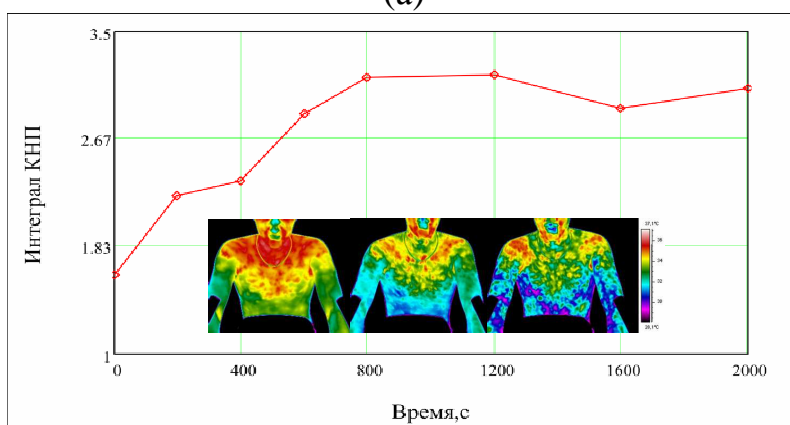
где m – номер класса, $m=1..M$; N^m – кол-во точек в классе m ; $l \min_i^m$ – i -ое минимальное расстояние в классе m ; X_i, Y_i – координаты i -й точки ближайшей к точке с координатами x, y . Для представления длины КНП в диапазоне от 0 до 1 значения \bar{L}_m нормировались к максимальному межпиксельному расстоянию выделенной зоны $l_{\max} = \sqrt{H^2 + W^2}$, где H – высота, W – ширина зоны термограммы.

Расчет введенной характеристики неоднородности пространственного распределения температуры \bar{L}_m позволяет проследить временную динамику температуры на поверхности объекта. На рис. 7, а приведена диаграмма длин КНП в зависимости от диапазонов температур для начала и

конца тренировки. В конце тренировки диаграмма показывает увеличение неоднородности пространственного распределения для точек с низкой температурой, расширение и смещение диапазона температур в сторону низких температур. Данные процессы во время тренировки соответствуют нормальной терморегуляции и охлаждению поверхности тела за счет потоотделения на поверхности кожи. Сумма длин КНП для всех поддиапазонов температур (интеграл КНП) может характеризовать общее изменение



(а)



(б)

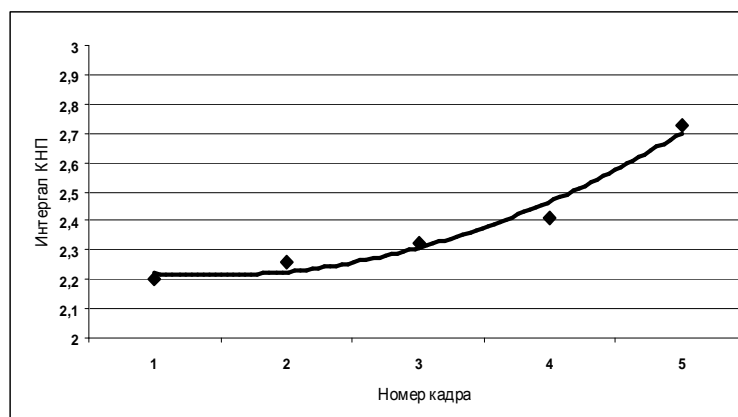
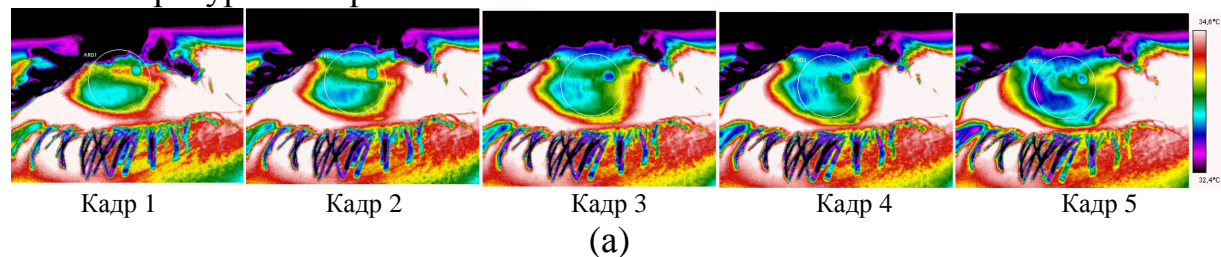
Рис. 7. Построение КНП. а- диаграмма длин КНП, б- изменение интеграла КНП во время тренировки на велотренажере

неоднородности поверхностного распределения температуры. На рис. 7, б приведена зависимость интеграла КНП от времени тренировки. Возрастающее значение интеграла КНП соответствует увеличению неоднородности распределения температуры на приведенных термограммах.

Аналогично оценивалось изменение неоднородности распределения температуры на поверхности глазного яблока во время акта моргания (рис.8), при этом слезная динамика определяет изменение неоднородности температуры поверхности глазного яблока.

В результате информация о кратчайшем незамкнутом пути позволяет исследовать пространственно-временные изменения температуры, инте-

гравльно характеризовать степень неоднородности термограмм различных участков тела человека и других объектов с неоднородным распределением температуры поверхности.



(б)

Рис. 8. Подсчет КНП для термограммы глаз. а- изменение вида термограмм глаз после открытия века, б – изменение интеграла КНП от кадра к кадру

В **заклучении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные выводы и результаты:

- Использование динамической модели, описывающей вид временных зависимостей температуры дистальных фаланг кисти при создании окклюзии плечевой артерии, позволяет выявлять нарушения регуляции кровотока в периферических сосудах.
- Уменьшение температуры кисти во время полной окклюзии плечевой артерии происходит не только за счет остывания конечности, но и за счет медленного вытеснения объемов крови из сужающихся артерий в вены. В отличие от многих других методов контроля состояния конечности во время окклюзионной пробы, контролируя температуру, можно получить информацию о протекании сосудистых реакций в периферических сосудах не только до и после, но и во время окклюзии, когда пульсирующий кровоток отсутствует.
- Анализ процесса остывания пальцев кисти во время полной окклюзии показал наличие тенденции к увеличению скорости остывания при увели-

чении исходной температуры, что согласуется с законом остывания тел Ньютона. Разброс результатов относительно линейной зависимости объясняется индивидуальным для каждого испытуемого изменением кровенаполнения и теплоемкости тканей в течение периода окклюзии.

- Анализируя температуру поверхности глазного яблока, необходимо использовать модель, учитывающую процесс моргания, который оказывает существенное влияние на динамику температуры глаз. Измерение динамики температуры глаз во время моргания дает возможность для выявления патологий глаз, изменяющих нормальную температуру роговицы, температуру поверхности и конъюнктивы века, динамику выделения слезы.
- Длина кратчайшего незамкнутого пути (КНП), соединяющего изотермические точки термограммы, дает количественную оценку пространственно-временного распределения температуры поверхности во всем диапазоне температур биообъекта и позволяет исследовать распределение температуры одновременно в нескольких температурных диапазонах. Анализ поверхности глазного яблока во время моргания и поверхности торса во время физической нагрузки на велотренажере показал, что суммарная длина КНП возрастает при увеличении неоднородности термограмм исследуемых объектов.

Список опубликованных работ по теме диссертации

*- журналы из списка ВАК РФ.

Статьи

- 1.* *Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.А. Протопопов, А.А. Сагайдачный, А.П. Рытик, Е.В. Мирошниченко.* Оценка функционального состояния кровеносных сосудов по анализу температурной реакции на окклюзионную пробу // Саратовский научно-медицинский журнал. 2009. № 4. С. 554 – 558.
- 2.* *Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Т.Г. Каменских, Е.С. Сумарокова, А.А. Сагайдачный, Н.Р. Лопатинская.* Тепловизионный контроль состояния глаз у больных после факоэмульсификации катаракты // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. №1. С. 8-12.
3. *Т.Г. Каменских, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.С. Сумарокова, В.А. Галанжа, А.А. Сагайдачный, Н.Р. Лопатинская.* Тепловизионное исследование в изучении влияния препарата Офтаквикс на течение послеоперационного периода факоэмульсификации катаракты //РМЖ. Клиническая офтальмология. 2009. Том 10. №3. С. 104-107.

Учебно-методическое пособие

4. Тепловизионная биомедицинская диагностика. *Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А., Усанов Д.А.* Изд-во Сарат. ун - та. 2009. 118 с.

Тезисы докладов на конференциях

5. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Протопопов А.А., Сагайдачный А.А., Рытик А.П., Мирошниченко Е.В.* Тепловизионная диагностика тонического состояния артериальных сосудов // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2008: Материалы ежегод. Всерос. науч. школы-семинара / Под ред. проф. Д.А.Усанова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2008. С. 24-26.
6. *Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А., Фомин А.В., Усанов Д.А.* Метод оценки пространственной неоднородности распределения температуры// Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2009: Материалы ежегод. Всерос. науч. школы-семинара / Под ред. проф. Д.А.Усанова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. С. 161 – 165.
7. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Каменских Т.Г., Сумарокова Е.С., Сагайдачный А.А., Лопатинская Н.Р.* Тепловизионный контроль состояния глаз у больных после факэмульсификации катаракты// Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2009: Материалы ежегод. Всерос. науч. школы-семинара / Под ред. проф. Д.А.Усанова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. С. 49 – 52.
8. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А.* Тепловизионный анализ вариабельности температуры конечностей в состоянии покоя и в процессе проведения окклюзионной пробы // Проблемы оптической физики и биофотоники: мат. 13-й междунар. конф. молодежн. научн. школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. – Саратов: Изд - во «Новый ветер», 2009.
9. *Сагайдачный А.А.* Функциональная тепловизионная диагностика регуляторной функции периферических сосудов // Всерос. мол. Выставка конкурс прикладных исследований, изобретений, и инноваций. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2009. – 232 с.
10. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А.* Динамика температуры конечностей во время проведения окклюзионной пробы// III Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010», 21-25 июня 2010 г, Троицк, Россия. Т. 4. С. 129-131.
11. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А., Фомин А.В.* Спектральный анализ колебаний температуры конечностей тела человека // III Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010», 21-25 июня 2010 г, Троицк, Россия, Т.3. С. 102-104.
12. *Averyanov A., Skripal A., Tkacheva E., Sagaydachnyi A.* Microcirculation reactivity in children with type 1 diabetes mellitus // 49th Annual Meeting of the European Society for pediatric Endocrinology (ESPE), September 22-25, 2010, Prague, Czech Republic. С. 177.

Положительные решения о выдаче патента

- Положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2009117567/14(024139) от 12.05.2009. Способ диагностики функционального состояния периферических сосудов. Авторы: *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Протопопов А.А., Сагайдачный А.А.*
- Положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2009132829/14(046083) от 31.08.2009. Способ контроля медикаментозного воздействия на состояние глаз. Авторы: *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Каменских Т.Г., Сагайдачный А.А., Лопатинская Н.Р.*

Список цитированной литературы

1. Покровский В.М., Коротько Г.Ф., Наточин Ю.В. и др. Физиология человека. М.: Медицина, 1997. 368 с.
2. Иваницкий, Г.Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине // УФН. 2006. Т. 176, №12. С. 1293-1320.
3. Lawson R.N. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer // Canad. Med. Assoc. J. 1956. Vol. 75. P. 309 –310.
4. Иваницкий Г.Р. Тепловидение в медицине // Вестник РАН. 2006. Т. 76, №1. С. 48-62.

Сагайдачный Андрей Александрович

МЕТОДЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ