

Термотопография кистей рук здорового человека как основа для тепловизионной диагностики (нарративный обзор)

М. Г. Воловик, Д. Б. Н.^{1,2}

И. М. Долгов, Д. М. Н.¹

¹ООО «Дигнозис», Москва

²ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения России, г. Нижний Новгород

Thermotography of the hands of a healthy person as a basis for thermal diagnosis (narrative review)

M. G. Volovik^{1,2}, I. M. Dolgov¹

¹Dignosys LLC, Moscow

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Privolzhsky Research Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Nizhny Novgorod

Резюме

Тепловизионные исследования кистей рук — целый мир результатов, используемых как в биомедицинской области, так и в ряде иных прикладных направлений человеческой деятельности (например, в биометрии). Статья представляет собой обзор литературы, посвященный методологии сбора, анализа и представления тепловизионных данных об этом сегменте тела, а также собственно результатам широкого спектра исследований нормальных температурных распределений и реакций у здоровых добровольцев. Последнее важно как нормативная база для последующей разработки температурных критериев любых патологий, имеющих проявления в кистях.

Ключевые слова: тепловидение, кисти рук, физиология терморегуляции кистей, методология, нормальное температурное распределение.

Сокращения: ИК — инфракрасный, ТПВ — тепловизионный, ТА — термоасимметрия, ПАГ — проксимально-дистальный градиент, ХП — холодная проба, АВШ — артериовенозный шунт, ROI (region of interest) — область интереса.

Summary

This is a narrative literature review of current status of normal hand thermography, methods and technique of their acquisition and analysis. Some physiological processes underlying the thermography picture formation also discussed.

Key words: thermal imaging, hand, physiology of hand thermoregulation, methodology, normal temperature distribution.

Введение

Кисти рук составляют 6–7% общей площади поверхности тела, но кровотоков в них, изменяясь в десятки и сотни раз, обеспечивает эффективную регуляцию теплоотдачи. В целом, у человека в разных контекстах величина кожного кровотока может изменяться от 1–2 до 30% минутного объема кровообращения (который в покое равен примерно 5 л/мин.) [1].

Тепловидение, или термография — получение видимого изображения объекта на основании его собственного инфракрасного (ИК) излучения, способ дистанционной регистрации пространственного распределения температур на поверхности объектов. Для медицинского использования метода важно, что при любом нарушении существующих нормальных топографических взаимоотношений и морфо-функциональных характеристик биологических тканей независимо от причины происходит изменение их энергообеспечения и, следовательно, ИК излучения от этой области и ее температуры.

Доказано, что участок здоровой кожи в тепловизионном (ТПВ) отображении аналогичен экрану, с которого можно считать опосредованные данные о состоянии периферических нервов, спинного мозга, стволовых и корковых отделов головного мозга, сосудов и обменных процессов, функциональном состо-

янии организма в целом [2]. Поскольку паттерн ИК излучения от любых биологических тканей определяется, прежде всего, локальной и системной регуляцией кровотока в них [3], «норме» соответствуют здоровые кожные покровы с адекватным кровоснабжением и ненарушенными нервными путями управления терморегуляторными процессами.

В соответствии с этим положением можно выделить следующие основные группы эндогенных патологических контекстов, относящихся к кистям рук:

- прерывание одного или нескольких звеньев в многоуровневой системе терморегуляции (причины: неврологическая патология);
- измененное кровоснабжение при интактной терморегуляции (причины: сосудистая, эндокринная и иная патология различного генеза);
- поврежденные кожные покровы при интактной терморегуляции и ненарушенном (как минимум, магистральном) кровоснабжении (причины: дерматология, ожоги, послеожоговые рубцы и иное).

Кроме этих трех групп проблем характер ИК излучения от кистей может меняться при воспалительных и дегенеративных процессах в суставах (артриты, артрозы), болезнях соединитель-

1. Введение.

Кисти рук составляют 6-7% общей площади поверхности тела, но кровоток в них, изменяясь в десятки и сотни раз, обеспечивает эффективную регуляцию теплоотдачи. В целом, у человека в разных контекстах величина кожного кровотока может изменяться от 1-2 до 30% минутного объема кровообращения (который в покое равен примерно 5 л/мин.) [1].

Тепловидение, или термография – получение видимого изображения объекта на основании его собственного инфракрасного (ИК) излучения, способ дистанционной регистрации пространственного распределения температур на поверхности объектов. Для медицинского использования метода важно, что при любом нарушении существующих нормальных топографических взаимоотношений и морфо-функциональных характеристик биологических тканей независимо от причины происходит изменение их энергообеспечения и, следовательно, ИК излучения от этой области и ее температуры.

Доказано, что участок здоровой кожи в тепловизионном (ТПВ) отображении аналогичен экрану, с которого можно считывать опосредованные данные о состоянии периферических нервов, спинного мозга, стволовых и корковых отделов головного мозга, сосудов и обменных процессов, функциональном состоянии организма в целом [2]. Поскольку паттерн ИК излучения от любых биологических тканей определяется, прежде всего, локальной и системной регуляцией кровотока в них [3], «норме» соответствуют здоровые кожные покровы с адекватным кровоснабжением и ненарушенными нервными путями управления терморегуляторными процессами.

В соответствии с этим положением можно выделить следующие основные группы эндогенных патологических контекстов, относящихся к кистям рук:

- прерывание одного или нескольких звеньев в многоуровневой системе терморегуляции (причины: неврологическая патология);
- измененное кровоснабжение при интактной терморегуляции (причины: сосудистая, эндокринная и иная патология различного генеза);
- поврежденные кожные покровы при интактной терморегуляции и ненарушенном (как минимум, магистральном) кровоснабжении (причины: дерматология, ожоги, послеожоговые рубцы и иное).

Кроме этих трех групп проблем характер ИК излучения от кистей может меняться при воспалительных и дегенеративных процессах в суставах (артриты, артрозы), болезнях соединительной ткани, нарушениях комбинированной этиологии (возрастные изменения, стебель Филатова), в том числе – при психофизиологических реакциях.

Цель: Обзор современных исследований термотопографии кистей рук в норме и при патологии, перспективных в плане создания на их основе систем поддержки принятия решения в ТПВ скрининг-диагностике и мониторинге лечения.

Достижение этой цели возможно в рамках оценки имеющихся в литературе решений следующих задач: 1) разработка методологии (протоколов сбора и анализа исходных ТПВ данных); 2) описание границ нормального температурного распределения на кистях рук здорового человека, которые должны явиться нормативными (эталонными) для определения любых патологий, имеющих проявления в этой области тела.

2. Протокол сбора ТПВ информации о кистях рук: общие правила, пространство анализируемых признаков.

Положения общепринятого стандартного протокола подготовки пациента и процедуры ТПВ обследования описаны в ряде работ [4, 5], мы остановимся на деталях, значимых для кистей рук. Так, примерно за 4 часа до обследования рекомендовано избегать тяжелой пищи, после приема которой желудок «обкрадывает» кожный кровоток, что приводит к снижению температуры кожи в конечностях [6]. Статистическими методами оценены оптимальные процент и время акклиматизации (адаптации), при этом

между женщинами и мужчинами не обнаружено статистически значимых различий в терморегуляции кистей рук, но имеются различия в динамике акклиматизации между дистальными и проксимальными фалангами пальцев [7]. Кроме того, в термонеutralной зоне и в акклиматизированных условиях сосудистые реакции могут быть вызваны у здоровых людей не терморегуляторными причинами, например, психологическим стрессом. Поэтому корректные протокольные условия съема ТПВ информации должны жестко соблюдаться не только в отношении физических условий среды, но и в психологическом отношении [8].

Следует стремиться к стандартной укладке кистей рук у больных и соблюдению технических условий регистрации, что немаловажно для клинической ТПВ диагностики повреждений и заболеваний периферических нервов и сосудов верхних конечностей. Регистрация термограмм кистей рук, в зависимости от локализации зон интереса (ROI) и задач исследования, наиболее информативна в позициях: тыльная поверхность, ладонная поверхность, на наружном ребре (при необходимости – обычно при нарушениях в зоне иннервации лучевого нерва) с доступностью для обследования 1-го межпальцевого промежутка и «табакерки» [9]. Укладка должна быть по возможности симметричной, обзору должны быть доступны ROI, простирающиеся при обследовании кистей до границы средней и нижней трети предплечья. Пальцы разведены, но без напряжения. Желательно положение III пальцев перпендикулярно линии пола, левый и правый III пальцы параллельны друг другу [10, 11]. Следует учитывать зависимость температурных данных от положения кистей (прежде всего, выше или ниже уровня сердца) [5]. Возможны и нестандартные укладки кистей при решении частных задач [12].

Для предотвращения искажений ИК потока от кистей последние в максимально удобном положении помещают на теплоизолирующую подложку (оптимально – сетка, натянутая на ребра ящика), под предплечья подкладывают мягкую прокладку во избежание сдавливания сосудов и нервов. Ось визирования при обследовании должна быть перпендикулярна плоскости поверхности кистей. Фокусное расстояние при регистрации выбирают таким образом, чтобы степень заполнения ТПВ кадра полезным сигналом («рабочая зона» – значимая для анализа область в кадре) позволяла максимально эффективно использовать площадь ИК матрицы тепловизора [13].

Традиционно используется укладка в положении стоя [4]. Однако в ряде исследований показано влияние положения тела на регистрируемые ИК характеристики в разных его частях [14, 15] и выявлена дополнительная провокационная нагрузка на функциональную систему регуляции периферического кровотока у стоящих [16, 17]. С учетом того, что в положении сидя базовые характеристики термопаттернов и термореакций сохраняются в большинстве клинических ситуаций, при обследовании некоторых больных целесообразно применять более щадящие варианты укладок [18].

При выборе стороны кисти для обследования одним из аргументов в пользу регистрации температуры с тыльной стороны является различие в терморегуляторном ответе орошенной и безволосой кожи, которые по-разному реагируют на температурные раздражители [19]. Существуют также различия в температурных порогах локальных сосудистых ответов [20]. Однако ТПВ измерения температуры на тыле кистей показали, что термограмма не содержит буквального отражения пространственно-временного паттерна термочувствительных рецепторов кожи, отвечающих за ввод информации в систему терморегуляции [21].

К. Ammer [22] разъясняет значение измерений температуры ладонной поверхности кистей рук. В его списке: референтные значения нормы; оценка состояния температурного комфорта и отклонений от него; ревматоидный и псориатический артрит, остеоартрит; комплексный регионарный болевой синдром; болезни периферического кровообращения; лимфедема; феномен Рейно; вибрационная болезнь; холододовый невроаскулит; холододовая травма; карпальный, кубитальный и другие туннельные синдромы; синдром лестничной мышцы; гипергидроз и онлайн-контроль его хирургического лечения; терморегуляторные

реакции на упражнения, температурные и эмоциональные стимулы (психологический стресс); геморрагический шок; коллапс; сахарный диабет; факторы риска кардиоваскулярных заболеваний; контроль биологической обратной связи; эффекты лекарственных препаратов. Возможен также контроль уровня спинальной анестезии [23].

Мы не находим в этом списке дополнительных возможностей метода по сравнению с измерениями на тыльной (дорсальной) поверхности кисти. Добавим также: спинальные неврологические синдромы (рефлекторные и корешковые, а также симпатические при спинальной травме на уровне Th4-6) [2, 9]; исследование механизмов регуляции периферического кровотока и терморегуляции (как локальных, так и системных [2, 24, 25]), нарушений толерантности к глюкозе и сахарного диабета на ранней стадии (см. статью [26]). При этом только оценку гипергидроза лучше проводить с ладонной стороны, для артритов мы считаем тыл кисти информативнее, для всего остального – скорее, равнозначно. В то же время, технически для испытуемых обследование тыла удобнее, не говоря о пациентах с двигательными или болевыми ограничениями.

При анализе данных следует учитывать, что даже в контролируемых условиях (один и тот же субъект и протокол, одно и то же время дня и условия среды) температура пальцев изо дня в день флуктуирует примерно на $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ [27]. Температура кожи ниже утром и повышается в течение дня, что свидетельствует о связи между кожным кровотоком и циркадным ритмом. При этом руки – область тела с наибольшим таким повышающимся температурным трендом [28, 29]. Для уменьшения влияния циркадного ритма целесообразно проведение измерений всегда в одно и то же время дня [30-32].

Анализ широкого спектра физиологических и клинических контекстов, в которых производятся измерения кожной температуры, доказал обязательность стационарных протокольных условий регистрации и использования областей, которые надежно связаны с изучаемыми причинами изменения этих температур [33]. Многочисленные исследования достоверности, надежности и воспроизводимости ТПВ данных подтвердили основания высокой эффективности применения метода в медицине [34-37]. В частности, внутриклассовый коэффициент корреляции (ICС) составил при ТПВ измерениях на конечностях от 0,46 до 0,99, в большинстве работ превысив 0,8 [10, 36, 38-40].

Существует также обширный корпус работ, посвященных обработке и представлению ТПВ данных. Сюда относятся разработка автоматических методов выделения из фона контуров кистей при низком температурном контрасте [41, 42], сегментация областей интереса [43-45], поиск значимых признаков заболеваний, основанных на выборе областей интереса и способах их сравнения [46, 47], и ряд других направлений, в последние годы все больше ориентирующихся на применение технологий машинного интеллекта [48].

Пространство анализируемых признаков для кистей рук:

- 1) Термоасимметрия (ТА) – разница температур между корреспондирующими ROI слева и справа.
- 2) Локальная гипертермия (по разнице температур ΔT с окружающими тканями).
- 3) Локальная гипотермия (по тому же принципу).
- 4) Проксимально-дистальный градиент (ПДГ) в парах ROI «плечо/кисть» или «предплечье/кисть», «тыл кисти/ногтевые фаланги пальцев» и «основная фаланга/ногтевая фаланга» каждого пальца.
- 5) Специфические для данного сегмента тела признаки – анизотермия пальцев, ТА отдельных пальцев и разница температур локтевого и лучевого краев кисти.

3. Физиологические основы формирования нормальной ТПВ картины кистей рук.

В физиологических условиях терморегуляторные реакции вазоконстрикции / вазодилатации происходят, главным образом, в конечностях, имеющих более высокое отношение площади поверхности к объему, больший размах тепловых колебаний за счет вегетативной активности, «отслеживающей» температуру окружающей среды в сравнении

с температурой кожных покровов и модулирующей кровотока на периферии для регуляции внутренней температуры тела [49]. Изучение температурного распределения и его динамики в верхних конечностях при разнообразных физиологических реакциях и состояниях у здоровых людей служит основанием для выработки ТПВ критериев множества сосудистых, нейропатических, воспалительных и иных заболеваний.

Артериовенозные анастомозы, или шунты (АВШ) расположены преимущественно в коже дистальных сегментов (акральные зоны – подушечки пальцев, зоны тенара и гипотенара, ногтевые ложа), где представлены также мелкие резистивные сосуды (артерии и артериолы) [50]. Эти области играют ключевую роль в вегетативной терморегуляции, и в богатых АВШ участках безволосой кожи изменения микроциркуляции являются доминирующей причиной флуктуаций температуры [51]. В пальцах, ладонях и стопах кожная температура зависит почти исключительно от перфузии, причем в кисти она связана прежде всего с перфузией пальцев, – возможно, вследствие незначительности метаболического вклада пястной области как «транзитной» для кровотока [52]. Утверждалось, что АВШ в коже конечностей, «не находясь под метаболическим контролем, не способны к реактивной гиперемии» [53]. Иную точку зрения доказывают эксперименты с параллельной регистрацией температурных и микроциркуляторных характеристик кончика пальца при его периодических пережатиях жгутом [54], где получена 98% корреляция данных с тыльной и ладонной стороны ногтевой фаланги в ходе окклюзии и в постокклюзионный период. В работе [55] сделан вывод, что «дорсальная поверхность дистальной фаланги является хорошей альтернативой для изучения симпатически связанных вазомоторных (нейрососудистых) реакций».

Связь температуры и кровотока в кистях – предмет многочисленных исследований. Показано, что температурный паттерн кистей и пальцев рук хорошо коррелирует с параметрами кровотока, измеренными ЛДФ [56-59], лазерной спеклографией (LSCI) [12], объемной плетизмографией [60]. Температурные градиенты кожи являются точной мерой терморегуляторной периферической вазоконстрикции, что позволяет использовать тепловидение в разнообразных контекстах, в том числе как дополнительный метод оценки риска кардиоваскулярных осложнений. Адекватность применения тепловидения в исследованиях кровотока доказывает и корреляция данных ТПВ измерений кожной температуры с изменениями перфузии и оксигенации в физиологических и патофизиологических контекстах [61].

ТПВ измерения акрального кровотока кожи легче по выполнению и проще анализируются по сравнению с прямыми методами измерения кровотока (ЛДФ и ФПГ) и широко используются как индикатор симпатических рефлекторных реакций на различные раздражители. Так, показано, что стимуляция симпатической нервной системы вызывает в коже кончиков пальцев почти немедленную вазоконстрикцию [62, 63]. Кисти рук являются удобной моделью для изучения местных эффектов вазоактивных веществ, например, токсинов. Интрадермальное введение пчелиного яда мелиттина позволило с помощью тепловидения установить динамику формирования болевого синдрома, закономерности рецепторных реакций, оценить степень и стадию развития патофизиологических нарушений [64], а также эффективность местного введения антагонистов NMDA-рецепторов для лечения нейровоспалительной боли [65].

75% статей сообщают о разнице менее $0,2^{\circ}\text{C}$ в температурном распределении на ладонной и тыльной поверхностях кистей в норме (не считая пальцев), а также в поперечном градиенте на ладонях (Рис. 1). Температуры ладони правой руки находились, по разным данным, в диапазоне $27,8 \pm 2,1^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающей среды 19°C и достигали значений $34,1 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ при ее повышении выше зоны комфорта. Отмечено, что при температуре среды выше комфортной снижается разброс температур кисти и уменьшается диапазон их колебаний, а при низких температурах среды колебания растут и разброс увеличивается. ТА кистей с тыльной стороны была такая же, как и с ладонной [19]. Показано также, что и терморезакции в ногтевых фалангах пальцев на различную

стимуляцию идентичны с ладонной и тыльной сторон кисти [54]. Тем не менее, средняя температура тыла кистей была на 0,2-1,1°C ниже, чем ладонная температура [19].

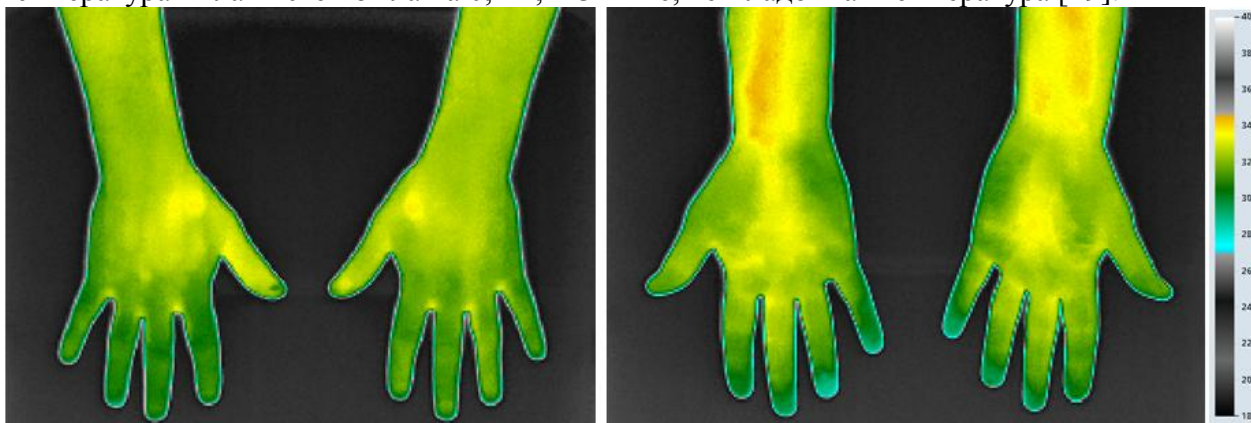


Рис. 1. Пример нормального распределения температур на тыльной (слева) и ладонной (справа) поверхностях кистей мужчины 38 лет (собственные исследования).

Температурный градиент между пальцами кисти и предплечьем может служить показателем (индексом) периферического кровообращения и вазомоторного тонуса. Но чаще пользуются разницей температур между кончиками пальцев (ногтевая фаланга) и серединой пясти (тыл кисти) [66]. Цифровой ТПВ мониторинг реактивности сосудов обеспечивает значимые и воспроизводимые физиологические переменные, а комбинацию ТПВ измерений и мониторинга АД можно использовать как в клиниках, так и дома [67]. Иной подход в оценке васкулярной реактивности – по термоответу на нагрев поверхности кожи на тыле кистей – использован в работе [59].

Изучены гендерные различия в термотопографии верхних конечностей у здоровых испытуемых: так, у молодых мужчин, в отличие от женщин, достоверно теплее оказались плечо и предплечье, но нет различий в температуре кистей [68]. В этой же работе установлена зависимость ИК излучения от индекса массы тела и локального подкожного жира, анатомической структуры анализируемых областей или распределения термочувствительных рецепторов. Среди лиц старше 60 лет отмечено значительное снижение температуры рук [69], эти данные подтверждены в [70].

Влияние возраста на эффективность терморегуляторного ответа на локальную холодовую пробу (ХП) исследовано в [71]. Отмечено, что у более пожилых субъектов контралатеральная симметрия вазоконстрикторного ответа была намного ниже, чем у молодых. Однако эти данные критикуются за использование протокола, препятствующего оценке воспроизводимости процессов терморегуляции в ИК отображении [7].

Изучена тепловая реакция на обеих сторонах рук у здоровых молодых людей после ХП и ее вариабельность при повторном исследовании в течение двух дней [72, 73]. Результаты показали, что: а) температура кожи на дорсальной и ладонной сторонах руки сильно коррелирует; б) корреляция более сильная на пальцах, чем в запястно-пястной области; в) ладонная сторона кисти теплее, чем тыльная, но на пальцах в постстимульный период инвертирован ПДГ (ногтевое ложе теплее); и г) ΔT между дорсальной и ладонной сторонами пальцев не зависит от температуры кожи, а ΔT в запястно-пястной области зависит от температуры. В целом, полученные данные свидетельствуют о существовании различных моделей изменения температуры кожи рук в норме, что важно учитывать при детальном исследовании тепловых явлений в руке [74].

В норме в ответ на ХП после кратковременного вазоспазма формируется тепловая реакция, которая, помимо вышеперечисленных факторов, зависит также от пола и гормонального статуса испытуемого [75]. При нарушениях регуляции периферического кровотока ХП на кистях рук может вызывать вазоспазм [76].

Проведено экспериментальное исследование по оценке изменений температуры и термомеханических свойств кожи в зависимости от эффектов гравитации [77]. ИК

измерения проводили на предплечье в трех положениях: горизонтальном, при поднятой и при опущенной руке. Возврат к тепловому балансу после охлаждения и нагревания происходит быстрее при горизонтальном положении руки. Сравнительное исследование экспериментального охлаждения и нагревания показало симметричное поведение кожной температуры при обоих типах воздействий, сходное у мужчин и женщин.

Установление взаимосвязи между кровотоком в коже и динамикой кожной температуры является важнейшей проблемой при ТПВ визуализации кровотока. В этой связи особую ценность приобретают исследования колебательных температурных процессов в коже конечностей в ИК отображении.

Функциональная ИК визуализация способна обнаруживать низкочастотные колебания температуры в неповрежденной коже человека и выявлять пространственные, временные, спектральные и частотно-временные различия между тремя классами тканей: микроциркуляторным руслом, большими подкожными венами и оставшейся окружающей тканью предплечья [78]. Авторы обнаружили, что крупные вены имеют более сильную сократимость в диапазоне 0,005-0,06 Гц по сравнению с двумя другими классами тканей. Участки микроциркуляторного русла и кожи без сосудов, видимые в ИК, имеют высокую фазовую когерентность в самых низких трех диапазонах частот (0,005-0,0095 Гц, 0,0095-0,02 Гц и 0,02-0,06 Гц), тогда как большие вены колеблются независимо.

Группа российских авторов исследовала колебания кожного кровотока, связанные с механической активностью сосудов [79-82]. Разработанная методика спектральной фильтрации для визуализации кровотока на основе тепловидения позволяет преобразовывать температуру кожи в реальном времени в колебания кровотока кожи, и наоборот. Описан общий алгоритм обратимого преобразования температуры в кровоток, позволяющий превратить датчик температуры в датчик кровотока. Это перспективно для диагностики периферических гемодинамических нарушений, в частности, при мониторинге кровоснабжения пересаженных кожных лоскутов и при заживлении ожогов.

В связи поиском способов осуществления дистантного ишемического preconditionирования в области диагностики и терапии атеросклероза, артериальной гипертензии, сахарного диабета проанализированы и обобщены результаты работ, посвященных изучению реакции периферического кровотока человека на окклюзионную пробу [83-86]. Показано, что ТПВ анализ температурных колебаний кожи ограничивается эндотелиальным, нейрогенным и краем миогенного диапазона с частотами менее 0,1 Гц. Наиболее удобным сегментом для измерений признана кисть. Показана синхронность колебаний температуры левой и правой кистей в покое (коэффициент корреляции $r=0,95$) и через определенное (индивидуальное для каждого испытуемого) время после окклюзионной пробы. Это время восстановления может быть использовано для оценки реактивной способности кровотока.

В психофизиологических исследованиях наиболее изучаемая область тела с применением тепловидения – лицо. Однако рукам также посвящены некоторые работы. Так, установлено, что при реакциях страха и боли происходит снижение температуры ладонной поверхности [87] и пальцев рук [88], сходные изменения происходят при реакции смущения [89]. Тепловидение использовано также в когнитивной нейробиологии в качестве соматического маркера субъективного опыта во время когнитивных и эмоциональных задач типа задачи Iowa Gambling. Результаты показали значительную корреляцию между изменениями температуры рук и лба и психическим состоянием: она имела тенденцию снижаться во время эмоциональных заданий и повышаться во время познавательных заданий, а при смешанных заданиях (с участием как когнитивных, так и эмоциональных ресурсов), таких как задание Damasio Gambling Task, термопаттерн был более сложным, но постоянным: холодный лоб и руки у хороших игроков против горячих рук и лба у плохих игроков [90]. Стабильность индивидуального рисунка вен тыльной поверхности кистей является также основой развития технологий их ИК визуализации с целью биометрической аутентификации [41, 91, 92].

Важным прикладным значением обладают исследования влияния курения на нормальное температурное распределение и его динамику на кистях рук [93-95]. Показан сосудосуживающий эффект никотина, способный снизить температуру кожи рук. Более того, курильщики имеют сниженное кровоснабжение конечностей по сравнению с некурящими (например, у них нарушен капиллярный кровоток и механизмы вазодилатации). Поэтому для физиологических исследований рекомендуется исключать из выборки курящих, а общей рекомендацией является 6-12 часов не курить перед ТПВ обследованием. Способ попадания никотина в организм не принципиален для вызывания периферической вазоконстрикции (курение, жевание, снюсы) [96, 97]. Подтвержден кумулятивный эффект от курения большого количества сигарет [98, 99], особенно опасный для спортсменов [100]. Выявленный непосредственный визуальный тепловой эффект (снижение температуры кистей) после курения, полезный для демонстрации в образовательных программах по борьбе за здоровый образ жизни, позволил предложить тепловидение как рутинный метод оценки потенциального вреда курения для гипертоников и нормотоников [101]. Та же направленность может быть у исследований ТПВ эффектов алкогольного опьянения [102].

4. Заключение.

Универсальных методологических подходов к изучению температурной жизни кистей мы выделяем два: а) статическое тепловидение с применением методов машинной обработки и анализа данных и б) функциональное динамическое тепловидение. Добывание знаний об исходных температурных паттернах и реакциях, присущих здоровому организму в разнообразных физиологических контекстах, является важнейшим этапом на пути решения многообразных диагностических задач. Сравнивая получаемые ТПВ данные с эталонными данными, известными для здоровых кожных покровов, мы можем отследить характер и степень изменений на разных уровнях терморегуляторной системы и связать их с конкретными клиническими ситуациями [103].

Для цитирования: Воловик М.Г., Долгов И.М. Термотопография кистей рук здорового человека как основа для тепловизионной диагностики (нарративный обзор). Медицинский алфавит. 2020;(32):62-68. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2020-32-62-68>
For citation: Volovik M.G., Dolgov I.M. Thermotography of the hands of a healthy person as a basis for thermal diagnosis (narrative review). Medical alphabet. 2020;(32):62-68. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2020-32-62-68>

Литература.

1. (Шмидт Р., Тевс Г.). Физиология человека. В трех томах. Пер. с англ. / Под ред. Р.Шмидта и Г.Тевса. 2е изд. М.: Мир, 1996.
2. Воловик М.Г. Динамическое инфракрасное картирование терморегуляторных процессов в биологических тканях. Автореф. дис...доктора биологических наук. Пущино, 2016. 45 с.
3. Johnson J.M., Kellogg D.L.Jr. Thermoregulatory and thermal control in the human cutaneous circulation // Front Biosci. (Schol Ed.). 2010 Jun 1; 2: 825-853. doi: 10.2741/s105
4. Ammer K. The Glamorgan Protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body // Thermology International. 2008;18(4):125-129.
5. Sillero-Quintana M.S., Fernandez-Cuevas I.F., Arnaiz-Lastras J.A., Bouzas J. Protocol for thermographic assessment in humans. In: Pre-Congress XIII EAT Congress Course on «Medical Applications of Human Thermography»; TERMOINEF Group: Madrid, Spain, 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1749.2969
6. Hirai A., Tanabe M., Shido O. Enhancement of finger blood flow response of postprandial human subjects to the increase in body temperature during exercise // Eur J Appl Physiol. (1991);62:221-227. <https://doi.org/10.1007/BF00643746>
7. Ospina-Restrepo L.C., Herrera-Velasquez L.M., Barrera-Causil C.J. et al. Thermoregulation of the hand: assessment with infrared thermography. In book: VII Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2016, Bucaramanga, Santander, Colombia, October 26th -28th, 2016. IFMBE proceedings. April 2017. DOI: 10.1007/978-981-10-4086-3_182
8. Charkoudian N. Human thermoregulation from the autonomic perspective // Auton Neurosci Basic Clin. 2016;196:1-2. doi:10.1016/j.autneu.2016.02.007

9. Колесов С.Н., Воловик М.Г., Прилучный М.А. Медицинское теплорадиовидение: современный методологический подход. Н.Новгород: ФГУ «ННИИТО Росмедтехнологий», 2008. 184 с.
10. Ammer K. Need for standardization of measurements in thermal imaging. In: B.Wiecek (Ed.). *Thermography & lasers in medicine*. Lodz, Poland: Akademickie Centrum Graficzno-Marketigowe Lodar S.A., 2003. P. 13-17.
11. Ammer K., Ring F. Standard Procedures for Infrared Imaging in Medicine. In: J.Bronzino (ed.), *Biomedical Engineering Handbook (3rd. Ed.)*, Infrared Imaging Section. N.A.Diakides (ed.). CRC Press, 2006; 36.1-36-14.
12. Pauling J.D., Shipley J.A., Raper S. et al. Comparison of infrared thermography and laser speckle contrast imaging for the dynamic assessment of digital microvascular function // *Microvasc Res*. 2012;83:162-167. doi: 10.1016/j.mvr.2011.06.012
13. Makarenko A.V., Volovik M.G. Method of differentiated analysis of IR thermal maps of the exposed cerebral cortex when neurosurgical operations are being performed // *Journal of Optical Technology*. 2015;82(7):459-466. DOI 10.1364/JOT.82.000459
14. Kurazumi Y., Tsuchikawa T., Ishiia J. et al. Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection // *Building and Environment*. 2008;43:2142-2153. doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.012
15. Nkh A., Tahavvor A.R. Numerical simulation of radiation heat transfer of the human body for determining its radiation coefficient // *Proc. of the ASME 2011 Int. Mechanical Engineering Congress & Exposition*. November 11-17, 2011. Denver, Colorado, USA. IMECE2011-65353.
16. De Dear R. et al. Convective and radiative heat transfer coefficients for individual body segments // *Int J Meteorol*. June 1997;40:141-156. <https://doi.org/10.1007/s004840050035>
17. Najjaran A., Najjaran Ar., Tahavvor A.R., Ahmadfard M.A. Determination of radiation heat transfer coefficient of standing human body model by numerical approach // *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*. 2012, 3: 033007. DOI: 10.5098/hmt.v3.3.3007
18. Volovik M.G., Polevaya S.A., Khomyakova M.I. Cold test for thermal-vision studies of symmetrical reactions in physiology and medical diagnosis // *Journal of Optical Technology*. 2013;80(6):393-399. DOI 10.1364/JOT.80.000393
19. Ammer K. Temperature measurements and thermography of the palmar surface of the human hand – An overview // *Thermology International*. 2016;26(4):107-116.
20. Schepers R.J., Ringkamp M. Thermoreceptors and thermosensitive afferents // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 2010;34:177-184.
21. Воловик М.Г., Габдуллина Е.Г., Зевеке А.В., Клейнбок И.Я., Колесов С.Н., Полевая С.А., Снежницкая И.В. Определение температуры в термочувствительных точках кожи человека // *Российский физиологический журнал им. И.М.Сеченова*. 1998;3:256-259.
22. Ammer K. Temperature measurements and thermography of the palmar surface of the human hand – An overview // *Thermology International* 2016;26(4):107-116.
23. Yamakage M., Kamada Y., Honma Y. Predictive variables of hypothermia in the early phase of general anesthesia // *Anesthesia & Analgesia* 2000;90(2):456-459. doi: 10.1097/0000539-200002000-00040
24. Bouzida N., Bendada A., Maldague X.P. Visualization of body thermoregulation by infrared imaging // *Journal of Thermal Biology*. 2009;34(3):120-126. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2008.11.008>
25. Сагайдачный А.А., Фомин А.В., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Температурные и гемодинамические эффекты при проведении окклюзионной пробы на верхних конечностях здоровых испытуемых: синхронность, вазоконстрикция, вазодилатация // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2017;63(4)6:27-34. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2017-16-4-27-34>
26. Долгов И.М., Воловик М.Г. Проксимально-дистальный температурный градиент на кистях рук как тепловизионный признак нарушения углеводного обмена. Варианты, перспективы применения // *Медицинский алфавит*. 2020;(25):48-52. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2020-25-48-52>
27. Ammer K., Melnizky P., Rathkolb O., Hirschl M. Reproducibility of the Response to the Cold Water Challenge // *Thermology international*. 2001, 11 (2) 89-90.
28. Fernandez Cuevas I., Arnaiz Lastras J., Sillero Quintana M. et al. Daily variation of skin temperature in humans through infrared thermography. A pilot study about circadian rhythm // *Clinical Temperature Measurement, National Physical Laboratory (NPL)*. At: London, United Kingdom. January 2012. 1 pp. DOI: 10.13140/2.1.3820.3524
29. Costa C.M.A., Sillero-Quintana M., Piñonosa Cano S. et al. Daily oscillations of skin temperature in military personnel using thermography // *Journal of the Royal Army Medical Corps* 2016; 162 (5): 335-342. <http://dx.doi.org/10.1136/jramc-2015-000462>
30. Sillero-Quintana M., Fernandez-Jaen T., Fernandez-Cuevas I. et al. Infrared thermography as a support tool for screening and early diagnosis in emergencies // *J Med Imaging Health Inform*. 2015;5:1223-1228. DOI: <https://doi.org/10.1166/jmih.2015.1511>
31. Marins J.C.B., Formenti D., Costa C.M.A. et al. Circadian and gender differences in skin temperature in militaries by thermography // *Infrared Physics & Technology* 2015; 71: 322-328. DOI10.1016/j.infrared.2015.05.008
32. Costa C.M.A., Moreira D.G., Sillero-Quintana M. et al. Daily rhythm of skin temperature of women evaluated by infrared thermal imaging // *J Therm Biol*. 2018;72:1-9. doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.12.002

33. Taylor N.A.S., Tipton M.J., Kenny G.P. Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures // *Journal of Thermal Biology*. 2014;46:72-101. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2014.10.006
34. Ammer K., Engelbert B., Kern E. The Determination of Normal Temperature Values of Finger Joints // *Thermology International*. 2002;12:23-33.
35. Ammer K., Ring E.F. Repeatability of the standard view both dorsal hands. Results from a training course on medical infrared imaging // *Thermology International*. 2004;14(2):99-102.
36. Zaproudina N., Varmavuo V., Airaksinen O., Narhi M. Reproducibility of infrared thermography measurements in healthy individuals // *Physiological Measurement*. 2008;29:515-524. DOI:10.1088/0967-3334/29/4/007
37. Fernandez-Cuevas I., Marins J.C.B., Arnaiz-Lastras J.A. et al. Validity, Reliability, and Reproducibility of Skin Temperature in Healthy Subjects Using Infrared Thermography. In book: *Measuring the Skin* (chapter). Springer International Publishing Switzerland, 2016. P.Humbert et al. (eds.). P. 1311-1318. DOI 10.1007/978-3-319-26594-0_74-1
38. Varju G., Pieper C.F., Renner J.B., Kraus V.B. Assessment of hand osteoarthritis: correlation between thermographic and radiographic methods // *Rheumatology (Oxford)*; 2004;43(7):915-919. doi:10.1093/rheumatology/keh204
39. Fernández-Cuevas I., Marins J.C., Gomez Carmona P. et al. Reliability and reproducibility of skin temperature of overweight subjects by an Infrared Thermography software designed for human beings // *Thermology international*. 2012;22(S):S130-S137.
40. Choi E., Lee P.B., Nahm F.S. Interexaminer reliability of infrared thermography for the diagnosis of complex regional pain syndrome // *Skin Res Technol*. 2013;19:189-193. doi: 10.1111/srt.12032
41. Lin C.L., Fan K.C. Biometric verification using thermal images of palm-dorsal vein patterns // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2004;14(2):199-213. DOI: 10.1109/TCSVT.2003.821975
42. Sousa E., Vardasca R., Mendes J., Costa-Ferreira A. Towards the Automatic Detection of Hand Fingertips and Phalanges in Thermal Images // *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics*. 2018;27:1053-1062. DOI 10.1007/978-3-319-68195-5_117
43. Gatt A., Formosa C., Cassar K. et al. Thermographic patterns of the upper and lower limbs: baseline data // *Int. J Vasc Med*. 2015;15:831369. <https://doi.org/10.1155/2015/831369>
44. Yoon T.H., Kin K.S., Lee J.W. et al. Image segmentation of human forearms in infrared image / *Conf Proc. IEEE Eng Med Biol Soc*. 2006;1:2762-2765. DOI: 10.1109/IEMBS.2006.260706
45. Herry C.L. Segmentation and extraction of regions of interest for automated detection of anomalies in clinical thermal infrared images. Ph.D. thesis, Carleton University Ottawa, Ottawa, ON, Canada, 2008.
46. Calliet R. *Doenças dos tecidos moles*. Artmed, Porto Alegre, 2000. 3 ed. [in Portugal]
47. Lange K.H.W., Jansen T., Asghar S. et al. Skin temperature measured by infrared thermography after specific ultrasound-guided blocking of the musculocutaneous, radial, ulnar, and median nerves in the upper extremity // *Br J Anaesth*. 2011;106:887-895. doi:10.1093/bja/aer085
48. Glowacz A., Glowacz Z. Recognition of images of finger skin with application of histogram, image filtration and K-NN classifier // *Biocybern Biomed Eng*. 2016;36:95-101. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2015.12.005>
49. Cheung S.S. Responses of the hands and feet to cold exposure // *Temperature (Austin)*. 2015; 2:105-120. doi: 10.1080/23328940.2015.1008890
50. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. *Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови (руководство для врачей)*. М.: Медицина, 2005.
51. Seifalian A.M., Stansby G., Jackson A. et al. Comparison of laser Doppler perfusion imaging, laser Doppler flowmetry, and thermographic imaging for assessment of blood flow in human skin // *Eur J Vasc Surg*. 1994;8:65-69. [https://doi.org/10.1016/S0950-821X\(05\)80123-9](https://doi.org/10.1016/S0950-821X(05)80123-9)
52. Stoner H.B., Barker P., Riding G.S., et al. Relationships between skin temperature and perfusion in the arm and leg // *Clin Physiology*. 1991;11(1):27-40. doi: 10.1111/j.1475-097x.1991.tb00651.x
53. Камкин А.Г., Каменский А.А. *Фундаментальная и клиническая физиология*. М.: Академия, 2010. 1073 с.
54. Volovik M.G., Kiselyov D.V., Poleyaya S.A. et al. Effects of Repeated Local Ischemia on the Temperature and Microcirculation in the Skin of the Human Hand // *Human Physiology*. 2015;41(4):428-436. <https://doi.org/10.1134/S0362119715030184>
55. Mayrovitz H.N., Groseclose E.E. Inspiration-induced vascular responses in finger dorsum skin // *Microvasc Res*. 2002;63(2):227-232. doi:10.1006/mvre.2001.2391
56. Merla A., Di Romualdo S., Di Donato L. et al. Combined thermal and laser Doppler imaging in the assessment of cutaneous tissue perfusion // *Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS Cité Internationale, Lyon, France, August 23-26, 2007 (Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc)*; FrB04.3: 2630-2633. doi: 10.1109/IEMBS.2007.4352869
57. McQuilkin G.L., Panthagani D., Metcalfe R.W. et al. Digital thermal monitoring (DTM) of vascular reactivity closely correlates with Doppler flow velocity // *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. September 2009;2009:1100-1103. doi: 10.1109/IEMBS.2009.5333962
58. Schier R., Marcus H.E., Mansur E. et al. Evaluation of Digital Thermal Monitoring as a Tool to Assess Perioperative Vascular Reactivity // *Journal of atherosclerosis and thrombosis*; November 2012. P. 277-286. DOI: 10.5551/jat.15255

59. Nieuwenhoff M.D., Wu Y., Huygen F.J. et al. Reproducibility of axon reflex-related vasodilation assessed by dynamic thermal imaging in healthy subjects // *Microvasc Res.* 2016;106:1-7. doi:10.1016/j.mvr.2016.03.001
60. Rubinstein E.H., Sessler D.I. Skin-surface temperature gradients correlate with fingertip blood flow in humans // *Anesthesiology.* 1990 Sep;73(3):541-545. PMID: 2393139
61. Klaessens J., Nelisse M., Verdaasdonk R.M., Noordmans H.J. Multimodal tissue perfusion imaging using multi-spectral and thermographic imaging systems applied on clinical data // *Proc. SPIE 8574, Multimodal Biomedical Imaging VIII, 85740F* (March 13, 2013). doi:10.1117/12.2003823
62. Kistler A., Mariauzouls C., von Berlepsch K. Fingertip temperature as an indicator for sympathetic responses // *Int J Psychophysiol.* 1998 Jun; 29(1): 35-41. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(97\)00087-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(97)00087-1)
63. Michikami D., Iwase S., Kamiya A. et al. Interrelations of vasoconstrictor sympathetic outflow to skin core temperature during unilateral sole heating in humans // *Auton Neurosci.* 2001 Aug 13;91(1-2):55-61. [https://doi.org/10.1016/S1566-0702\(01\)00286-7](https://doi.org/10.1016/S1566-0702(01)00286-7)
64. Koyama N., Hirata K., Hori K. et al. Computer-assisted infrared thermographic study of axon reflex induced by intradermal melittin // *Pain.* 2000 Feb;84(2-3):133-139. [https://doi.org/10.1016/S0304-3959\(99\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3959(99)00192-X)
65. Iwashita N., Nosaka S., Koyama N. Involvement of peripheral NMDA receptor in melittin-induced thermographic flare // *Neurochem Res.* 2012;37(10):2222-2228. doi:10.1007/s11064-012-0849-3
66. Keramidis M.E., Geladas N.D., Mekjavic I.B., Kounalakis S.N. Forearm-finger skin temperature gradient as an index of cutaneous perfusion during steady-state exercise // *Clin Physiol Funct Imaging.* 2013;33:400-404. doi:10.1111/cpf.12043
67. Naghavi M., Yen A.A., Lin A.W. H. et al. New Indices of Endothelial Function Measured by Digital Thermal Monitoring of Vascular Reactivity: Data from 6084 Patients Registry // *International Journal of Vascular Medicine* 2016. Volume 2016, Article ID 1348028, 8 pp. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1348028>
68. Chudecka M., Lubkowska A. Thermal maps of young women and men // *Infrared Physics & Technology.* 2015;69:81-87. doi:10.1016/j.infrared.2015.01.012
69. Niu H.H., Lui P.W., Hu J.S. et al. Thermal symmetry of skin temperature: normative data of normal subjects in Taiwan // *Zhonghua Yi Xue Za Zhi (Taipei).* 2001;64:459-468. PMID: 11720145
70. Chlebicka I., Matusiak J.M.A.J., Baran E., Szepietowski J.C. Freezing fingers syndrome, primary and secondary Raynaud's Phenomenon: Characteristic features with hand thermography // *Acta Derm Venereol.* 2013;93(4):428-432. <https://doi.org/10.2340/00015555-1508>
71. Lahiri B.B., Bagavathiappan S., Nishanthi K. et al. Infrared thermography based studies on the effect of age on localized cold stress induced thermoregulation in human // *Infrared Phys Technol.* 2016;76:592-602. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.04.023>
72. Leijon-Sundqvist K., Tegner Y., Juntti U. et al. Hand skin temperature – Are there warm and cold rewarming patterns after cold stress test? // *Thermology International.* 2016;26(3):81-87.
73. Leijon-Sundqvist K., Tegner Y., Olsson F. et al. Relation between dorsal and palmar hand skin temperatures during a cold stress test // *Journal of Thermal Biology.* 2017;66:87-92. doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.04.003
74. Leijon-Sundqvist K. Evaluation of Hand Skin Temperature – Infrared Thermography in Combination with Cold Stress Tests. Doctoral thesis. Luleå University of Technology, Sweden. May 2017. 110 pp.
75. Bartelink M.L., DeWit A., Wollersheim H. et al. Skin vascular reactivity in healthy subjects: Influence of hormonal status // *J Appl Physiol.* 1993;74(2):727-732. doi: 10.1152/jappl.1993.74.2.727
76. Reilly D.O., Taylor L., El-Hadidy K., Jayson M.I.V. Measurement of cold challenge responses in primary Raynaud's phenomenon and Raynaud's phenomenon associated with systemic sclerosis // *Ann Rheum Dis.* 1992;51(11):1193-1196. doi: 10.1136/ard.51.11.1193
77. Ratovoson D., Jourdan F., Huon V. Influence of gravity on the skin thermal behavior: experimental study using dynamic infrared thermography // *Skin Res Technol.* 2013;19(1):397-408. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0846.2012.00657.x>
78. Liu W., Meyer J., Scully C.G. et al. Observing Temperature Fluctuations in Humans Using Infrared Imaging // 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT-10). July 27-30, 2010, Québec (Canada). 9 pp. doi: 10.3166/qirt.8.21-36
79. Sagaidachnyi A.A., Usanov D.A., Scripal A.V., Fomin A.V. Correlation of skin temperature and blood flow oscillations // *Optical technologies in biophysics and medicine XIII, Saratov Fall Meeting, Oct. 2011.* ed. by V.V.Tuchin et al. *Proc. of SPIE.* 2012. V. 8337, 83370A-8. <https://doi.org/10.1117/12.925146>
80. Sagaidachnyi A.A., Scripal A.V., Fomin A.V., Usanov D.A. Determination of the amplitude and phase relationships between oscillations in skin temperature and photoplethysmography-measured blood flow in fingertips // *Physiol Meas.* 2014a;35(2):153-166. Doi: 10.1088/0967-3334/35/2/153
81. Sagaidachnyi A.A., Fomin A.V., Usanov D.A., Skripal A.V. Thermography-based blood flow imaging in human skin of the hands and feet: A Spectral – Filtering Approach // *Physiological measurement.* 2017;38(2):272. Doi: 10.1088/1361-6579/aa4eaf
82. Sagaidachnyi A., Fomin A., Usanov D., Skripal A. Real-time technique for conversion of skin temperature into skin blood flow: human skin as a low-pass filter for thermal waves // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering.* May 2019. 11 pp. DOI: 10.1080/10255842.2019.1615058

83. Сагайдачный А.А., Фомин А.В. Анализ временной производной температурной реакции пальцев рук на плечевую окклюзию и ее взаимосвязь с параметрами гемодинамики // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017;63(3):31-40. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2017-16-3-31-40>
84. Sagaidachnyi A.A., Fomin A.V., Mayskov D.I. et al. Features of the temperature response to a double cuff-occlusion of the upper limbs: remote ischemic preconditioning aspect // Saratov Fall Meeting 2017: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIX, Proc. SPIE 107160R (26 April 2018). doi: 10.1117/12.2312533
85. Сагайдачный А.А., Фомин А.В., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Температурные и гемодинамические эффекты при проведении окклюзионной пробы на верхних конечностях здоровых испытуемых: синхронность, вазоконстрикция, вазодилатация // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017;63(4):27-34. DOI: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-27-34
86. Сагайдачный А.А. Окклюзионная проба: методы анализа, механизмы реакции, перспективы применения // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018;17(3):5-22. DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-5-22
87. Ioannou S., Gallese V., Merla A. Thermal infrared imaging in psychophysiology: potentialities and limits // Psychophysiology. 2014;51:951-963. doi:10.1111/psyp.12243
88. Kistler A., Mariauzouls C., von Berlepsch K. Fingertip temperature as an indicator for sympathetic responses // Int J Psychophysiol Off J Int Organ Psychophysiol. 1998;29:35-41. doi: 10.1016/s0167-8760(97)00087-1
89. Merla A., Romani G.L. Thermal signatures of emotional arousal: a functional infrared imaging study // 2007 29th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society. IEEE, pp 247-249. doi: 10.1109/IEMBS.2007.4352270
90. Juarez-Ramos V., Salazar E., de La Fuente J et al. The hot and cold hands of a poker player: The somatic marker hypothesis and thermography // Dep. Of Experimental Psychology, Univ. of Granada, January 2014. 18 pp. DOI: 10.13140/RG.2.2.33433.01126
91. Cabrera C., Guillen M.R., Adjouadi M. Infrared Thermal Hand Vein Pattern Recognition // Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011), Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development, August 3-5, 2011, Medellín, Colombia. WE1-1- WE1-6.
92. Kumar A., Hanmandlu M., Lovell B.C. Biometric Authentication Based on Infrared Thermal Hand Vein Patterns // 2009 Digital Image Computing: Techniques and Applications. Melbourne, VIC, Australia, 1-3 Dec. 2009. IEEE Xplore: 19 January 2010. DOI:10.1109/DICTA.2009.63
93. Gershon-Cohen J., Borden A.G.B., Hermel M.B. Thermography of extremities after smoking // Br J Radiol. 1969;42:189-191. doi: 10.1259/0007-1285-42-495-189
94. Bornmyr S., Svensson H. Thermography and laser-Doppler flowmetry for monitoring changes in finger skin blood flow upon cigarette smoking // Clin Physiol. 1991;11:135-141. doi: 10.1111/j.1475-097x.1991.tb00106.x
95. Blank M., Kargel C. Infrared imaging to measure temperature changes of the extremities caused by cigarette smoke and nicotine gums // Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Sorrento, Italy, April 2006, pp. 794-799. doi: 10.1109/IMTC.2006.328204
96. Hoiland I.I. The effect of oral uptake of nicotine on skin blood perfusion of the face and hands in snus users as determined by thermography. Master thesis in Biomedical sciences. University of Tromso, May 2014. 61 pp.
97. Hoiland I.I., de Weerd L., Mercer J.B. The effect of oral uptake of nicotine in snus on peripheral skin blood circulation evaluated by thermography // Temperature. Oct./Nov./Dec. 2014;1:3,220-226. <http://dx.doi.org/10.4161/23328940.2014.984553>
98. Di Carlo A., Ippolito F. Early effects of cigarette smoking in hypertensive and normotensive subjects. An ambulatory blood pressure and thermographic study // Minerva Cardioangiol. 2003 Aug;51(4):387-393. PMID: 12900720 [in Italian]
99. Di Carlo A. Telethermographic study of skin circulation in smokers // 11th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT-2012). Naples, Italy, June 11-14, 2012. 2 pp. doi.org/10.21611/qirt.2012.197
100. Application of Infrared Thermography in Sports Science. Jose Ignacio Priego Quesada (Editor). Valencia, Spain: Springer International Publishing AG, 2017. 327 p. DOI 10.1007/978-3-319-47410-6
101. Стулин И.Д., Гуревич К.Г., Солонский Д.С. и др. Термография и ультразвук в оценке курения как фактора риска сердечно-сосудистой патологии // Оптический журнал. 2013;80(6):68-72.
102. Ураков А.Л., Грузда А.М. После холодовая динамика инфракрасного изображения и температуры ладоней и пальцев рук мужчин в норме и при алкогольном опьянении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 12-1. С. 109-111; URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6274> (дата обращения: 13.07.2020).
103. Volovik M.G., Polevaia S.A. Dynamic Infrared Mapping of Human Skin // 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT-2018). Berlin, Germany, June 24-29, 2018. P11. 8 pp. DOI: 10.21611/qirt.2018.p11