

ФИЗИОЛОГИЯ И ПАТОФИЗИОЛОГИЯ

УДК 612.563+57.089+57.084+57.087.3

Обзор

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕДИЦИНЕ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ (ОБЗОР)

А. В. Даценко — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, заведующий лабораторией экспериментальной патологии и статистического прогнозирования, доктор медицинских наук; **В. И. Казьмин** — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна» ФМБА России, старший научный сотрудник, кандидат медицинских наук.

USE OF A REMOTE INFRARED THERMOGRAPHY IN EXPERIMENTAL MEDICINE AT EXTREME INFLUENCES (REVIEW)

A. V. Datsenko — Federal Medical and Biophysical Center n.a. A. I. Burnazyan, Head of the Laboratory of Experimental Pathology and Statistical Prediction, Doctor of Medical Sciences; **V. I. Kazmin** — Federal Medical and Biophysical Center n.a. A. I. Burnazyan, Senior Researcher, Candidate of Medical Sciences.

Дата поступления — 22.11.2016 г.

Дата принятия в печать — 08.12.2016 г.

Даценко А. В., Казьмин В. И. Использование дистанционной инфракрасной термографии в экспериментальной медицине при экстремальных воздействиях (обзор). Саратовский научно-медицинский журнал 2016; 12 (4): 685–691.

Проведен анализ литературных данных по применению дистанционной инфракрасной термографии в медицине и ветеринарии, оценены основные возможности и методы тепловизионной регистрации в экспериментальных медицинских исследованиях на биообъектах, в том числе при экстремальных воздействиях. Используются информационные ресурсы библиографических электронных баз данных: eLibrary, PubMed, Clinical Key, Science Direct. В настоящее время методы инфракрасной термографии в недостаточной степени используются в экспериментальной медицине, в том числе при изучении неблагоприятного биологического действия различных вредных и опасных экстремальных факторов, основным проявлением которых, особенно в ранние сроки после воздействия, являются системные микрососудистые нарушения, определяющие состояние дееспособности биомоделей человека. Данные динамического дистанционного термографического исследования подопытных биообъектов могут быть использованы для оценки нарушений периферического кровообращения, работоспособности и эмоционального состояния биомоделей, подвергнутых воздействию экстремальных факторов, в том числе в ранние сроки после проведения экспериментальных исследований в лабораторных и выездных работах.

Ключевые слова: инфракрасная термография, тепловидение, экспериментальные биообъекты, медико-биологические исследования, экстремальные воздействия.

Datsenko AV, Kazmin VI. Use of a remote infrared thermography in experimental medicine at extreme influences (review). *Saratov Journal of Medical Scientific Research* 2016; 12 (4): 685–691.

The study presents an analysis of published data on the use of remote infrared thermography in medicine and veterinary science and evaluated the main opportunities, methods and ways of thermovision registration in experimental medical studies on biological objects, including at extreme influences. The following resources of the bibliographic electronic databases had been used: eLibrary, PubMed, Clinical Key, Science. Now methods of infrared thermography in insufficient degree are used in experimental medicine, including when studying adverse biological effect of various harmful and dangerous extreme factors, which main manifestation, especially in the early period after exposure, are systemic microvascular disorders, determining the state of capacity of human biomodels. These dynamic remote thermographic studies of experimental biological objects can be used to evaluate disorders of the peripheral circulation, working capacity and an emotional condition of the biomodels exposed to extreme factors, including early after experimental studies in laboratory and field work.

Key words: infrared thermography, thermovision, experimental biological objects, biomedical research, extreme influences.

Температура является важной характеристикой функционального состояния организма человека и животных и используется в медицинской и ветери-

нарной практике в качестве критерия для диагностики различных заболеваний. Наиболее совершенным способом регистрации пространственного распределения температур является метод инфракрасной термографии (ИКТ). По наличию на теле зон с аномально высокой или низкой температурой диагностируют

Ответственный автор — Даценко Алексей Валентинович
Тел. (сот.): +79055543783
E-mail: av.datsenko@fmbcfmba.ru, lab92@mail.ru

ряд болезней, в том числе на ранних стадиях их возникновения [1–3]. Наряду с этим, в настоящее время отсутствует единое мнение о достаточной диагностической информативности метода ИКТ. В частности, по мнению ряда авторов, термография не обеспечивает существенных преимуществ при решении задач клинической диагностики [4]. С другой стороны, показано, что современная инфракрасная технология визуализации с улучшенными протоколами проведения исследований служит надежным и эффективным неинвазивным инструментом в клинической практике [5, 6].

Проведен анализ литературных данных по применению дистанционной ИКТ в медицине и ветеринарии, оценены основные возможности, методы и способы тепловизионной регистрации в экспериментальных медицинских исследованиях на биообъектах, в том числе при экстремальных воздействиях. Используются ресурсы библиографических электронных баз данных: eLibrary, PubMed, Clinical Key, Science Direct. Поиск по ключевым словам: «термография», «thermography», «тепловидение», «thermovision» — не был ограничен датой и языком публикаций. Предпочтение отдавалось наиболее информативным работам за последние десять лет.

Основные возможности использования ИКТ в медицине. ИКТ безвредна для человека и животных, метод является неинвазивным, противопоказаний к термографии не существует, бесконтактность обследования снимает все санитарно-эпидемические требования и ограничения. ИКТ позволяет проводить исследования одномоментно или многократно в динамике наблюдения и проводимого лечения без возрастных и временных ограничений. Термографию можно делать всем и в любом состоянии. С помощью ИКТ определяют расположение очагов повышенного излучения, оценивают функциональное состояние организма, выявляют патологические изменения в органах и системах в доклинических исследованиях и при клиническом обследовании. Измененная температура часто является первым признаком патологии на ранней стадии заболеваний до клинического проявления и при бессимптомном течении болезни. ИКТ может быть применена в профилактических массовых скрининговых обследованиях с целью раннего выявления патологических процессов, при дистанционном распознавании больных в условиях больших скоплений людей. Подготовка пациента к тепловизионному обследованию не требует проведения специальных мероприятий и занимает короткий промежуток времени. ИКТ может быть проведена в кабинете врача, в палате у постели больного, в операционной, в домашних и в полевых условиях, а также дополнена оценкой динамики тепловых реакций в ответ на функциональные нагрузочные пробы. Для проведения физиологических экспериментов важна дистанционность проведения ИКТ для того, чтобы объект исследования ощущал себя свободно и естественно [1, 2, 7–10].

Температура кожи является интегральным показателем, на величину которого оказывает влияние кровоток в сосудах, уровень метаболизма в органах, теплопроводность кожи и прилегающих к ней глубоких тканей. Участки гипертермии на термограммах могут быть вызваны усилением кровотока, воспалением, опухолью, повреждениями тканей, сокращением мышц во время физических усилий или температурой окружающей среды, превышающей пределы теплового комфорта. Гипотермические изменения

обусловлены снижением кровотока и тонуса мышц, симпатической гиперактивностью или низкой температурой окружающей среды. Главным фактором, определяющим температуру, особенно в ранние сроки после разнообразных воздействий и при острейшем течении заболеваний, является сосудистый. Нарушение гемодинамики в виде венозного стаза, ухудшения артериального притока, патологических изменений на уровне микроциркуляторного русла приводит к изменению температуры тканей. Кожа является основным маршрутом для отвода тепла с использованием крови в качестве теплоносителя. Объемное и поверхностное перераспределение крови регулируется сосудистыми реакциями дилатации и констрикции [2, 8, 11].

В клинической медицине с помощью ИКТ выявляют признаки патологии, характерные для ряда заболеваний. Описаны возможности использования ИКТ в неонатологии и педиатрии, травматологии, трансплантологии, хирургии и нейрохирургии, офтальмологии, спортивной, реабилитационной, судебной медицине, анестезиологии, профпатологии, реаниматологии. Тепловидение используют для выявления предпатологических симптомов, для оценки результатов проводимого лечения, термофармакологических эффектов лекарственных средств. Включение ИКТ в комплексные медицинские исследования повышает чувствительность и специфичность диагностики различных заболеваний [2, 7, 12–14].

Применительно к изучению неблагоприятных биологических эффектов и оценке медицинских последствий острых воздействий различных экстремальных факторов наибольший интерес представляют возможности ИКТ для выявления прямых и опосредованных нарушений периферической гемодинамики и связанных с ними гипоксических изменений в тканях при разного рода травматических повреждениях. Прямая зависимость интенсивности инфракрасного излучения от температуры излучающих участков тела позволяет использовать ИКТ для оценки состояния кровообращения в тканях. Термографию также рассматривают как метод исследования в экспериментальных приложениях, связанных с изучением патофизиологии микроциркуляции крови [15]. Тканевые перфузионные расстройства в виде артериальной ишемии или венозного застоя сопровождаются локальными изменениями температуры, при этом резкое снижение температуры свидетельствует о недостаточном кровоснабжении в результате нарушений микроциркуляции крови [16]. Методы термографии применяют в качестве высокоточного и достаточно чувствительного метода контроля параметров микроциркуляции и температуры поверхности кожи при проведении процедур низкоинтенсивной лазерной терапии [17].

Снижение температуры поверхности тела при гипоксии обусловлено изменениями периферического кровообращения [14]. Благодаря инфракрасному мониторингу выявлена последовательность охлаждения тела, возникающая в гипоксических условиях, вызванных шоком и клинической смертью [18]. ИКТ подушечек пальцев рук и поверхности головы над не заросшими родничками у ребенка и над трепанационным отверстием у взрослого человека позволяет судить о глубине гипоксического повреждения коры головного мозга и адекватности вентиляции легких дыхательным газом [19]. Показана диагностическая ценность ИКТ различных участков поверхности тела в оценке гипоксических, ишемических и лекарствен-

ных повреждений [14]. Разработаны подходы оценки эффективности терапии геморрагического шока с помощью ИКТ [20]. Волнообразность смещения границы между температурными зонами свидетельствовала о наличии кровообращения. Выявленный с помощью тепловизора момент смены однонаправленности и прямолинейности динамики температуры тела на ее волнообразность является диагностическим признаком обратимости клинической смерти и вероятности успешной реанимации [18].

ИКТ является инструментом для определения перфузии головного мозга, сердца и почек во время проведения операций у человека. Изменения температуры до появления клинических симптомов ишемии и ИКТ использовали в микрохирургии для послеоперационного мониторинга пересаженных органов и тканей. Изменения микроциркуляции определяли с помощью неинвазивной термографии непосредственно в операционной, они служили маркером ранней критической ишемии почек, и данные термографии коррелировали с результатами стандартных измерений кровотока [12, 16]. С помощью ИКТ неинвазивно мгновенно устанавливали, какая часть легких доноров может быть использована для трансплантации, определяли наличие области недостаточной перфузии, вызванной тромбом [21]. Термография являлась эффективным методом оценки жизнеспособности и выживаемости пересаженного кожного лоскута [22].

Показана диагностическая ценность ИКТ различных частей тела человека и его трупа для выявления повреждений, вызванных механическими, химическими, биологическими и другими агрессивными факторами. В судебной медицине ИКТ используют при обнаружении закрытых переломов костей, повреждений мягких тканей на ранних стадиях развития патологического процесса и определении давности травматического воздействия [23]. Используя бесконтактную ИКТ определяют глубину ожоговой раны, основываясь на выявлении разницы между местной, перифокальной температурой и температурой не поврежденных участков поверхности тела. Преимуществом использования тепловидения является возможность получать изображения большой площади поверхности кожи для идентификации областей с разной глубиной ожога и определения размеров трансплантатов, необходимых для лечения глубоких ожогов кожи [24].

Дистанционное зондирование с помощью ИКТ используется в проходных системах сканирования и досмотра в аэропортах, вокзалах, на пограничных переходах в качестве средства скрининга для выявления людей с повышенной температурой, перенесших острые респираторные заболевания. Особенности распределения температуры в области глаз и наружного слухового прохода способствуют созданию систем предварительной экспресс-диагностики в случае эпидемий и для контроля инфекционной заболеваемости в местах скопления большого количества людей [2, 11].

Повышение информативности тепловидения достигнуто при использовании провоцирующих функциональных проб с последующей регистрацией динамики восстановления исходной тепловой картины. Более часто используют пробы, выявляющие сосудистый вклад в формирование тепловой картины. Одним из наиболее обоснованных тестов для функциональной оценки микрососудистого русла является холодовая проба, которая создает условия для выяв-

ления нарушений микроциркуляции на ранних этапах развития различных патологических состояний. При охлаждении кожи режим кровоснабжения изменяется, при этом здоровые и патологически измененные ткани реагируют на охлаждение по-разному, что приводит к повышению контрастности тепловизионного изображения [18, 25]. Оклюзионная манжеточная проба обеспечивает последовательную смену физиологических состояний покоя, ишемии и гиперемии. Во время проведения окклюзионной пробы изменение кровотока является главной причиной изменения температуры поверхности кожи [2, 13].

Регистрация динамики температуры тела во время выполнения физической нагрузки позволяет количественно оценивать физическую работоспособность в спортивной и реабилитационной медицине, физиологии труда, а также определять состояние тепловой устойчивости. При активной мышечной работе изменяется однородность пространственного распределения температуры на теле человека. Резкое повышение температуры тела наблюдается в момент отказа от дальнейшего продолжения физической деятельности, выполняемой на пределе функциональных возможностей [26].

ИКТ в экспериментальной медицине. Лабораторных животных используют в качестве моделей для биомедицинских исследований [27]. ИКТ применяют для исследований различных аспектов термической физиологии, определения стресса, идентификации воспаления, диагностики травм и болезней, которые сопровождаются изменением температуры тела при нарушениях микроциркуляции крови и метаболизма, а также для подсчета популяций животных и сопоставления изменений температуры поверхности с определенными физиологическими состояниями и формами поведения. Термография способна обнаруживать изменения температуры поверхности тела при физической активности и состоянии страха [8, 9, 28–30]. С помощью ИКТ исследовали динамику сосудистых реакций у биообъектов, возникающих в ответ на внешние механические и термические воздействия, диагностировали заболевания воспалительной природы, состояния, при которых изменялся уровень обменных процессов в органах и тканях. Увеличение кровотока, сопутствующее воспалительной реакции, и катаболизма в тканях вызывает повышение локальной температуры. Полученные результаты указывали на возможность использования ИКТ в экспериментах на биомоделях для оценки противовоспалительной активности агентов в фармакокинетических исследованиях.

Термографические методы были применены для оценки васкуляризации и поверхностной температуры химически индуцированных опухолей у крыс. Зарегистрированная максимальная температура опухоли коррелировала с размерами злокачественного новообразования, и термографические данные характеризовали процессы ангиогенеза в опухоли [31]. ИКТ может быть задействована для оценки тепловых эффектов электромагнитных излучений у биообъектов непосредственно во время и в динамике после воздействия [32]. Термография также применялась для диагностики воспаления и наблюдения за заживлением травм. Использование ИКТ имеет значение для выявления незаконных улучшающих (допинговых) процедур при проведении спортивных соревнований [28].

Большим преимуществом термографии в исследовании биообъектов является возможность про-

водить измерения на разном расстоянии от них, не касаясь и не мешая животному [29]. Основные проблемы при измерении температуры у биообъектов связаны с трудностями, возникающими в процессе их регистрации, поскольку традиционные процедуры с участием экспериментатора являются инвазивными и вызывают стрессорные реакции. ИКТ может использоваться для мониторинга физиологического состояния биообъектов, в частности для оценки эффективности кормления, диагностики беременности и контроля ответных реакций на стресс [30]. Цвет покровов животных не оказывает эффекта на данные термографии. При изучении инфекционных заболеваний не требуется прямого контакта исследователя с зараженными биообъектами. Разработаны способы регистрации температуры тела у движущегося объекта на термографических изображениях. Тепловизор подходит для проведения исследований лабораторных и экспериментальных животных, так как отпадает необходимость использования инвазивных датчиков, которые могут принести неудобства биообъекту, и он может попытаться от него избавиться, а также проводов к датчикам, которые могут запутаться во время движения.

С помощью ИКТ возможно осуществлять отбор и предварительную отбраковку некондиционных экспериментальных животных. Скрининговые термографические исследования обнаруживают скрытые нарушения, предшествующие серьезным и необратимым изменениям, что предотвращает использование в исследованиях изначально или потенциально больных животных с интеркуррентными заболеваниями [33]. При моделировании инфекционных болезней у грызунов температурные показатели были индикаторами смертельного исхода. С помощью дистанционной регистрации температуры тела осуществляли мониторинг для предсказания надвигающейся смерти и выявления более ранней гуманной «конечной точки» эксперимента [34].

Выбор объекта для термографического исследования. Важную роль в поддержании постоянной температуры тела у млекопитающих играет шерстный покров. Для измерения температуры в ряде случаев рекомендуют вырывать или удалять волосы с определенных участков кожи [30]. С другой стороны, удаление волос не всегда представляется возможным и не желательно для большинства исследований. Нос, уши, глаза и другие части тела, где присутствует голая кожа, являются областями, где можно определять температуру животного [9]. К зонам с ярко выраженными колебаниями температуры относят зону глаз, непосредственно контактирующих с окружающей средой [35]. При этом необходимо учитывать, что ИКТ можно проводить только тогда, когда теплообменный орган полностью виден. При беспрепятственном перемещении животного при оценке двигательной активности и поведения самая высокая температура отображается в точках, соответствующих глазам и ушам животных [36].

Единственным органом, доступным для непосредственного тепловизионного наблюдения, являются глаза. В живом организме изменения температуры разных частей и ядра тела коррелируют с температурой поверхности в области глаз [33, 37]. При спазме сосудов, питающих глаз, наблюдали снижение температуры роговицы, дилатация сосудов сопровождалась повышением температуры [2]. Область глаз является регионом для обнаружения изменений температуры тела млекопитающих при воспалениях

[38]. Хвост является важным органом терморегуляции у крыс. Уменьшение температуры поверхности хвоста сопровождалось кожной вазоконстрикцией. Поток крови в хвосте возрастал с повышением внутренней температуры, увеличение температуры хвоста в ответ на увеличение температуры тела было пропорциональным [39].

ИКТ при исследовании поведения биообъектов. Применение при оценке поведенческих реакций биообъектов систем на основе технического зрения в видимой области спектра ограничивается факторами, связанными с цветом, контрастом, яркостью освещения, окраской животных, сложным фоном, и плохой переносимостью к разного рода техническим помехам. Для изучения поведения животных в отдельных случаях также были использованы инфракрасные камеры, которые имеют достаточное разрешение и чувствительность для регистрации температуры поверхности тела, при этом процедура измерений не влияет на поведение биообъектов [40]. С помощью тепловидения выявляют объекты вне зависимости от цвета животных и фона окружающей области исследования. Использование последовательностей инфракрасных изображений позволяет регистрировать движения объекта, так как качество термограмм не зависит от условий освещения. ИКТ является неинвазивной альтернативой существующим методам измерения температуры, и объединение тепловизора с программами видеотрекинга позволило получить комплексную дистанционную систему, которая может отслеживать траекторию движения, оценивать поведение и температуру тела биообъекта одновременно. Системы комплексного мониторинга поведенческих и температурных реакций животных используют при изучении эмоциональности, тревожно-фобических состояний, агрессии, когнитивных функций и памяти. Измерения температуры можно проводить в различных частях тела (например, голова, туловище, хвост) одновременно [9, 29].

Изменения психоэмоционального состояния у человека и животных традиционно оценивают с помощью косвенных физиологических и поведенческих показателей, но инвазивность большинства процедур физиологических исследований, особенно для более мелких по размерам животных, существенно ограничивает их применение. Наряду с возможностями обнаружения изменений периферического кровотока неинвазивный и простой в использовании метод ИКТ был использован для физиологической оценки эмоционального состояния экспериментальных биообъектов и у человека [8]. Сужение сосудов при стрессе уменьшало перфузию крови, что отражалось на термограмме появлением очага гипотермии. При моделировании стресса у кроликов определяли температуру глаз и ушей, разница температур была положительна на начальном этапе исследования и отрицательна при развитии стрессорной реакции [40], минимальная температура глаз и носа кроликов позволила оценить потери тепла при тепловом стрессе [41].

При оценке тревожно-фобических состояний данные динамической ИКТ хвоста биообъектов имели тенденцию к снижению, одновременно с этим температура глаз увеличивалась при экспериментальном моделировании стрессорных реакций [8, 42]. Повышение температуры глаз в стрессовых ситуациях также зарегистрировано у коров, собак и лошадей [42]. Термография использовалась для оценки реакции на стресс и разработки технологий скрининга в нейрофизиологии, в том числе с учетом состояния

сосудистого кровотока, дыхания и активации потовых желез [43]. Предложен способ выявления болюсов дефекаций и пятен уринаций при исследовании поведения экспериментальных биообъектов в открытых аренах этологических тестов с помощью тепловизионной регистрации [44].

Температурная асимметрия и количественный анализ термограмм. У здоровых людей и животных температура кожи распределена симметрично относительно оси, расположенной в медианной плоскости тела. Для тепловизионной диагностики патологического состояния определенного органа или части тела основными критериями служат показатели термоасимметрии и величины перепада температуры. В ряде случаев тепловая симметрия и тепловое распределение являются более важными диагностическими параметрами, чем абсолютная температура. При наличии патологического процесса происходит изменение нормальной картины распределения температуры по поверхности тела, что фиксируется в виде температурной асимметрии. Температурные распределения, регистрируемые с помощью современных матричных ИК-систем, позволяют анатомически точно визуализировать структуру поврежденных сосудов и выявлять начальные стадии нарушений микроциркуляции. Для выявления температурной асимметрии используют построение гистограмм и определение статистических параметров распределения величин температуры на изучаемой площади поверхности тела [1, 2, 7]. Необходимо отметить, что специализированное программное обеспечение для компьютерной обработки термограмм входит в состав комплектов современного тепловизионного оборудования.

Морфофункциональные корреляции с данными ИКТ. Температура кожи, измеренная с помощью ИКТ, коррелировала с уровнем кровотока и являлась биомаркером сосудистых дисфункций. Выявлена связь между температурой поверхности кожи и кровообращением в подстилающей ткани [45]. Показатели ИКТ коррелировали с результатами лазерной доплеровской визуализации при заболеваниях, поражающих кожные ткани и систему микроциркуляции [46]. При введении сосудорасширяющих средств температура кожи коррелировала с показателями кровотока, полученными с помощью плетизмографии [45]. Выявлена сильная отрицательная корреляционная связь между изменениями температуры поверхности туловища и уровнем максимального потребления кислорода при оценке физической работоспособности в нагрузочном тестировании [26]. Определена сильная положительная корреляционная связь между онкометрическими величинами объема конечностей и показателями ИКТ при оценке противовоспалительной активности потенциальных лекарственных препаратов в экспериментальной фармакологии [47]. Сильные корреляционные связи данных ИКТ и индуктивной плетизмографии демонстрируют возможность использования тепловидения лица в качестве бесконтактной технологии для контроля дыхания [48]. С помощью ИКТ определены взаимосвязи колебаний температуры и кожного кровотока, при этом выявлено сходство формы колебаний кровотока и температуры конечностей [49, 50].

Одним из показателей расхода энергии являлась физическая активность, параметры которой коррелировали с результатами температурных измерений. Установлены статистически значимые корреляционные взаимосвязи физиологических показателей

тепловых реакций и поведенческих проявлений эмоций, зарегистрированных в ходе исследования реакций страха. У биообъектов с более высокой исходной температурой хвоста, глаз и тела в целом имела место более выраженная исследовательская активность, что может быть использовано для прогнозирования по данным ИКТ наличия и развития психоэмоциональных гиперактивных или тревожно-фобических расстройств [8].

При проведении тепловизионных исследований экспериментальных биообъектов необходимо учитывать ряд ограничений, связанных с тем, что ИКТ является высокочувствительным, но недостаточно специфичным методом медицинской и ветеринарной диагностики. В клинической практике при ИКТ в основном применяют визуальный анализ. Во многих случаях температурные изменения обусловлены неспецифическими типовыми изменениями системы микроциркуляции крови организма, которые имеют место при развитии любого патологического процесса. Относительная специфичность ИКТ-диагностики может быть установлена при выявлении количественных взаимосвязей термографических данных с результатами функциональных и морфологических исследований. При этом при проведении экспериментальных работ гистологическое и морфометрическое исследование микроструктурных изменений в органах и тканях является объективным референтным методом, в том числе для данных ИКТ биообъектов при экстремальных воздействиях.

Таким образом, ИКТ как функциональный метод исследования не имеет противопоказаний, неинвазивен, дистанционен, прост в использовании и безопасен для пациентов, биообъектов и персонала. Тепловизионная регистрация используется в качестве средства бесконтактного неразрушающего контроля в инженерно-техническом обеспечении. Современную термографическую аппаратуру на широкоформатных неохлаждаемых матрицах также применяют в качестве составной части комплексных клинических медицинских и ветеринарных диагностических исследований. В основе диагностики лежат аппаратные и программные средства визуализации аномалий в виде градиентов температур исследуемых областей поверхности тела и асимметрии термопортретов, а также количественные абсолютные и относительные температурные показатели различных участков тела. Величины температурных показателей в основном определяются кровотоком в периферических сосудах и метаболическими процессами в подлежащих тканях и органах. При проведении комплексных медицинских исследований, включающих ИКТ, решают диагностические задачи ряда онкологических, инфекционных, кожных, неврологических, опорно-двигательных, ревматических и других заболеваний, в том числе в педиатрии и неонатологии. Установлены корреляционные взаимосвязи температурных показателей и параметров термоасимметрии с данными функциональных исследований, характеризующие диагностические возможности тепловидения, его значение в контроле проводимых лечебных и реабилитационных мероприятий, в оценке состояния организма в спортивной медицине.

Вместе с тем методы ИКТ в недостаточной степени используют в экспериментальной медицине, в частности при изучении неблагоприятного биологического действия различных вредных и опасных экстремальных факторов, основным проявлением которых являются системные микрососудистые на-

рушения, определяющие состояние дееспособности биомоделей человека. Практически отсутствуют результаты экспериментальных медико-биологических исследований, позволяющие на основании термографических данных, характеризующих изменения периферической гемодинамики, проводить оценку функционального состояния, поведения, памяти и когнитивных функций, физической работоспособности у подопытных биообъектов в ранние сроки после экстремальных воздействий. Наряду с этим, установлено, что тепловизионные исследования биообъектов разных видов при соблюдении определенных условий позволяют дистанционно тестировать их многократно, не подвергая дополнительным травматическим или стрессующим процедурам. Получаемые результаты не зависят от цвета тестовых арен и окраски шерсти и кожи животных, тепловизионную регистрацию можно проводить при слабом или неравномерном освещении и в полной темноте. Использование тепловизора при исследованиях лабораторных крыс и мышей позволило четко определять их контуры для проведения видеотрекинга в любых условиях содержания и тестирования. Анализ литературных данных свидетельствует о возможности проведения комплексных морфофункциональных экспериментальных исследований для сопоставления и определения прогностических статистических взаимосвязей результатов ИКТ с параметрами, характеризующими психоэмоциональное состояние и работоспособность биообъектов, а также с показателями системы микроциркуляции крови в центральной нервной системе, жизненно важных внутренних органах и кожных покровах. Данные динамических термографических исследований подопытных биообъектов разных видов могут быть использованы для оценки нарушений периферического кровообращения, двигательной активности, физической выносливости и оперантного поведения биомоделей, подвергнутых воздействию экстремальных факторов, в том числе в ранние сроки после проведения экспериментальных исследований в лабораторных и выездных работах.

Авторский вклад: написание статьи — А. В. Даценко, В. И. Казьмин; утверждение рукописи для публикации — А. В. Даценко.

References (Литература)

- Ivanitsky GR, Khizhnyak EP, Deev AA. Biophysical basis of medical thermovision. *Biophysics* 2012; 57 (1): 130–139. Russian (Иваницкий Г. Р., Хижняк Е. П., Деев А. А. Биофизические основы медицинского тепловидения. *Биофизика* 2012; 57 (1): 130–139).
- Skripal AV, Sagaydachnyy AA, Usanov DA. Teplovizionnaya biomeditsinskaya diagnostika. Saratov: Saratov University, 2009; 118 p. Russian (Скрипаль А. В., Сагайдачный А. А., Усанов Д. А. Тепловизионная биомедицинская диагностика. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009; 118 с.).
- Kolesov SN, Volovik MG. Sovremennaya metodologiya teplovizionnykh issledovaniy i teplovizionnaya diagnosticheskaya apparatura. *Journal of Optical Technology* 2013; 80 (6): 59–67. Russian (Колесов С. Н., Воловик М. Г. Современная методология тепловизионных исследований и тепловизионная диагностическая аппаратура. *Оптический журнал* 2013; 80 (6): 59–67).
- Fitzgerald A, Berentson-Shaw J. Thermography as a screening and diagnostic tool: a systematic review. *N Z Med J* 2012; 125 (1350): 80–91.
- John HE, Niumsawatt V, Rozen WM, Whitaker IS. Clinical applications of dynamic infrared thermography in plastic surgery: a systematic review. *Gland Surg* 2016; 5 (2): 122–132.
- Neves EB, Vilaça-Alves J, Rosa C, Reis VM. Thermography in Neurologic Practice. *Open Neurol J* 2015; 9: 24–27.
- Mekshina LA, Usynin VA, Stolyarov VV, Usynin AF. Thermal imaging in the diagnosis of obliterating diseases of lower limb arteries. *Siberian Medical Journal* 2012; 27 (2): 15–22. Russian (Мекшина Л. А., Усынин В. А., Столяров В. В., Усынин А. Ф. Применение тепловидения в диагностике облитерирующих заболеваний артерий нижних конечностей. *Сибирский медицинский журнал* 2012; 27 (2): 15–22).
- Lecorps B, Rödel HG, Féron C. Assessment of anxiety in open field and elevated plus maze using infrared thermography. *Physiol Behav* 2016; 157: 209–216.
- Redaelli V, Ludwig N, Nanni Costa L, et al. Potential application of thermography (IRT) in animal production and for animal welfare. A case report of working dogs. *Ann Ist Super Sanita* 2014; 50 (2): 147–152.
- Redaelli V, Tanzi B, Luzi F, et al. Use of thermographic imaging in clinical diagnosis of small animal: preliminary notes. *Ann Ist Super Sanita* 2014; 50 (2): 140–146.
- Ring EF, Ammer K. Infrared thermal imaging in medicine. *Physiol Meas* 2012; 33 (3): R33–46.
- Stavrovsky KM. Automatic diagnostic and analysis of thermal images in medical practice. *Electronics and communications* 2014; 19 (1): 47–55. Russian (Ставоровский К. М. Автоматическая диагностика и анализ термограмм в медицинской практике. *Electronics and communications* 2014; 19 (1): 47–55).
- Usanov DA, Skripal AV, Protopopov AA, et al. Estimation of blood vessels functional state by means of analysis of temperature reaction on occlusive test. *Saratov Journal of Medical Scientific Research* 2009; 5 (4): 554–558. Russian (Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Протопопов А. А. и др. Оценка функционального состояния кровеносных сосудов по анализу температурной реакции на окклюзионную пробу. *Саратовский научно-медицинский журнал* 2009; 5 (4): 554–558).
- Urakova NA. Decrease of the temperature of the head of the fetus during birth as a symptom of Hypoxia. *Thermology International* 2013; 23 (2): 74–75.
- Allen J, Howell K. Microvascular imaging: techniques and opportunities for clinical physiological measurements. *Physiol Meas* 2014; 35 (7): R91–R141.
- Lokaj M, Czaplá N, Falkowski A, Prowans P. The use of thermography in early detection of tissue perfusion disorders in rats. *Videosurg and Other Miniinvasive Techniques* 2014; 9 (3): 329–336.
- Rogatkin DA, Makarov DS, Bychenkov OA, Shcherbakov MI. Teplovizionnyy kontrol' protsessov nagreva i mikrotsirkulyatsii krovi pri provedenii nizkointensivnykh lazernykh terapevticheskikh protsedur. *Journal of Optical Technology* 2011; 78 (10): 38–45. Russian (Рогаткин Д. А., Макаров Д. С., Быченков О. А., Щербачев М. И. Тепловизионный контроль процессов нагрева и микроциркуляции крови при проведении низкоинтенсивных лазерных терапевтических процедур. *Оптический журнал* 2011; 78 (10): 38–45).
- Urakov AL, Kasatkin AA, Urakova NA. Infrared thermography fingers and palms shock as way for evaluating stability of patients to hypoxia and «responsiveness» to resuscitation. *Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii* 2013; 44 (4): 169–171. Russian (Ураков А. Л., Касаткин А. А., Уракова Н. А. Инфракрасная термография пальцев и ладоней при шоке как способ оценки устойчивости пациентов к гипоксии и «отзывчивости» их к оживлению. *Вестник Российской военно-медицинской академии* 2013; 44 (4): 169–171).
- Urakov AL, Urakova NA, Kasatkin AA, et al. Infrared diagnostic of hypoxia. *International journal of applied and fundamental research* 2014; (11-5): 855–858. Russian (Ураков А. Л., Уракова Н. А., Касаткин А. А. и др. Инфракрасная диагностика гипоксии. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований* 2014; (11-5): 855–858).
- Kasatkin AA. Cuff occlusion test as a method of assesment successful treatment of hemorrhagic choc. *Medical examination problems* 2014; 14 (1): 28–31. Russian (Касаткин А. А. Манжеточный окклюзионный тест как способ оценки успешности терапии геморрагического шока. *Проблемы экспертизы в медицине* 2014; 14 (1): 28–31).
- Motoyama H, Chen F, Hijjya K, et al. Novel thermographic detection of regional malperfusion caused by a thrombosis during ex vivo lung perfusion. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2015; 20 (2): 242–247.
- Shejbal D, Drvis P, Bedekovic V. Thermography-measured effect of capsaicin, methylprednisolone and mitomycin

- on the survival of random skin flaps in rats. *Skin Res Technol* 2012; 18 (2): 157–161.
23. Viter VI, Chirkov SV, Vavilov AJu. Possibilities of thermographic diagnostic of damages of a mucous membrane of a mouth of the suffered alive persons. *Medical examination problems* 2014; 14 (1): 19–21. Russian (Витер В.И., Чирков С. В., Вавилов А.Ю. Возможности термографической диагностики повреждений слизистой оболочки рта пострадавших живых лиц. *Проблемы экспертизы в медицине* 2014; 14 (1): 19–21).
24. Hardwicke J, Thomson R, Bamford A, Moiem N. A pilot evaluation study of high resolution digital thermal imaging in the assessment of burn depth. *Burns* 2013; 39 (1): 76–81.
25. Podtaev SYu, Mizeva IA, Smirnova EN. Diagnostika funktsional'nogo sostoyaniya sistemy mikrotsirkulyatsii na osnove termometrii vysokogo razresheniya. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra* 2012; (3-4): 11–20. Russian (Подтаев С. Ю., Мизева И.А., Смирнова Е.Н. Диагностика функционального состояния системы микроциркуляции на основе термометрии высокого разрешения. *Вестник Пермского научного центра* 2012; (3-4): 11–20).
26. Adamczyk JG, Mastej M, Boguszewski D, Białoszewski D. Usage of thermography as indirect non-invasive method of evaluation of physical efficiency: Pilot study. *Pedagogy, Psychology, Medical-Biological Problems of Physical Training and Sports* 2014; (3): 90–95.
27. Karkishchenko NN, Uyba VV, Karkishchenko VN, Shustov EB. *Ocherki sportivnoy farmakologii*. Vol. 1: Vektory ekstrapolyatsii. Moscow: Aysing, 2013; 288 p. Russian (Каркищенко Н.Н., Уйба В.В., Каркищенко В.Н., Шустов Е.Б. *Очерки спортивной фармакологии*. Т. 1: Векторы экстраполяции. М.: Айсинг, 2013; 288 с.).
28. Eddy AL, Van Hoogmoed LM, Snyder JR. The role of thermography in the management of equine lameness. *Vet J* 2001; 162 (3): 172–181.
29. McCafferty DJ. The value of infrared thermography for research on mammals: Previous applications and future directions. *Mammal Review* 2007; 37 (3): 207–223.
30. Rekant SI, Lyons MA, Pacheco JM, et al. Veterinary applications of infrared thermography. *Am J Vet Res* 2016; 77 (1): 98–107.
31. Faustino-Rochaa AI, Silvab A, Gabrielb J, et al. Ultrasonographic, thermographic and histologic evaluation of MNU-induced mammary tumors in female Sprague-Dawley rats. *Biomed Pharmacother* 2013; 67 (8): 771–776.
32. Kiziltan HS, Eris AH, Bayir AG, et al. Thermal and biochemical effects of low level electromagnetic radiation on rat brains and bodies. *Panacea Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences* 2014; 3 (2): 29–34.
33. Dunbar MR, Johnson SR, Rhyan JC, McCollum M. Use of infrared thermography to detect thermographic changes in mule deer (*Odocoileus hemionus*) experimentally infected with foot-and-mouth disease. *J Zoo Wildl Med* 2009; 40 (2): 296–301.
34. Warn PA, Brampton MW, Sharp A, et al. Infrared body temperature measurement of mice as an early predictor of death in experimental fungal infections. *Lab Anim* 2003; 37 (2): 126–131.
35. Svejdoва K, Šoch M, Šimkova A, et al. Measuring the body surface temperature of animals using a thermographic camera. *Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology* 2013; 17 (2): 99–106.
36. Carstens AM, Tambara EM, Matias JEF, et al. Vasomotor effect after acute intoxication with bupivacaine and levobupivacaine in rats via intraperitoneal route analyzed via digital infrared imaging. *Rev Bras Anesthesiol* 2011; 61 (2): 188–193.
37. George WD, Godfrey RW, Ketring RC, et al. Relationship among eye and muzzle temperatures measured using digital infrared thermal imaging and vaginal and rectal temperatures in hair sheep and cattle. *J Anim Sci* 2014; 92 (11): 4949–4955.
38. Church JS, Hegadoren PR, Paetkau MJ, et al. Influence of environmental factors on infrared eye temperature measurements in cattle. *Res Vet Sci* 2014; 96 (1): 220–226.
39. Ngampramuan S, Cerri M, Del Vecchio F, et al. Thermoregulatory correlates of nausea in rats and musk shrews. *Oncotarget* 2014; 5 (6): 15651575.
40. Ludwig N, Gargano M, Luzi F, et al. Applicability of infrared thermography as a non invasive measurement of stress in rabbit. *World Rabbit Sci* 2007; 15 (4): 199–205.
41. de Lima V, Piles M, Rafel O, et al. Use of infrared thermography to assess the influence of high environmental temperature on rabbits. *Res Vet Sci* 2013; 95 (2): 802–810.
42. Dai F, Cogi NH, Heinzl EUL, et al. Validation of a fear test in sport horses using infrared thermography. *J Vet Behav Clin Appl Res* 2015; 10 (2): 128–136.
43. Shastri D, Merla A, Tsiamyrtzis P, Pavlidis I. Imaging facial signs of neurophysiological responses. *IEEE Trans Biomed Eng* 2009; 56 (2): 477–484.
44. Datsenko AV, Kazmin VI. Thermovision registration of defecation and urination in the evaluation of emotional state of experimental biological objects in the open arenas of behavioral tests. *Saratov Journal of Medical Scientific Research* 2014; 10 (4): 771–776. Russian (Даценко А.В., Казмин В.И. Термоизионная регистрация дефекаций и уриаций при оценке психоэмоционального состояния экспериментальных биообъектов в открытых аренах поведенческих тестов. *Саратовский научно-медицинский журнал* 2014; 10 (4): 771–776).
45. Gorbach AM, Ackerman HC, Liu WM, et al. Infrared imaging of nitric oxide-mediated blood flow in human sickle cell disease. *Microvasc Res* 2012; 84 (3): 262–269.
46. Pauling JD, Shipley JA, 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 (2): 162–167.
47. Petrova AA. *Infrakrasnaya termografiya v eksperimental'noy farmakologii dlya otsenki protivovospalitel'noy aktivnosti potentsial'nykh lekarstvennykh preparatov*. *Advances in current natural sciences* 2014; (6): 107. Russian (Петрова А.А. Инфракрасная термография в экспериментальной фармакологии для оценки противовоспалительной активности потенциальных лекарственных препаратов. *Успехи современного естествознания* 2014; (6): 107).
48. Lewis GF, Gatto RG, Porges SW. A novel method for extracting respiration rate and relative tidal volume from infrared thermography. *Psychophysiology* 2011; 48 (7): 877–887.
49. Usanov DA, Sagaidachnyi AA, Skripal AV, Fomin AV. Interrelation of temperature and blood flow oscillations of fingers. *Regional Haemodynamics and Microcirculation* 2012; 11 (2): 37–42. Russian (Усанов Д.А., Сагайдачный А.А., Скрипаль А.В., Фомин А.В. Взаимосвязь колебаний температуры и кровотока пальцев рук. *Регионарное кровообращение и микроциркуляция* 2012; 11 (2): 37–42).
50. Sagaidachnyi AA, Skripal AV, Fomin AV, Usanov DA. Determination of the amplitude and phase relationships between oscillations in skin temperature and photoplethysmography — measured blood flow in fingertips. *Physiol Meas* 2014; 35 (2): 153–166.