

УДК 57.621.383

**Б.Г. Вайнер**

Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Российская Федерация  
Новосибирский государственный университет,  
Новосибирск, Российская Федерация

## **СОВРЕМЕННАЯ ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ФОТОНИКА В БИОМЕДИЦИНЕ**

В статье показано, что современная фотоника, реализованная в виде матричной инфракрасной термографии (матричного тепловидения), обладает высоким потенциалом для высокоинформативного извлечения новых знаний об организме млекопитающих, в том числе человека.

**Ключевые слова:** тепловидение, динамическая инфракрасная термография, физиология человека и животных, метод сорбционно-усиленной инфракрасной термографии, интервентный принцип обследования, автоматизированные синхронные многоканальные измерения.

**B.G. Vainer**

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation  
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

## **MODERN INFRARED THERMOGRAPHY PHOTONICS IN BIOMEDICINE**

It is shown in the paper that modern photonics, implemented in the form of the focal plane array (FPA)-based infrared thermography (FPA-based thermal imaging), has high potential for highly informative extraction of new knowledge about the mammal's organism, including humans.

**Keywords:** thermal imaging, dynamic infrared thermography, human and animal physiology, Sorption-Enhanced Infrared Thermography (SEIRT) method, interventional principle of examination, automated synchronous multichannel measurements.

### **Введение**

В медицине к тепловидению сегодня часто относятся как к одному из спорных и не до конца однозначных методов диагностики. С момента зарождения в середине 50-х годов прошлого столетия, когда канадский хирург Лоусон своими статьями [1, 2] произвел, как тогда казалось, революцию в маммологии, этот метод за короткий период сумел пережить

и молниеносный взлет (к середине 70-х), и падение (конец 80-х), и новый выраженный подъем (со середины 90-х гг. XX века).

Последний из вышеупомянутых успешных этапов развития обязан двум решающим обстоятельствам: стремительному прогрессу в области микроэлектроники, позволившему сделать широкодоступными матричные детекторы инфракрасного (ИК) излучения, и столь же бурному развитию компьютерных и цифровых технологий, сумевших превратить «любительские» тепловизионные фотографии в многопиксельные оцифрованные тепловые поля, измеренные с температурным разрешением в сотые и даже тысячные доли градуса за времена порядка сотых и тысячных долей секунды [3]. Столь революционные изменения позволили теперь не только «видеть» тепло, но также получать из тепловых изображений двумерные и трехмерные графики [4, 5], наблюдать эволюцию последних с течением времени [6, 7] и даже выражать на количественном уровне степень гетерогенности двумерных термограмм [8, 9]. Тепловидение нового поколения, реализующее возможность количественного анализа изображений, принято называть ИК-термографией, а когда с ее помощью производят запись термофильмов с регистрацией быстропротекающих тепловых процессов – динамической ИК-термографией.

Тепловизоры применяют во многих научно-технических и народно-хозяйственных областях, но часто на примитивном уровне, ограничиваясь лишь распознаванием двумерного теплового профиля объекта. В редчайших случаях используют скоростные свойства современных тепловизионных камер с их способностью регистрировать сотни и тысячи последовательных термограмм в секунду. Еще реже полноценно реализуют высокую температурную чувствительность (сотые и тысячные доли градуса) приборов [10]. И совсем уж невероятно увидеть, когда динамическая ИК-термография высокого разрешения применяется синхронно с записью результатов измерений того же объекта другими, независимыми от тепловидения, методами, не говоря уже о сопровождающей эту процедуру математической обработке потоков данных, одновременно приходящих по всем вышеупомянутым измерительным каналам.

В ранних тепловизионных камерах использовали в качестве детектора излучения одноэлементные или линейчатые фотоприемники. Для получения полноформатной двумерной картины при этом требовалось пользоваться «услугами» оптико-механического сканера, который

встраивался в прибор и осуществлял развертку изображения. При замене ИК-детекторов на матричные были существенно улучшены технические характеристики тепловизионных камер по совокупности их основных параметров – температурной чувствительности, быстродействию, пространственному разрешению. Матричные тепловизоры дали старт развитию современной тепловизионной фотоники, которой посвящена настоящая статья.

Здесь следует оговорить одну немаловажную деталь. Многие связывают термин «фотоника» исключительно с технической стороной вопроса и интерпретируют это понятие сообразно термину «авионика». При таком понимании можно было бы считать, что с появлением матричных детекторов излучения тепловизионная фотоника достигла своего совершенства и тем самым себя исчерпала. Однако подобный ограниченный взгляд является заблуждением. Фотоника определяется не только уровнем техники, параметрами и потребительскими качествами фотоприемных устройств, но она включает в себя также широкую область исследований, приносящих, благодаря использованию свойств фотонов, новые знания. На тепловидение при этом «работают» фотоны инфракрасного спектрального диапазона. Однако чтобы такая работа приносила пользу, наличие одних лишь тепловизионных камер, пусть даже высочайшего технического уровня, вовсе не является достаточным.

Действительно, попробуем ответить на вопрос: какой из дорогостоящих приборов при ограниченном финансировании приобретет сегодня клиника – совершенный тепловизор с рекордными техническими характеристиками или, например, за те же деньги магниторезонансный томограф?

Ответ очевиден. В современном мире сложилась парадоксальная ситуация. На рынке можно приобрести тепловизионные камеры высочайшего класса, заведомо удовлетворяющие нужды сколь угодно требовательной диагностической медицины, но, несмотря на солидный возраст медицинского тепловидения и соответствующий накопленный врачебный опыт, тепловизионная техника остается, тем не менее, весьма маловостребованной. Стоит хотя бы сравнить оснащенность медицинских учреждений тепловизорами и аппаратами ультразвуковой или рентген-диагностики.

С чем связан этот парадокс? Может быть, температурные портреты человеческого тела не содержат полезной информации, способной заинтересовать «видавших виды» медиков?

Вовсе не так. Протекающие внутри человека биологические процессы сопровождаются, как известно, непрерывным выделением и поглощением теплоты [11]. И распознавание особенностей этих процессов несет для квалифицированного и думающего врача не просто полезную, а бесценную информацию о состоянии организма. Поверхность тела (у человека – кожа) служит выразительным органом, демонстрирующим скрытую внутреннюю жизнь живого объекта с ее разнообразными и, как правило, нестационарными энергетическими превращениями. Температурная картина передней, задней или боковых поверхностей тела, которую тепловизор «запросто» способен предоставить физиологу или врачу всю целиком за доли секунды, а при желании также и записать в реальном масштабе времени любой по длительности эпизод, отражающий изменение этой картины, – подобные «подарки» не в силах делать ни одна медицинская технология, кроме тепловизионной.

Но именно в этом месте и возникает загвоздка: как прочитать этот высокоинформативный температурный «язык тела»? Даже в таких давно уже ставших классическими диагностиках, как рентгенография, магниторезонансная томография, УЗИ, и то встречается масса нюансов, корректная интерпретация которых требует высокой квалификации врача. В тепловидении всё «еще хуже». Поверхностная температурная картина, регистрируемая прибором, определяется, главным образом, тремя биофизическими факторами: поверхностным кровотоком, теплопритоками от заглубленных органов и тканей и потоотделением. Понимая это, становится ясным любому, кто хоть однажды был свидетелем, как человек почти мгновенно розовел, бледнел или покрывался потом, что термограмма поверхности тела чрезвычайно чувствительна к физическому, физиологическому, эмоциональному и иным состояниям пациента. И в ходе тепловизионного обследования надо принять массу предосторожностей, чтобы достоверная диагностическая картина не утонула в коварной и многоликой коллекции артефактов. К слову, осознавая затронутую проблему, следует всегда стремиться к тому, чтобы для исключения возможного психофизического воздействия диагностической процедуры на испытуемого используемые методы были бы, сообразно тепловидению, не только неинвазивными, но и дистанционными.

Что из этого следует? А то, что обеспечение корректной медицинской интерпретации внешних температурных полей человеческого тела становится, по сути, задачей, решаемой применительно к каждому конкретному больному персонально. Такой персонализированный подход

требует от врача не только исключительной внимательности, но также высочайшего уровня знаний в области анатомии, физиологии и функциональной диагностики. Тепловизионный метод обследования при этом превращается из строго детерминированной технологии, характерной для медицинской специализации, в тонкое искусство, которому весьма трудно, а то и невозможно обучить студента за годы его пребывания в медицинском университете.

Таким образом, современный мир нуждается уже не в создании совершенных тепловизоров, коих на рынке стало вполне достаточно, а в надежной тепловизионной методологии, позволяющей выявлять из измеренных данных патогномичные признаки заболеваний и патологических отклонений организма от нормы. Лишь разработка таких методов, ориентированных на использование высоких параметров современной матричной техники, позволит разрешить упомянутый выше парадокс и сделать тепловизоры неотъемлемым атрибутом любой клиники. Тепловизионная фотоника призвана решить эту задачу.

Несмотря на все сложности, с которыми встретилась тепловизионная диагностика на пути своего становления и развития, не стоит терять оптимизма. Ниже представлены иллюстрирующие примеры, которые показывают, что даже такая «противоречивая» и, казалось бы, неоднозначная технология, как биомедицинское тепловидение, позволяет успешно разрабатывать новые высокоинформативные подходы, приносящие с помощью тепловизионной камеры уникальные знания, не доступные другим методам исследования. Действуя, в свою очередь, совместно с другими независимыми диагностическими методами и реализуя обследование в условиях интервентных нагрузок на испытуемого, у тепловизионной фотоники открываются многообещающие перспективы, которые могут привести к лучшему пониманию текущего и даже прогнозируемого физиологического и функционального статуса организма людей и животных.

### **Принцип синхронных многоканальных измерений с интервентным воздействием на объект исследования**

Широко практикуемый в медицине принцип назначения серии диагностических обследований, предполагающий последовательное (друг за другом) применение аппаратных средств, причем, как правило, без сопровождающих такие процедуры функциональных проб (нагрузок),

рискует завершиться получением некорректных сведений о состоянии организма пациента, поскольку в естественных перерывах между обследованиями статус организма способен меняться. Гораздо более достоверной диагностики и избавления от вышеописанной ошибки можно достичь, если все измерения проводить синхронно, в едином цикле, получая информацию об организме по множеству его биофизических каналов одновременно. Таких каналов может быть порядка 10 и больше.

Поскольку жизнеобеспечивающие системы в организме взаимосвязаны, в мультиканальном режиме можно учесть и, при необходимости, определить степень их влияния друг на друга, что имеет самостоятельное диагностическое значение. Более того, после интервентного воздействия на испытуемого (проведения диагностической функциональной пробы) траектория возврата из возбужденного к исходному состоянию несет важную информацию о резервах организма, в том числе о его потенциальной способности сопротивляться патологиям. Измерительный синхронизм силён тем, что в период, когда все основные жизнеобеспечивающие системы дружно взаимодействуют, будучи связанными между собой, можно искать признаки согласованности или же рассогласованности в их функционировании. И диагностически значимыми являются результаты этого поиска. Ведь естественно предположить, что в пораженном организме уже на начальных стадиях заболевания возврат к исходному состоянию после оказанного интервентного воздействия будет отличаться от того, как это происходит в здоровом. И целью является выявить такие отличия в траекториях возврата.

С учетом изложенного принцип интервентности, реализуемый через проведение комплекса мягких функциональных проб, может рассматриваться как высокоперспективная тактика в синхронной мультиканальной диагностике физиологического и функционального состояния живого объекта как целого. Полностью пассивный, и потому щадящий, тепловизионный метод исследования позволяет реализовать необременительность технологии диагностического тестирования для испытуемого. Как правило, испытуемый в ходе обследования находится в комфортном положении, не претерпевая каких-либо паразитных (недокументированных) воздействий, кроме заданной протоколом интервенции (рис. 1). Такие условия позволяют целенаправленно изучать отклик его организма на вариацию параметров используемых функциональных проб (длительность, интенсивность и пр.) и делать достоверные выводы из результатов таких обследований.



Рис. 1. Вид испытуемого в процессе автоматизированного многоканального интервентного обследования

Пример одного из часто реализуемых интервентных воздействий – кратковременная задержка дыхания – приведен на рис. 2. Здесь в качестве биофизического отклика на такое вмешательство в гомеостаз было обнаружено изменение температуры пальцев рук, свидетельствующее об изменении характера периферического кровообращения.

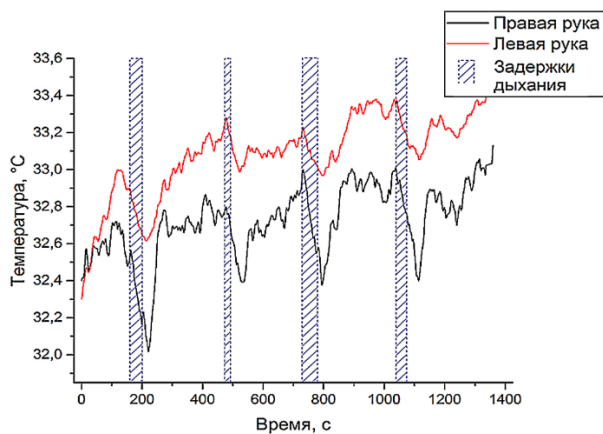


Рис. 2. Изменение температуры пальцев рук испытуемого в ответ на кратковременные задержки дыхания; температура измерялась матричным тепловизором ТКВр-ИФП/СВИТ

Температура измерялась дистанционно тепловизионной камерой. Из рисунка видно, что каждый раз после неоднократно повторяющейся задержки дыхания интенсивность кровообращения в дистальных отделах

верхних конечностей претерпевала спад. Влияние динамики дыхания, контролируемой тепловизионным методом, на скорость пульсовой волны в лучевой артерии, в том числе при задержке дыхания на продолжительное время (несколько минут), подробно описано в нашей работе [12].

Когда число каналов, по которым синхронно приходят информационные сигналы, исчисляется двумя или тремя (например, информация о частоте сердечных сокращений и частоте дыхания), способностей человеческого мозга может оказаться вполне достаточно чтобы сделать вывод о степени корреляции или антикорреляции этих данных (хотя и такое не всегда получается). Если же количество каналов, включая тепловизионный, уже порядка пяти или больше, найти корреляцию и согласованность в непрерывных рядах (потоках) экспериментально полученных данных, обнаружить их взаимозависимость и подчиненность одного от другого становится практически невозможно. Особенно, когда такие ряды зашумлены случайными процессами (например, естественной вариабельностью сердечного или дыхательного ритмов). Для изучения подобных мультимодальных систем требуются разработка, исследование и развитие принципиально новой методологии, позволяющей из совокупности коррелированных рядов извлекать новую информацию о свойствах системы, которую невозможно обнаружить путем анализа отдельных составляющих (к примеру, путем рассмотрения по отдельности результатов ЭКГ, спирометрии, тепловидения и пр.). В науке подход, идущий ещё от Аристотеля («Целое больше, чем сумма его частей»), приводящий к выявлению нового качества исследуемой системы, не сводимого к сумме качеств ее элементов, вызывает последнее время всё больший интерес у исследователей и имеет все основания считаться высокоперспективным.

Разработка современной методологии определения индивидуального функционально-физиологического статуса организма людей на основе проведения синхронных многоканальных динамических измерений разными физическими неинвазивными методами с применением непродолжительных мягких функциональных проб и с последующей совместной математической обработкой полученных биоданных представляет собой актуальную и пока еще не решенную задачу современной биомедицины. Ее решение позволит сформировать новое направление в персонализированной диагностике, поскольку даст возможность внесения коррекций в системный гомеостатический портрет пациента на основе выявленных индивидуальных особенностей его организма.



Практическим итогом применения описанного выше подхода является разработка методов принятия решения автоматизированной системой, которое не способен выработать человек в силу ограниченности его когнитивных возможностей и отсутствия прямого доступа к корреляционным взаимосвязям между отдельными проявлениями свойств сложного многопараметрического объекта. Успешное принятие таких решений можно ожидать лишь от автоматизированных аппаратно-программных комплексов, анализирующих многопараметрическую задачу. В контексте обсуждаемой проблемы в качестве оригинального и высокоинформативного атрибута такого комплекса выступает тепловизионная фотоника.

В конечном итоге мы непременно приходим к необходимости привлечения искусственного интеллекта (ИИ), способного стать венцом работ в вышеописанном направлении исследований. Однако еще до воплощения результатов в форме ИИ необходимо разработать, исследовать, развить и опробовать методы, позволяющие этот ИИ в дальнейшем реализовать.

В общем виде целью, стоящей сегодня перед исследователями, использующими такой инструмент, как тепловизионная фотоника, является разработка инновационного высокоперспективного методологического подхода, включающего в себя применение одновременно нескольких оригинальных технических инструментов исследования (инженерных, физических, математических), в том числе ИК-термографии нового поколения, и математических средств интеллектуального анализа данных, в совокупности приводящих к появлению новых знаний об изучаемой сложной системе, не доступных для извлечения с применением иных методов научного исследования. Решение данной научно-технической проблемы направлено на более ясное понимание фундаментальных механизмов биологических процессов, протекающих в организме человека и млекопитающих в целом.

По ходу можно отметить, что у нашего научного коллектива уже накоплен значительный опыт проведения многоканальных биофизических исследований с использованием в качестве испытуемых не только человека [13], но также мелких и крупных лабораторных животных (крысы, минисвиньи и др.) [14–16]. При поиске у млекопитающих корреляции и согласованности трендов их сердечного и дыхательного ритмов был разработан и реализован модифицированный метод Блэнда–

Алтмана [17], исходная версия которого [18] широко применяется сегодня в мире в разнообразных биомедицинских исследованиях. В модифицированной форме у метода появилась возможность определять корреляцию и согласованность не только у однотипных в отношении единиц измерения величин (например, при сопоставлении двух ритмов дыхания или двух сердечных ритмов), но также у величин разной природы (например, сравнение ритма дыхания с частотой сердечных сокращений).

### **Метод сорбционно усиленной инфракрасной термографии**

В настоящее время в мире характеристики дыхания у млекопитающих традиционно определяют, вводя трубки (канюли) в носовые отверстия, или у человека с применением прижатых к лицу масок. Такой подход уже сам по себе нарушает аэродинамику в верхних дыхательных путях и является раздражающим для реципиента. С использованием базовых принципов тепловизионной фотоники нами были открыты беспрецедентные возможности современного высокоскоростного и высокочувствительного тепловизионного метода для изучения динамики легочного дыхания у людей и животных, что позволило создать измерительную технологию, свободную от указанных недостатков.

В работе [19] подробно описан вышеупомянутый оригинальный подход, названный методом сорбционно-усиленной инфракрасной термографии (Sorption-Enhanced Infrared Thermography – SEIRT). Использование эффекта выделения (и поглощения) теплоты фазового перехода первого рода при адсорбции/конденсации (и испарении) молекул воды, взаимодействующих с твердой поверхностью сорбционного индикатора, привело к появлению тепловизионного метода, оказавшегося в десятки раз чувствительнее других известных из литературы способов исследования дыхания, реализуемых с помощью тепловидения.

Примеры применения метода SEIRT представлены на рис. 3 (для дыхания человека) и рис. 4 (для лабораторной крысы).

О высоком динамическом диапазоне SEIRT можно судить, к примеру, из того, что измеренный с его помощью перепад температуры сорбционного индикатора при наблюдении естественного спонтанного дыхания в случаях, приведенных на рис. 3 и 4, составляет даже у столь малого животного, как лабораторная крыса, около 10 °С (!) при рабочей чувствительности использованного матричного тепловизора 0,03 °С.

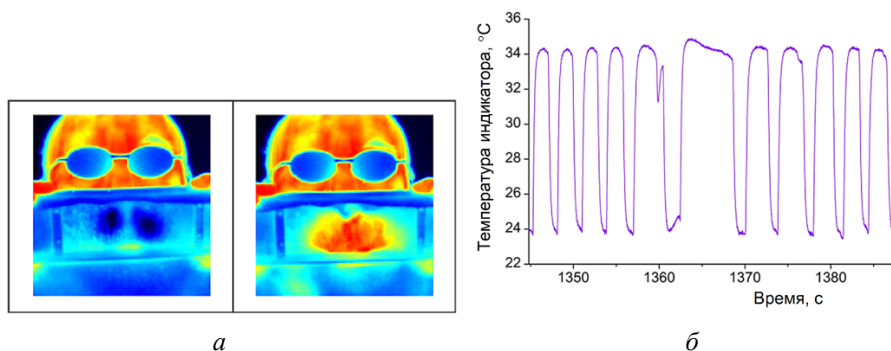


Рис. 3. Пара термограмм (а), отражающих тепловой след на сорбционном индикаторе при дыхании человека (слева – фаза вдоха, справа – выдоха); фрагмент, демонстрирующий вариацию температуры сорбционного индикатора при спокойном спонтанном дыхании человека с попавшим в этот период продолжительным выдохом (б) (широкий «холм» в средней части графика); более высокие значения температуры на характеристике соответствуют фазе выдоха (адсорбция/конденсация на поверхности индикатора молекул воды, содержащихся в выдыхаемом воздухе), и более низкие значения соответствуют фазе вдоха (охлаждение индикатора при испарении с его поверхности сконденсированной влаги)

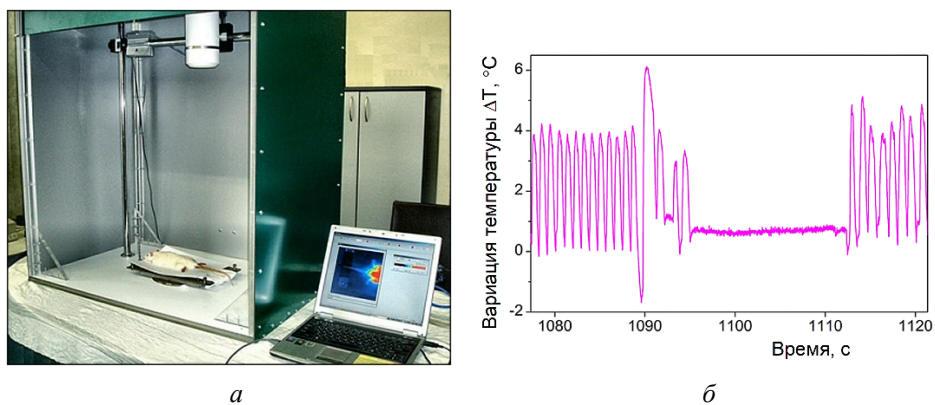


Рис. 4. Лабораторная крыса в специальном боксе, экранирующем внутреннее пространство от внешнего теплового излучения (а), сверху на штативе закреплена тепловизионная камера ТКВр-ИФП/СВИТ; вариация температуры сорбционного индикатора, расположенного вблизи внешних дыхательных отверстий крысы (б); отсутствие модуляции сигнала в средней части графика демонстрирует продолжительное апноэ у спящего (наркотизированного) животного; измерения сделаны вышеупомянутым матричным тепловизором с применением метода SEIRT

Отметим, что метод SEIRT упомянут как один из заслуживающих внимания в контексте решения проблем, связанных с пандемией COVID-19, что было отражено в обзоре [20], опубликованном в 2021 г. в высокорейтинговом журнале IEEE Reviews in Biomedical Engineering.

## Заключение

Современная тепловизионная фотоника, построенная на использовании матричных детекторов ИК-излучения, будучи примененной совместно с другими инструментами биомедицинской диагностики, усиленная компьютерной обработкой и интеллектуальным анализом данных, синхронно измеренных на том же живом объекте другими устройствами с применением интервентного воздействия на объект исследования, наделена надёжными перспективами для своего успешного развития и получения качественно новых высокоинформативных результатов. Имеются все основания ожидать, что в ближайшем будущем временные ряды данных, полученные в разных экспериментальных условиях с участием не только испытуемых волонтеров, но и реальных пациентов, будут обрабатываться с использованием разнообразных математических методов, в том числе с помощью нейросети, которая сможет учиться предсказывать (прогнозировать) последующее поведение и физические состояния живой системы.

С применением тепловизионной фотоники в качестве основного атрибута новой технологии будет разработан инновационный методологический подход, принципиально отличающийся от того, что до сих пор применялся в медико-биологической сфере при изучении человека. Образно выражаясь, он «держится на трех китах»:

1) синхронное (!) измерение неинвазивными и необременительными для испытуемого биофизическими методами сразу многих (порядка десяти) физиологических показателей с автоматизированным получением цифровой информации о характеристиках организма с частотой непрерывной записи сигналов не менее 100 Гц;

2) применение интервентного (преимущественно, неоднократного) воздействия на организм в ходе диагностического обследования с целью провоцирования сдвигов гомеостаза и получения ответного биофизического отклика;

3) математическая и компьютерная совместная обработка непрерывных временных рядов биоданных, полученных разными измерительными методами, в том числе тепловизионным, с применением многомерного статистического анализа и других адекватных для достоверной диагностики аналитических методов и подходов. По результатам такой обработки будет осуществлен алгоритмический поиск

с выявлением принципиально новых признаков отклонения организма от нормы на основании критериев, найденных исключительно путем математического анализа данных и в принципе не видимых «невооруженным глазом».

Предполагается, что на основе такой инновационной технологии впервые возникнут реальные перспективы прогнозирования и контроля состояния изучаемой системы с неизвестными (скрытыми) свойствами, на основе чего, в частности, появится возможность проведения научно обоснованной оптимизации лечения, осуществления донозологической диагностики и в итоге успешной борьбы с широким спектром разнообразных патологий у людей. Результаты этой работы существенно расширят современные представления о взаимосвязи ведущих жизнеобеспечивающих систем организма, характере согласованности их совместного функционирования при внешних физических атаках (вмешательствах) и стрессах. Развитые подходы будут востребованы практической медициной и найдут также место при решении актуальных задач физиологии человека и животных.

### Список литературы

1. Lawson, R. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer / R. Lawson // *Can. Med. Assoc. J.* – 1956. – Vol. 75. – P. 309–311.
2. Lawson, R. Thermography; a new tool in the investigation of breast lesions / R. Lawson // *Can. Serv. Med. J.* – 1957. – Vol. 8. – P. 517–524.
3. Vainer, B.G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment / B.G. Vainer // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 41. – P. 065102.
4. Vainer, B.G. Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3  $\mu\text{m}$  operating wavelength / B.G. Vainer // *Quantitative InfraRed Thermography 5, Eurotherm Seminar 64, QIRT'2000; Reims, France, July 18–21, 2000 / Proceedings.* ed. by D. Balageas, J.-L. Beaudoin, G. Busse, G.M. Carlomagno. UTAP URCA. – 2000. – P. 84–91.
5. Vainer, B.G. Treated skin temperature regularities revealed by IR thermography / B.G. Vainer // *Proc. SPIE.* – 2001. – Vol. 4360. – P. 470–481.
6. Вайнер, Б.Г. Матричное тепловидение в физиологии: Исследование сосудистых реакций, перспирации и терморегуляции у человека / Б.Г. Вайнер. – Новосибирск: Изд-во Сибир. отдел. РАН, 2004. – 96 с.
7. Vainer, B.G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans / B.G. Vainer // *Phys. Med. Biol.* – 2005. – Vol. 50. – P. R63–R94.

8. Tarkov, M.S. Evaluation of a thermogram heterogeneity based on the wavelet Haar transform / M.S. Tarkov, B.G. Vainer // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). Proceedings. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, April 20-21, 2007. – P. 145–152.

9. Vainer, B. Heterogeneous thermograms: the methods of attack / B. Vainer, A. Moskalev // QIRT2008, 9-th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Proceedings; July 2-5, 2008, Krakow-Poland. – Edited by Boguslaw Wiecek. – Poland, Technical University of Lodz, Institute of Electronics. – 2008. – P. 157–164.

10. Vainer, B.G. Infrared thermography as a powerful, versatile and elegant research tool in chemistry: Principles and application to catalysis and adsorption / B.G. Vainer // ChemPlusChem. – 2020. – Vol. 85. – P. 1438–1454.

11. Иванов, К.П. Основы энергетики организма: Теоретические и практические аспекты / К.П. Иванов // Т. 1: Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. – Л.: Наука, 1990. – 307 с.

12. Vainer, B.G. Radial artery pulse wave velocity: a new characterization technique and the instabilities associated with the respiratory phase and breath-holding / B.G. Vainer // *Physiol. Meas.* – 2023 – Vol. 44. – P. 015004.

13. Vainer, B.G. Up-to-date thermal imaging systems in the multichannel automated measurements / B.G. Vainer // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 44894 Proceedings, APEIE-2018; Novosibirsk, October 2-6, 2018: in 8 Volumes. Papers in English. – Novosibirsk: NSTU, IEEE. – 2018. – Vol. 1, Part 2. – 389 p. – P. 334–338.

14. Вайнер, Б.Г. Синхронизм, выявленный при одновременном измерении сердечного ритма, динамики дыхания и поверхностной температуры тела у лабораторных крыс в состоянии сна / Б.Г. Вайнер, Е.Г. Вергунов, В.И. Баранов // Наука и образование: проблемы и перспективы развития: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф.; 30 августа 2014 г.: в 5 ч. Ч. 3. – Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – 164 с. – С. 39–41.

15. Вайнер, Б.Г. Согласованность ритмов дыхания и сердца у экспериментальных животных при разном составе дыхательной смеси / Б.Г. Вайнер, Е.Г. Вергунов, Д.С. Сергеевичев // Вестник психофизиологии. – 2016. – № 4. – С. 24–33.

16. Vainer, B.G. Infrared thermography as applied to the studies of cardiovascular system in rats / B.G. Vainer, V.I. Baranov, E.G. Vergunov // Proc. QIRT 2014 Conference; 7-11 July 2014, Bordeaux, France. DOI: 10.21611/qirt.2014.157. – URL: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2014/QIRT%202014%20Papers/QIRT-2014-157.pdf>.

17. Вергунов, Е.Г. Модификация метода Блэнда-Алтмана и её применение для оценки согласованности сердечного и дыхательного ритмов / Е.Г. Вергунов, Б.Г. Вайнер // Вестник психофизиологии. – 2016. – № 4. – С. 34–45.

18. Bland, J.M. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement / J.M. Bland, D.G. Altman // *Lancet*. – 1986. – Vol. 1. – P. 307–310.

19. Vainer, B.G. A novel high-resolution method for the respiration rate and breathing waveforms remote monitoring / B.G. Vainer // *Ann. Biomed. Eng.* – 2018. – Vol. 46. – P. 960–971.

20. Wearable sensing and telehealth technology with potential applications in the coronavirus pandemic / X. Ding, D. Clifton, N. Ji, N.H. Lovell, P. Bonato, W. Chen, X. Yu, Z. Xue, T. Xiang, X. Long, K. Xu, X. Jiang, Q. Wang, B. Yin, G. Feng, Y.T. Zhang // *IEEE Rev. Biomed. Eng.* – 2021. – Vol. 14. – P. 48–70.

## References

1. Lawson R. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer // *Can. Med. Assoc. J.* – 1956. – Vol. 75. – P. 309–311.

2. Lawson R. Thermography; a new tool in the investigation of breast lesions // *Can. Serv. Med. J.* – 1957. – Vol. 8. – P. 517–524.

3. Vainer B. G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 41. – P. 065102.

4. Vainer B. G. Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3  $\mu\text{m}$  operating wavelength // *Quantitative InfraRed Thermography 5, Eurotherm Seminar 64, QIRT'2000, Reims, France, July 18–21, 2000. Proceedings*. Ed. by D. Balageas, J.-L. Beaudoin, G. Busse, and G. M. Carlomagno. UTAP URCA – 2000. – P.84–91.

5. Vainer B. G. Treated skin temperature regularities revealed by IR thermography // *Proc. SPIE*. – 2001. – V.4360. – P.470–481.

6. Vainer B. G. FPA-based infrared thermography in physiology: Investigation of vascular response, perspiration, and thermoregulation in humans. – Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2004. – 96 pp. ISBN 5-7692-0706-X.

7. Vainer B. G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // *Phys. Med. Biol.* – 2005. – V.50. – P.R63–R94.

8. Tarkov M. S., Vainer B. G. Evaluation of a thermogram heterogeneity based on the wavelet Haar transform // *IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). Proceedings*. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, April 20-21, 2007. – P.145–152.

9. Vainer B., Moskalev A. Heterogeneous thermograms: the methods of attack // *QIRT2008, 9-th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Proceedings, July 2-5, 2008, Krakow-Poland*. – Edited by Boguslaw Wiecek. – Poland, Technical University of Lodz, Institute of Electronics. – 2008. – P.157–164.

10. Vainer B. G. Infrared thermography as a powerful, versatile and elegant research tool in chemistry: Principles and application to catalysis and adsorption // *ChemPlusChem*. – 2020. – V.85. – P.1438–1454.

11. Ivanov K. P. Fundamentals of the body energetics: Theoretical and practical aspects // Volume 1. General energetics, heat exchange and thermoregulation. – Leningrad: Nauka. – 1990. – 307 pp.

12. Vainer B. G. Radial artery pulse wave velocity: a new characterization technique and the instabilities associated with the respiratory phase and breath-holding // *Physiol. Meas.* – 2023 – V.44 – P.015004.

13. Vainer B. G. Up-to-date thermal imaging systems in the multichannel automated measurements // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 44894 Proceedings, APEIE-2018, Novosibirsk, October 2-6, 2018. In 8 Volumes. Papers in English. – Novosibirsk: NSTU, IEEE. – 2018. – V.1, Part 2. – 389 pp. – P.334–338.

14. Vainer B. G., Vergunov E. G., Baranov V. I. Synchronism revealed from the combined measurements of heart rate, breath dynamics and body surface temperature in narcotized laboratory rat // *Science and Education: Topical Problems and Future Trends / Intern. Scientific-Practical Conf.*, August 30, 2014. Proceedings. Part 3. Tambov: Consulting company Ucom Ltd, 2014, pp. 39–41.

15. Vainer B. G., Vergunov E. G., Sergeevichev D. S. Consistency of respiratory and cardiac rhythms in experimental animals exposed to the respiratory gases of different composition mixtures // *Psychophysiology News (ISSN: 2227-6157)*. – 2016 – No.4 – P.24–33.

16. Vainer B. G., Baranov V. I., Vergunov E. G. Infrared thermography as applied to the studies of cardiovascular system in rats // *Proc. QIRT 2014 Conference*, 7-11 July 2014, Bordeaux, France. – DOI: 10.21611/qirt.2014.157. – <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2014/QIRT%202014%20Papers/QIRT-2014-157.pdf>

17. Vergunov E. G., Vainer B. G. Bland-Altman plot modification and its application to assessing agreement between heart and breathing rates // *Psychophysiology News (ISSN: 2227-6157)* – 2016 – No.4 – P.34–45.

18. Bland J. M., Altman D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement // *Lancet*. – 1986. – V.1. – P.307–310.

19. Vainer B. G. A novel high-resolution method for the respiration rate and breathing waveforms remote monitoring // *Ann. Biomed. Eng.* – 2018. – V.46. – P.960–971.

20. Ding X., Clifton D., Ji N., Lovell N. H., Bonato P., Chen W., Yu X., Xue Z., Xiang T., Long X., Xu K., Jiang X., Wang Q., Yin B., Feng G., Zhang Y.T. Wearable sensing and telehealth technology with potential applications in the coronavirus pandemic // *IEEE Rev. Biomed. Eng.* – 2021. – V.14. – P.48–70.



**Сведения об авторе**

**ВАЙНЕР Б.Г.**

e-mail: *boris-stmt@yandex.ru*

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Лаборатории физических основ интегральной микрофотозлектроники Института физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, профессор Специализированного учебно-научного центра Новосибирского государственного университета, г. Новосибирск

**About the author**

**B.G. VAINER**

e-mail: *boris-stmt@yandex.ru*

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor, Principal Research Scientist, Laboratory of Physical Principles of Integral Microphotoelectronics, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Novosibirsk State University, Professor of Specialized Educational Scientific Center of Novosibirsk State University, Novosibirsk

**Финансирование.** Работа не имела спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора** 100 %.

**Получена:** 02.08.2024

**Одобрена:** 10.08.2024

**Принята к публикации:** 15.08.2024

**Financing.** The work was not sponsored.

**Conflict of Interest.** The author declare no conflict of interest.

**The authors' contribution is equal.**

**Received:** 02/08/2024

**Approved:** 10/08/2024

**Accepted for publication:** 05/08/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Вайнер, Б.Г. Современная тепловизионная фотоника в биомедицине / Б.Г. Вайнер // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 5–21.

Please cite this article in English as: Vainer B.G. Modern infrared thermography photonics in biomedicine. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 5–21.