

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 612.563

И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротева, В.В. Шишаков, О.Н. Градобоева, А.М. Новинская

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет,  
Россия,*

*119991, Москва, Ленинские горы д.1, стр. 2 , E-mail: znamen@phys.msu.ru*

**ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ОБЛАСТИ  
ЛИЦА С ЦЕЛЬЮ АНАЛИЗА ПСИХОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

**АННОТАЦИЯ**

При введении человека в стрессовое состояние меняется активность потовых желез, учащается пульс и ускоряется интенсивность и ритм дыхания, что отражается в кратковременных изменениях теплового поля лица. Использование термографии позволяет регистрировать изменения теплового поля на лице человека и рядом с его поверхностью, вызванных деятельностью центральной и периферической нервной системы. С помощью визуализации и количественной оценки тепловых потоков в области лица, возможен дистанционный анализ эмоционального состояния человека, в случае предварительного анализа физиологических особенностей индивидуума в спокойном состоянии.

**ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ, ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ, ПСИХОФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ**

**ВВЕДЕНИЕ**

За последние годы появились качественно новые классы цифровых термографических приборов, позволяющих перевести термографию в мощный инструмент научных исследований широкого спектра. Раздвинут на порядок (до 15 мкм) доступный для высокоскоростной визуализации диапазон шкалы электромагнитных колебаний. Сегодня борьба идет за терагерцовый диапазон визуализации, но смежный с ним инфракрасный – не менее интересен с точки зрения фундаментальной и прикладной науки. Именно в этом диапазоне лежат основные тепловые потоки, излучаемые человеком и животными, конденсированными и газовыми средами. Современные тепловизионные системы позволяют регистрировать распределение ИК излучения от объектов с высоким временным, пространственным и температурным разрешением. Одним из важнейших приложений термографии как междисциплинарной области техники является возможность использования бесконтактно регистрируемых психофизиологических показателей в системах дистанционного выявления и идентификации особенностей внешнего облика и поведения людей в ситуациях тревоги, повышенного эмоционального возбуждения и стресса.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ПСИХОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Методы, основанные на использовании инфракрасной (ИК) термографии представляются на данный момент весьма перспективными для надежного бесконтактного мониторинга основных биофизических показателей организма. Они дают возможность не только дистанционно визуализировать, но и количественно измерять малейшие изменения теплового потока от поверхности тела человека [1]. Значительный прогресс в тепловизионных исследованиях на сегодняшний день обусловлен также созданием и оптимизацией алгоритмов обработки, а также компьютерных методов сопоставления результатов тепловизионной съемки с данными, полученными с привлечением других измерительных систем.

Лицо человека представляет собой мультисигнальную систему, являющуюся источником множественных посланий. Сигналы, от этой системы обычно делятся на статические, медленные и быстрые. К статическим сигналам (признакам) относятся: цвет кожного пигмента, форма лица, структура черепа, локализация и толщина жировых отложений, характерные особенности рта, носа, глаз и бровей. Медленными сигналами являются изменения, возникающие в течение длительного периода времени: постоянные морщины, мышечный тонус.

Быстрые сигналы могут длиться секунды или доли секунды и производят временные изменения выражения лица. Они определяются деятельностью лицевых мышц, рисунка морщин а также температурой участков кожи.

Термография сегодня может регистрировать сверхбыстрые тепловые изменения теплового поля на лице человека и около лица. Анализ тепловых потоков осуществлялся по трем основным каналам:

1. по визуализации и анализу струйных дыхательных течений в широком диапазоне углов обзора;
2. по регистрации пульсационных характеристик кровотока в выделенных областях;
3. по регистрации проявления активности потовых желез.

Разработана технология комплексной регистрации и анализа активности центральной и периферической нервной системы с использованием тепловизора (в сочетании с видеокамерой) на основе трех видов динамических тепловых полей в области лица. Создан и протестирован программный модуль для приведения теплового поля на лице к стандартному представлению (по изображению в видимой области спектра).

Для проведения инфракрасной съемки в экспериментах были использованы (по отдельности) две тепловизионные камеры. Первая камера марки FLIR SC7700 работает в диапазоне длин волн 3,7-4,8 мкм (MWIR) и позволяет получать тепловизионные изображения с частотой до 115 Гц с пространственным разрешением 640x512 пикселей и до 400 Гц с ограниченным разрешением. Данная MWIR-камера относится к классу фотонных приемников с охлаждаемым ИК детектором. Управление камерой и обработка термограмм проводятся при помощи программного обеспечения Altair и FLIR ResearchIRMax. Вторая камера модели COX CX640 работает в диапазоне длин волн 8-14 мкм (LWIR) и позволяет получать тепловизионные изображения с частотой до 50 Гц с пространственным разрешением 640x480 пикселей. LWIR-камера относится к классу неохлаждаемых тепловых приемников микроболометрического типа, обладает тепловой инерционностью и меньшей, по сравнению с MWIR-камерой, температурной чувствительностью. Для получения и анализа термограмм используется программное обеспечение ThermallmagingAnalyzer.

Кожа человека имеет высокий коэффициент излучения, близкий к абсолютно черному телу, поэтому изменение ее температуры приводит к значительному изменению мощности испускаемого ИК излучения. Низкий коэффициент отражения кожи минимизирует влияние среды на определение ее температуры. При термографической визуализации это позволяет достаточно точно регистрировать локальную температуру, ее динамику [2]. Одно- и

двухатомные газы практически прозрачны для теплового излучения. Значительной излучающей и поглощающей способностью, имеющей практическое значение, обладают трехатомные и многоатомные газы. Для термографической визуализации дыхательных потоков наибольший интерес представляют углекислый газ и водяной пар. Полоса поглощения углекислого газа (4,13–4,43 мкм) лежит в частности в рабочем диапазоне камеры FLIR. Таким образом, струя выдыхаемого газа благодаря температурному и концентрационному контрасту является регистрируемым объектом для данного тепловизора.

Выполнена качественная и количественная визуализация дыхательных струйных потоков на основе высокоскоростной ИК термографии. Получены тепловизионные записи нормального носового дыхания ряда добровольцев. Время регистрации составляло 10–100 секунд, частота кадров была в диапазоне от 5 Гц (полный кадр), до 400 Гц (с ограниченным разрешением). Размеры области термографической визуализации, как показали результаты съемки, составили не более 0,2 м; записи велись в широком диапазоне углов обзора. Температура области опроса колеблется в пределах каждого дыхательного цикла: вдыхание холодного воздуха из окружающей среды с последующим выдохом теплого воздуха из легких. Испытуемым предлагалось дышать либо только через нос, либо только через рот. Съемки велись анфас и в профиль. Было получено, что периодическое изменение температуры областей интереса стабильно наблюдается при регистрации ИК излучения от поверхности кожи анфас как в средневолновом, так и длинноволновом диапазоне (рис. 1).

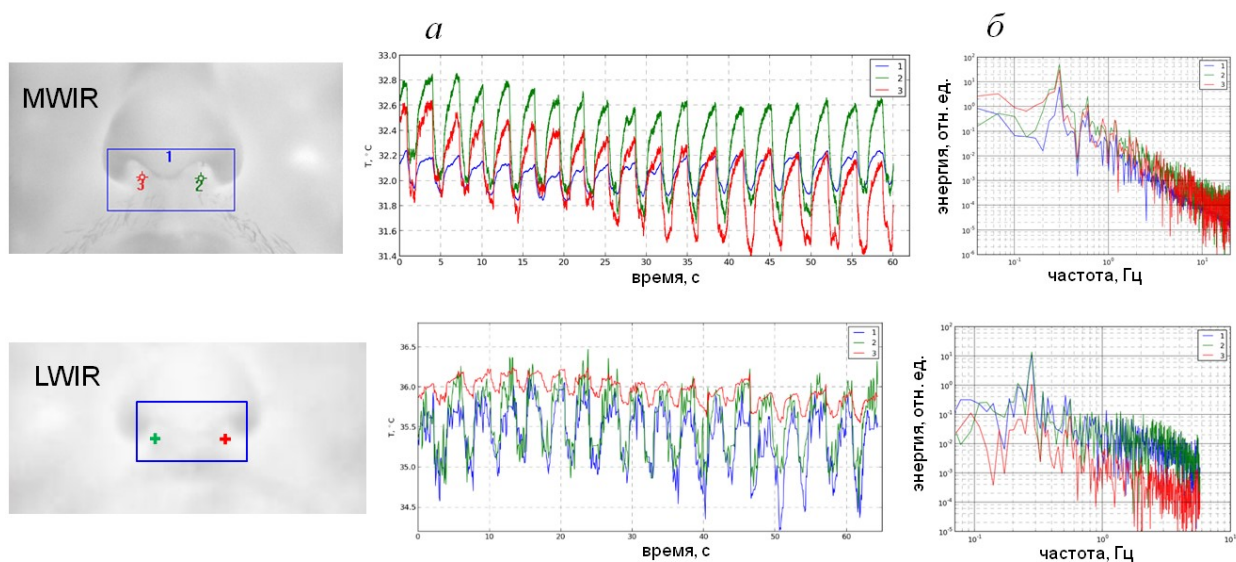


Рис. 1. Регистрация дыхательного процесса анфас MWIR (вверху) и LWIR (внизу) камерами: а - динамика среднего значения температуры в выделенных областях; б - результат спектрального преобразования ИК сигнала

Использование MWIR-камеры также дает возможность визуализации дыхательного течения (за счет повышения содержания углекислого газа) при съемке в профиль. Поскольку ИК сигнал в данном случае оказывается слабее, чем при регистрации излучения с поверхности кожи, увеличение соотношения сигнал/шум возможно путем увеличения времени интеграции камеры (от 0,8 до 2 мс). Пример полученных термограмм представлен на рис. 2.

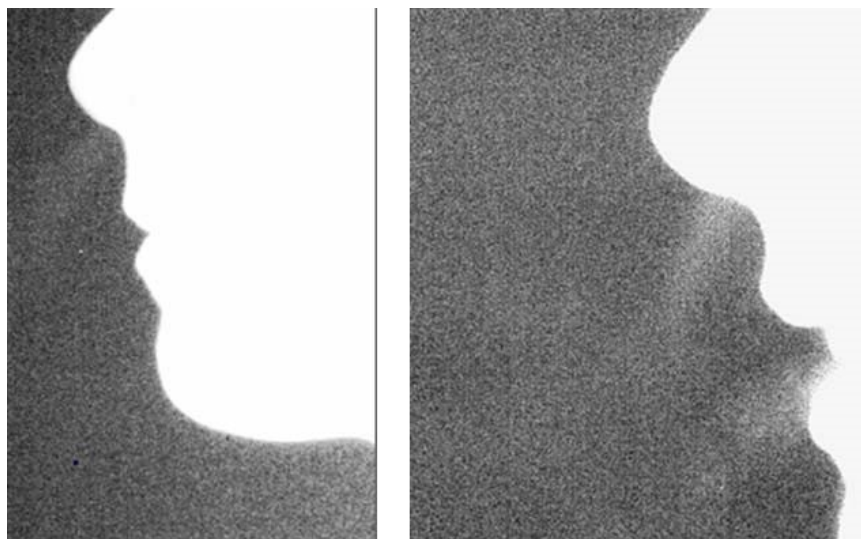


Рис. 2. Визуализация дыхательного потока MWIR камерой на стадии выдоха через нос (слева) и во время разговора (справа)

В выбранных точках температурного поля области опроса из зависимостей температуры от времени были построены энергетические спектры тепловых пульсаций турбулентного потока воздуха в дыхательной струе. На основании выделенных областей опроса испытуемого и термокарт его лица строились зависимости изменения их температуры от времени в выбранных точках изображений. Разработанная методика позволяет обнаруживать нерегулярные паттерны в дыхании, которые можно рассматривать в качестве маркеров для анализа психологического или физиологического стресса [3].

Было получено, что в случае равномерного, спокойного дыхания регистрации полей ИК излучения в течение 20 секунд со скоростью от 5 Гц достаточно, чтобы исследовать эволюцию и частотные характеристики дыхания с высокой точностью. При этом в случае использования MWIR-камеры возможность визуализации выдыхаемого потока и расчета частоты дыхания сохраняется при повороте головы вплоть до  $150^\circ$  от оси камеры.

При тепловизионной визуализации области лица человека пространственная неоднородность термограмм возникает также в процессе нестационарной терморегуляции за счет потоотделения. Активность потовых желез связана с уровнем физической или эмоциональной нагрузки. И хотя потовые железы распределены относительно равномерно по коже, они редко функционируют одновременно и с одинаковой интенсивностью [4]. Открытие потовых пор на поверхности кожи приводит к появлению темных (более холодных) точек на термограмме. Это связано с тем, что пот обладает несколько иным, по сравнению с кожным покровом, коэффициентом излучения; кроме того, в результате испарения капель пота происходит охлаждение кожи вблизи каналов потовых желез.

Исследовалась возможность тепловизионной регистрации процесса потоотделения в ситуации стресса. Для возникновения стрессовой реакции в лабораторных условиях использовался неожиданный резкий звук и тест Струпа. Синхронно велась регистрация КГР. Было обнаружено, что пики КГР соответствуют увеличению количества открытых потовых пор на термограмме, а также последующему понижению среднего значения температуры в областях интереса (зоны лба и носа). При этом характер расположения и активность потовых желез являются индивидуальными для каждого человека. Пример полученных термограмм представлен на рис. 3.

Исследована динамика холодных точек на термограмме с высоким временным разрешением. Оценены характерные времена процесса их возникновения и релаксации (до 0,1 сек).

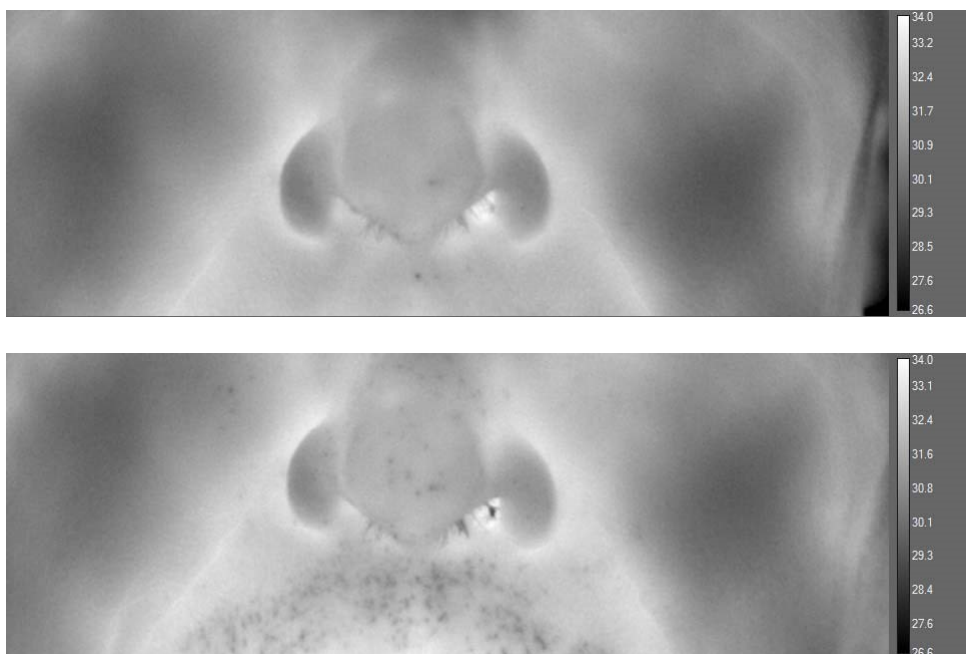


Рис. 3. Визуализация потовыделения FLIR камерой: спокойное состояние (вверху); в процессе прохождения теста Струпа (внизу)

Для анализа термографических изображений использовалось программное обеспечение на языке Python с использованием библиотек OpenCV и Dlib. Данные библиотеки, используя метод Виолы-Джонса, позволяют найти лицо на изображении, а также найти характерные ключевые точки лица (глаза, губы, нос, т.д.), и наложить на изображение лица сетку т.н. нормализованных лицевых координат, что позволяет оценить ориентацию лица относительно плоскости детектора камеры и найти на изображении участки, соответствующие требуемым лицевым чертам (крылья носа, область верхней губы под носом, области по бокам от переносицы, т.д.), на всех кадрах видеоряда. Данный подход позволяет компенсировать движение головы относительно камеры, а также оценить, видны ли эти участки на изображении, или нет. Данные алгоритмы применялись как к тепловизионным видеосъемкам, так и к визуальным. При одновременной съемке тепловизионной и обычной цифровой камерой, для синхронизации видеоряда использовалось моргание глаз. Изначально планировалось, что использование дополнительного синхронного видеоряда в визуальном диапазоне позволит более точно оценивать положение контрольных точек лица на изображении и лучше компенсировать движение и повороты лица относительно камеры, однако, характеристики использованной тепловизионной камеры оказались таковыми, что дополнительная информация с цифровой видеокамеры не вносила существенных улучшений, по сравнению с результатами, полученными с использованием одной только тепловизионной камеры, и в дальнейших экспериментах не учитывались

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты показывают, что визуализация тепловых потоков на основе инфракрасной термографии с временным разрешением открывает широкие возможности дистанционной диагностики эмоциональных реакций человека, особенно, при условии предварительного анализа его индивидуальных физиологических особенностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 16-18-00080).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иваницкий Г.Р.** Современное матричное тепловидение в биомедицине // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1293–1320.
2. **Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А., Усанов Д.А.** Тепловизионная биомедицинская диагностика: Учеб. пособие. / Саратов. 2009. 119 с.
3. **Vainer V.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. № 23. P. R63.
4. **Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Хахалин А.В., Шишаков В.В.** Термографическая визуализация и дистанционный анализ динамических процессов в области лица // Научная визуализация. 2016. Т. 8. № 5. С. 122–131.

I.A. Znameskaya, E.U. Koroteeva, V.V. Shishakov, O.N. Gradoboeva, A.M. Novinskaya

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia,  
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, 2, E-mail: znamen@phys.msu.ru*

### **THERMOGRAPHIC VISUALIZATION OF HEAT FLOW IN THE FACIAL AREA WITH THE PURPOSE OF THE ANALYSIS OF THE PSYCHOPHYSICAL CONDITION OF THE PERSON**

*With the introduction of the person in stress changes the activity of the sweat glands, quickens the pulse, and accelerates the intensity and rhythm of the breath, which is reflected in the short-term changes in the thermal field of the person. The use of thermography allows to register changes in the thermal field on the face and near its surface, caused by the activities of the Central and peripheral nervous system. By visualizing and quantifying heat flow in the face, possible remote analysis of emotional state, in the case of pre-analysis of the physiological characteristics of the individual in a calm state.*

**INFRARED THERMOGRAPHY, THERMAL FLOWS, PHYSICAL AND MENTAL STATE**