

УДК 772.962;612.821

ТЕРМОГРАФИЯ КАК СПОСОБ ОЦЕНКИ ВЕГЕТАТИВНЫХ РЕАКЦИЙ ЧЕЛОВЕКА

С. А. РУТКЕВИЧ¹⁾, К. М. ЛЮЗИНА¹⁾, Р. Ю. МИКУЛИЧ²⁾, Д. М. КАБАНОВ²⁾, Е. В. ЛЕБЕДОК²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Беларусь

Изучена возможность применения тепловизионного метода для оценки уровня кровотока в ходе построения термограмм поверхности кистей рук здоровых добровольцев до и после нагрузки на мышцы. Полученные с помощью указанного метода результаты дают оперативную информацию о степени кровоснабжения тканей, что открывает новые перспективы для динамической оценки кожного кровотока. Методика абсолютно безопасна, неинвазивна, универсальна и проста в выполнении.

Ключевые слова: тепловизионный метод; температура поверхности кожи; кровоток; мышечное сокращение.

THERMOGRAPHY AS A METHOD FOR EVALUATING HUMAN VEGETATIVE REACTIONS

S. A. RUTKEVICH^a, K. M. LIUZINA^a, R. Yu. MIKULICH^b, D. M. KABANAU^b, Yu. V. LEBIADOK^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^b«Optics, Optoelectronics and Laser Technology», 68 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220072, Belarus

Corresponding author: K. M. Liuzina (liuzina@bsu.by)

Образец цитирования:

Руткевич СА, Люзина КМ, Микулич РЮ, Кабанов ДМ, Лебедок ЕВ. Термография как способ оценки вегетативных реакций человека. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2019;2:36–44.
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2019-2-36-44>

For citation:

Rutkevich SA, Liuzina KM, Mikulich RYu, Kabanau DM, Lebiadok YaV. Thermography as a method for evaluating human vegetative reactions. *Journal of the Belarusian State University. Biology.* 2019;2:36–44. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2019-2-36-44>

Авторы:

Светлана Александровна Руткевич – кандидат биологических наук; доцент кафедры физиологии человека и животных биологического факультета.

Ксения Михайловна Люзина – кандидат биологических наук; доцент кафедры физиологии человека и животных биологического факультета.

Роман Юрьевич Микулич – младший научный сотрудник лаборатории оптико-электронного приборостроения.

Дмитрий Михайлович Кабанов – кандидат физико-математических наук; заместитель заведующего лабораторией оптико-электронного приборостроения.

Егор Викторович Лебедок – кандидат физико-математических наук; заведующий лабораторией оптико-электронного приборостроения.

Authors:

Svetlana A. Rutkevich, PhD (biology); associate professor at the department of human and animal physiology, faculty of biology.

rutkevitch@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1840-4025>

Kseniya M. Liuzina, PhD (biology); associate professor at the department of human and animal physiology, faculty of biology.

liuzina@bsu.by
<https://orcid.org/0000-0002-7565-2252>

Roman Yu. Mikulich, junior researcher at the optoelectronic engineering laboratory.

raman.mikulich@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1186-0722>

Dmitry M. Kabanau, PhD (physics and mathematics); deputy head of the optoelectronic engineering laboratory.

d.kabanau@ifanbel.bas-net.by
<https://orcid.org/0000-0003-2926-0335>

Yahor V. Lebiadok, PhD (physics and mathematics); head of the optoelectronic engineering laboratory.

y.lebiadok@ifanbel.bas-net.by
<https://orcid.org/0000-0002-8653-6134>

The possibility of using the thermal imaging method to assess the level of blood flow in the course of building thermograms of the surface of the hands of healthy volunteers before and after the load on the muscles was studied in this paper. The results obtained using the thermal imaging method provide objective information about the degree of blood supply to the tissues, which opens up new perspectives for evaluating skin blood flow in the dynamics. The technique is absolutely safe, non-invasive, versatile and easy to perform.

Keywords: thermal imaging method; temperature of skin surface; blood flow; muscle contraction.

Введение

Жизнедеятельность организма как целого происходит под влиянием многих факторов окружающего пространства и событий в его внутренней среде, связанных с регуляцией разнообразных функций. Существует ряд физиологических теорий и принципов, в соответствии с которыми системы организма формируются и действуют для достижения полезного приспособительного результата, а всякая рефлекторная реакция, соматическая или даже возникающая при решении когнитивных задач, включает обязательным элементом вегетативный компонент [1]. Не является исключением и система регуляции температуры тела [2–4], в процессы которой могут вовлекаться многие отделы головного и спинного мозга [5]. Указанные обобщения сделаны преимущественно после анализа результатов экспериментов на животных. Следует отметить, что в литературе приводятся сведения о развитии функциональной активности мышечной системы на фоне активации нейронных сетей моторных областей коры мозга, предшествующей реальному мышечному сокращению [6]. Другими словами, эти данные могут выступать подтверждением представлений школы Анохина – Судакова о формировании акцептора результата действия на этапах афферентного синтеза и принятия решения о будущей деятельности [7; 8]. Вопрос о вегетативном или сосудистом «сопровождении» этого важнейшего этапа в формировании функциональной системы остается открытым.

Методические неинвазивные подходы и приемы для оценки вовлечения нейромоторного аппарата обычно сводятся к использованию электрофизиологических методов исследования. Согласно идеомоторному принципу в ходе образного представления о совершении определенного движения в сознании человека возникает реальная локализованная мышечная активность, более слабая по величине, но идентичная по характеру мышечной деятельности при выполнении движения [9]. Применение идеомоторной теории на практике является актуальной задачей [10; 11]. Также с практической точки зрения важно расширять набор методик, позволяющих быстро, объективно и с возможно большей точностью оценить вегетативный компонент в деятельности нервной системы при организации и регуляции мышечных движений. Одним из процессов, поддающихся объективному контролю и отражающих активацию вегетативных механизмов, может выступать кровоток в поверхностных слоях кожи, влияющий на ее температуру. Цель работы – анализ динамики колебаний температуры кожи ладонной поверхности кистей и пальцев рук у здоровых добровольцев в условиях реализации разнообразных рефлекторных и произвольных команд, адресованных мышечной системе, с использованием тепловизора.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены с привлечением 6 здоровых испытуемых мужчин 22–46 лет, не страдающих хроническими заболеваниями. Экспериментальный протокол включал: 1) измерение температуры аксиально в подмышечной впадине (термометр производства *PIC Solution*, Италия) с левой и правой стороны; 2) регистрацию термограммы до (4 мин в состоянии покоя), во время (4 мин) и после как реальной нагрузки кистей рук, так и психомоторного представления сжатия кисти в кулак (проба). Для получения электрофизиологических коррелят произвольных движений записывали миограмму. Состояние вегетативной регуляции тонуса сосудов оценивалось по вариабельности сердечного ритма. Активная проба заключалась либо в воображении сжатия кисти руки в кулак с частотой, близкой к 1 разу в секунду, либо в реальной физической активности мышц кисти. Воображаемое и реальное действия испытуемые совершали сидя, руки были расположены на столе чуть ниже уровня груди. С помощью тепловизора фиксировались тепловые поля ладонных поверхностей кистей рук. Значения температуры на проксимальных фалангах пальцев, а также расчет среднего значения температуры в ладонной области и максимальной температуры кисти получены и обработаны с использованием программного обеспечения.

Для регистрации инфракрасного излучения исследуемых объектов использовалась тепловизионная камера (*Flir*, США) на базе неохлаждаемой микроболометрической матрицы на основе оксида ванадия с разрешением 640×480 пк, шагом фоточувствительных элементов 17 мкм, параметром разницы температур, эквивалентной шуму не хуже 50 мК. Спектральная чувствительность используемой тепловизионной камеры 7,5–14,0 мкм. Частота кадров тепловизора 50 Гц (временной интервал записи следующего

кадра 20 мс). Динамический диапазон 14 бит (16 384 уровней серого). В эксперименте использовался трехлинзовый асферический объектив с относительным отверстием $f/1,0$, фокусным расстоянием 24,6 мм при угловом поле зрения $25^\circ \times 19^\circ$ (диагональное – 31°), с пространственным разрешением 0,6 мм и фиксированным расстоянием (значение которого использовалось при построении термограмм) от тепловизора до объекта 850–950 мм (угловое пространственное разрешение 0,7 мрад). Фокусировка тепловизора производилась в автоматическом режиме перемещением матричного фотоприемника. Регистрация термограмм выполнялась в одинаковых условиях (перед проведением каждого измерения прибор калибруется равномерно нагретым автоматическим затвором тепловизора) с фиксированными положением объекта исследования и расстоянием до него. Обработка результатов измерений производилась с помощью специализированного программного обеспечения *FLIR R & D Software*, которое при построении термограммы учитывает параметры объекта (коэффициент излучения, видимая отраженная температура), окружающей среды (влажность, относительное спектральное пропускание, температура и расстояние до объекта) и объектива (относительное спектральное пропускание, температура объектива).

На каждой видеозаписи, полученной с помощью тепловизора, на изображении рук фиксировались маркеры в области проксимальных фаланг пальцев (Sp1–Sp5 – на правой руке, Sp6–Sp10 – на левой) и обозначались области на ладонях, на которых автоматически отображалась самая холодная и самая горячая точки. Значение средней температуры ладоней определялось как среднее арифметическое температур всех точек (попиксельно) в области эллипса, указанного на рис. 1 как E11 или E12. При этом площадь эллипса попиксельно для всех испытуемых была одинаковой. Значение максимальной температуры ладоней определялось для квадратных областей, указанных на рис. 1 как Ar1 и Ar2, до и во время проб с нагрузкой.

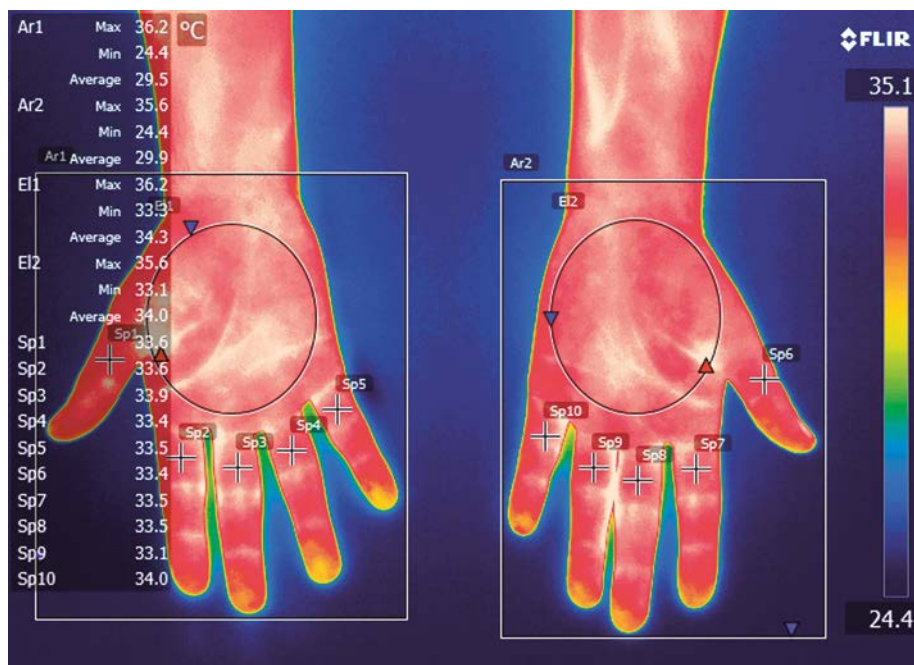


Рис. 1. Схема расположения маркеров на пальцах (Sp1–Sp10) и областей анализа на ладонях (Ar1, Ar2, E11, E12).

Слева на рисунке – правая рука, справа – левая

Fig. 1. The layout of the markers on the fingers (Sp1–Sp10) and designation of areas of analysis on the palms (Ar1, Ar2, E11, E12).

On the left in the picture is the right hand, on the right – the left

На основе распределения температуры строились зависимости ее изменения в самой горячей точке, средней температуры по области ладони и температуры пальцев от времени.

Для иллюстрации изменений, происходящих в организме при воображаемой нагрузке (сокращении мышц предплечья и кисти), использовались миография и ЭКГ. Для доказательства наличия отклика мышцы на мысленное сокращение использовался электромиограф «Нейро-МВП-4» («Нейрософт», Россия). Методом суммарной электромиографии (ЭМГ) выполнено исследование электрической активности *m. flexor digitorum profundus* (глубокий сгибатель пальцев). Электромиограммы регистрировались монолатерально на правой конечности в течение 4 мин при отсутствии напряжения (так называемый покой) и в процессе виртуального максимального напряжения. Регистрация 4-минутных фрагментов ЭКГ проводилась в состоянии покоя (испытуемым предварительно не предъявлялись физические или

психоэмоциональные нагрузки) с использованием программы *HC-Психотест.NET*, при этом записывались 3 стандартных и 3 усиленных однополюсных отведения от конечностей. Оценка параметров variability сердечного ритма осуществлялась на основе геометрического, временного, спектрального и автокорреляционного методов анализа.

Полученные данные статистически обрабатывали с помощью программного комплекса *Microsoft Excel*. Результаты представлены как среднее значение \pm стандартное отклонение. Чтобы выявить достоверность различий между группами, использовали *t*-критерий Стьюдента (различия считали достоверными при $p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение

Аксиальная температура добровольцев была в норме, асимметрия в двух подмышечных впадинах составила меньше $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у 5 из 6 испытуемых. Температура помещения комфортная ($23\text{--}24\text{ }^{\circ}\text{C}$). С помощью тепловизора визуализировались колебания поверхностной температуры ладоней, обусловленные изменениями кровотока, который определяется тонусом сосудодвигательных волокон симпатической нервной системы. Температура в подмышечной впадине, измеренная с помощью контактного термометра, и средняя температура поверхности ладони приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения аксиальной температуры и поверхностной температуры ладонной области в покое, $^{\circ}\text{C}$

Table 1

Values of axial temperature and surface palmar temperature at rest, $^{\circ}\text{C}$

Доброволец	Температура в подмышечной впадине		Поверхностная средняя температура ладонной области (за 4 мин до записи)		Асимметрия*	
	D	S	D	S	в подмышечной впадине	на ладони
Рм	36,9	36,6	$35,0 \pm 0,4$	$34,9 \pm 0,3$	0,3	0,1
И	36,5	36,1	$33,9 \pm 0,6$	$33,7 \pm 0,4$	0,4	0,2
С	36,7	36,3	$34,5 \pm 0,5$	$34,4 \pm 0,4$	0,4	0,1
Е	35,5	36,2	$33,4 \pm 0,4$	$33,6 \pm 0,4$	-0,7	-0,2
Рб	36,6	36,5	$32,7 \pm 0,6$	$33,2 \pm 0,7$	0,1	-0,5
Де	33,7	33,4	$34,5 \pm 0,5$	$34,4 \pm 0,4$	0,3	0,1

Примечание. D – правая сторона (dexter); S – левая сторона (sinister); * – разница между правой и левой стороной.

Электрофизиологические доказательства мышечной активности, представленные на рис. 2, зарегистрированы с применением компьютерной ЭМГ для нервно-мышечной функции верхних конечностей в условиях выполнения реального сокращения мышц, а также идеомоторного акта (воображаемого сокращения).

Электрическая активность мышцы ($n = 6$) в покое по амплитуде не превышала уровень шума (10 мкВ) и соответствовала электромиограмме «биоэлектрического молчания» (см. рис. 2, а). Максимальная амплитуда покоя ($11,5 \pm 1,3$) мкВ. В процессе развития минимального произвольного напряжения возникали низкоамплитудные осцилляции, максимальная амплитуда которых соответствовала ($66,2 \pm 9,4$) мкВ, а частота равнялась (110 ± 27) имп./с (см. рис. 2, б), что свидетельствует о достоверном отличии от фона. Реализация воображаемого движения позволила зарегистрировать единичные осцилляции ($1\text{--}3$ имп./с), амплитуда которых находилась в пределах ($31,0 \pm 7,3$) мкВ ($p < 0,05$).

Графики зависимости изменения максимальной температуры кисти во время и после реального и виртуального сокращения мышц правой кисти испытуемого И приведены на рис. 3.

Обнаружено также, что во время ритмических сокращений кисти кровотоки каждый раз снижались в первые минуты проведения пробы, вероятно из-за сдавливания кровеносных сосудов сокращающимися скелетными мышцами, что и отражено на рис. 3. После выполнения упражнения кровотоки оставались на очень высоком уровне и только через несколько минут постепенно возвращались к исходному уровню. Явление рабочей гиперемии, обнаруженное в исследовании, регистрировалось постоянно во всех испытаниях. По данным [12], в покое в значительной части мышечных капилляров кровотоки находятся на очень низком уровне или даже отсутствуют. Однако во время интенсивных сокращений проис-

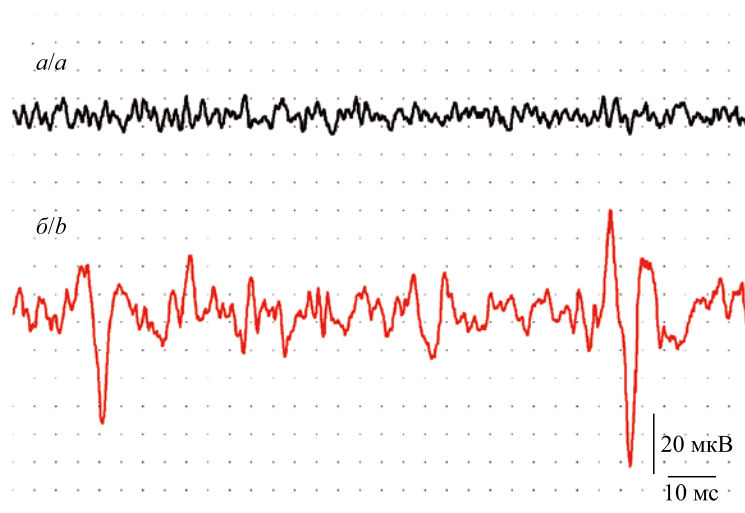


Рис. 2. Примеры суммарной электромиограммы глубокого сгибателя пальцев у испытуемого И:
а – покой; б – воображение ситуации с мысленной имитацией сжатия кисти в кулак

Fig. 2. Examples of the total electromyogram of the deep flexor of the fingers of the subject I:
a – rest; b – the imagination of a situation in which the compression of the hand into a fist is mentally simulated

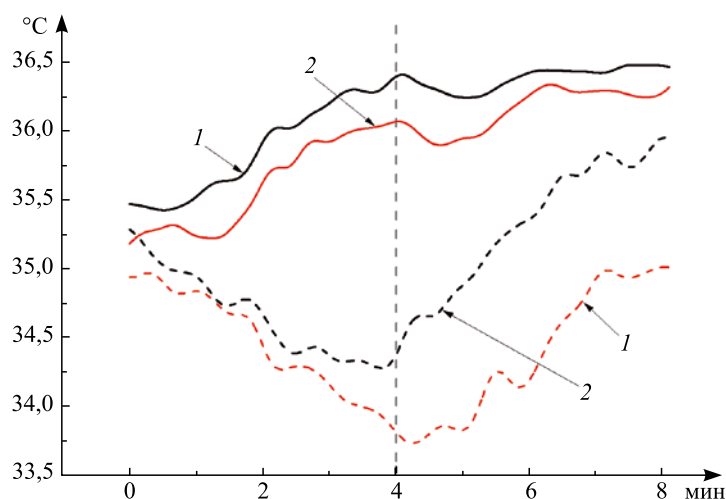


Рис. 3. Изменение максимальной температуры кожи кисти во время (0–4 мин) и после (4–8 мин) реального (штриховые линии) и ментального (сплошные линии) сокращения мышц кисти правой (1) и левой (2) рук (доброволец И)

Fig. 3. Change of the maximum temperature of the skin of the hand during (0–4 min) and after (4–8 min) real (dashed lines) and mental (solid lines) contraction of the muscles of the hand (1) and left (2) hands (volunteer I)

ходит усиление обменного кровотока. Следует отметить, что во время реального и воображаемого мышечного сокращения при сжатии кисти в кулак обнаружен разогрев кожи руки не только работающей правой кисти, но и неактивной левой.

Как следует из графика, представленного на рис. 3 (ментальная нагрузка), и табл. 2, воображаемая нагрузка изменяла поверхностную температуру кожи кисти, что можно рассматривать в качестве подтверждения изменения уровня кровотока.

Аналогичные по направленности колебания температуры наблюдались и при анализе изменения температуры кожи пальцев (рис. 4). Для отображения общей закономерности приведены данные только для большого и указательного пальцев правой и левой рук соответственно.

В случае реального мышечного усилия у всех испытуемых больше всего разогревались пальцы правой (рабочей) руки с разницей между состоянием покоя и нагрузкой до 3 °С. Левая (нерабочая) рука максимально разогревалась на 0,8 °С. Воображаемая нагрузка также приводила к росту температуры пальцев на 1,5 °С в правой руке и на 1,3 °С – в левой.

Изменение средней температуры ладонной области
во время и после ментальной нагрузки, °C

Table 2

Change in the average temperature of the palmar area during and after mental load, °C

Доброволец	До нагрузки (за минуту до начала пробы)		Во время ментальной нагрузки		После нагрузки	
	D	S	D	S	D	S
РМ	36,0 ± 0,2	35,8 ± 0,2	37,0 ± 0,1*	36,9 ± 0,1*	36,2 ± 0,2	36,1 ± 0,2
И	35,2 ± 0,4	35,2 ± 0,3	36,6 ± 0,1*	36,7 ± 0,1*	35,6 ± 0,3	35,7 ± 0,5
С	35,7 ± 0,1	35,6 ± 0,3	36,9 ± 0,1*	36,9 ± 0,1*	35,8 ± 0,2	35,8 ± 0,2
Е	34,6 ± 0,4	35,1 ± 0,3	36,0 ± 0,1*	36,2 ± 0,3*	35,4 ± 0,1	35,3 ± 0,5
Рб	34,4 ± 0,2	34,3 ± 0,1	35,8 ± 0,1*	35,5 ± 0,1*	34,9 ± 0,1	34,7 ± 0,2
Де	34,1 ± 0,3	33,9 ± 0,2	35,2 ± 0,1*	35,4 ± 0,2*	35,0 ± 0,3	34,7 ± 0,3

Примечание. D – правая ладонь; S – левая ладонь; * $p < 0,05$.

Разогрев поверхности кисти продолжался и после прекращения движения, что видно на графиках рис. 4, отражающих усредненные сдвиги поверхностной температуры (разница между температурой в состоянии покоя и во время (после) пробы) по всем добровольцам. Это может быть связано с компенсаторными процессами, происходящими при восстановлении организма после физической нагрузки. На рис. 4 подписи Sp1, Sp2, Sp6, Sp7 соответствуют областям, указанным на рис. 1.

Увеличению кровотока в скелетных мышцах во время физической нагрузки могут способствовать три основных взаимосвязанных процесса: возбуждение симпатической нервной системы, вызывающее общие изменения в системе кровообращения; повышение артериального давления; увеличение сердечного выброса. Изменение ритма сердца – универсальная реакция всего организма в ответ на любое воздействие. Оно характеризует баланс между тонусом симпатической и парасимпатической нервной системы. У 71,43 % добровольцев в ответ на 4-минутное мысленное сокращение мышц кисти частота сердечных сокращений увеличилась на (4 ± 2) уд/мин, у оставшихся осталась на уровне фона.

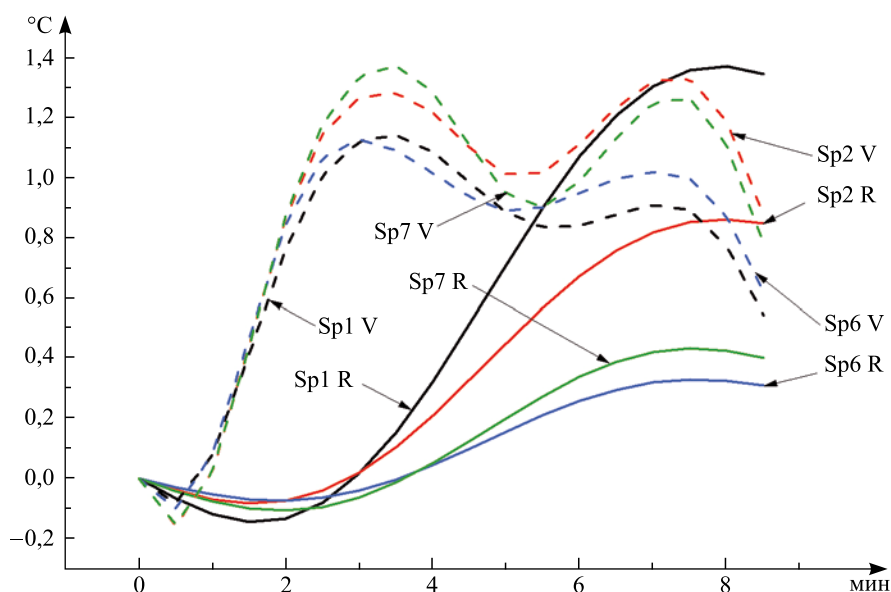


Рис. 4. Изменение поверхностной температуры на проксимальных фалангах больших (Sp1, Sp6) и указательных (Sp2, Sp7) пальцев правой (Sp1, Sp2) и левой (Sp6, Sp7) рук.

V – воображаемое сокращение мышц кисти правой руки, R – реальное

Fig. 4. Changes in surface temperature in the proximal phalanges. Sp1, Sp6 – thumbs, Sp2, Sp7 – index fingers of the right and left hands, respectively.

V is an imaginary contraction of the muscles of the right hand, R is real

Результаты исследования показали, что вегетативный тонус нервной системы в состоянии покоя и в процессе ментальной нагрузки мышц кисти различается. По направлению изменений показателей variability сердечного ритма (BCP) можно судить о преобладании тонуса либо симпатического, либо парасимпатического отдела вегетативной нервной системы на каждом этапе эксперимента. В состоянии покоя только у двух из шести добровольцев преобладал тонус парасимпатического отдела. В процессе ментальной нагрузки у всех испытуемых отмечалась активация симпатической нервной системы по разным показателям BCP (табл. 3). Поскольку последние у всех индивидуальные, то для расчета показателя BCP был использован показатель нормы из [13; 14], при этом норму приняли за 100 %. В табл. 4 приведены отклонения от нормы в процентах.

Таблица 3

Результаты измерения BCP испытуемых при ментальной нагрузке, %

Table 3

The results of measuring the heart rate variability of subjects under mental load, %

Показатели BCP	Доброволец					
	Pб	Pм	Де	Е	С	И
RRNN	2,3	-1,5	-1,9	-4,7	-6,6	0,5
SDNN	-2,9	-4,3	-30,0	0,0	13,3	-25,0
RMSSD	-12,0	6,0	-25,7	-5,7	-8,6	-30,0
pNN50	-3,4	7,1	-26,2	-3,8	-37,7	0,0
CV	-4,8	-4,8	-40,7	5,0	26,8	-29,3
Amo	-1,1	-6,0	73,0	-6,8	-14,9	102,1
BP	8,9	-3,7	-19,0	10,7	6,9	-32,7
TP	-17,2	-6,1	-39,4	7,2	24,0	-23,7
HF	-82,5	4,4	-44,0	8,7	-10,2	-8,7
LF	6,8	-9,5	-50,9	13,8	43,0	-15,5
VLF	17,1	-18,4	-43,9	0,1	55,3	-110,4
HFnorm	-35,8	30,4	-5,3	14,2	-35,0	-37,0
LFnorm	35,0	-29,6	5,1	-13,8	34,2	35,9
%HF	-43,3	18,4	-3,6	14,2	-36,3	-20,9
%LF	19,0	-14,3	9,2	9,5	21,7	83,6
%VLF	31,8	-6,3	-6,3	-29,0	20,2	-93,6

Примечание. Розовым цветом обозначено повышение тонуса симпатической нервной системы, голубым – его снижение. RRNN – средняя длительность всех интервалов R–R в выборке; SDNN (standard deviation of the NN interval) – стандартное отклонение величин нормальных интервалов R–R (NN); RMSSD (the square root of the mean squared differences of successive NN interval) – квадратный корень из среднего квадратов разностей величин последовательных пар интервалов NN; pNN50 – доля последовательных интервалов NN, различие между которыми превышает 50 мс; CV (SDNN/RRNN · 100 %) – коэффициент вариации; Amo – амплитуда моды; BP – вариационный размах; TP (total power) – общая мощность спектра; HF (high frequency) – мощность волн высокой частоты; LF (low frequency) – мощность волн низкой частоты; VLF (very low frequency) – мощность очень низкочастотных волн; HFnorm – относительное значение мощности в диапазоне высоких частот (в нормализованных единицах); LFnorm – относительное значение мощности волн низкой частоты (в нормализованных единицах); %HF, %LF, %VLF – относительное значение мощности волн высокой, низкой и очень низкой частоты соответственно.

С использованием метода спектрального анализа обнаружено, что показатель LF низкочастотных колебаний, характеризующих мощность волн в диапазоне от 0,04 до 0,15 Гц, повышается при физических нагрузках, различных функциональных органических изменениях в сердечно-сосудистой системе. Перераспределение преобладающего тонуса с симпатического на парасимпатический не произошло ни у одного из испытуемых. Таким образом, установлено совпадение колебаний температуры кожи (ее кровоснабжения) и процессов нервной регуляции тонуса сосудов.

По литературным данным известно, что в ходе образного представления определенного движения возникают такие же, но меньшие по амплитуде суммарные потенциалы действия в мышцах, как при реальном усилии, что и было подтверждено с помощью миографии. Результаты также подтверждают представление о том, что форпостное регулирование [15] процессов регуляции кровотока в кисти формируется на этапе еще только складывающейся мозаики возбуждений в мозге и предшествует реальному мышечному усилию. При этом вовлекается и активность сосудодвигательных симпатических нервных волокон в соответствии с представлениями [2; 5]. Незначительные индивидуальные различия в реакции на воображаемую нагрузку можно объяснить тем, что для возникновения идеомоторной реакции недостаточно просто концентрации внимания на представлении о движении. Необходимо наличие интереса или целевой установки на воображаемое действие, особенно на его эмоциональную окрашенность. А это связано с личностными особенностями испытуемых [16].

Совокупность полученных в работе результатов на основе комплекса методов (миография, измерение variability сердечного ритма, построение термограмм кожных поверхностей верхних конечностей) подтверждает эффективность компьютерной термографии при оценке кожного кровотока в верхних конечностях. Возможность использования термографии для получения оперативной и объективной информации о регуляции тонуса сосудов [17], а также об активности автономной нервной системы [18; 19] широко обсуждается в научной литературе и продолжает вызывать дискуссии в научных кругах.

Библиографические ссылки

1. Булыгин ИА. Аfferентное звено интероцептивных рефлексов. В: Баглаваджян ОГ, редактор. *Руководство по физиологии. Физиология вегетативной нервной системы*. Ленинград: Наука; 1981. с. 187–211.
2. Flavahan NA. Thermoregulation: The Normal Structure and Function of the Cutaneous Vascular System. In: Wigley FM, Herrick AL, Flavahan NA, editors. *Raynaud's Phenomenon*. New York: Springer; 2014. p. 37–55. DOI: 10.1007/978-1-4939-1526-2_4.
3. Гурин ВН. *Терморегуляция и симпатическая нервная система*. Минск: Наука и техника; 1989. 231 с.
4. Tansey EA, Roe SM, Johnson CD. The sympathetic release test: a test used to assess thermoregulation and autonomic control of blood flow. *Advances in physiology education*. 2014;38(1):87–92. DOI: 10.1152/advan.00095.2013.
5. Кульчицкий ВА, Поленов СА, Пашкевич СГ, Нетукова НИ, Тропникова ГК, Песоцкая ЯА и др. *Регуляция функций при активации мозга*. Минск: Белпринт; 2004. 112 с.
6. Vassiliadis P, Grandjean J, Derosiere G, de Wilde Y, Quemener L, Duque J. Using a Double-Coil TMS Protocol to Assess Preparatory Inhibition Bilaterally. *Frontiers in Neuroscience*. 2018;12:139. DOI: 10.3389/fnins.2018.00139.
7. Анохин ПК. Системные механизмы высшей нервной деятельности. В: *Избранные труды АН СССР. Отделение физиологии*. Москва: Наука; 1979. 454 с.
8. Анохин КВ. Когнитом: гиперсетевая теория мозга. В: *Нейроинформатика-2015. XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Часть 1*. Трофимов АГ, ответственный редактор. Москва: НИЯУ МИФИ; 2015. с. 14–16.
9. Pfister R, Melcher T, Kiesel A, Dechent P, Gruber O. Neural correlates of ideomotor effect anticipations. *Neuroscience*. 2014;259:164–171. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.11.061.
10. Yoxon E, Tremblay L, Welsh TN. Effect of task-specific execution on accuracy of imagined aiming movements. *Neuroscience Letters*. 2015;585:72–76. DOI: 10.1016/j.neulet.2014.11.021.
11. Colton J, Bach P, Whalley B, Mitchell C. Intention insertion: Activating an action's perceptual consequences is sufficient to induce non-willed motor behavior. *Journal of Experimental Psychology: General*. 2018;147(8):1256–1263. DOI: 10.1037/xge0000435.
12. Joyner MJ, Darren PC. Regulation of increased blood flow (hyperemia) to muscles during exercise: a hierarchy of competing physiological needs. *Physiological reviews*. 2015;95(2):549–601. DOI: 10.1152/physrev.00035.2013.
13. Бабунц ИВ, Мириджанян ЭМ, Машаех ЮА. *Азбука variability сердечного ритма*. Ставрополь: Принт-Мастер; 2002. 152 с.
14. Михайлов ВМ. *Variability ритма сердца (новый взгляд на старую парадигму)*. Иваново: Нейрософт; 2017. 516 с.
15. Бигдай ЕВ, Вихров СП, Гривенная НВ, Редькин ВМ, Самойлов ВО, Чигирев БИ. *Биофизика для инженеров. Том 2*. Вихрова СП, Самойлова ВО, редакторы. Москва: ГЛТ; 2017. 456 с.
16. Веракса АН, Горюва АЕ, Грушко АИ, Леонов СВ. *Мысленная тренировка в психологической подготовке спортсмена*. Москва: Спорт; 2016. 208 с.
17. Крупаткин АИ. Влияние симпатической иннервации на тонус микрососудов и колебания кровотока кожи. *Физиология человека*. 2006;32(5):95–104.
18. Huggins J, Rakobowchuk M. Utility of lacrimal caruncle infrared thermography when monitoring alterations in autonomic activity in healthy humans. *European Journal of Applied Physiology*. 2019;119(2):531–538. DOI: 10.1007/s00421-018-4041-6.
19. Seixas A, Ammer K. Utility of infrared thermography when monitoring autonomic activity. *European Journal of Applied Physiology*. 2019;119(6):1455–1457. DOI: 10.1007/s00421-019-04120-x.

References

1. Bulygin IA. Afferent link of interoceptive reflexes. In: Baklavajyan OG, editor. *A Guide to Physiology. Physiology of the autonomic nervous system*. Leningrad: Science; 1981. p. 187–211. Russian.
2. Flavahan NA. Thermoregulation: The Normal Structure and Function of the Cutaneous Vascular System. In: Wigley FM, Herrick AL, Flavahan NA, editors. *Raynaud's Phenomenon*. New York: Springer; 2014. p. 37–55. DOI: 10.1007/978-1-4939-1526-2_4. Russian.

3. Gurin VN. *Termoregulyatsiya i simpaticheskaya nervnaya sistema* [Thermoregulation and the sympathetic nervous system]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1989. 231 p. Russian.
4. Tansey EA, Roe SM, Johnson CD. The sympathetic release test: a test used to assess thermoregulation and autonomic control of blood flow. *Advances in Physiology Education*. 2014;38(1):87–92. DOI: 10.1152/advan.00095.2013.
5. Kulchitsky VA, Polenov SA, Pashkevich SG, Netukova NI, Tropnikova GK, Pesotskaya YaA, et al. *Regulyatsiya funktsii pri aktivatsii mozga* [Regulation of functions during brain activation]. Minsk: Belprint; 2004. 112 p. Russian.
6. Vassiliadis P, Grandjean J, Derosiere G, de Wilde Y, Quemener L, Duque J. Using a Double-Coil TMS Protocol to Assess Preparatory Inhibition Bilaterally. *Frontiers in Neuroscience*. 2018;12:139. DOI: 10.3389/fnins.2018.00139.
7. Anokhin PK. [System mechanisms of higher nervous activity]. In: *Izbrannye trudy AN SSSR. Otdelenie fiziologii* [Selected Works Academy of Sciences of the USSR, Separation of physiology]. Moscow: Nauka; 1979. 454 p. Russian.
8. Anokhin KV. Cognit: Hypernetory Theory of the Brain. In: *Neuroinformatika-2015. XVII vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. Part 1* [Neuroinformatics-2015. XVII All-Russian Scientific and Technical Conference with the participation of RSMM. Part 1]. Trofimov AG, editor. Moscow: NRNU MEPhI; 2015. p. 14–16. Russian.
9. Pfister R, Melcher T, Kiesel A, Dechent P, Gruber O. Neural correlates of ideomotor effect anticipations. *Neuroscience*. 2014;259:164–171. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.11.061.
10. Yoxon E, Tremblay L, Welsh TN. Effect of task-specific execution on accuracy of imagined aiming movements. *Neuroscience Letters*. 2015;585:72–76. DOI: 10.1016/j.neulet.2014.11.021.
11. Colton J, Bach P, Whalley B, Mitchell C. Intention insertion: Activating an action's perceptual consequences is sufficient to induce non-willed motor behavior. *Journal of Experimental Psychology: General*. 2018;147(8):1256–1263. DOI: 10.1037/xge0000435.
12. Joyner MJ, Darren PC. Regulation of increased blood flow (hyperemia) to muscles during exercise: a hierarchy of competing physiological needs. *Physiological reviews*. 2015;95(2):549–601. DOI: 10.1152/physrev.00035.2013.
13. Babunts IV, Mirizhanyan EM, Mashahah YuA. *Azbuka variabel'nosti serdechnogo ritma* [Alphabet of heart rate variability]. Stavropol: Print-Master; 2002. 152 p. Russian.
14. Mikhailov VM. *Variabel'nost' ritma serdtsa (novyi vzglyad na staruyu paradigmu)* [Heart rate variability (new look at the old paradigm)]. Ivanovo: Neurosoft; 2017. 516 p. Russian.
15. Bigday EV, Vikhrov SP, Hryvna NV, Redkin VM, Samoilov VO, Chigirev BI. *Biofizika dlya inzhenerov. Tom 2* [Biophysics for engineers. Tom 2]. Vikhrova SP, Samoilova VO, editors. Moscow: GLT; 2017. 456 p. Russian.
16. Veraksa AN, Gorovaya AE, Grushko AI, Leonov SV. *Myslennaya trenirovka v psikhologicheskoi podgotovke sportsmena* [Mental training in the psychological preparation of an athlete]. Moscow: Sport; 2016. 208 p. Russian.
17. Krupatkin AI. Influence of sympathetic innervation on the tone of microvessels and fluctuations in the blood flow of the skin. *Fiziologiya cheloveka*. 2006;32(5):95–104. Russian.
18. Huggins J, Rakobowchuk M. Utility of lacrimal caruncle infrared thermography when monitoring alterations in autonomic activity in healthy humans. *European Journal of Applied Physiology*. 2019;119(2):531–538. DOI: 10.1007/s00421-018-4041-6.
19. Seixas A, Ammer K. Utility of infrared thermography when monitoring autonomic activity. *European Journal of Applied Physiology*. 2019;119(6):1455–1457. DOI: 10.1007/s00421-019-04120-x.

Статья поступила в редакцию 17.05.2019.
Received by editorial board 17.05.2019.