

Ан. В. СКРИПАЛЬ<sup>1</sup>, АЛЬ-БАДРИ ФАРКАД<sup>1</sup>, К. В. МАШКОВ<sup>1</sup>,  
А. Д. УСАНОВ<sup>1</sup>, А. П. АВЕРЬЯНОВ<sup>2</sup>

## Лазерная флоуметрия микроциркуляции крови пальца руки в зависимости от внешней температуры и положения конечности

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», г. Саратов, Россия 410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского», г. Саратов, Россия 410012, Россия, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112  
E-mail: skriaplav@info.sgu.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.23 г.; принята к печати 15.09.23 г.

### Резюме

**Введение.** Использование лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) позволяет оценить состояние и нарушения микроциркуляции крови, повышая качество диагностики различных сердечно-сосудистых заболеваний. Дополнительные функциональные пробы при лазерных флоуметрических измерениях используются для оценки состояния механизмов, регулирующих кровотоки тканей. **Цель.** Выявление закономерностей изменения кровотока в микроциркуляторном русле при комбинировании постуральной пробы и изменения температуры воздуха. **Материалы и методы.** Исследование проведено на группе испытуемых из 20 человек, в которую входили в равном количестве девушки и юноши в возрасте 21–23 года, которые считались здоровыми и не имели сердечно-сосудистых заболеваний. Эксперимент проводился в два этапа, сначала в помещении с температурой воздуха  $20 \pm 1$  °С, затем при температуре воздуха  $30 \pm 1$  °С. Для оценки разницы в данных между положениями руки в рамках одного этапа исследования при одинаковой температуре был использован t-критерий Стьюдента для сравнения количественных переменных в двух зависимых выборках. Для оценки статистических различий в данных для одного и того же положения руки, но при разной температуре воздуха, был использован критерий Вилкоксона. При  $p < 0,05$  изменения считались статистически значимыми. У испытуемых измерялась величина микроциркуляции периферических кровеносных сосудов на фаланге пальца руки в трех положениях относительно уровня сердца с использованием портативного лазерного доплеровского флоуриметра «ЛАЗМА ПФ» (Россия). **Результаты.** Показано, что увеличение температуры окружающей среды приводит к увеличению разницы микроциркуляции периферических сосудов при изменении положения руки относительно уровня сердца. При нахождении человека в помещении с температурой  $30 \pm 1$  °С происходит дилатация сосудов и изменение их тонуса, чем объясняется возрастание значений микроциркуляции в относительных перфузионных единицах. **Заключение.** Результаты исследования показали увеличение статистически значимых отличий по t-критерию Стьюдента между различными положениями руки при увеличении температуры воздуха в помещении ( $p < 0,0001$ ). В сравнительной выборке между первым этапом (при температуре воздуха  $20 \pm 1$  °С) и вторым этапом исследования (при температуре воздуха  $30 \pm 1$  °С) были получены статистически значимые результаты ( $p < 0,001$ ) по критерию Вилкоксона для положения руки на уровне сердца и поднятой руки.

**Ключевые слова:** микроциркуляция, постуральная проба, лазерная доплеровская флоуметрия, периферическое кровообращение, положение руки

**Для цитирования:** Скрипаль Ан. В., Фаркад Аль-Бадри, Машков К. В., Усанов А. Д., Аверьянов А. П. Лазерная флоуметрия микроциркуляции крови пальца руки в зависимости от внешней температуры и положения конечности. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2023;22(4):35–41. Doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-4-35-41.

An. V. SKRIPAL<sup>1</sup>, AL-BADRI FARKAD<sup>1</sup>, K. V. MASHKOV<sup>1</sup>,  
A. D. USANOV<sup>1</sup>, A. P. AVERYANOV<sup>2</sup>

## Laser flowmetry of microcirculation of the finger depending on the external temperature and the limb position

<sup>1</sup> Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia

83, Astrakhan str., Saratov, Russia, 410012

<sup>2</sup> Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov, Russia

112, Bolshaya Kazachya str., Saratov, Russia, 410012

E-mail: skriaplav@info.sgu.ru

Received 03.07.23; accepted 15.09.23

### Summary

**Introduction.** The use of laser Doppler flowmetry (LDF) makes it possible to assess the condition and disorders of blood microcirculation, improving the quality of diagnosis of various cardiovascular diseases. Additional functional tests with laser flowmetric measurements are used to assess the state of the mechanisms that regulate the tissue blood flow. **Objective.** To identify patterns of blood flow changes in the microcirculatory bed when combining a postural test and a change in air temperature. **Materials and methods.** The study was conducted on a group of 20 subjects, which included an equal number of girls and boys aged 21–23 years, who were considered healthy and did not have cardiovascular diseases. The experiment was carried out in two stages: first in a room with an air temperature of  $20 \pm 1$  °C, then at  $30 \pm 1$  °C. To assess the difference in data between arm positions within the same study phase at the same temperature, the Student's t-test was used to compare quantitative variables in two dependent samples. The Wilcoxon test was used to assess statistical differences in data for the same hand position but at different air temperatures. Changes were considered statistically significant at  $p < 0.05$ . The subjects were measured the microcirculation of peripheral blood vessels on the phalanx of the finger in three positions relative to the level of the heart using a portable laser Doppler flowmeter LAZMA PF (Russia). **Results.** It is shown that an increase in ambient temperature leads to an increase in the difference in microcirculation of peripheral vessels when the arm position changes relative to the level of the heart. When a person is in a room with a temperature of  $30 \pm 1$  °C, dilation of blood vessels and changes in their tone occur, which explains the increase in microcirculation values in relative perfusion units. **Conclusions.** The results of the study showed an increase in statistically significant differences according to the Student's t-test between the different hand positions with increasing room temperature ( $p < 0.0001$ ). In a comparative sample between the first stage (at an air temperature of  $20 \pm 1$  °C) and the second stage of the study (at an air temperature of  $30 \pm 1$  °C), statistically significant results ( $p < 0.001$ ) were obtained according to the Wilcoxon test for the hand position at the heart level and the raised arm.

**Keywords:** microcirculation, postural test, laser Doppler flowmetry, peripheral blood circulation, hand position**For citation:** Skripal An. V., Farkad Al-Badri, Mashkov K. V., Usanov A. D., Averyanov A. P. Laser flowmetry of microcirculation of the finger of the hand depending on the external temperature and the position of the limb. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2023;22(4):35–41. Doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-4-35-41.

### Введение

Использование лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) позволяет оценить состояние и нарушения микроциркуляции крови, повышая качество диагностики различных сердечно-сосудистых заболеваний. Дополнительные функциональные пробы при лазерных флоуметрических измерениях используются для оценки состояния механизмов, регулирующих кровотоки тканей. Так, например, постуральная проба позволяет оценить реактивность венозных сосудов и венозно-артериальную констрикцию, которая возникает после переполнения сосудов кровью. Постуральные веноулоартериолярные реакции – это изменения в кровообращении, которые происходят в ответ на изменение положения тела или конечности. Эти изменения носят кратковременный характер и могут привести к временному увеличению или уменьшению объема крови в разных частях тела [1]. Реакция артериальной гемодинамики человека на постуральную (ортостатическую) пробу направлена на повышение сопротивления периферического кровотока (повышение тонуса), что ограничивает перемещение крови в сосуды конечностей и предотвращает уменьшение кровоснабжения головного мозга [2]. Температурная проба позволяет оценить резервную способность микроциркулятор-

ного русла по увеличению кровотока при реактивной тепловой гиперемии [3].

Авторами ряда статей [4–7] было экспериментально зафиксировано, что при тепловом воздействии на организм человека наблюдалось увеличение показателей скорости и объема кровотока в периферическом микроциркуляторном русле. При общем тепловом воздействии на организм испытуемого наблюдается увеличение кожного кровотока и перераспределение его между капиллярами и артериовенозными анастомозами [8].

В работе [9] показана возможность применения постуральной пробы при локальном тепловом нагреве области измерения перфузии для диагностики нарушений микроциркуляции крови у больных сахарным диабетом методом с помощью диагностического комплекса ЛАКК-02 (Лазма, Россия). Однако величина изменения индекса перфузии при таком локальном комбинированном воздействии была незначительной.

В работе [10] проводили измерение микроциркуляции кожи с помощью лазерной доплеровской флоуметрии во время теста на нагревание. Полученная ЛДФ-грамма, хорошо отражала реакцию организма на нагрев. Авторы статьи пришли к выводу, что оценка реактивности кожной микроциркуляции на

местное нагревание может рассматриваться как био-маркер повреждения сердечно-сосудистой системы.

В работах [11, 12] авторы измеряли кровотоки в микроциркуляторном русле при различных условиях исследования. Был сделан вывод о том, что на показания величины перфузии на записи ЛДФ-сигнала влияет как расположение датчика, так и положение тела человека в пространстве и температура воздуха.

В работе [13] авторы проводили исследование с различными функциональными пробами на трех участках кожи при локальном и общем нагревании. Два участка кожи были выбраны случайным образом на вентральной стороне верхней части левого предплечья, а третий – на подушечке указательного пальца. Выявлено увеличение у испытуемых величины кровотока в микроциркуляторном русле на фаланге руки при повышении температуры с 21 до 27 °С. При локальном нагревании до 44 °С микроциркуляция усилилась более значительно.

Кожная микроциркуляция имеет анатомические и физиологические особенности для выполнения своей терморегулирующей функции. Существуют анатомические различия кожной микроциркуляции в зависимости от региона измерения ЛДФ, что необходимо учитывать при проведении исследования [14]. Это обусловлено наличием на ладонной поверхности большого количества артериовенозных анастомозов, из-за которых средняя скорость кровотока на вентральной поверхности пальцев выше.

Локальная термическая гиперемия приводит к зависящему от температуры устойчивому увеличению кожного кровотока и достигает максимальной вазодилатации между 42 и 44 °С. Эта максимальная тепловая вазодилатация соответствует максимальной сосудорасширяющей способности сосудов [15–17].

Тепловое воздействие является физиологическим раздражающим фактором, приводящим к артериальной гиперемии – повышению уровня кровенаполнения различных органов и тканей [18].

Повышение величины перфузии, вызванное пребыванием испытуемых в помещении с температурой воздуха 30±1 °С, можно объяснить главным образом за счет артериальной гиперемии, которая приводит к расширению артериол и увеличению количества функционирующих капилляров [19]. Аналогичные работы по изучению микроциркуляции в верхней конечности человека подтверждают данный факт [18–21].

Таким образом, анализ изменения величины кровотока в микроциркуляторном русле при использовании функциональных проб позволяет выявлять адаптационный потенциал и прогнозировать риск сердечно-сосудистых заболеваний у человека [22–24]. При этом изменение величины кровотока в микроциркуляторном русле будет сильно зависеть от начального тонуса сосудистой системы, зависящего как от психоэмоционального состояния пациента, так и сопутствующих заболеваний, среди которых заболевания, не связанные с сосудистой системой, могут быть причиной неадекватного диагноза заболеваний сосудистой системы [25–27]

В этой связи целью настоящего исследования являлось выявление закономерностей изменения кровотока в микроциркуляторном русле при комбинировании постуральной пробы и повышенной температуры воздуха, уменьшающей зависимость от начального тонуса сосудистой системы.

### Материалы и методы

Исследование проведено на группе добровольцев из 20 человек, в которую входили в равном количестве девушки и юноши в возрасте 21–23 года. Участники эксперимента считались здоровыми и не имели сердечно-сосудистых заболеваний.

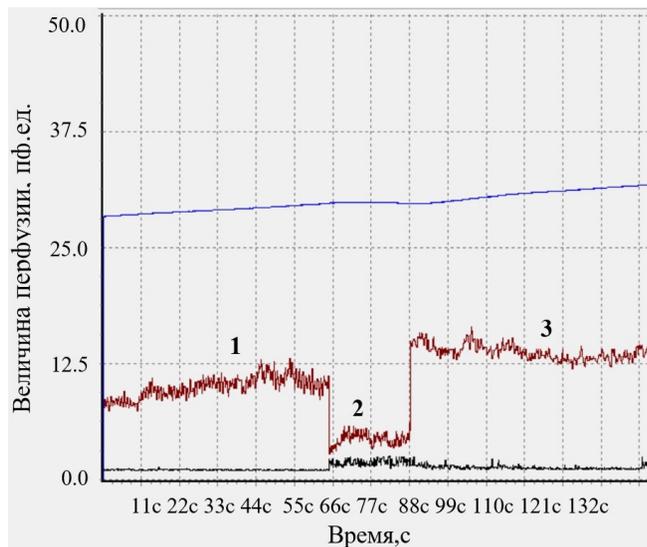
Настоящее исследование одобрено Комитетом по Этике Саратовского государственного медицинского университета им. В. И. Разумовского (протокол № 9 от 4.04.2023 г.) и проводилось в клинических условиях под наблюдением медицинского персонала. Все испытуемые перед участием подписывали информированное согласие на проведение исследования.

Эксперимент выполнялся в два этапа: сначала в помещении с температурой воздуха 20±1 °С, затем с температурой воздуха 30±1 °С. У испытуемых измерялись показания величины микроциркуляции (перфузии) при различных положениях тела с использованием портативного ЛДФ-устройства «ЛАЗМА ПФ» (Россия). В устройстве «ЛАЗМА ПФ» применяется одночастотный лазер мощностью непрерывного лазерного излучения на выходе анализатора не более 1мВт и с длиной волны 850 нм, глубина проникновения в кожу которого составляет около 1–1,2 мм.

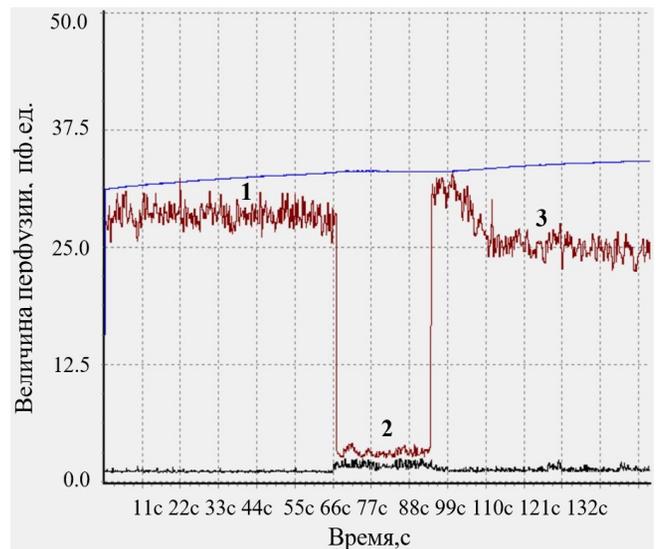
На первом этапе эксперимента для каждого из участников исследования последовательно регистрировались сигналы с помощью ЛДФ-прибора при различных положениях их правой руки в помещении с температурой воздуха 20±1 °С. Испытуемый садился на стул, после чего его правая рука помещалась на высоко расположенный стол, чтобы она находилась на уровне сердца. На ладонную поверхность указательного пальца правой руки участнику исследования надевался прибор для записи ЛДФ-граммы. Запись ЛДФ-граммы проводилась в течение 1 минуты для положения руки с датчиком на уровне сердца и в положении опущенной руки вниз, для положения поднятой руки вверх запись была 30 секунд. Выбранный интервал времени связан с тем, что постуральные веноультоартериолярные реакции происходят сразу после изменения положения тела и могут привести к кратковременному увеличению или уменьшению объема крови в определенных участках тела. Расчет значения микроциркуляции проводился путем определения среднего значения перфузии для данной позиции руки человека. Порядок следования положений был следующим:

- 1) в положении руки с датчиком на уровне сердца;
- 2) в положении поднятой руки вверх;
- 3) в положении опущенной руки вниз.

Для избавления от шумов в данных ЛДФ-граммы, связанных с движением и дыханием испытуемого, в компьютерной программе ЛДФ-прибора применялся встроенный фильтр. После фильтрации данных фактическое время измерения на несколько секунд



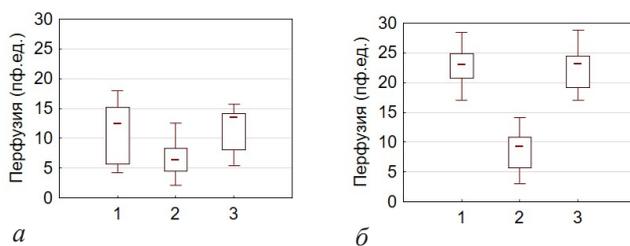
а



б

Рис. 1. ЛДФ-грамма испытуемого при температуре воздуха в комнате: а –  $20\pm 1$  °С; б –  $30\pm 1$  °С; для трех положений руки: 1 – рука с датчиком на уровне сердца; 2 – рука с датчиком выше уровня сердца; 3 – рука с датчиком ниже уровня сердца

Fig. 1. LDF-gram of the subject at an air temperature: а –  $20\pm 1$  °С; б –  $30\pm 1$  °С; for three arm positions: 1 – arm with sensor at heart level; 2 – arm with sensor above heart level; 3 – arm with sensor below heart level



а

б

Рис. 2. Разброс величины перфузии в группе испытуемых из 20 человек при температуре воздуха в комнате: а –  $20\pm 1$  °С; б –  $30\pm 1$  °С; для трех положений руки: 1 – рука с датчиком на уровне сердца; 2 – рука с датчиком выше уровня сердца; 3 – рука с датчиком ниже уровня сердца

Fig. 2. The spread of perfusion values in a group of 20 subjects at room temperature: а –  $20\pm 1$  °С; б –  $30\pm 1$  °С; for three arm positions: 1 – arm with a sensor at heart level; 2 – arm with a sensor above heart level; 3 – a hand with a sensor below the level of the heart

могло отличаться для разных испытуемых, так как удалялись данные с шумами из-за движений руки. Запись данных ЛДФ-граммы, полученная после фильтрации, позволяет точнее оценить величину микроциркуляции.

На втором этапе исследования испытуемого помещали в помещение с температурой воздуха  $30\pm 1$  °С. В течение 10 минут у человека происходила температурная адаптация при прогревании тела и увеличение притока крови к различным тканям организма. В последующем испытуемый совершал аналогичные действия руки с датчиком, что и во время первого этапа исследования.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием стандартных статистических методов пакета программ STATISTICA 10 (StatSoft, США). Для количественных переменных рассчитывались средние арифметические значения и стандартные отклонения ( $M\pm SD$ ), медианы и квартили ( $Me [LQ; UQ]$ ). Сравнение количественных переменных в двух зависимых выборках проводили с помощью t-критерия Стьюдента для оценки разницы в данных между положениями руки в рамках одного из этапов

исследования при одинаковой температуре воздуха. Статистические различия для одного и того же положения руки, но при разной температуре воздуха оценивали с помощью критерия Вилкоксона. За уровень статистически значимых принимали изменения при  $p < 0,05$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены ЛДФ-граммы для трех положений руки относительно уровня сердца одного из испытуемых при температуре воздуха  $20\pm 1$  и  $30\pm 1$  °С соответственно.

Из рис. 1 видно, что при переходе руки из положения 1 (на уровне сердца) в положение 2 (рука поднята вверх) наблюдалось уменьшение величины перфузии в микроциркуляторном русле, что обусловлено уменьшением трансмурального давления в конечности руки. При изменении положения руки из 2-го в 3-е (рука опущена вниз) наблюдалось увеличение перфузии в микроциркуляторном русле, что обусловлено повышением трансмурального давления, увеличением объема артериальной и венозной крови в конечности и, как следствие, расширением артерий и вен.

На рис. 2 показаны разбросы значений микроциркуляции в перфузионных относительных единицах для всех испытуемых при различных положениях руки с датчиком и температурой воздуха в помещении  $20\pm 1$  и  $30\pm 1$  °С. Увеличение медианного значения перфузии на рис. 2, б для 1-го положения руки (на уровне сердца) и 3-го положения руки (рука опущена вниз) объясняется уменьшением тонуса гладких мышц сосудистой системы человека с увеличением температуры воздуха.

При проведении первого этапа с температурой воздуха в комнате  $20\pm 1$  °С у группы по t-критерию Стьюдента для зависимых выборок были обнаружены статистически значимые результаты. Так, для 1-го (на уровне сердца) и 2-го (рука поднята вверх) положения руки  $t=6,16$  ( $p < 0,001$ ). Разница между меди-

Значения перфузии между одинаковыми положениями руки с датчиком при температуре воздуха  $20\pm 1$  и  $30\pm 1$  °C соответственноPerfusion values between the same hand positions with the sensor at an air temperature of  $20\pm 1$  and  $30\pm 1$  °C, respectively

Характеристика	Температура воздуха $20\pm 1$ °C	Температура воздуха $30\pm 1$ °C	p-value
Положение 1 рука на уровне сердца	11,1 $\pm$ 4,8 12,5 [5,7; 15,2]	22,7 $\pm$ 3,3 23,1 [20,7; 24,9]	p<0,001
Положение 2 рука опущена	6,7 $\pm$ 3,3 6,5 [4,5; 8,3]	8,7 $\pm$ 3,3 9,4 [5,7; 10,9]	p>0,05
Положение 3 рука поднята	11,7 $\pm$ 3,6 13,6 [8,1; 14,2]	22,4 $\pm$ 3,3 23,3 [19,2; 24,5]	p<0,001

анными значениями для 1-го и 2-го положения руки составила 6,0 пф. ед. Для 2-го и 3-го (рука опущена вниз) положения руки абсолютное значение  $t=8,5$  ( $p<0,001$ ). Разница между медианными значениями для 2-го и 3-го положения руки составила 7,1 пф. ед.

Результаты исследования показали увеличение статистически значимых отличий во время второго этапа эксперимента при температуре воздуха  $30\pm 1$  °C. Так, для 1-го (на уровне сердца) и 2-го (рука поднята вверх) положения руки  $t=13,5$  ( $p<0,0001$ ). Разница между медианными значениями для 1-го и 2-го положения руки составила 13,7 пф. ед. Для 2-го и 3-го (рука опущена вниз) положения руки абсолютное значение  $t=15,6$  ( $p<0,0001$ ). Разница между медианными значениями для 2-го и 3-го положения руки составила 13,9 пф. ед.

В таблице приведены результаты сравнительного анализа величины перфузии между одинаковыми положениями руки с датчиком при двух температурах воздуха в помещении.

Как видно из данных таблицы, в сравнительной выборке между первым и вторым этапом исследования были получены статистически значимые результаты по критерию Вилкоксона для положения руки относительно уровня сердца и поднятой руки, для обоих случаев  $p<0,001$ . При температуре воздуха  $30\pm 1$  °C и положении руки на уровне сердца наблюдалось увеличение медианной величины перфузии на 10,6 пф. ед по сравнению с таким же положением руки при температуре воздуха  $20\pm 1$  °C. При положении руки ниже уровня сердца медианная величина перфузии увеличилась на 2,9 пф. ед., а при положении руки выше уровня сердца – на 9,7 пф. ед., по сравнению с таким же положением руки при температуре воздуха  $20\pm 1$  °C.

Из полученных данных следует, что увеличение температуры окружающей среды приводит к увеличению разницы микроциркуляции периферических сосудов при изменении положения руки для всех испытуемых, и результаты исследования становятся статистически значимы. При нахождении человека в комнате с температурой  $30\pm 1$  °C происходит дилатация сосудов и изменение их тонуса, чем объясняется возрастание значений микроциркуляции в относительных перфузионных единицах.

Проведение исследования с температурой воздуха в помещении  $30\pm 1$  °C позволило получить более однозначную реакцию у испытуемых при проведении постральной пробы. Это объясняется уменьшением влияния начального тонуса сосудистой системы.

**Заключение**

В рамках данного исследования были обнаружены статистически значимые изменения величины кровотока в микроциркуляторном русле верхней конечности человека в зависимости от положения руки относительно уровня сердца. При поднятии руки происходит снижение перфузии, при опускании – увеличение.

Тепловое воздействие приводит к изменению функционального резерва кровообращения микроциркуляторного русла и его сосудистого тонуса. Артериальная гемодинамика человека реагирует на тепловое воздействие уменьшением тонуса сосудистой системы, что сопровождается расширением артериол и увеличением количества функционирующих капилляров.

Результаты исследования показали увеличение статистически значимых отличий между различными положениями руки при увеличении температуры воздуха в комнате. Для положений руки на уровне, выше и ниже уровня сердца при температуре воздуха  $20\pm 1$  °C была зафиксирована статистически значимая разница по t-критерию Стьюдента, значение  $p<0,001$ . Для тех же положений руки, но при температуре воздуха  $30\pm 1$  °C значение  $p<0,0001$ .

В сравнительной выборке между первым этапом (при температуре воздуха  $20\pm 1$  °C) и вторым этапом исследования (при температуре воздуха  $30\pm 1$  °C) были получены статистически значимые результаты ( $p<0,001$ ) по критерию Вилкоксона для положения руки на уровне сердца и поднятой руки.

Анализ изменения величины кровотока в микроциркуляторном русле при одновременном использовании нескольких функциональных проб может явиться основой для исследований по выявлению адаптационного потенциала и прогнозирования риска сердечно-сосудистых заболеваний у человека.

**Конфликт интересов / Conflict of interest**

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare that they have no conflicts of interest.

**Литература / References**

1. Левичева Е.Н., Каменская О.В., Логинова И.Ю. и др. Резервные возможности микроциркуляторного кровотока периферических тканей при циркуляторной гипоксии // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2012. – Т. 11, № 3. – С. 34–38. [Levicheva EN, Kamenskaya OV, Loginova IYu, Klinkova AS, Bulatetskaya LM. Reserve capabilities of microcirculatory blood flow of peripheral tissues in circulatory hypoxia. Regional blood circulation and microcirculation. 2012;11(3);34-38. (In Russ.)].

2. Скедина М.А., Ковалева А.А., Дегтеренкова Н.В. Исследование церебральной гемодинамики и периферической микроциркуляции при проведении пассивной постуральной ортостатической пробы. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 115–119. [Skedina MA, Kovaleva AA, Degterenkova NV. Investigation of cerebral hemodynamics and peripheral microcirculation during a passive postural orthostatic test. Regional blood circulation and microcirculation. 2018;17(3):115-119. (In Russ.)].
3. Fedorovich AA, Loktionova YI, Zharkikh EV, Mikhailova MA, Popova JA, Suvorov AV, Zherebtsov EA. Body position affects capillary blood flow regulation measured with wearable blood flow sensors. *Diagnostics*. 2021;11(3):436. Doi: 10.3390/diagnostics11030436.
4. Abraham P, Bourgeau M, Camo M, Humeau-Heurtier A, Durand S, Rousseau P, Mahe G. Effect of skin temperature on skin endothelial function assessment. *Microvasc res*. 2013; 88:56-60. Doi: 10.1016/j.mvr.2013.04.005.
5. Jonasson H, Fredriksson I, Pettersson A, Larsson M, Strömberg T. Oxygen saturation, red blood cell tissue fraction and speed resolved perfusion—a new optical method for microcirculatory assessment. *Microvasc res*. 2015;102:70-77. Doi: 10.1016/j.mvr.2015.08.006.
6. Filina MA, Potapova EV, Makovik IN, Zharkikh EV, Dremmin VV, Zherebtsov EA, Muradyan VF. Functional changes in blood microcirculation in the skin of the foot during heating tests in patients with diabetes mellitus. *Human Physiol*. 2017;43:693-699. Doi: 10.1134/s0362119717060020.
7. Tesselaar E, Flejmer AM, Farnebo S, Dasu A. Changes in skin microcirculation during radiation therapy for breast cancer. *Acta Oncologica*. 2017;56(8):1072-1080. Doi: 10.1080/0284186x.2017.1299220.
8. Пономарева А.А. Традиционные и современные представления о кровоснабжении кожи // Журн. фундамент. мед. и биол. – 2018. – № 2. – С. 34–44. [Ponomareva AA. Traditional and modern ideas about the blood supply to the skin. *J Fund Med Biol*. 2018;(2):34-44. (In Russ.)].
9. Глазков А.А., Куликов Д.А., Древал А.В. и др. Разработка способа диагностики нарушений микроциркуляции крови у больных сахарным диабетом методом лазерной доплеровской флоуметрии // Альм. клин. мед. – 2014. – № 31. – С. 7–10. [Glazkov AA, Kulikov DA, Dreval AV, Kovaleva YuA, Shumsky VI, Rogatkin DA. Development of a method for diagnosing blood microcirculation disorders in patients with diabetes mellitus by laser Doppler flowmetry. *Alm Clin Med*. 2014;(31):7-10. (In Russ.)].
10. Glazkova PA, Kulikov DA, Glazkov AA, Terpigorev SA, Rogatkin DA, Shekhyan GG, Paleev FN. Reactivity of skin microcirculation as a biomarker of cardiovascular events. Pilot study. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2021;78(3):247-257. Doi: 10.3233/ch-201016.
11. Hodges GJ, Del Pozzi AT. Noninvasive examination of endothelial, sympathetic, and myogenic contributions to regional differences in the human cutaneous microcirculation. *Microvasc res*. 2014;93:87-91. Doi: 10.1016/j.mvr.2014.04.002.
12. Sorelli M, Stoyneva Z, Mizeva I, Bocchi L. Spatial heterogeneity in the time and frequency properties of skin perfusion. *Physiol Measur*. 2017;38(5):860. Doi: 10.1088/1361-6579/aa5909.
13. Roustit M, Blaise S, Millet C, Cracowski JL. Reproducibility and methodological issues of skin post-occlusive and thermal hyperemia assessed by single-point laser Doppler flowmetry. *Microvasc res*. 2010;79(2):102-108. Doi: 10.1016/j.mvr.2010.01.001.
14. Roustit M, Cracowski JL. Assessment of endothelial and neurovascular function in human skin microcirculation. *Trends Pharmacol Sci*. 2013;34(7):373-384. Doi: 10.1016/j.tips.2013.05.007.
15. Charkoudian N, Morrison SF. Physiology of thermoregulation: central and peripheral mechanisms. In *Primer on the Autonomic Nervous System*. 4th ed. Academic Press, 2023: 315-321. Doi: 10.1016/B978-0-323-85492-4.00104-6.
16. Christen S, Delachaux A, Dischl B, Golay S, Liaudet L, Feihl F, Waeber B. Dose-dependent vasodilatory effects of acetylcholine and local warming on skin microcirculation. *J cardiovasc pharmacol*. 2004;44(6):659-664. Doi: 10.1097/00005344-200412000-00006.
17. Cracowski JL, Roustit M. Human skin microcirculation. *Compr Physiol*. 2020;10(3):1105-1154. Doi: 10.1002/cphy.c190008.
18. Федорович А.А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2010. – Т. 9, № 1. – С. 49–60. [Fedorovich AA. Functional state of regulatory mechanisms of microcirculatory blood flow in normal and arterial hypertension according to laser Doppler flowmetry. *Regional blood circulation and microcirculation*. 2010;9(1):49-60. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2010-9-1-49-60.
19. Федорович А.А. Микрососудистое русло кожи человека как объект исследования // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 11–26. [Fedorovich AA. Microcirculation of the human skin as an object of research. *Regional blood circulation and microcirculation*. 2017;16(4):11-26. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-11-26.
20. Глазкова П.А., Терпигорев С.А., Куликов Д.А. и др. Пути повышения диагностической значимости метода лазерной доплеровской флоуметрии при оценке кожной микроциркуляции у пациентов с артериальной гипертензией // Артериальная гипертензия. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 74–83. [Glazkova PA, Terpigorev SA, Kulikov DA, Ivanova NA, Glazkov AA. Ways to increase the diagnostic significance of the laser Doppler flowmetry method in assessing skin microcirculation in patients with arterial hypertension. *Arterial hypertension*. 2019;25(1):74-83. (In Russ.)]. Doi: 10.18705/1607-419X-2019-25-1-74-83.
21. Gavish L, Hoffer O, Rabin N, Halak M, Shkilevich S, Shayovitz Y, Weizman G, Haim O, Gavish B, Gertz D, Ovadia-Blechman Z. Microcirculatory response to photobiomodulation—why some respond and others do not: a randomized controlled study. *Lasers Surg Med*. 2020;52(9):863-872. Doi: 10.1002/lsm.23225.
22. Bonetti PO, Pumper GM, Higano ST, Kuvin JT, Lerman A. Noninvasive identification of patients with early coronary atherosclerosis by assessment of digital reactive hyperemia. *JAAC*. 2004;44(11):2137-2141. Doi: 10.1016/j.jacc.2004.08.062.
23. Hellmann M, Roustit M, Cracowski JL. Skin microvascular endothelial function as a biomarker in cardiovascular diseases? *Pharmacol Rep*. 2015;67(4):803-810. Doi: 10.1016/j.pharep.2015.05.008.
24. Levy BI, Schiffrin EL, Mourad JJ, Agostini D, Vicaut E, Safar ME, Struijker-Boudier HA. Impaired tissue perfusion: a pathology common to hypertension, obesity, and diabetes mellitus. *Circulation*. 2008;118(9):968-976. Doi: 10.1161/circulationaha.107.763730.
25. Hultman M, Larsson M, Strömberg T, Henricson J, Iredahl F, Fredriksson I. Flowmotion imaging analysis of spatio-temporal variations in skin microcirculatory perfusion. *Microvasc Res*. 2023;146:104456. Doi: 10.1016/j.mvr.2022.104456.

26. Fredriksson, I, Larsson M, Strömberg T, Iredahl F. *Vasomotion analysis of speed resolved perfusion, oxygen saturation, red blood cell tissue fraction, and vessel diameter: novel microvascular perspectives. Skin Res Technol. 2022; 28(1):142-152. Doi: 10.1111/srt.13106.*

27. Melsens K, Van Impe S, Paolino S, Vanhaecke A, Cutolo M, Smith V. *The preliminary validation of laser Doppler flowmetry in systemic sclerosis in accordance with the OMERACT filter: a systematic review. In Seminars in arthritis and rheumatism. 2020;50(2):321-328. Doi: 10.1016/j.semarthrit.2019.08.007.*

### Информация об авторах

**Скрипаль Анатолий Владимирович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия, e-mail: skriaplav@info.sgu.ru, ORCID: 0000-0002-9080-0057.

**Аль-Бадри Фаркад** – аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия, e-mail: farqad@uowasit.edu.iq, ORCID: 0009-0009-9411-1740.

**Машков Константин Владимирович** – аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия, e-mail: konstantinpluss@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5835-9428.

**Усанов Андрей Дмитриевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры медицинской физики, Саратовский националь-

ный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия, e-mail: aka\_norton@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4004-875X.

**Аверьянов Андрей Петрович** – д-р мед. наук, профессор кафедры пропедевтики детских болезней, детской эндокринологии и диabetологии, Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского, г. Саратов, Россия, e-mail: andaveryanov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0341-3199.

### Authors information

**Skripal Anatoly V.** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Medical Physics, Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia, e-mail: skriaplav@info.sgu.ru, ORCID: 0000-0002-9080-0057.

**Farkad Al-Badri** – Postgraduate student of the Department of Medical Physics, Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia, e-mail: farqad@uowasit.edu.iq, ORCID: 0009-0009-9411-1740.

**Mashkov Konstantin V.** – Postgraduate student of the Department of Medical Physics, Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia, e-mail: konstantinpluss@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5835-9428.

**Usanov Andrey D.** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Medical Physics, Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia, e-mail: aka\_norton@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4004-875X.

**Averyanov Andrey P.** – Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Propaedeutics of Children's Diseases, Pediatric Endocrinology and Diabetology, Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov, Russia, e-mail: andaveryanov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0341-3199.