

УДК 612.213, 612.135
DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44

А. В. ФРОЛОВ¹, Ю. И. ЛОКТИОНОВА², Е. В. ЖАРКИХ²,
В. В. СИДОРОВ³, А. И. КРУПАТКИН⁴, А. В. ДУНАЕВ²

Исследование изменений кожной микроциркуляции крови при выполнении дыхательной техники хатха-йоги

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации», Санкт-Петербург, Россия

191186, Россия, Санкт-Петербург, Невский пр., д. 30а

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», г. Орёл, Россия

302026, Россия, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95

³ Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие "ЛАЗМА"», Москва, Россия

123458, Россия, Москва, ул. Твардовского, д. 8

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр

травматологии и ортопедии имени Н. Н. Приорова», Москва, Россия

127299, Россия, Москва, ул. Приорова, д. 10

E-mail: polyclinic@list.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.21 г.; принята к печати 19.11.21 г.

Резюме

Введение. Дыхательные упражнения йоги способствуют развитию умения значительно снижать частоту дыхания. Уменьшение минутного объема дыхания приводит к компенсаторным реакциям микроциркуляторного русла на изменение газового состава. Оценить реакцию механизмов регуляции микрососудистого русла можно с помощью оптического неинвазивного метода – лазерной доплеровской флоуметрии. **Цель** исследования заключалась в оценке изменений параметров тканевой микроциркуляции у лиц, выполняющих дыхательные упражнения йоги. **Материалы и методы.** 25 волонтеров выполняли дыхательные упражнения йоги с частотой 3 раза в минуту, 2 раза в минуту, 1,5 раза в минуту, 1 раз в минуту в течение 5 мин, а также свободное дыхание в течение 6 мин до и после дыхательных упражнений. Для выявления реакции кожной микроциркуляции в разных областях тела человека проводилась одновременная регистрация параметров в шести областях методом лазерной доплеровской флоуметрии с применением распределенной системы носимых анализаторов: показатели микроциркуляции (ПМ), нутритивного кровотока (Мнутр), амплитуд миогенных (Ам), нейрогенных (Ан), эндотелиальных (Аэ), дыхательных (Ад) и сердечных (Ас) осцилляций. **Результаты.** После выполнения дыхательных упражнений йоги наблюдалось увеличение показателя микроциркуляции при всех частотах дыхания; дыхание с частотой 1,5 и 1/мин приводит к значимому увеличению нутритивного кровотока, что сопровождалось увеличением Ам. Низкочастотные дыхательные упражнения приводят к увеличению Ад при наиболее низких частотах дыхания – 1,5/мин и 1/мин. Наиболее значимые изменения достигнуты при наиболее низких частотах дыхания (1 и 1,5/мин), что может быть связано с гипоксически-гиперкапническими механизмами. **Заключение.** Отсутствие значительных изменений параметров микрокровотока после низкочастотного дыхания при измерениях в области надглазничных артерий в обеих группах волонтеров характеризует работу гомеостатических механизмов поддержания перфузии мозга в стрессовых для организма ситуациях (низкочастотные типы дыхания, гиперкапния и гипоксия). При измерении в конечностях наблюдалось изменение влияния регуляторных механизмов системы кровообращения, что в совокупности с увеличением кожной перфузии и нутритивной составляющей может характеризовать компенсаторную реакцию микрокровотока на изменение дыхания.

Ключевые слова: микроциркуляция, дыхание, йога, лазерная доплеровская флоуметрия, распределенная система носимых анализаторов

Для цитирования: Фролов А. В., Локтионова Ю. И., Жарких Е. В., Сидоров В. В., Крупаткин А. И., Дунаев А. В. Исследование изменений кожной микроциркуляции крови при выполнении дыхательной техники хатха-йоги. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2021;20(4):33–44. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44.

УДК 612.213, 612.135

A. V. FROLOV¹, Yu. I. LOKTIONOVA², E. V. ZHARKIKH²,
V. V. SIDOROV³, A. I. KRUPATKIN⁴, A. V. DUNAIEV²

Investigation of changes in the skin blood microcirculation when performing the hatha yoga breathing technique

¹ Ltd. St. Petersburg Institute of Oriental Methods of Rehabilitation, Saint-Petersburg, Russia
30a, Nevskii pr., Saint Petersburg, Russia, 191186

² Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia
95, Komsomolskaya str., Orel, Russia, 302026

³ SPE «LAZMA» Ltd., Moscow, Russia

8, Tvardovskogo str., Moscow, Russia, 123458

⁴ N. N. Priorov National Medical research center of traumatology and orthopaedics, Moscow, Russia
10, Priorova str., Moscow, Russia, 127299

E-mail:

Received 01.10.21; accepted 19.11.21

Summary

Introduction. Yoga breathing exercises improve the ability to significantly reduce the respiratory rate. A decrease of the minute respiration volume results in compensatory reactions of the microcirculatory bed caused by changes in the gas composition. The reaction of the regulatory mechanisms of the microvascular bed can be evaluated by the optical non-invasive laser Doppler flowmetry method. The aim of the study was to assess the tissue microcirculation parameter changes in people performing yoga breathing exercises. **Materials and methods.** 25 volunteers performed yoga breathing exercises at a frequency of 3 times per minute, 2 times per minute, 1.5 times per minute, 1 time per minute for 5 minutes, and free breathing for 6 minutes before and after breathing exercises. Parameters aimed to define the reaction of skin microcirculation in different body areas were simultaneously recorded in six sites by laser Doppler flowmetry using a distributed system of wearable analyzers. The parameters of tissue microcirculation recorded by the method of laser Doppler flowmetry were: the index of microcirculation (Im), nutritive blood flow (Imn), the amplitude of myogenic (Am), neurogenic (An), endothelial (Ae), respiratory (Ar) and cardiac (Ac) regulation circuits. **Results.** Yoga breathing exercises led to increase of microcirculation index at all breathing frequencies. Breathing at a frequency of 1.5 and 1/minute leads to a significant increase in nutritional blood flow. Low-frequency breathing exercises lead to an increase in blood pressure at the lowest breathing rates – 1.5/minute and 1/minute. The most significant changes were achieved at the lowest respiration rates (1 and 1.5/minute), that could be associated with hypoxic-hypercapnic mechanisms. **Conclusion.** The absence of significant changes in microcirculation parameters after low-frequency respiration during measurements in the supraorbital arteries in both groups characterizes the work of homeostatic mechanisms for maintaining brain perfusion in stressful situations for the body (low-frequency types of respiration, hypercapnia and hypoxia). When measured in the extremities, a change in the effect of the circulatory system regulatory mechanisms was observed; along with an increase in skin perfusion and the nutritional component, it can characterize the compensatory reaction of the microcirculation to respiration change.

Keywords: microcirculation, breathing, yoga, laser Doppler flowmetry, distributed system of wearable analyzers

For citation: Frolov A. V., Loktionova Yu. I., Zharkikh E. V., Sidorov V. V., Krupatkin A. I., Dunaev A. V. Investigation of changes in the skin blood microcirculation after the performing the hatha yoga breathing technique. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2021;20(4):33–44. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44.

Введение

Хатха-йога – система психофизиологической саморегуляции, зародившаяся на территории современной Индии и включающая в себя подробно разработанные дыхательные упражнения, которые способствуют развитию подвижности грудной клетки, укреплению дыхательной мускулатуры, увеличению жизненной емкости легких и оптимизации аппарата внешнего дыхания в целом [1]. Дыхательные упражнения йоги также способствуют развитию умения значительно снижать частоту дыхания. Уменьшение минутного объема дыхания приводит к состоянию гиповентиляции, оказывает влияние на газообмен с достижением гиперкапнии (состояние, при котором наблюдается повышенный уровень углекислого газа в крови) [2], вызывает компенсаторные реакции общего состояния микроциркуляции крови организма человека.

Углекислый газ как вазоактивный агент, способный влиять на тонус артерий (в том числе цереб-

ральных), используется во многих исследованиях. Для увеличения парциального давления углекислого газа (PaCO_2) применяются ингаляции газовых смесей с повышенным содержанием CO_2 , а также задержка дыхания [3]. Несколько научных работ посвящено изучению парциального давления CO_2 в артериальной крови как регулятора мозгового кровотока [4]. Было показано, что прирост PaCO_2 на 1 мм рт. ст. сопровождается увеличением мозгового кровотока в среднем на 5 % [5].

Для оценки церебральной тканевой перфузии при изменениях газового обмена в научных работах применялась функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) головного мозга [6–8], транскраниальное ультразвуковое доплеровское исследование, позитронно-эмиссионная томография [9–11], а также метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Метод ЛДФ использовался для регистрации изменений мозгового кровотока в сравнении со спо-

Протокол проведения исследований

Table 1

The research protocol

Этап	Описание	Время, мин
1	Фоновая запись	6
2	Выполнение дыхательной пробы (глубокий вдох, задержка дыхания на 15 с)	≈1–2
3	Специальный режим полного дыхания по одной из схем: 30:30 (30 с – вдох; 30 с – выдох) 25:25 20:20 15:15 13:13 10:10	5
4	Фоновая запись	6
Общее время		≈18–19

собом внутриартериальной инъекцией ксенона-133 в качестве «золотого стандарта». Измерения мозгового кровотока проводились одновременно с помощью ЛДФ и Хе-133 на фоне колебаний церебральной ауторегуляции, вызванных изменениями PaCO_2 . При значительных изменениях PaCO_2 оба метода дали одинаковые результаты. Авторы [12] делают вывод, что ЛДФ является надежным методом обнаружения широкого спектра изменений мозгового кровотока под воздействием колебания PaCO_2 .

Известны исследования изменений состояния микроциркуляции при осуществлении контролируемого дыхания. В исследовании М. Й. Тюриной и др. [13], осуществлявшемся при контролируемом по глубине, частоте и динамике экскурсии грудной клетки дыхании, показано, что влияние дыхания на колебания кровотока может реализовываться в широком диапазоне частот (от 0,03 до 0,25 Гц в зависимости от частоты дыхания), при этом обнаруживается зависимость амплитуды дыхательных осцилляций от частоты управляемого дыхания.

Для оценки влияния дыхательной техники йоги на общую микроциркуляцию крови в настоящей работе нами предложено исследовать кожную микроциркуляцию крови в локальных областях тела человека. Микроциркуляторно-тканевая система (МТС) кожи является анатомически неоднородной и отличается временной регуляцией сосудистого тонуса звеньев микроциркуляторного русла кровотока (артериол, прекапилляров, артериовенулярных шунтов) в зависимости от жизнедеятельности кожной ткани в различных областях. Ввиду анатомических и физиологических отличий МТС целесообразно проводить одновременное исследование кровотока в ряде симметричных областей. Такой методический подход позволяет улучшить диагностику системных изменений, путем сравнения выявить области с наибольшими ответными реакциями физиологических показателей кожной микрогемодинамики при дыхательных упражнениях.

Помимо исследований микроциркуляторного русла кожи верхних и нижних конечностей, метод

лазерной доплеровской флоуметрии применяется для оценки мозгового кровотока в лобной области в проекциях надглазничных артерий (НГА), принадлежащих к общему бассейну кровообращения с сонными артериями [14–16]. В работе была использована оценка изменений мозгового кровотока при выполнении гиповентиляционных упражнений йоги по результатам лобной кожной микроциркуляции крови в левой и правой зонах НГА.

Цель исследования – оценить влияние дыхательных упражнений йоги на параметры общей кожной микроциркуляции крови на основе анализа полученных результатов в ряде локальных областей.

Материалы и методы исследования

Для исследования параметров кожной микроциркуляции в настоящей работе применяли метод лазерной доплеровской флоуметрии. Метод ЛДФ является одним из наиболее широко распространенных методов оптической неинвазивной диагностики функционального состояния микроциркуляторной

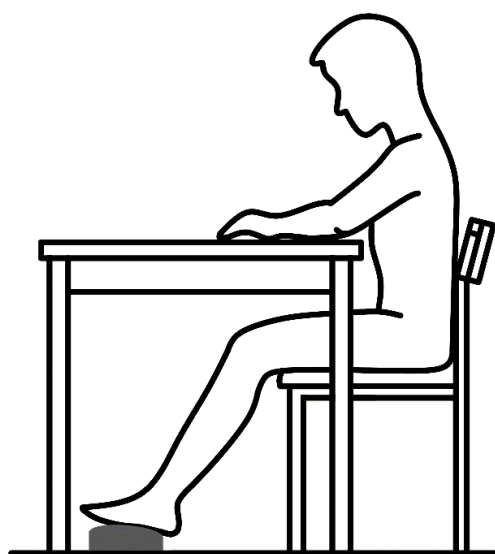


Рис. 1. Положение волонтера во время проведения исследований
Fig. 1. Volunteer specific position in the experiments

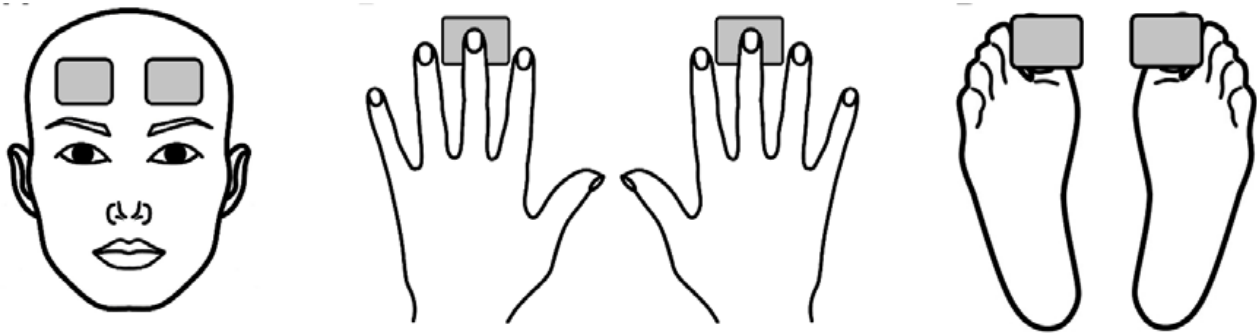


Рис. 2. Расположение портативных анализаторов во время проведения исследований
 Рис. 2. Wearable analyzers arrangement in the experiments

Таблица 2

Характеристика выборки волонтеров

Table 2

Volunteer characteristics

Группа волонтеров	Число волонтеров	Выполняемые режимы
1-я	9	15:15, 13:13, 10:10
2-я	16	30:30, 25:25, 20:20

части сосудистого русла [17–20]. Метод основан на облучении кожного покрова когерентным лазерным излучением с последующей регистрацией интенсивности отраженного излучения от статичных и подвижных структур ткани. После фотометрирования интенсивности отраженного излучения, аналоговой и цифровой обработки вычисляется показатель микроциркуляции (ПМ), пропорциональный числу эритроцитов в диагностируемом объеме и их средней скорости. В полученном сигнале содержится информация об эндотелиальном, нейрогенном и миогенном активных механизмах регуляции сосудистого тонуса и пассивных механизмов – дыхательных и сердечных колебаниях кровотока. Указанные механизмы оказывают влияние на формирование продольных и поперечных колебаний кровотока в определенных частотных диапазонах. Осцилляции кровотока эндотелиального диапазона находятся в пределах от 0,0095 до 0,021 Гц, колебания микрокровотока в нейрогенном диапазоне – 0,021–0,052 Гц, осцилляции миогенного диапазона – 0,052–0,145 Гц. Диапазоны колебаний кровотока пассивных механизмов: дыхательный диапазон – 0,145–0,6 Гц и сердечный – 0,6–2 Гц.

Для осуществления диагностики общего состояния МТС применена система портативных анализаторов микроциркуляции крови «ЛАЗМА ПФ» (регистрационное удостоверение Росздравнадзора № РЗН 2018/7853 от 26.11.2018 г.). Разработанное программное обеспечение позволяет работать с разным числом носимых приборов, от одного до восьми одновременно. Из анализаторов «ЛАЗМА ПФ» была организована распределенная система, состоящая из шести приборов: по два анализатора для одновременных исследований на лбу в зонах НГА, на III пальцах рук и на I пальцах ног. В носимые анализаторы интегрированы датчики контроля температуры области исследований и датчики движения. При проведении исследований по данным датчиков

движения выявляется фрагмент записи, связанный с движением объекта исследований, который может исказить реальную запись ЛДФ-граммы, такой фрагмент отфильтровывается с помощью программного обеспечения, затем проводится вычисление диагностических показателей.

Для изучения влияния дыхательных техник на микроциркуляторное русло был разработан протокол, включающий в себя четыре этапа, представленных в табл. 1.

На третьем этапе длительность вдоха и выдоха зависела от уровня подготовки волонтера и контролировалась с помощью метронома.

Во время проведения исследований волонтеры располагались в положении сидя на стуле с прямой спиной. Руки волонтера располагались на столе на уровне сердца, ноги находились под столом в полусогнутом состоянии (рис. 1).

Портативные анализаторы закреплялись в шести симметричных точках: два устройства фиксировались на лбу в области бассейнов надглазничных артерий (рис. 2, а), два – на ладонной поверхности дистальных фаланг III пальцев рук (рис. 2, б), еще два анализатора крепились на подошвенной поверхности I пальцев ног (рис. 2, в).

Все 25 волонтеров, которые приняли участие в исследовании, считали себя субъективно здоровыми и не принимали никаких лекарственных препаратов на постоянной основе. Они имели регулярный опыт дыхательных упражнений йоги от 2 до 20 лет, не менее 3 раз в неделю по 15 мин. В зависимости от индивидуальных возможностей волонтеры выполняли один из приведенных в табл. 2 вариантов специального режима дыхания, в зависимости от чего все участники были разделены на две группы, приведенные в табл. 2. В 1-ю группу вошли 6 мужчин и 3 женщины (средний возраст – 44,0±7,8 года), во вторую – 4 женщины и 12 мужчин (средний

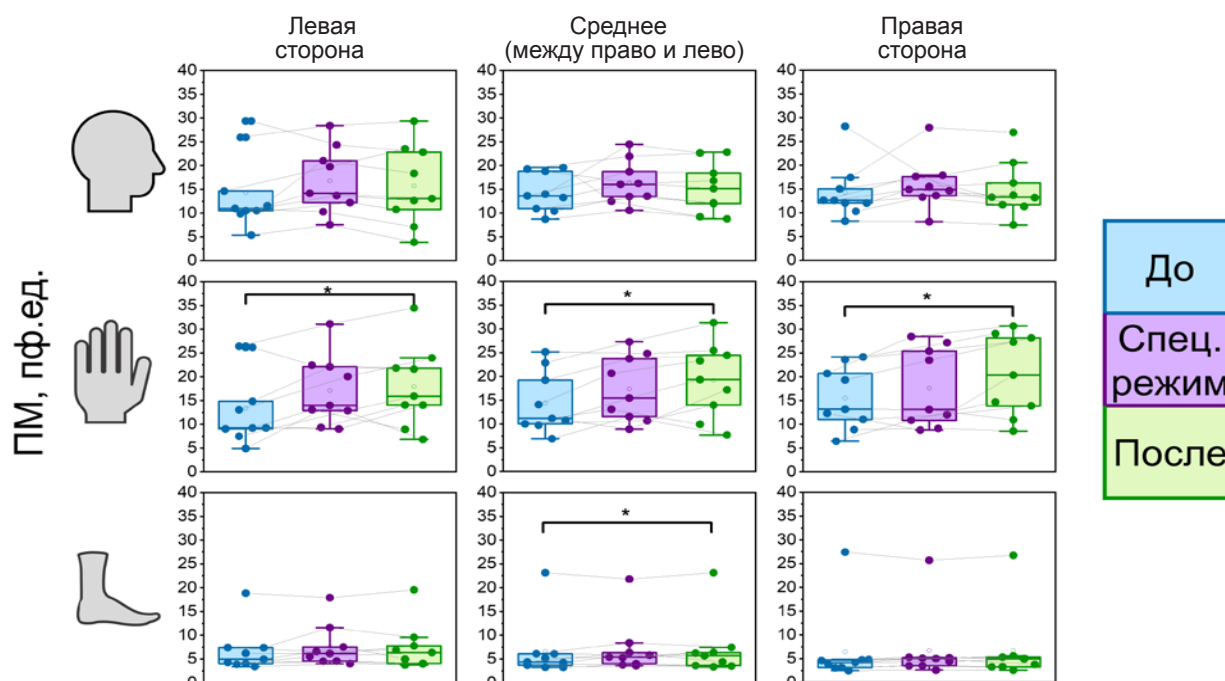


Рис. 3. Показатель микроциркуляции в 1-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$

Fig. 3. Microcirculation parameter of the first volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0,05$

Таблица 3

Характеристика показателя микроциркуляции, нутритивного кровотока, амплитуд колебаний миогенного и сердечного диапазонов в 1-й группе волонтеров

Table 3

The first volunteer group characteristics of microcirculation, nutritive blood flow, amplitude of myogenic and cardiac ranges

Показатель		После / до			После – до		
		левая сторона	среднее	правая сторона	левая сторона	среднее	правая сторона
ПМ	Голова	1,12±0,38	1,11±0,33	1,10±0,32	1,42±5,02	1,04±5,46	0,65±7,26
	Руки	1,44±0,40	1,37±0,34	1,37±0,43	4,59±4,78	4,75±4,07	4,90±4,27
	Ноги	1,12±0,24	1,10±0,13	1,07±0,07	0,62±1,12	0,49±0,63	0,25±0,46
M _{нутр}	Голова	1,08±0,40	1,09±0,32	1,11±0,33	0,53±4,15	0,82±5,46	1,17±7,26
	Руки	1,44±0,56	1,39±0,45	1,44±0,59	1,82±3,20	2,15±3,23	2,48±4,39
	Ноги	1,29±0,52	1,25±0,35	1,23±0,25	0,48±1,50	0,52±0,78	0,57±0,67
Ам	Голова	0,86±0,44	0,93±0,37	0,97±0,36	-0,53±1,06	-0,31±0,79	-0,18±0,66
	Руки	1,53±0,9	1,30±0,63	1,32±0,79	0,22±0,85	0,13±0,50	0,03±0,57
	Ноги	1,39±0,77	1,30±0,51	1,17±0,28	0,04±0,16	0,04±0,11	0,01±0,10
Ад	Голова	1,03±0,40	1,01±0,30	1,07±0,26	-0,17±0,44	-0,06±0,25	0,02±0,11
	Руки	1,37±0,54	1,19±0,25	1,16±0,33	0,09±0,13	0,07±0,09	0,06±0,14
	Ноги	1,12±0,30	1,08±0,19	1,03±0,18	0,02±0,04	0,01±0,03	-0,01±0,04

возраст – 40,6±8,2 года). Такое деление на группы было осуществлено в связи с предположением, что разная частота дыхания оказывает различное влияние на минутный объем дыхания и на процессы газообмена.

Для проведенных измерений для каждой области исследования средний ПМ был определен для первого, третьего и четвертого этапов, также для первого и четвертого этапов оценивались амплитуды эндотелиального (Аэ), нейрогенного (Ан),

миогенного (Ам), дыхательного (Ад) и сердечного (Ас) диапазонов, вычислялся нутритивный кровоток. Для поиска статистически значимых различий между первым и четвертым этапами исследования применяли парный выборочный знаковый ранговый тест Уилкоксона, при уровне охвата 95 %. Для наглядного представления изменения перечисленных параметров были найдены средние абсолютные и относительные изменения для каждого из параметров.

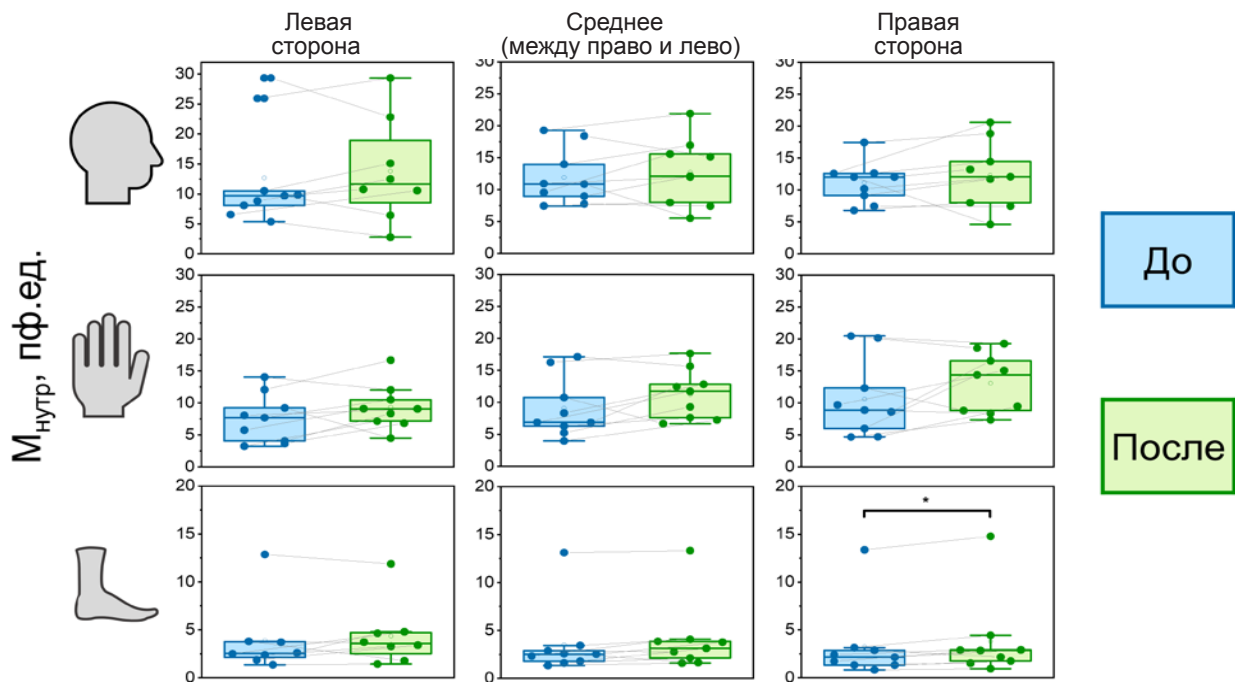


Рис. 4. Нутритивный кровоток в 1-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$

Fig. 4. The nutritive blood flow of the first volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0.05$

Результаты исследования и их обсуждение

Для 1-й группы волонтеров были получены следующие результаты. После выполнения специального режима дыхания у большинства волонтеров наблюдается увеличение ПМ, статистической значимости эти изменения достигают в руках и ногах (рис. 3).

Были рассчитаны абсолютные (После – до) и относительные (После/до) изменения ПМ, $M_{\text{нутр}}$, A_m и A_c для каждой области исследования (табл. 3). Наибольший как относительный, так и абсолютный прирост ПМ наблюдается при измерении на пальцах рук. Это может быть обусловлено более высоким исходным уровнем кожной перфузии в данной области исследования.

$M_{\text{нутр}}$ характеризует движение крови через капилляры, где происходит обмен метаболическими субстратами и газообмен между кровью и окружающими тканями. Во всех областях измерения наблюдается незначительный прирост $M_{\text{нутр}}$ после специального режима дыхания (рис. 4).

Наибольший как относительный, так и абсолютный прирост $M_{\text{нутр}}$ наблюдается при измерении на пальцах рук (табл. 3), как и в случае с ПМ.

В конечностях у волонтеров наблюдается разнонаправленное изменение A_z , в большинстве случаев наблюдается увеличение данного параметра после специального режима дыхания, что подтверждается статистически значимой разницей этапов «До» и «После» в руках. В области интереса на голове наблюдается уменьшение A_z при общей тенденции возрастания перфузии.

В A_m в конечностях реакция на специальный режим дыхания носит индивидуальный характер – наблюдается как увеличение, так и уменьшение амплитуд. Однако при измерении на лбу наблюдается уменьшение данного параметра после нагрузочного этапа исследования.

При анализе реакции A_m на специальный режим дыхания наблюдается следующее: при измерении на голове у большинства волонтеров анализируемый параметр уменьшается, в конечностях реакция носит разнонаправленный характер при среднем увеличении (рис. 5).

В руках и ногах прослеживается тенденция к возрастанию данного параметра после полного дыхания, в голове наоборот – относительное и абсолютное уменьшение (табл. 3).

В дыхательном диапазоне (рис. 6) наблюдается незначительное увеличение влияния осцилляций, что может быть обусловлено сложностью возвращения волонтера к нормальному дыханию после полного низкочастотного дыхания.

Наблюдается небольшой прирост A_d во всех областях исследования (табл. 3).

В исследовании также приняли участие волонтеры, способные выполнять более сложные режимы – частота дыхания составляла от 1 до 1,5 раз в минуту. Во 2-ю группу испытуемых вошли 16 волонтеров.

При анализе показателя микроциркуляции после выполнения специального режима наблюдается статистически значимое увеличение данного параметра как в конечностях, так и при измерении на голове (рис. 7).

Также были рассчитаны абсолютные и относительные изменения анализируемых параметров для каждой области исследования (табл. 4). Наблюдается как относительный, так и абсолютный прирост ПМ во всех точках измерения

$M_{\text{нутр}}$ также значительно увеличивается во всех точках измерения (рис. 8). Реакция на низкочастотное полное дыхание носит общий характер для всех волонтеров.

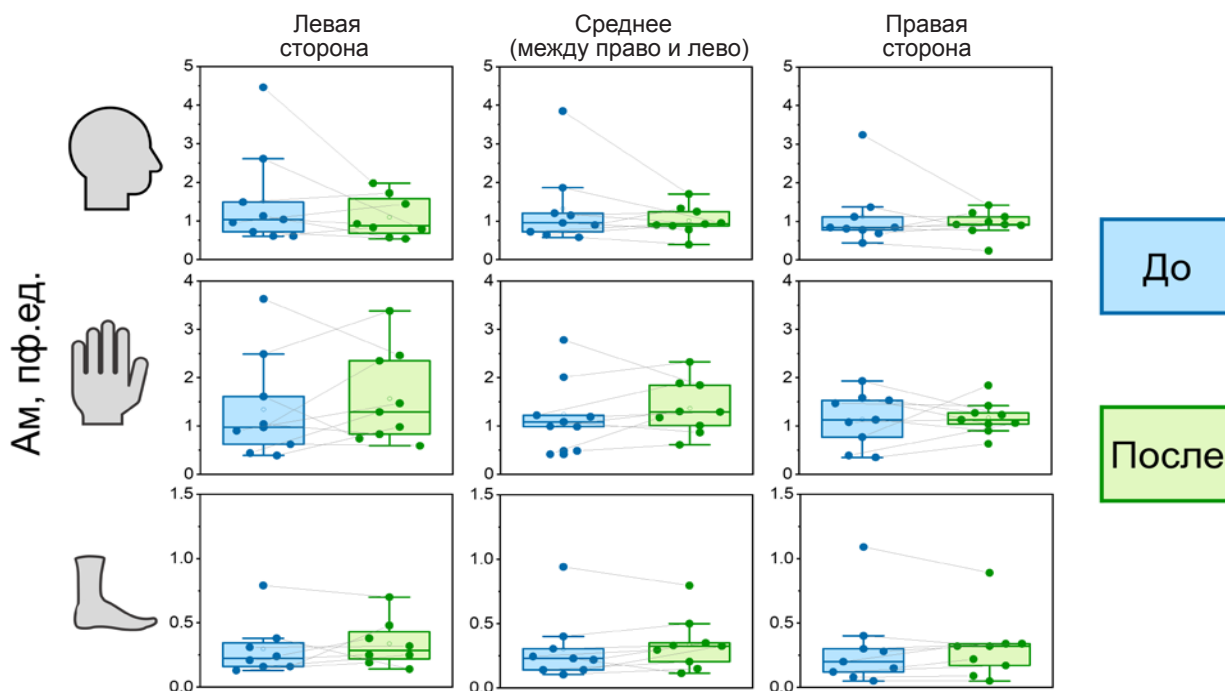


Рис. 5. Амплитуды осцилляций миогенного диапазона в 1-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$

Amplitude of myogenic and cardiac ranges of the first volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0,05$

Положительное изменение $M_{\text{нутр}}$ фиксировалось во всех точках измерения. Наибольший как относительный, так и абсолютный прирост наблюдается при измерении на пальцах рук (табл. 4).

При общей тенденции к незначительному увеличению A_z реакция регуляторного механизма носит индивидуальный характер у каждого волонтера. Наибольший как относительный, так и абсолютный прирост наблюдается при измерении на пальцах рук. В большинстве точек измерения наблюдается небольшое относительное и абсолютное увеличение параметра.

В изменении Ам не было найдено статистически значимых различий до и после выполнения специального режима дыхания, однако в конечностях можно отметить тенденцию к увеличению данного параметра, тогда как при индивидуальной разнонаправленной реакции каждого волонтера в области исследования на голове средние значения амплитуд для 2-й группы не изменились. Наибольший как относительный, так и абсолютный прирост Ам наблюдается при измерении на пальцах рук. В области исследования на голове реакция практически отсутствовала.

В конечностях наблюдается значительное увеличение амплитуд миогенного диапазона после выполнения волонтерами специального режима дыхания. При измерениях на голове индивидуальная реакция носит разнонаправленный характер, а средние изменения отсутствуют (рис. 9).

Реакция данного параметра на специальной режим дыхания в области исследования на голове минимальна, тогда как в руках и ногах присутствует увеличение осцилляций во всех точках измерения (табл. 4).

Было отмечено, что чем больше отличается частота специального режима дыхания от типичной для

волонтера, тем медленнее происходит возвращение к обычному дыханию после выполнения специального режима. Это объясняет значительное увеличение Ад во 2-й группе волонтеров (рис. 10), тогда как в 1-й группе тенденция к увеличению также присутствовала, но не достигала статистической значимости. Наблюдается абсолютный и относительный прирост Ад (табл. 4).

У большинства волонтеров наблюдается увеличение амплитуд сердечных колебаний (рис. 10), что совместно с увеличением перфузии свидетельствует об увеличении артериального притока. Наибольший как относительный, так и абсолютный прирост наблюдается при измерении на пальцах рук, при общей тенденции к увеличению данного параметра после специального режима дыхания.

После выполнения специального режима дыхания наблюдается статистически значимое увеличение ПМ как в 1-й, так и во 2-й группе волонтеров (в группе 1 – на руках и ногах, в группе 2 – на всех измеряемых зонах). Изменения кожной перфузии более выражены в группе 2, что, возможно, обусловлено более низкочастотным дыханием и, следовательно, снижением вентиляции легких по сравнению с группой 1. Снижение минутного объема дыхания (т. е. состояние гиповентиляции), сопровождаясь развитием гипоксии и гиперкапнии, может оказывать определенное влияние на ПМ. Однако тот факт, что ПМ значимо увеличился и в группе 1 (на руках и ногах), и в группе 2 (все зоны исследования), может говорить о том, что данный эффект обусловлен не столько уровнем вентиляции, сколько амплитудой экскурсий грудной клетки и глубиной дыхания – возможно, интенсивное воздействие пассивного дыхательного контура приводит к увеличению ПМ независимо от частоты дыхания.

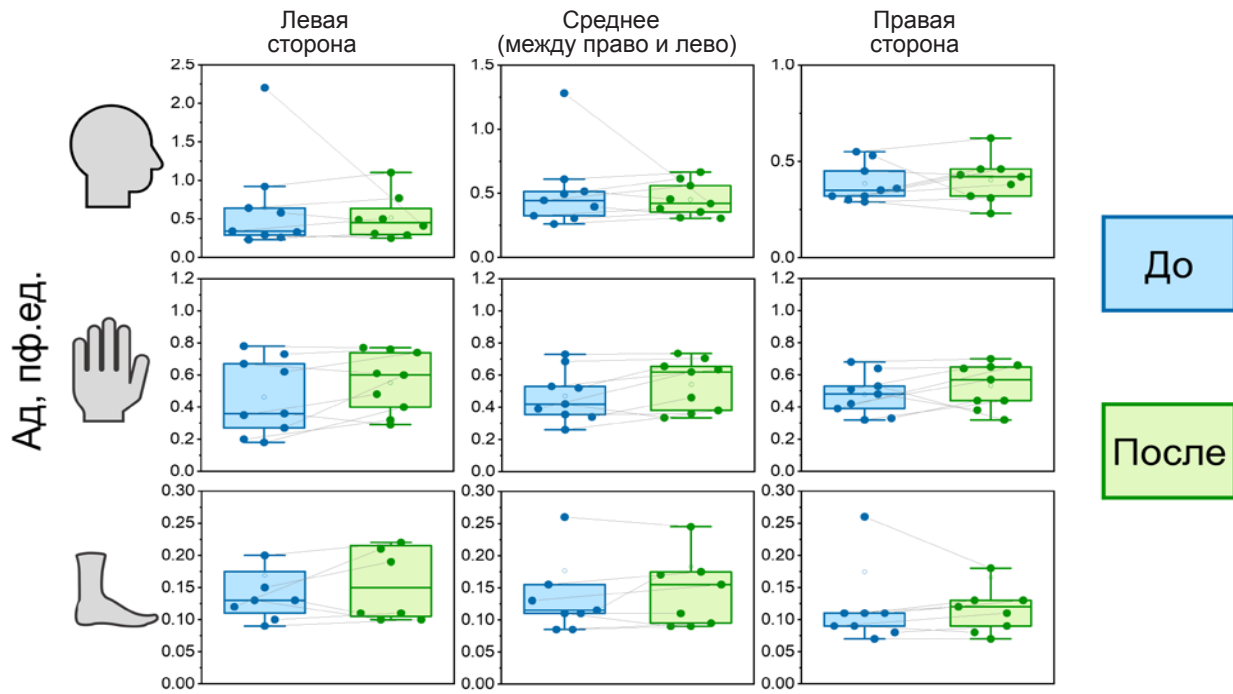


Рис. 6. Амплитуды осцилляций дыхательного диапазона в 1-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$
 Fig. 6. Amplitude of respiratory range of the first volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0.05$

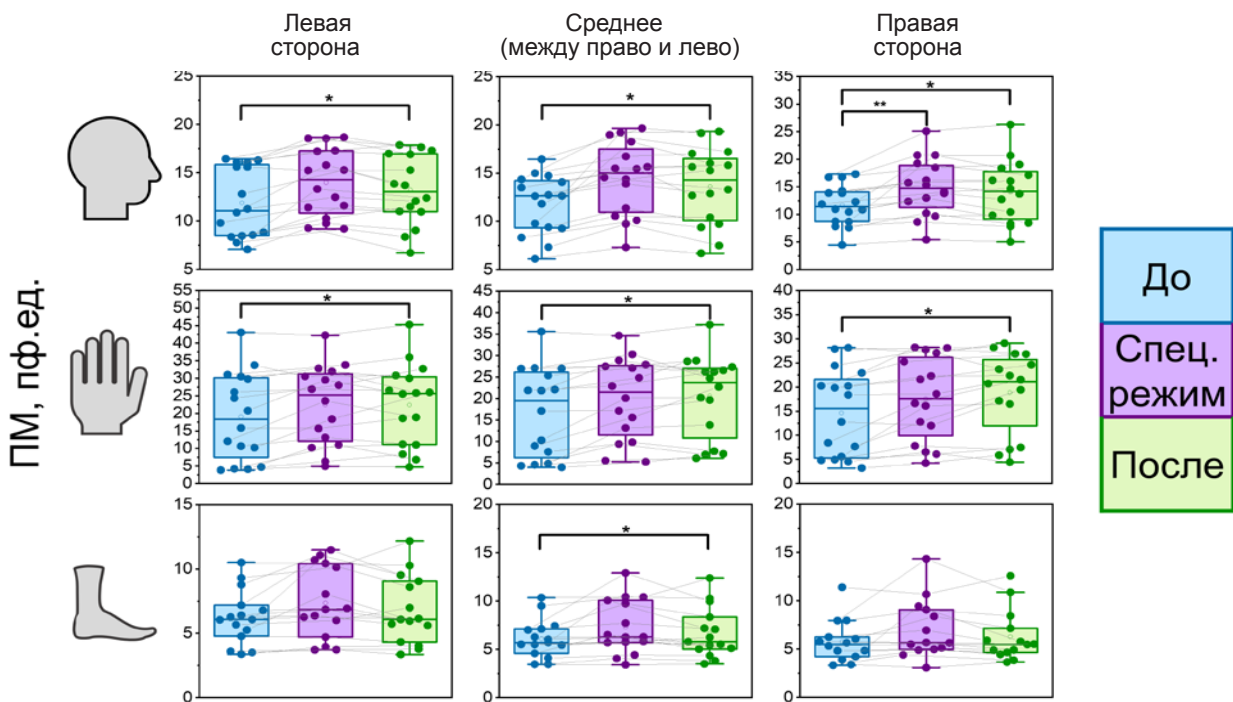


Рис. 7. Показатель микроциркуляции во 2-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$; ** – статистически значимая разница подтверждена тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$
 Fig. 7. Microcirculation parameter of the second volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0.05$

Изменения происходят и с $M_{\text{нутр}}$, характеризующим долю кровотока, проходящего через капиллярное русло. $M_{\text{нутр}}$ отражает степень эффективной тканевой перфузии, обеспечивающей собственно нутритивную поддержку ткани. После выполнения дыхательных упражнений $M_{\text{нутр}}$ увеличивается, но статистически значимые изменения достигнуты только в группе 2. Данный результат тоже гипотетически можно связать с

тем, что в группе 2 волонтеры выполняли дыхательные упражнения с более низкой частотой дыхания, что, в свою очередь, обуславливало снижение минутного объема дыхания и развитие гипоксии и гиперкапнии с последующими метаболическими влияниями на микроциркуляторное русло (для подтверждения данного тезиса необходимы последующие исследования с применением газоанализа).

Характеристика показателя микроциркуляции, нутритивного кровотока, амплитуд колебаний миогенного и сердечного диапазонов во 2-й группе волонтеров

Table 4

The second volunteer group characteristics of microcirculation, nutritive blood flow, amplitude of myogenic and cardiac ranges

Показатель		После / до			После – до		
		левая сторона	среднее	правая сторона	левая сторона	среднее	правая сторона
ПМ	Голова	1,13±0,13	1,16±0,18	1,20±0,30	1,35±1,17	1,87±2,06	2,38±3,29
	Руки	1,39±0,55	1,44±0,57	1,51±0,63	3,33±4,78	3,78±4,17	4,23±4,26
	Ноги	1,09±0,18	1,08±0,14	1,09±0,15	0,55±1,15	0,57±0,97	0,52±0,94
M _{нутр}	Голова	1,07±0,20	1,08±0,19	1,13±0,34	0,58±1,44	1,20±1,79	0,89±2,97
	Руки	1,73±1,10	1,79±0,99	1,90±0,93	3,25±5,71	4,00±4,17	3,92±3,78
	Ноги	1,31±0,39	1,27±0,41	1,25±0,48	0,78±1,00	1,10±1,68	0,78±1,70
Ам	Голова	1,17±0,87	1,06±0,44	1,00±0,39	0,04±0,23	0,01±0,15	-0,02±0,14
	Руки	1,66±1,35	1,68±1,28	1,73±1,28	0,20±0,87	0,32±0,79	0,41±0,88
	Ноги	1,09±0,45	1,23±0,37	1,65±1,33	0,01±0,16	0,04±0,11	0,06±0,10
Ад	Голова	1,07±0,47	1,00±0,35	0,94±0,33	0,00±0,36	-0,13±0,48	-0,25±0,73
	Руки	1,73±1,30	1,67±0,88	1,70±0,88	0,44±0,71	0,42±0,49	0,35±0,48
	Ноги	1,30±0,43	1,35±0,42	1,47±0,60	0,07±0,14	0,13±0,18	0,16±0,25

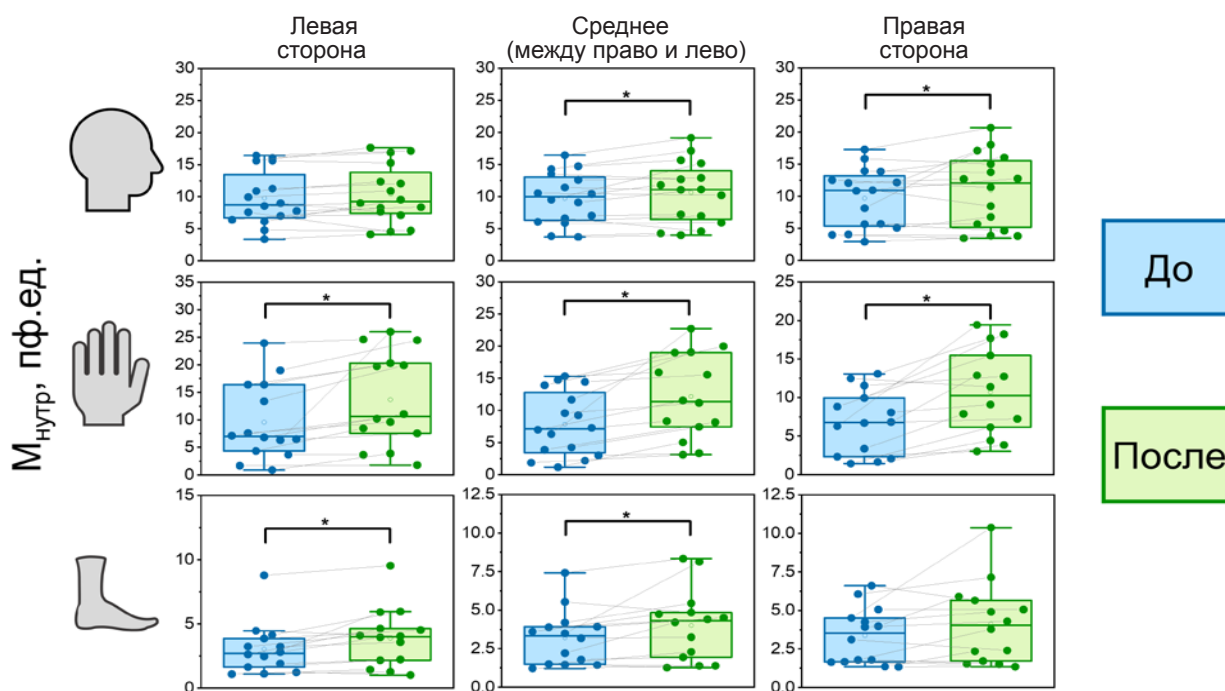


Рис. 8. Нутритивный кровоток во 2-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$

Fig. 8. The nutritive blood flow of the second volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0.05$

Увеличение нутритивного кровотока принято связывать с количеством функционирующих капилляров, которое, в свою очередь, зависит от миогенного контура активной регуляции (Ам). Данный тезис подтверждается тем, что увеличение $M_{\text{нутр}}$ сопровождается статистически значимым увеличением показателя Ам в группе 2 (для рук и ног; для кожи лба результаты имеют разнонаправленный характер);

в группе 1 статистически значимых изменений для всех трех зон не получено.

Что касается реакции других активных механизмов регуляции (эндотелиальных и нейрогенных) на специальный режим дыхания, то в конечностях эти реакции носят индивидуальный разнонаправленный характер и отличаются у каждого волонтера: наблюдается как увеличение, так и уменьшение

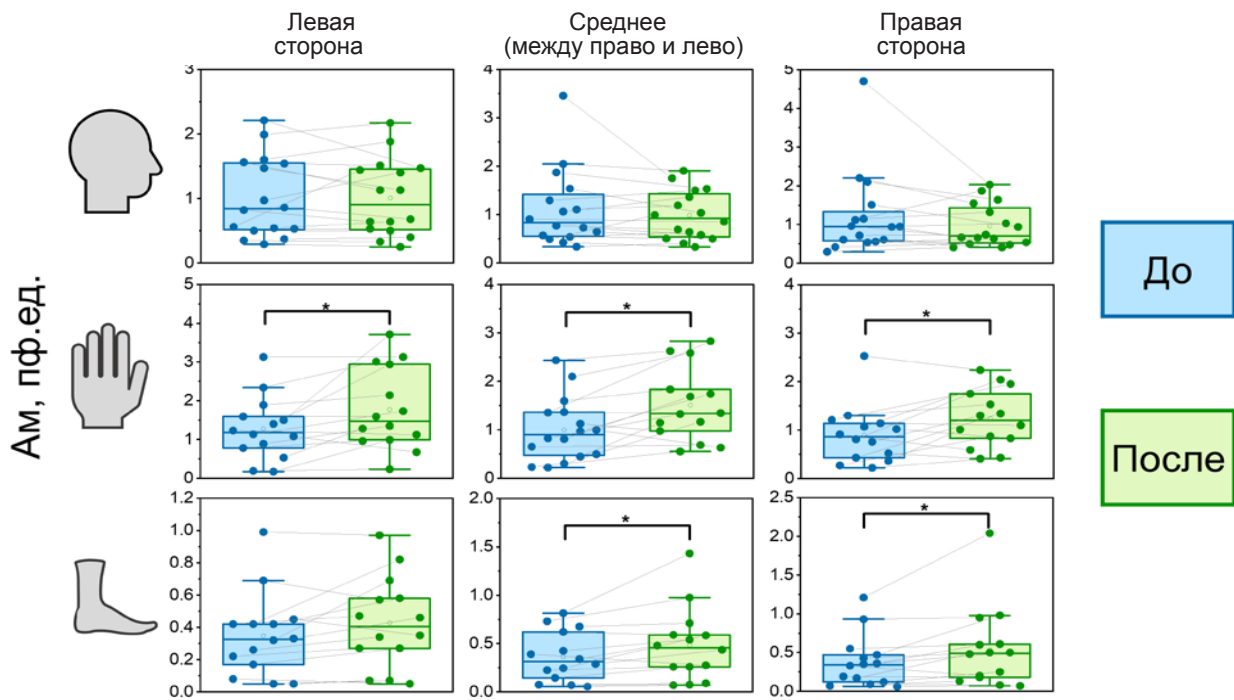


Рис. 9. Амплитуды осцилляций миогенного диапазона во 2-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$

Fig. 9. Amplitude of myogenic and cardiac ranges of the second volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0.05$

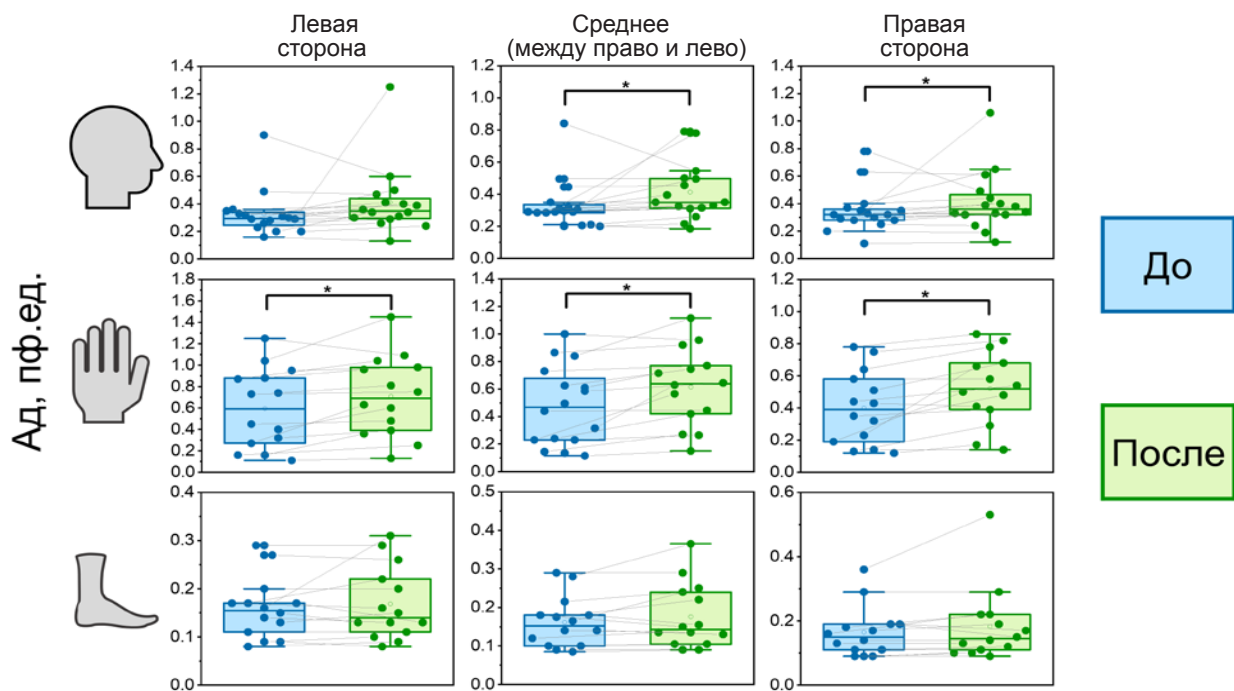


Рис. 10. Амплитуды осцилляций дыхательного диапазона во 2-й группе волонтеров: * – статистически значимая разница подтверждена парным выборочным знаковым ранговым тестом Уилкоксона, $p \leq 0,05$

Fig. 10. Amplitude of respiratory range of the second volunteer group: * – statistical significance of differences confirmed by Wilcoxon matched pairs test, $p \leq 0.05$

амплитуд эндотелиальных и нейрогенных амплитуд осцилляций, но в большинстве случаев встречается увеличение данных параметров (хотя и статистически незначимое). В области измерения на голове в качестве реакции на специальный режим дыхания в группе 1 наблюдается уменьшение влияния активных регуляторных механизмов, в группе 2 – незначительное увеличение. Разнонаправленной реакции внутри каждой из групп при измерениях на голове отмечено не было.

Как в 1-й, так и во 2-й группе реакцией пассивных механизмов на полное низкочастотное дыхание является увеличение влияния дыхательного регуляторного контура. После длительного выполнения специального режима дыхания и перехода к обычному дыханию амплитуды колебаний дыхательного диапазона (Ад) увеличиваются тем больше, чем меньше была частота дыхательных движений во время упражнения. Увеличение Ад в группе 2 достигло статистически значимых значений, чего не наблю-

далось в группе 1. Это можно объяснить возможной гиповентиляцией легких, возникающей на низких частотах дыхания (1,5 и 1/мин), и последующим компенсаторным увеличением амплитуды движений грудной клетки для восстановления газообмена – на уровне микроциркуляторного русла это проявляется увеличением амплитуды колебаний в дыхательном диапазоне.

Таким образом, исследованные режимы дыхания приводят к статистически значимому увеличению показателя микроциркуляции независимо от частоты дыхания (3/мин, 1,5/мин и 1/мин). Дыхание с частотой 1,5 и 1/мин приводит к значимому увеличению нутритивного кровотока, что гипотетически может быть связано со снижением минутного объема дыхания и развитием гипоксически-гиперкапнических изменений газообмена. Рост нутритивного кровотока ($M_{\text{нутр}}$) при дыхании 1,5 и 1/мин сопровождается активизацией миогенного контура регуляции, отвечающего за количество функционирующих капилляров. Выполнение низкочастотных дыхательных упражнений приводит к активизации пассивного дыхательного контура регуляции при наиболее низких частотах дыхания – 1,5/мин и 1/мин.

Заключение

В проведенном исследовании было выявлено, что наибольшие изменения микроциркуляции произошли во 2-й группе, т. е. под влиянием более выраженных изменений (более низкочастотных) режимов дыхания.

При этом ни в 1-й, ни во 2-й группе волонтеров не было найдено значительных изменений в активной регуляции микроциркуляции при измерении в области НГА, тогда как при измерении в конечностях увеличивалось влияние миогенного и нейрогенного факторов. Также значительно большее влияние после специального режима дыхания во всех областях исследования стали оказывать механизмы, обусловленные дыхательной активностью, что характеризует компенсаторные механизмы перехода от низкочастотного к обычному дыханию.

Отсутствие значительных изменений параметров микроциркуляции после низкочастотного дыхания при измерениях в области НГА в обеих группах волонтеров, очевидно, характеризует работу гомеостатических механизмов поддержания перфузии мозга в стрессовых для организма ситуациях (низкочастотные типы дыхания, гиперкапния и гипоксия). При измерении в конечностях наблюдалось изменение влияния регуляторных механизмов системы кровообращения, что в совокупности с увеличением кожной перфузии крови за счет нутритивной составляющей может характеризовать компенсаторную реакцию микроциркуляции на изменение дыхания.

Для уточнения возможных физиологических механизмов полученных эффектов дыхательных упражнений необходимо проведение дальнейших исследований с использованием методов спирометрии и определением уровня O_2 и CO_2 в выдыхаемом воздухе.

Финансирование / Financing

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 20-08-01153 А. / The studies were funded by the Russian Foundation for Basic Research (the research project 20-08-01153).

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Литература / References

1. McKay JAA, McCulloch CL, Querido JS, Foster GE, Koehle MS, Sheel AW. The effect of consistent practice of yogic breathing exercises on the human cardiorespiratory system // *Respiratory Physiology & Neurobiology*. 2016;(233):41–51. Doi: 10.1016/j.resp.2016.07.005.
2. Miyamura M, Nishimura K, Ishida K, Katayama K, Shimaoka M, Hiruta S. Is Man Able to Breathe Once a Minute for an Hour? The Effect of Yoga Respiration on Blood Gases // *Japanese Journal of Physiology*. 2002;(52):313–316. Doi: 10.2170/jjphysiol.52.313.
3. Tancredi FB, Hoge RD. Comparison of cerebral vascular reactivity measures obtained using breath-holding and CO_2 inhalation // *J Cereb Blood Flow Metab* 2013;(33):1066–1074. Doi: 10.1038/jcbfm.2013.48.
4. Urbach AL, MacIntosh BJ, Goldstein BI. Cerebrovascular reactivity measured by functional magnetic resonance imaging during breath-hold challenge: A systematic review // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2017;(79):27–47. Doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.05.003.
5. Corfield DR, Murphy K, Josephs O, Adams L, Turner R. Does hypercapnia-induced cerebral vasodilation modulate the hemodynamic response to neural activation? // *Neuroimage*. 2001;13(6):1207–1211. Doi: 10.1006/nimg.2001.0760.
6. Liu P, De Vis JB, Lu H. Cerebrovascular reactivity (CVR) MRI with CO_2 challenge: A technical review // *Neuroimage* 2019;(187):104–115. Doi: 10.1016/j.neuroimage.2018.03.047.
7. Bright MG, Bulte DP, Jezzard P, Duyn JH. Characterization of regional heterogeneity in cerebrovascular reactivity dynamics using novel hypocapnia task and BOLD fMRI // *Neuroimage*. 2009;48(1):166–175. Doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.05.026.
8. Chan ST, Evans KC, Song TY, Selb J, Kouwe A, Rosen BR, Zheng YP, Ahn A, Kwong KK. Cerebrovascular reactivity assessment with O_2 - CO_2 exchange ratio under brief breath hold challenge // *PLOS ONE*. 2020;15(3):E0225915. Doi: 10.1371/journal.pone.0225915
9. Willie CK, Macleod DB, Shaw AD, Smith KJ, Tzeng YC, Eves ND, Ikeda K, Graham J, Lewis NC, Day TA, Ainslie PN. Regional brain blood flow in man during acute changes in arterial blood gases // *J Physiol*. 2012;590(14):3261–3275. Doi: 10.1113/jphysiol.2012.228551.
10. Bor-Seng-Shu E, Kita WS, Figueiredo EG, Paiva WS, Fonoff ET, Teixeira MJ, Panerai RB. Cerebral hemodynamics: concepts of clinical importance // *Arq Neuropsiquiatr*. 2012;70(5):352–356. Doi: 10.1590/s0004-282x2012000500010.
11. Fierstra J, van Niftrik C, Warnock G, Wegener S, Piccirelli M, Pangalu A, Esposito G, Valavanis A, Buck A, Luft A, Bozinov O, Regli L. Staging Hemodynamic Failure With Blood Oxygen-Level-Dependent Functional Magnetic Resonance Imaging Cerebrovascular Reactivity: A Comparison Versus Gold Standard (^{15}O -)H $_2$ O-Positron Emission Tomography // *Stroke*. 2018;49(3):621–629. Doi: 10.1161/STROKEAHA.117.020010.

12. Tønnesen J, Pryds A, Larsen E, Paulson O, Hauerberg J, Knudsen G. Laser Doppler flowmetry is valid for measurement of cerebral blood flow autoregulation lower limit in rats // *Experimental physiology*. 2005;(90):349–355. Doi: 10.1113/expphysiol.2004.029512.

13. Тюрина М. Й., Красников Г. В., Танканаг А. В. и др. Формирование респираторнозависимых колебаний скорости кровотока в микроциркуляторном русле кожи человека в условиях контролируемого дыхания // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2011. – Т. 10, № 3. – С. 31–37. [Tyurina MY, Krasnikov GV, Tankanag AV, Piskunova GM, Chemeris NK. Formation of respiratory-dependent fluctuations in the blood flow velocity in the microcirculatory bed of the human skin under controlled breathing conditions // *Regional blood circulation and microcirculation*. 2011;10(3):31–37. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2011-10-3-31-37.

14. Анисимова А. В., Крупаткин А. И., Сидоров В. В. и др. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке состояния микроциркуляции у пациентов с острой и хронической цереброваскулярной недостаточностью // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2014. – Т. 13, № 3. – С. 31–37 [Anisimova AV, Krupatkin AI, Sidorov VV, Zacharkina MV, Yutskova EV, Galkin SS. Laser Doppler flowmetry in the assessment of the microcirculation in patients with acute and chronic cerebrovascular insufficiency // *Regional blood circulation and microcirculation*. 2014;13(3):31–37. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2014-13-3-31-37.

15. Goltsov A, Anisimova AV, Zakharkina M, Krupatkin AI, Sidorov VV, Sokolovski SG, Rafailov E. Bifurcation in Blood Oscillatory Rhythms for Patients with Ischemic Stroke: A Small Scale Clinical Trial using Laser Doppler Flowmetry and Computational Modeling of Vasomotion // *Front Physiol*. 2017;(8):160. Doi: 10.3389/fphys.2017.00160.

16. 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.

17. Жарких Е. В., Маковик И. Н., Потапова Е. В. Оптическая неинвазивная диагностика функционального состояния микроциркуляторного русла пациентов с нарушением периферической микрогемодинамики // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 23–32. [Zharkikh EV, Makovik IN, Potapova EV, Dremine VV, Zherebtsov EA, Zherebtsova AI, Dunaev AV, Sidorov VV, Krupatkin AI. Optical noninvasive diagnostics of the functional state of microcirculatory bed in patients with disorders of peripheral haemodynamics // *Regional blood circulation and microcirculation*. 2018;17(3):23–32. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-23-32.

18. Дремин В. В., Козлов И. О., Жеребцов Е. А. и др. Возможности лазерной доплеровской флоуметрии в оценке состояния микрогемолимфоциркуляции // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2017. –

Т. 16. – № 4. – С. 42–49. [Dremine VV, Kozlov IO, Zherebtsov EA, Makovik IN, Dunaev AV, Sidorov VV, Krupatkin AI. The capabilities of laser Doppler flowmetry in assessment of lymph and blood microcirculation // *Regional blood circulation and microcirculation*. 2017;16(4):42–49. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-42-49.

19. Zharkikh EV, Loktionova YI, Masalygina GI, Krupatkin AI, Sidorov VV, Dunaev AV. Optical noninvasive diagnostics of dynamic changes in the level of blood microcirculation and oxidative metabolism using temperature tests // *Proc. SPIE 11363. Tissue Optics and Photonics*. 2020;1136321. Doi: 10.1117/12.2555870.

20. Makovik IN, Dunaev AV, Dremine VV, Krupatkin AI, Sidorov VV, Khakhicheva LS, Muradyan VF, Pilipenko OV, Rafailov IE, Litvinova KS. Detection of angiospastic disorders in the microcirculatory bed using laser diagnostics technologies // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2017;11(1):750016. Doi: 10.1142/S179354581750016X.

Информация об авторах

Фролов Артём Владимирович – ректор ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: polyclinic@list.ru.

Локтионова Юлия Игоревна – стажер-исследователь, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орёл, Россия, e-mail: julya-loktionova@mail.ru.

Жарких Елена Валерьевна – стажер-исследователь, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орёл, Россия, e-mail: ev.zharkikh@gmail.com.

Сидоров Виктор Васильевич – канд. техн. наук, Научно-производственное предприятие «ЛАЗМА», Москва, Россия, e-mail: victor.v.sidorov@mail.ru.

Крупаткин Александр Ильич – д-р мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова, Москва, Россия, e-mail: krup.61@mail.ru.

Дунаев Андрей Валерьевич – д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орёл, Россия, e-mail: inohvat@yandex.ru.

Authors information

Frolov Artem V. – Ltd. St. Petersburg Institute of Oriental Methods of Rehabilitation, Saint Petersburg, Russia, e-mail: polyclinic@list.ru.

Loktionova Yulia I. – trainee researcher of Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, e-mail: julya-loktionova@mail.ru.

Zharkikh Elena V. – Trainee researcher of Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, e-mail: loread@mail.ru.

Sidorov Victor V. – PhD, SPE «LAZMA» Ltd., Moscow, Russia, e-mail: victor.v.sidorov@mail.ru.

Krupatkin Alexandr I. – M. D., professor, Leading researcher, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics, Moscow, Russia, e-mail: krup.61@mail.ru.

Dunaev Andrey V. – PhD, associate professor, Leading researcher, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, e-mail: inohvat@yandex.ru.