УДК 612.213, 612.135
DOI: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-72-84

А. В. ФРОЛОВ[1], Ю. И. ЛОКТИОНОВА[2], Е. В. ЖАРКИХ[2], В. В. СИДОРОВ[3], А. В. ТАНКАНАГ[4], А. В. ДУНАЕВ[2]

Реакция микроциркуляции крови в коже различных участков тела при выполнении дыхательных упражнений 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. Орел, Россия
302026, Россия, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95
[3] Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие „ЛАЗМА“», Москва, Россия
123458, Россия, Москва, ул. Твардовского, д. 8
[4] Институт биофизики клетки Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр „Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук“», г. Пущино, Россия
142290, Россия, г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
E-mail: polyclinic@list.ru

Статья поступила в редакцию 18.10.22 г.; принята к печати 23.12.22 г.

Резюме

Введение. Дыхательные упражнения йоги дают возможность изменять минутный объем дыхания (МОД) в широких пределах, достигая состояния гипер- и гиповентиляции с соответствующими сдвигами газообмена. В данной работе оценивалась взаимосвязь изменений внешнего дыхания и газового метаболизма с процессами кожной микроциркуляции крови. *Материалы и методы.* 22 опытных волонтера выполняли дыхательные упражнения йоги с частотой 3–3,5 раза в минуту и 1–1,5 раза в минуту в течение 5 минут, а также свободное дыхание в течение 6 минут до и после дыхательных упражнений. Проводилась регистрация частоты дыхания (ЧД), минутного объема дыхания (МОД), дыхательного объема (ДО), парциального давления CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха ($PetCO_2$), процентного содержания O_2 в выдыхаемом воздухе (FeO_2) методом спирогазоанализа, а также параметров кожной микроциркуляции в шести областях тела человека: показателя микроциркуляции (ПМ), нутритивного кровотока ($M_{нутр}$), амплитуд миогенных (Ам), нейрогенных (Ан), эндотелиальных (Аэ), дыхательных (Ад) и сердечных (Ас) осцилляций методом лазерной допплеровской флоуметрии с применением распределенной системы носимых анализаторов. *Результаты.* После выполнения дыхательных упражнений йоги наблюдалось увеличение показателя микроциркуляции в коже бассейнов надглазничных артерий с 14,7 пф. ед. до 16,7 пф. ед., в пальцах рук с 24,8 пф. ед. до 29,4 пф. ед. и пальцах ног с 8,2 пф. ед. до 10,2 пф. ед. при гиповентиляционном (ЧД=1–1,5 раза/мин) и в коже бассейнов надглазничных артерий с 14,7 пф. ед. до 16,0 пф. ед., в пальцах рук с 27,1 пф. ед. до 29,8 пф. ед. и пальцах ног с 11,5 пф. ед. до 13,5 пф. ед. при гипервентиляционном (ЧД=3–3,5 раза/мин) типе дыхания, увеличение нутритивного кровотока с 14,4 пф. ед. и 14,3 пф. ед. до 17,8 пф. ед. и 16,9 пф. ед. на верхних и с 4,7 пф. ед. и 6,1 пф. ед. до 6,8 пф. ед. и 7,5 пф. ед. на нижних конечностях при гипо- и гипервентиляционном типе дыхания соответственно, увеличение амплитуды эндотелиальных колебаний микрокровотока после гиповентиляционного режима дыхания и увеличение амплитуды нейрогенных колебаний после обоих типов дыхания в коже лба. *Заключение.* Отсутствие различий между влиянием гипо- и гипервентиляционных упражнений на ПМ позволяет предполагать, что основным механизмом действия могут быть не сдвиги МОД и газообмена, а глубина дыхания; обсуждается также влияние когнитивных механизмов (сознательный контроль дыхания в обоих режимах). Наличие изменений нутритивного кровотока на конечностях и отсутствие изменений на голове может объясняться регионарными особенностями регуляции микрокровотока. Гиповентиляционный режим дыхания значимо активирует эндотелиальный механизм регуляции; нейрогенный (симпатотонический) механизм регуляции активируется как гипо-, так и гипервентиляционным дыхательным режимом.

Ключевые слова: *газообмен, микроциркуляция, дыхательные упражнения, йога, спирометрия, лазерная допплеровская флоуметрия, распределенная система носимых анализаторов*

Для цитирования: *Фролов А. В., Локтионова Ю. И., Жарких Е. В., Сидоров В. В., Танканаг А. В., Дунаев А. В. Реакция микроциркуляции крови в коже различных участков тела при выполнении дыхательных упражнений йоги. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2023;22(1):72–84. Doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-72-84.*

UDC 612.213, 612.135
DOI: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-72-84

A. V. FROLOV[1], Yu. I. LOKTIONOVA[2], E. V. ZHARKIKH[2], V. V. SIDOROV[3], A. V. TANKANAG[4], A. V. DUNAEV[2]

The reaction of blood microcirculation in the skin of various parts of the body after performing yoga breathing exercises

[1] Ltd. Saint-Petersburg Institute of Oriental Methods of Rehabilitation, Saint Petersburg, Russia
30a, Nevsky pr., Saint Petersburg, Russia, 191186
[2] Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia
95, Komsomol'skaya str., Orel, Russia, 302026
[3] SPE «LAZMA» Ltd., Moscow, Russia
8, Tvardovskogo str., Moscow, Russia, 125252
[4] Institute of Cell Biophysics of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia
3, Institutskaya str., Pushchino, Russia, 142290
E-mail: polyclinic@list.ru

Received 18.10.22; accepted 23.12.22

Summary

Introduction. Yoga breathing exercises make it possible to change the minute ventilation (MV) within a wide range, reaching states of hyper- and hypoventilation with corresponding shifts in gas exchange. In this work, the interrelations between external respiration, parameters of gas metabolism and the skin microcirculation were evaluated. *Materials and methods:* 22 experienced volunteers performed yoga breathing exercises at a frequency of 3–3.5 times per minute and 1–1.5 times per minute for 5 minutes, as well as free breathing for 6 minutes before and after breathing exercises. Respiratory rate (RR), minute ventilation (MV), tidal volume (TV), partial pressure of CO_2 in exhaled air at the end of exhalation ($PetCO_2$), percentage of O_2 in exhaled air (FeO_2) were recorded using spirometry and gas analysis; by laser Doppler flowmetry and a distributed system of wearable analyzers parameters of skin microcirculation such as index of microcirculation (IM), nutritive blood flow (Im_n), amplitudes of endothelial (Ae), neurogenic (An), myogenic (Am), respiratory (Ar) and cardiac (Ac) oscillations were recorded in six body areas. *Results.* After the breathing exercises, the index of microcirculation of the supraorbital artery pool increased from 14.7 p. u. to 16.7 p. u., in the fingers from 24.8 p. u. to 29.4 p. u. and in toes from 8.2 p. u. to 10.2 p. u. with hypoventilation (RR=1–1.5 times/ minute) and in the skin of the supraorbital artery pool from 14.7 p. u. to 16.0 p. u., in the fingers from 27.1 p. u. to 29.8 p. u. and in toes from 11.5 p. u. to 13.5 p. u. with hyperventilation (RR=3–3.5 times / minute), nutritional blood flow increased from 14.4 p. u. and 14.3 p. u. to 17.8 p. u. and 16.9 perf.u. on the upper and from 4.7 p. u. and 6.1 p. u. to 6.8 p. u. and 7.5 p. u. on the lower extremities with hypo- and hyperventilation, respectively; an increase of the amplitude of endothelial blood oscillations after a hypoventilation and an increase of the amplitude of neurogenic oscillations after both types of breathing in the forehead skin were observed. *Conclusion.* The absence of differences between the effect of hypo- and hyperventilation exercises on Im suggests that the main mechanism of action may not be shifts in MV and gas exchange, but the depth of breathing; the influence of cognitive mechanisms (conscious control of breathing in both modes) is also discussed. The absence of changes in nutritive blood flow in the head can be explained by regional features of microcirculation regulation. The hypoventilatory mode of breathing significantly activates the endothelial mechanism of regulation; the neurogenic (sympathetic) mechanism of regulation is activated by both hypo- and hyperventilation respiratory modes.

Keywords: *gas exchange, microcirculation, breathing exercises, yoga, spirometry, laser Doppler flowmetry, distributed system of wearable analyzers*

For citation: *Frolov A. V., Loktionova Yu. I., Zharkikh E. V., Sidorov V. V., Tankanag A. V., Dunaev A. V. The reaction of blood microcirculation in the skin of various parts of the body after performing yoga breathing exercises. Regional hemodynamics and microcirculation. 2023;22(1):72–84. Doi: 10.24884/1682-6655-2023-22-1-72-84.*

Введение

Йога – система психофизиологической саморегуляции, сформировавшаяся на территории полуострова Индостан более 2000 лет назад и включающая в себя широкий арсенал гимнастических, дыхательных, релаксационных и когнитивных техник. Регулярное выполнение дыхательных упражнений йоги оказывает значительный спектр кардиоваскулярных и вегетативных физиологических эффектов [1], улучшая респираторные функции [2], нормализуя артериальное давление, снижая уровень тревожности и увеличивая парасимпатический тонус [3].

Ряд дыхательных упражнений йоги подразумевает произвольное изменение минутного объема дыхания (МОД) – как в сторону увеличения (гипервентиляция), так и в сторону уменьшения (гиповентиляция) с соответствующими изменениями газообмена. В дыхательных техниках снижение МОД и достижение гиповентиляции обычно реализуется за счет снижения частоты дыхания (ЧД) при поддержании максимального дыхательного объема (ДО), по возможности приближенного к жизненной емкости легких (ЖЕЛ). Опытные практики йоги способны поддерживать состояние гиповентиляции на протяжении существенных отрезков времени (30–60 минут и более).

Исследованиям гиповентиляционных упражнений йоги и сопутствующим им сдвигам газообмена посвящено ограниченное число научных работ. В экспериментах демонстрировались способности

поддерживать дыхание с частотой 1 раз/мин на протяжении 60 минут, при этом достигалась альвеолярная и артериальная гиперкапния и гипоксия, а также респираторный ацидоз [4].

Дыхательные упражнения йоги, обеспечивающие произвольное поддержание состояния гиповентиляции (а также альвеолярной и артериальной гиперкапнии и гипоксии), могут рассматриваться как вариант гипоксически-гиперкапнического тренинга, потенциально способного оказывать влияние на микроциркуляцию, мозговое и периферическое кровообращение. В йоге также используются дыхательные упражнения с учащением дыхания, предположительно способные увеличивать МОД с развитием гипервентиляции и гипокапнии (в практике данные режимы дыхания применяются короткими сериями с последующей компенсаторной задержкой дыхания во избежание развития гипервентиляции).

Имеется ограниченное количество научных работ, рассматривающих влияние произвольной регуляции дыхания на микроциркуляцию. В подушечках пальцев с хорошо развитой симпатической сосудистой иннервацией амплитуды дыхательных колебаний кожного микрокровотока при частоте дыхания 0,05 и 0,07 Гц (3 и 4,2 раза/мин) были выше в группе испытуемых с преобладанием парасимпатического тонуса. В коже предплечья (где плотность симпатической иннервации низка по сравнению с кожей пальцев) статистически значимых различий в амплитуде дыхательных колебаний кожного микрокровотока у двух групп испытуемых не обнаружено [5].

В исследовании М. Й. Тюриной и др., осуществлявшемся при контролируемом по глубине, частоте и динамике экскурсий грудной клетки дыхании, показано, что влияния дыхания на колебания кровотока могут 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; кроме того, частота дыхательного ритма, соответствующая максимальной амплитуде респираторнозависимых колебаний, имеет локальную специфику. Для кровотока кожи пальца максимум соответствовал частоте в области 0,05–0,07 Гц, в то время как для кровотока кожи предплечья — частоте 0,10 Гц [6].

Цель работы – оценка общего состояния микроциркуляции крови и механизмов регионарной регуляции микрокровотока при выполнении произвольной гипо- и гипервентиляции легких с помощью распределенной системы носимых анализаторов.

Материалы и методы исследования

В исследовании приняло участие 22 человека (16 мужчин и 6 женщин), средний возраст составил 43±8 лет. Участники считали себя здоровыми и не принимали никаких фармакологических препаратов на постоянной основе. Все участники исследования имели стаж регулярных занятий дыхательными упражнениями йоги от 2 до 20 лет не менее 15 минут 3 раза в неделю. Участникам определялся рост, вес и жизненная емкость легких (ЖЕЛ): ИМТ=22,8±3,2 кг/м^2, ЖЕЛ=5,3±1,0 л.

Оценка газообмена и функции внешнего дыхания. Все участники в рамках исследования выполняли ряд дыхательных режимов:

– свободное дыхание в течение 2 минут;

– дыхание с частотой 3–3,5 раза/мин (вдох и выдох длительностью по 8–10 секунд) с максимально доступным дыхательным объемом в течение 5–6 дыхательных циклов;

– дыхание с частотой 1,5 раза/мин (вдох и выдох длительностью по 20 секунд) с максимально доступным дыхательным объемом в течение 5–6 дыхательных циклов.

12 участникам, кроме того, оказался доступен режим дыхания с частотой 1 раз/мин (вдох и выдох длительностью по 30 секунд), также выполняемый с максимально доступным дыхательным объемом в течение 5–6 дыхательных циклов.

Надо заметить, что все участники исследования обладали опытом регулярного выполнения дыхательных паттернов с ЧД=1–1,5 раза/мин в течение относительно длительных промежутков времени (15–30 минут и более). Однако в рамках данного исследования, учитывая непривычные условия дыхания (дыхание через рот в мундштук прибора и перекрытое зажимом носовое дыхание) выполнение дыхательных упражнений было ограничено 5–6 дыхательными циклами. Между этапами под номерами 3 и 4 протокола № 1 «Спирометрия и газоанализ», представленного в табл. 1, участнику предоставлялся отдых в течение 5 минут.

Перечисленные дыхательные паттерны выполнялись в положении сидя с прямой спиной на стуле. Носовое дыхание перекрывалось с помощью зажима, дыхание производилось через рот в трубку прибора с использованием сертифицированного одноразового противовирусного фильтра «Vitalograph» (Ирландия).

Определялись следующие параметры:

– частота дыхания (ЧД);

– минутный объем дыхания (МОД);

– дыхательный объем (ДО);

– парциальное давление CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха ($PetCO_2$);

– процентное содержание O_2 в выдыхаемом воздухе (FeO_2).

Измерения проводились спирометром МАС-2С с функцией газоанализа и пульсоксиметрии (производство компании «Белинтелмед», г. Минск).

Оценка микроциркуляции. Для оценки параметров кожной микроциркуляции применялся метод лазерной допплеровской флоуметрии (ЛДФ), который является широко распространенным методом оптической неинвазивной диагностики функционального состояния микроциркуляторного сосудистого русла [7–9]. На основании полученных данных вычисляется показатель микроциркуляции (ПМ), измеряемый в перфузионных единицах (пф. ед.) и пропорциональный произведению числа эритроцитов в оцениваемом объеме и их средней скорости.

Осцилляции микрокровотока имеют несколько относительно постоянных диапазонов частот в зависимости от обеспечивающего их механизма. Метод ЛДФ позволяет получить информацию об эндо-

Таблица 1

Протокол № 1 «Спирометрия и газоанализ»

Table 1

Protocol № 1 «Spirometry and gas analysis»

Этап исследования	Описание этапа	Длительность
1	Определение ЖЕЛ	3–5 минут (до получения достоверных результатов)
2	Регистрация на фоне свободного естественного дыхания	2 минуты
3	Дыхание с частотой 3–3,5 раза/мин (вдох и выдох по 8–10 с под метроном, глаза закрыты)	5–6 дыхательных циклов
4	Дыхание 1–1,5 раза/мин (вдох и выдох по 20–30 секунд в соответствии с индивидуальными возможностями под метроном, глаза закрыты)	5–6 дыхательных циклов
Общее время	15–20 минут	

Таблица 2

Протокол № 2 «ЛДФ-Гиповентиляция»

Table 2

Protocol № 2 «LDF-Hypoventilation»

Этап исследования	Описание этапа	Длительность, мин
1	Регистрация ЛДФ на фоне свободного естественного дыхания (before test)	6
2	Регистрация ЛДФ на фоне дыхания в режиме «Гиповентиляция» – вдох и выдох по 20–30 секунд – в зависимости от индивидуальных возможностей участника (test)	5
3	Регистрация ЛДФ на фоне свободного естественного дыхания (after test)	6
Общее время	17 минут	

телиальном, нейрогенном и миогенном активных механизмах регуляции сосудистого тонуса, а также пассивных механизмах: дыхательных и сердечных колебаниях кровотока. Перечисленные механизмы оказывают влияние на формирование продольных и поперечных колебаний кровотока в определенных частотных диапазонах. Частота осцилляций кровотока эндотелиального диапазона находится в пределах от 0,0095 Гц 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.

Программное обеспечение позволяет рассчитывать среднее значение нутритивного кровотока ($М_{нутр}$) по формуле 1, измеряемое, как и ПМ, в перфузионных единицах (пф. ед.) и количественно характеризующее кровоток через капилляры – то есть тот кровоток, который непосредственно обеспечивает процессы трофики и оксигенации (в отличие от кровотока через артериоло-венулярные шунты в обход капилляров). $М_{нутр}$ находится в прямой зависимости от среднего значения показателя микроциркуляции М и амплитуды миогенных осцилляций Ам и в обратной зависимости от суммы амплитуд нейрогенных Ан и сердечных колебаний Ас [10].

$$M_{нутр} = \frac{M \cdot Ам}{Ан + Ас}, \quad (1)$$

где $М_{нутр}$ – нутритивный кровоток, М– среднее значение показателя микроциркуляции, Ам – амплитуда миогенных колебаний, Ан – амплитуда нейрогенных колебаний, Ас – амплитуда сердечных колебаний.

Исследование проводилось в положении участников сидя на стуле и после 15-минутного отдыха по протоколам № 2 «ЛДФ-Гиповентиляция» и № 3 «ЛДФ-Гипервентиляция», которые представлены в табл. 2, 3 соответственно. Между проведением исследований по этим протоколам участникам предоставлялся отдых не менее 15 минут, либо исследования проводились в разные дни. Для осуществления диагностики общего состояния микроциркуляции крови была использована распределенная система из шести портативных носимых приборов «ЛАЗМА-ПФ»: по два анализатора для одновременных исследований на ладонной поверхности дистальных фаланг третьих пальцев обеих рук и на подошвенной поверхности дистальных фаланг первых пальцев обеих ног, а также на лбу (слева и справа).

Таблица 3

Протокол № 3 «ЛДФ-Гипервентиляция»

Table 3

Protocol № 3 «LDF-Hyperventilation»

Этап исследования	Описание этапа	Длительность, мин
1	Регистрация ЛДФ на фоне свободного естественного дыхания (до теста)	6
2	Регистрация ЛДФ на фоне дыхания в режиме «Гипервентиляция» – вдох и выдох по 8–10 секунд (тест)	5
3	Регистрация ЛДФ на фоне свободного естественного дыхания (после теста)	6
Общее время	17 минут	

Зарегистрированные ЛДФ-граммы разбивались на фрагменты в соответствии с этапами исследования (протоколы № 2 и № 3). С целью выявления влияния различных режимов управляемой вентиляции (гипер- и гиповентиляция) на механизмы регуляции системной микроциркуляции в настоящем исследовании для каждого участника анализировали по два фрагмента исходных ЛДФ-грамм – до проведения дыхательных упражнений (1-й этап) и после (3-й этап) каждого из протоколов. Рассчитывали среднее значение ПМ, среднее значение нутритивного кровотока [10], а также амплитудно-частотные спектры с использованием адаптивного вейвлет-преобразования [11, 12].

Статистический анализ. Статистическая обработка данных спирометрии и газоанализа и параметров микроциркуляции проводилась в программной среде «OriginPro 2021» (*OriginLab Corporation,* США). Для оценки достоверности наблюдаемых различий в разных режимах проведения дыхательных упражнений использовался непараметрический тест Манна–Уитни. Для параметров микроциркуляции оценка достоверности различий на стадиях до и после проведения дыхательных упражнений использовался непараметрический парный критерий Вилкоксона. Достоверно значимыми различия параметров считались при $p<0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Спирометрия и газоанализ. При регистрации свободного дыхания спирометрические показатели в группе имели следующие средние значения: ЧД 11,6 раз/мин, ДО – 0,8 л, МОД – 8,8 л/мин. $PetCO_2$ в состоянии покоя составил 37,1 мм рт. ст., FeO_2 – 13,9 %.

При дыхании с ЧД=3–3,5 раза/мин МОД статистически значимо возрастал до 13,8±2,5 л/мин по сравнению с исходным (свободное дыхание). ДО в среднем составил 4,4 л. Регистрировалось снижение $PetCO_2$ до значений 32,6±2,9 мм рт. ст. – альвеолярная гипокапния ($p=8,2\times10^{-7}$). Значения FeO_2 значимо возрастали до 15,06±0,6 % ($p=1,7\times10^{-7}$). Пример протокола спиро-газоанализа показан на рис. 1, *а–в*.

При дыхании с ЧД=1–1,5 раза/мин наблюдалось статистически значимое снижение МОД по сравнению с исходным (свободное дыхание) до 5,7±1,5 л/мин. ДО составил 4,5 л. Регистрировалось значимое увеличение уровня $PetCO_2$ до 42,2±3,8 мм рт. ст. – альвеолярная гиперкапния ($p=8,3\times10^{-6}$). Значения FeO_2 значимо снижались до 11,6±1,6 %, демонстрируя альвеолярную гипоксию ($p=1,2\times10^{-9}$). Пример протокола спиро-газоанализа показан на рис. 1, *г–е*.

Обобщенные данные о динамике параметров внешнего дыхания и газообмена показаны на рис. 2.

Оценка микроциркуляции. При выполнении дыхательного упражнения как в режиме гиповентиляции (ЧД=1–1,5 раза/мин), так и в режиме гипервентиляции (ЧД=3–3,5 раза/мин) показатель микроциркуляции (ПМ) возрастал во всех зонах исследования – во время выполнения упражнения по сравнению с этапом «before test», а также после выполнения упражнения (after test) по сравнению с исходным (before test). Все изменения были статистически значимы ($p<0,05$) (рис. 3, 4).

После выполнения дыхательных упражнений $M_{нутр}$ значимо увеличился на руках и ногах, не изменившись в области бассейна надглазничной артерии НГА (рис. 3, *г–е*; рис. 4, *г–е*). В ногах также наблюдается статистически значимое увеличение амплитуд миогенных осцилляций, ассоциированных с работой гладкомышечной мускулатуры, а именно – прекапиллярных сфинктеров. Увеличение Ам свидетельствует об увеличении числа функционирующих капилляров [13].

Для обоих участков кожи лба (слева и справа) наблюдается достоверное увеличение амплитуд колебаний в диапазоне нейрогенного ритма (~0,05 Гц) в условиях гипервентиляции и в диапазонах эндотелиального и нейрогенного ритмов (0,01–0,05 Гц) для режима гиповентиляции (рис. 5, 6).

Микроциркуляторное русло ткани кожи является неоднородным анатомически (в зависимости от разных регионов тела), а также функционально с точки зрения регуляции различных звеньев микроциркуляторного русла разных участков тела: артериол, прекапилляров, артерио-венулярных шунтов.

НГА, являясь ветвью внутренней сонной артерии (ВСА) и огибая надглазничный край в области одноименной вырезки в лобной кости, выходит на кожу лба и кровоснабжает кожу лба в зоне ее прохождения. Можно предполагать, что колебания процессов регуляции и изменения кровообращения,

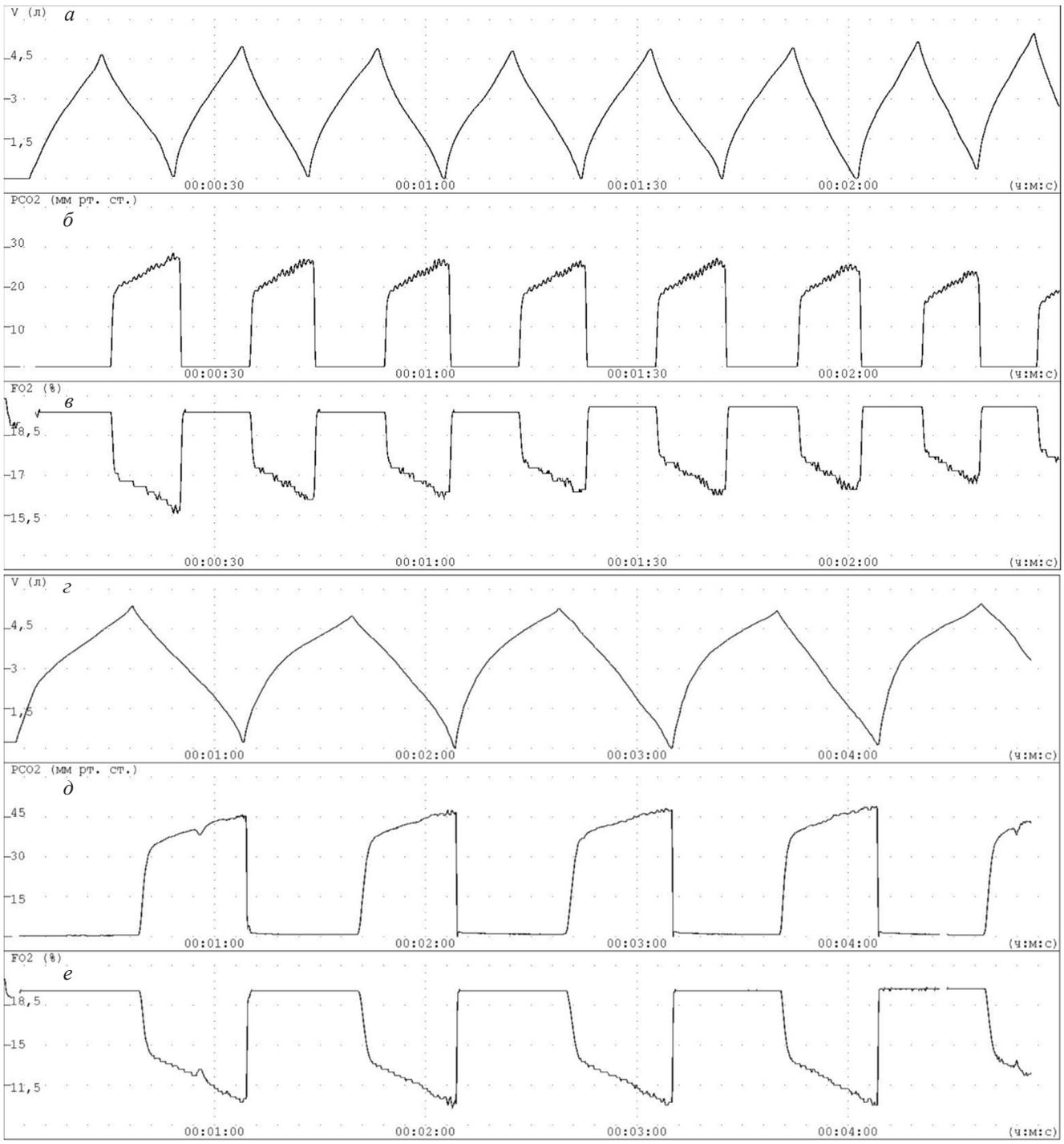

Рис. 1. Фрагменты протоколов спирографии с функцией газоанализа: *а* – спирографическая кривая при ЧД 3 раза/мин: восходящая часть кривой – вдох (10 секунд), нисходящая часть кривой – выдох (10 секунд); *б* – PCO_2 при ЧД 3 раза/мин; регистрируется гипокапния – $PetCO_2$ менее 30 мм рт. ст. (при норме 35–45 мм рт. ст.); *в* – FeO_2 (процентное содержание O_2 в выдыхаемом воздухе) при ЧД 3 раза/мин; *г* – спирографическая кривая при ЧД 1 раз/мин: восходящая часть кривой – вдох (30 секунд), нисходящая часть кривой – выдох (30 секунд); *д* – PCO_2 при ЧД 1 раз/мин; регистрируется гиперкапния ($PetCO_2$=46,5 мм рт. ст.); *е* – FeO_2 (процентное содержание O_2 в выдыхаемом воздухе) при ЧД 1 раз/мин, регистрируется альвеолярная гипоксия

Fig. 1. Fragment of the spirography protocol with the gas analysis function: *a* – the spirographic curve at RR 3 times/min: the ascending part of the curve is inhalation (10 seconds), the descending part of the curve is exhale (10 seconds); *б* – PCO_2 at RR 3 times/min; hypocapnia – $PetCO_2$ less than 30 mmHg is registered (the norm is 35–45 mmHg); *в* – FeO_2 (percentage of O_2 in exhaled air) at RR 3 times/min; *г* – spirographic curve at RR 1 time/min: the ascending part of the curve is inspiration (30 seconds), the descending part of the curve is exhalation (30 seconds); *д* – PCO_2 at RR 1 time/min; hypercapnia is recorded ($PetCO_2$=46.5 mm Hg. art.); *е* – FeO_2 (percentage of O_2 in exhaled air) at RR 1 time/min, alveolar hypoxia is recorded

регистрируемые в бассейне НГА, в той или иной степени отражают происходящее в бассейне ВСА; на данной гипотезе базируется ряд современных научных работ [14].

Таким образом, регистрация ЛДФ-сигнала в надбровной области (область бассейна НГА), а также в области пальцев рук и пальцев ног с обеих сторон проводилась с целью оценки общих изменений, а также регионарных различий реакции микрокровотока на различные сдвиги тканевого метаболизма, вызванных гипер- и гиповентиляционным режимами дыхания.

Полученные результаты демонстрируют, что реакция микрокровотока кожи на гипо- и гипервентиляционный

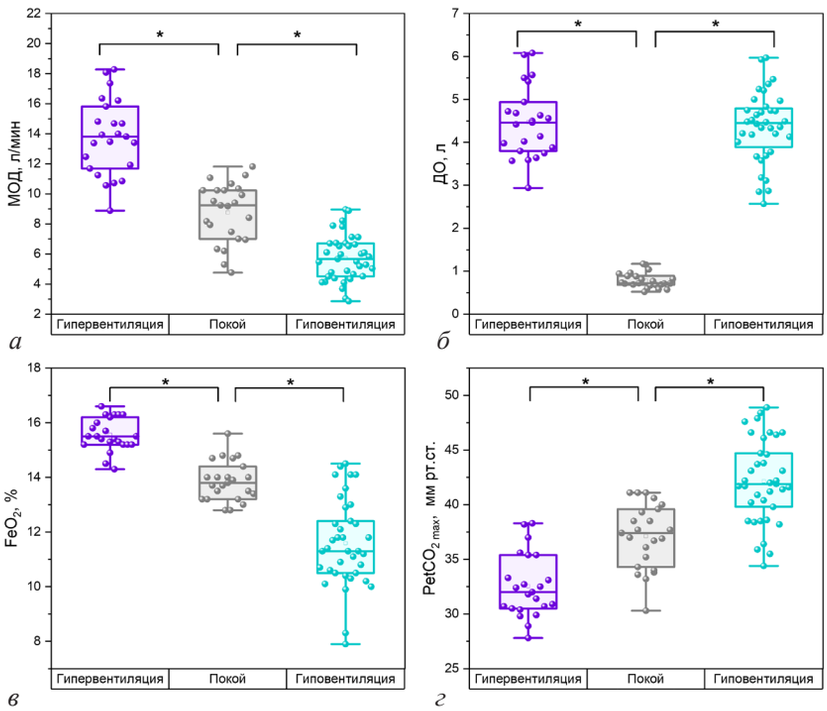

Рис. 2. Изменения минутного объема дыхания (*а*), дыхательного объема (*б*), процентного содержания O_2 в выдыхаемом воздухе (*в*) и парциального давления CO_2 в выдыхаемом воздухе в конце выдоха (*г*) при выполнении гипервентиляционных и гиповентиляционных режимов дыхания по сравнению с исходным состоянием в покое. * – статистически значимая разница подтверждена ранговым тестом Манна–Уитни, $p \leq 0{,}05$

Fig. 2. Changes in the minute ventilation (*а*), tidal volume (*б*), percentage of O_2 in exhaled air (*в*) and partial pressure of CO_2 in exhaled air at the end of exhalation (*г*) during hyperventilation and hypoventilation breathing modes compared with the initial state at rest. * – statistically significant difference confirmed by the Mann–Whitney test, $p \leq 0.05$

режим дыхания в разных частях тела имеет следующие регионарные особенности.

Гиповентиляция. Кожа лба. ПМ значимо возрастает, однако отсутствуют значимые изменения $М_{нутр}$. Регистрируется значимый рост амплитуд эндотелиальных и нейрогенных колебаний.

Пальцы рук. Значимо возрастает ПМ и $М_{нутр}$. Различия в частотных диапазонах асимметричны: слева увеличение Аэ и Ан, справа – Ан и Ам.

Пальцы ног. Значимо возрастает ПМ и $М_{нутр}$, а также имеет место увеличение амплитуд всех активных механизмов регуляции (в частотах от 0,01 до 0,4 Гц) с обеих сторон.

Гипервентиляция. Кожа лба. ПМ значимо возрастает, однако отсутствуют значимые изменения $М_{нутр}$. Из активных механизмов регуляции значимые изменения (рост) получены только для Ан.

Пальцы рук. Значимо возрастает ПМ и $М_{нутр}$. Рост амплитуды эндотелиальных, нейрогенных и миогенных колебаний (рост Аэ справа не достиг статистически достоверных различий).

Пальцы ног. Значимо возрастает ПМ и $М_{нутр}$. Рост Аэ и Ам слева, отмечается тенденция к увеличению амплитуды вазомоций справа, которая в данной группе не достигла статистически достоверных различий.

Таким образом, реакция микроциркуляторного русла в различных участках кожи на сдвиг тканевого гомеостаза отличается – и, по-видимому, осуществляется за счет различных механизмов.

Ранее в наших работах продемонстрировано, что выполнение дыхательных упражнений йоги с ЧД 1–1,5 раза/мин сопровождается снижением МОД, а также развитием альвеолярной гипоксии и гиперкапнии; дыхательные паттерны с ЧД 3 раза/мин приводят к увеличению МОД и гипокапнии [15]. Настоящая работа подтверждает эти результаты. Дыхательный режим с ЧД=3–3,5 раза/мин по сравнению с исходным дыханием в покое продемонстрировал увеличение МОД (характер данного режима оказался гипервентиляционным за счет того, что участники при его выполнении использовали максимально доступный дыхательный объем – что и привело к развитию гипервентиляции даже при такой частоте дыхания, значительно меньшей по сравнению со свободным дыханием). Режим ЧД=1–1,5 раза/мин при максимальном ДО продемонстрировал, напротив, уменьшение МОД относительно исходного уровня. При перечисленных сдвигах минутной вентиляции легких регистрировались соответствующие изменения газообмена (гиперкапния и гипоксия при гиповентиляционном режиме, гипокапния при гипервентиляционном режиме дыхания).

Гиперкапния (увеличение содержания CO_2 в крови) приводит к расширению церебральных артериол и прекапиллярных сфинктеров, тем самым снижая мозговое сосудистое сопротивление и стимулируя мозговой кровоток (МК). Гипокапния (снижение содержания CO_2), напротив, вызывает констрикцию резистивных сосудов мозга со снижением МК [16].

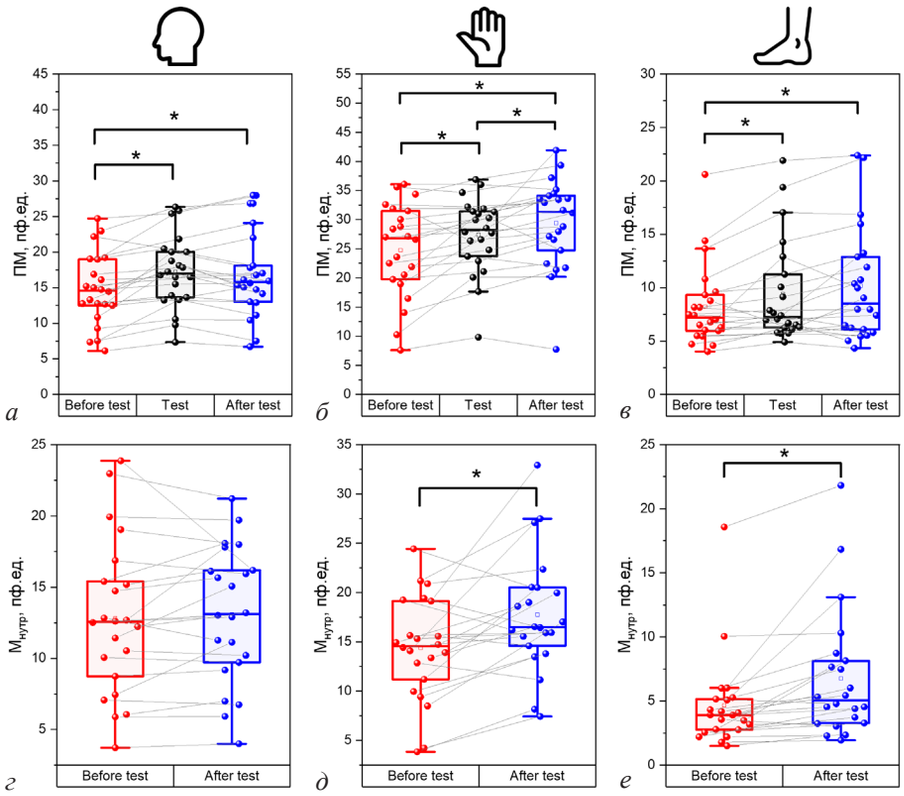

Рис. 3. Изменения показателя микроциркуляции (*а–в*) до, во время и после выполнения дыхательного упражнения и нутритивного кровотока (*г–е*) до и после выполнения дыхательного упражнения с ЧД=1–1,5 раза/мин (гиповентиляция).
* – статистически значимая разница подтверждена парным тестом Вилкоксона, p≤0,05

Fig. 3. Changes in the index of microcirculation (*а–в*) before, during and after performing a breathing exercise and nutritive blood flow (*г–е*) before and after performing a breathing exercise with RR=1–1.5 times/minute (hypoventilation).
* – statistically significant difference confirmed by the Wilcoxon paired test, p≤0.05

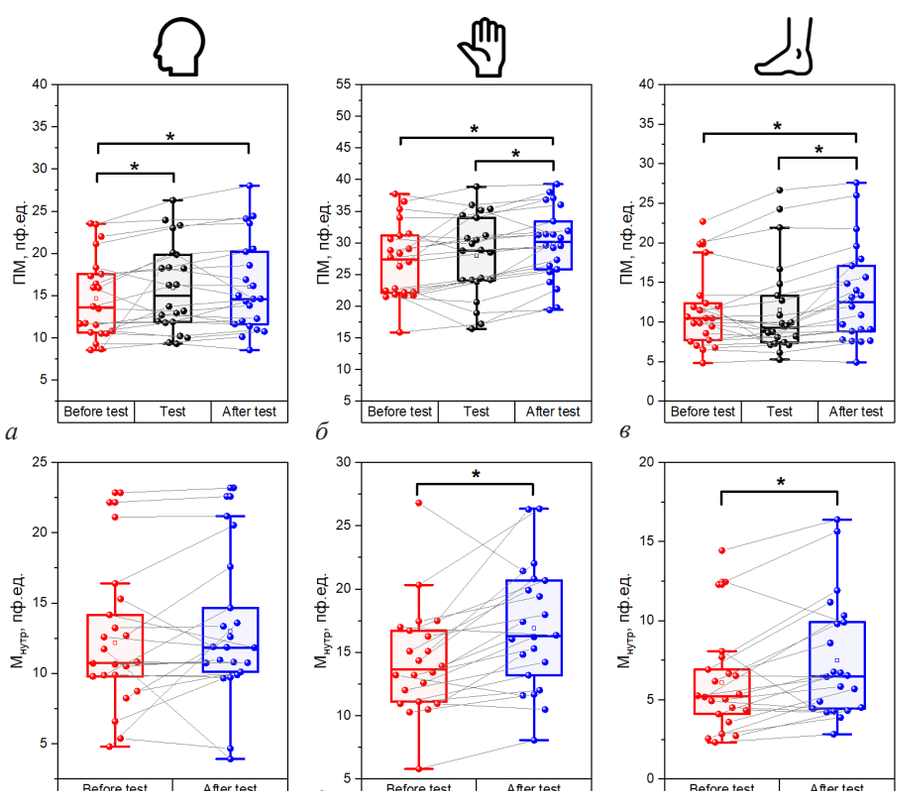

Рис. 4. Изменения показателя микроциркуляции (*а–в*) до, во время и после выполнения дыхательного упражнения и нутритивного кровотока (*г–е*) до и после выполнения дыхательного упражнения с ЧД=3–3,5 раза/мин (гипервентиляция).
* – статистически значимая разница подтверждена парным тестом Вилкоксона, p≤0,05

Fig. 4. Changes in the index of microcirculation (*а–в*) before, during and after performing the breathing exercise and nutritive blood flow (*г–е*) before and after performing the breathing exercise with RR= 3–3.5 times/minute (hyperventilation).
* – statistically significant difference confirmed by a paired test Wilcoxon, p≤0.05

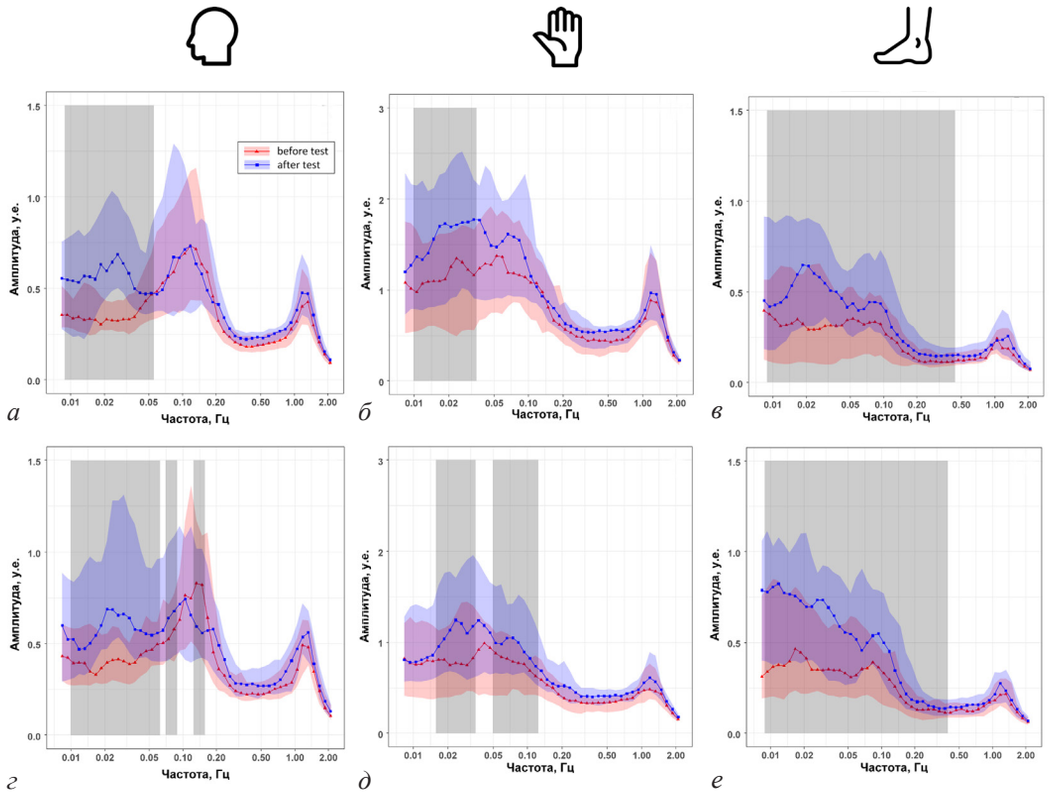

Рис. 5. Амплитудно-частотные спектры микроциркуляторных колебаний кровотока с левой (*а–в*) и правой стороны (*г–е*) до теста (красный) и после (синий) в условиях гиповентиляции. Данные представлены в виде медиан, 25 и 75 %. Серым обозначены частотные диапазоны достоверных различий

Fig. 5. Amplitude-frequency spectra of microcirculatory fluctuations from the left (*а–в*) and right sides (*г–е*) before (red) and after (blue) the test under hypoventilation. The data is presented in the form of medians, 25 % and 75 %. Gray indicates the frequency ranges of significant differences

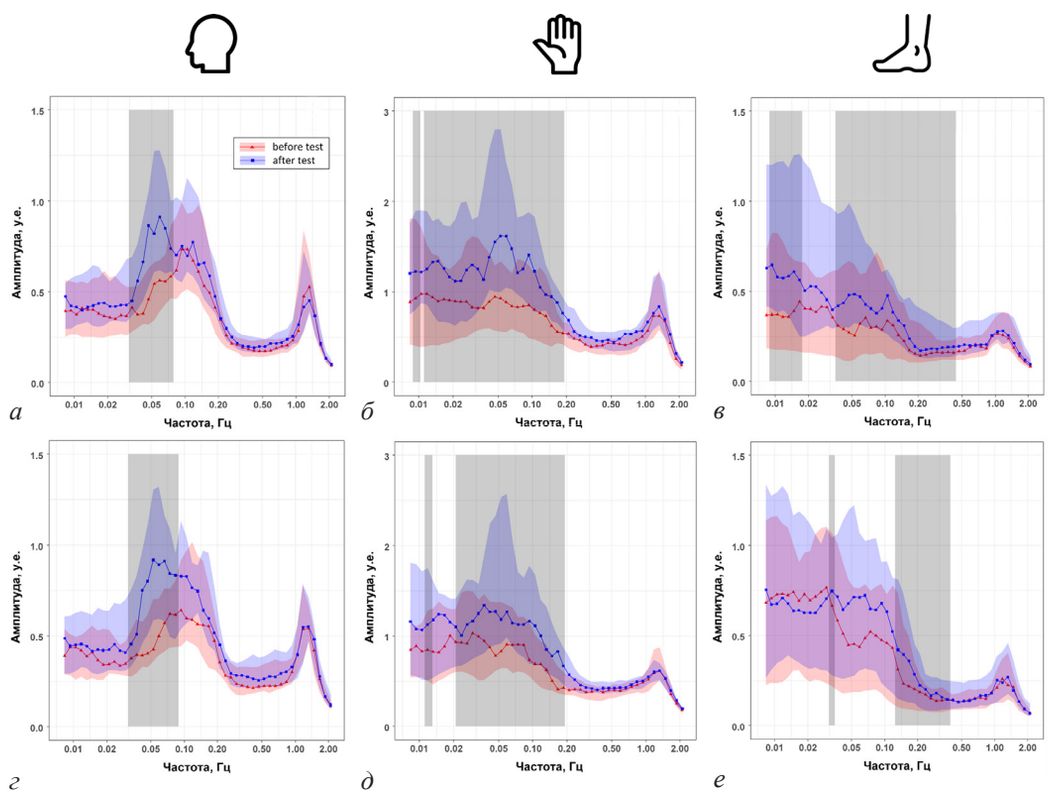

Рис. 6. Амплитудно-частотные спектры микроциркуляторных колебаний кровотока с левой (*а–в*) и правой стороны (*г–е*) до теста (красный) и после (синий) в условиях гипервентиляции. Данные представлены в виде медиан, 25 и 75 %. Серым обозначены частотные диапазоны достоверных различий

Fig. 6. Amplitude-frequency spectra of microcirculatory fluctuations from the left (*а–в*) and right sides (*г–е*) before (red) and after (blue) the test under hyperventilation. The data is presented in the form of medians, 25 % and 75 %. Gray indicates the frequency ranges of significant differences

Повышение парциального давления CO_2 артериальной крови ($PaCO_2$) и возникающее вследствие этого снижение pH оказывают прямое влияние на гладкомышечные клетки артериальных сосудов через калиевые каналы их мембран; гиперполяризация мембран мышечных элементов сосудистой стенки снижает активность кальциевых каналов и концентрацию внутриклеточного кальция, что в конечном итоге и приводит к вазодилатации [17]. Повышение $PaCO_2$ и снижение pH также приводит к активации NO-синтетазы эндотелия, что повышает концентрацию NO и релаксацию миоцитов сосудистой стенки [18].

Во многих исследованиях CO_2 используется как агент, способный влиять на тонус резистивных артериол. Для увеличения парциального давления углекислого газа ($PaCO_2$) применяются ингаляции газовых смесей с повышенным содержанием CO_2, задержка дыхания, а также методика возвратного дыхания и приборы для создания дополнительного объема мертвого функционального пространства [19, 20].

Учитывая имеющиеся научные данные о действии CO_2 на тонус резистивных сосудов, можно предполагать влияние данных режимов дыхания, сопровождающихся перечисленными выше сдвигами газообмена, на процессы мозговой и периферической микроциркуляции.

Тем не менее, несмотря на полученные данные о статистически значимых сдвигах МОД и газового метаболизма, ПМ значимо возрастает во всех зонах измерения как на фоне/после выполнения гиповентиляции, так и на фоне/после гипервентиляции. То есть между двумя разными режимами вентиляции с соответствующими разнонаправленными сдвигами газообмена различий не выявлено – что подтверждает результаты наших более ранних работ [21]. Можно предполагать, что данные изменения ПМ происходят не вследствие изменений газообмена, а вследствие других факторов, в том числе глубокого дыхания независимо от его частоты.

Значимых изменений нутритивного кровотока в коже лба не выявлено при обоих режимах дыхания, однако при этом имеет место значимый рост $M_{нутр}$ на руках и ногах при обоих режимах дыхания (то есть изменения $M_{нутр}$ как на конечностях, так и на голове также не зависят от сдвигов газообмена).

Таким образом, при глубоком дыхании с рекрутированием максимального дыхательного объема значимо увеличивается ПМ во всех зонах и $M_{нутр}$ на конечностях независимо от частоты дыхания, изменений минутной вентиляции легких и сдвигов газообмена. Можно предполагать, что одним из факторов влияния тут является глубина дыхания (и, возможно, другие факторы), а не изменения газового метаболизма. В то же время есть основания предполагать, что когнитивная составляющая регуляции дыхательного процесса, имеющая место при обоих (как гипо-, так и гипервентиляционных) дыхательных паттернах, может оказывать определенное влияние наряду с глубиной дыхания – так как участники нашего исследования одновременно с выполнением конкретного дыхательного паттерна выполняли и когнитивную задачу в виде счета в уме под метроном. Исследованиями показано, что ментальная активность в виде периодической концентрации сенсорного и моторного внимания в сочетании с произвольной периодической мышечной активностью оказывает достоверное влияние на ритмическую структуру колебаний микроциркуляторного кровотока кожи [22].

Значимые изменения $M_{нутр}$ в конечностях и отсутствие изменений в бассейне НГА, кроме регионарных особенностей регуляции, могут быть обусловлены адаптацией сосудов головы к регулярной гиперкапнически-гипоксической тренировке. Известно, что применение интервальной гиперкапнической гипоксии сопровождается снижением реактивности мозговых сосудов к гиперкапнии – что, по мнению авторов, является важным механизмом повышения толерантности мозга к ишемии [20]. Снижение хемочувствительности к CO_2, которое наблюдается в результате систематических гиперкапнических тренировок, в том числе путем гиповентиляционных упражнений йоги [4, 15], может рассматриваться как механизм, обеспечивающий стабильность мозгового кровообращения в условиях гипер- и гиповентиляционных девиаций дыхания.

Поскольку все участники нашего исследования имели опыт регулярной практики дыхательных упражнений не менее 2 лет, можно предположить, что регулярная гиперкапнически-гипоксическая тренировка привела к снижению хемочувствительности и увеличению адаптационных резервов церебральной сосудистой системы – следствием чего и является отсутствие значимых сдвигов нутритивного кровотока в бассейне НГА (и, возможно, ВСА). Система ауторегуляции церебральной гемодинамики имеет значительные регионарные особенности, собственные механизмы и скорость адаптации, отличные от периферического кровообращения конечностей. Возможно, поэтому у лиц, имеющих опыт систематического гиперкапнически-гипоксического тренинга, при выполнении дыхательных упражнений со сдвигами МОД обнаруживаются значимые изменения нутритивного кровотока в дистальных отделах конечностей и не обнаруживаются в коже лба в зонах бассейнов НГА.

Для обоих участков кожи лба (слева и справа) наблюдается достоверное увеличение амплитуд колебаний в диапазоне нейрогенного ритма (~0,05 Гц) для режима гипервентиляции и в диапазонах эндотелиального и нейрогенного ритмов (0,01–0,05 Гц) для режима гиповентиляции.

Активные механизмы регуляции и обусловленные ими колебания стенок сосудов могут улучшать адекватную доставку кислорода ко всем тканям [23]. Колебания потока, вызванные вазомоциями, способны значительно увеличить оксигенацию тканей в условиях гипоксии – при этом наибольший эффект наблюдается при регистрации колебаний на низких частотах, связанных именно с эндотелиальной и симпатической активностью [24]. Исследования указывают на возможность гипоксической активации эндотелиального механизма вазомоций: снижение средних значений сатурации гемоглобина ведет к активации эндотелиальных колебаний с частотой 0,02 Гц; обсуждается

роль эритроцитов как регуляторов эндотелиальной осцилляторной активности для стимуляции тканевого кровотока в условиях гипоксии [25, 26].

Результаты нашего исследования продемонстрировали увеличение амплитуд эндотелиальных осцилляций микрососудов кожи лба в результате выполнения гипоксического режима дыхания. С одной стороны, это можно расценивать как подтверждение взаимосвязи эндотелиальных механизмов регуляции кровотока в коже лба с тканевым кислородным обеспечением в условиях снижения сатурации гемоглобина путем увеличения амплитуд эндотелиальных осцилляций [25], с другой – как противоречие концепции увеличения количества функционирующих капилляров (а, следовательно, доставки кислорода в ткани) за счет увеличения амплитуды миогенных колебаний [13]. Возможно, эти противоречия можно будет разрешить за счет исследований на бóльшей выборке участников.

Как было указано выше, после выполнения как гипер-, так и гиповентиляционного режима дыхания отмечалось значимое увеличение амплитуд осцилляций в диапазоне нейрогенного ритма. Исходя из этих данных, можно сказать, что сдвиги респираторного метаболизма за пределы физиологических значений (гипокапния при гипервентиляции, гипоксия и гиперкапния при гиповентиляции) в обоих случаях вызывают симпатическую реакцию – во всяком случае, на уровне регуляторных механизмов микроциркуляции.

Что касается влияния гипокапнии, то в научной литературе на этот счет содержатся противоречивые данные. Гипокапния может быть дополнительным фактором стимуляции симпатической нервной системы, что показано в исследованиях влияния изо- и гипокапнической гипоксии на симпатическую активность [27]. Сердечный выброс увеличивается при максимально глубоком дыхании с развитием гипервентиляции на фоне изокапнии, что также может косвенно свидетельствовать в пользу симпатической активации, но уже за счет самого факта гипервентиляции и, возможно, увеличения потребления кислорода дыхательными мышцами [28]. С другой стороны, острый респираторный алкалоз со снижением $PaCO_2$ с 39,7 до 18,3 мм рт. ст. приводит к снижению сердечного выброса и ударного объема на фоне снижения спонтанной постганглионарной симпатической активности у анестезированных собак [29].

Более однозначным выглядит влияние гиперкапнии, которая приводит к активации симпатической системы путем возбуждения центральных и периферических хеморецепторов, что обеспечивает увеличение сердечного выброса [30]. Ряд исследований подтверждает концепцию о вкладе повышенной хеморецепторной каротидной чувствительности в избыточную активацию симпатической нервной системы и развитие артериальной гипертензии [20]. Гипоксия также вызывает симпатическую активацию, повышая уровень норэпинефрина плазмы у людей и животных [31] и увеличивая постганглионарную симпатическую активность [32].

Таким образом, активация нейрогенного симпатотонического механизма регуляции, выявленная нами после выполнения как гипер-, так и гиповентиляционных протоколов, может отражать реакцию симпатической системы на гипокапнию, а также на гипоксическую гиперкапнию, соответственно. Возможно, в обоих случаях симпатической активации также способствует нетривиальный тип дыхания со строгой регуляцией длительности дыхательного цикла под метроном.

Заключение

Гиповентиляционные и гипервентиляционные упражнения йоги оказывают однонаправленное влияние на показатель микроциркуляции во всех зонах исследования (пальцы рук и пальцы ног слева и справа, лоб слева и справа), увеличивая его, а также значимо увеличивают нутритивный кровоток, но только на конечностях. Показатели микрокровотока кожи лба в зонах бассейнов НГА демонстрируют особенности в части нутритивного кровотока (отсутствие значимых реакций), что может быть обусловлено особенностями регионарной регуляции. Изменения вентиляции легких и соответствующие им сдвиги газообмена влияют на активные механизмы регуляции микроциркуляции крови, стимулируя эндотелиальные механизмы при гиповентиляции с гипоксией и гиперкапнией, а также стимулируя нейрогенные механизмы как при увеличении, так и при снижении вентиляции легких.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Литература / References

1. Nivethitha L., Mooventha A., Manjunath N. Effects of Various Praṇayama on Cardiovascular and Autonomic Variables. Ancient Sci. Life. 2016;36(2):72–77. DOI: 10.4103/asl.ASL_178_16.

2. Dinesh T., Gaur G., Sharma V., Madanmohan T., Harichandra K., Bhavanani A. Comparative effect of 12 weeks of slow and fast pranayama training on pulmonary function in young, healthy volunteers: A randomized controlled trial. Int. J. Yoga. 2015;8(1):22–26. DOI: 10.4103/0973-6131.146051.

3. Thanalakshmi J., Maheshkumar K., Kannan R., Sundareswaran L., Venugopal V., Poonguzhali S. Effect of Sheetali pranayama on cardiac autonomic function among patients with primary hypertension – A randomized controlled trial. Compl. Ther. Clin. Pract. 2020;39:101138. DOI: 10.1016/j.ctcp.2020.101138.

4. 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. Japan. J. Physiol. 2002;52(3):313–316. DOI: 10.2170/jjphysiol.52.313.

5. Krasnikov G., Tyurina M., Tankanag A., Piskunova G., Chemeris N. Analysis of heart rate variability and skin blood flow oscillations under deep controlled breathing. Resp. Physiol. Neurobiol. 2013;185:562–570. DOI: 10.1016/j.resp.2012.11.007.

6. Тюрина М.Й., Красников Г.В., Танканаг А.В., Пискунова Г.М., Чемерис Н.К. Формирование респираторно-зависимых колебаний скорости кровотока в микроциркуляторном русле кожи человека в условиях контролируемого дыхания. Регионарное кровообращение и микроцирку-

ляция. 2011;10(3):31–37. [Tyurina M.Y., Krasnikov G.V., Tankanag A.V., Piskunova G.M., Chemeris N.K. Formation of respiratory-dependent fluctuations in the blood flow velocity in the microcirculatory bed of the human skin under controlled breathing conditions. Region. Blood Circulat. Microcirculat. 2011;10(3):31–37. (In Russ.)]. DOI: 10.24884/1682-6655-2011-10-3-31-37.

7. Жарких Е.В., Маковик И.Н., Потапова Е.В., Дремин В.В., Жеребцов Е.А., Жеребцова А.И., Дунаев А.В., Сидоров В.В., Крупаткин А.И. Оптическая неинвазивная диагностика функционального состояния микроциркуляторного русла пациентов с нарушением периферической микрогемодинамики. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018;17(3):23–32. [Zharkikh E.V., Makovik I.N., Potapova E.V., Dremin V.V., Zherebtsov E.A., Zherebtsova A.I., Dunaev A.V., Sidorov V.V., Krupatkin A.I. Optical noninvasive diagnostics of the functional state of microcirculatory bed in patients with disorders of peripheral haemodynamics. Region. Blood Circulat. Microcirculat. 2018;17(3):23–32. (In Russ.)]. DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-23-32.

8. Дремин В.В., Козлов И.О., Жеребцов Е.А., Маковик И.Н., Дунаев А.В., Сидоров В.В., Крупаткин А.И. Возможности лазерной допплеровской флоуметрии в оценке состояния микрогемолимфоциркуляции. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2017;16(4):42–49. [Dremin V.V., Kozlov I.O., Zherebtsov E.A., Makovik I.N., Dunaev A.V., Sidorov V.V., Krupatkin A.I. The capabilities of laser Doppler flowmetry in assessment of lymph and blood microcirculation. Region. Blood Circulat. Microcirculat. 2017;16(4):42–49 (In Russ.)]. DOI: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-42-49.

9. Дунаев А.В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека. Старый Оскол: ТНТ; 2022:440. [Dunaev A.V. Multimodal optical diagnostics of microcirculatory and tissue systems of the human body. Stary Oskol: TNT, 2022:440. (In Russ.)].

10. Sidorov V.V., Rybakov Yu.L., Gukasov V.M., Evtushenko G.S. A System of Local Analyzers for Noninvasive Diagnostics of the General State of the Tissue Microcirculation System of Human Skin. Biomed. Engin. 2022;55(6):379–382. DOI: 10.1007/s10527-022-10140-3.

11. Tankanag A., Chemeris N. Adaptive wavelet analysis of oscillations of the cutaneous peripheral blood flow in human. Phys. Med. Biol. 2009;54(3):537–544. DOI: 10.1134/S0006350909030221.

12. Танканаг А.В. Методы вейвлет-анализа в комплексном подходе к исследованию кожной микрогемодинамики как единицы сердечно-сосудистой системы. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018;17(3):33–41. [Tankanag A.V. Wavelet analysis methods in the comprehensive study approach of skin microhemodynamics as a cardiovascular unit. Region. Blood Circulat. Microcirculat. 2018;17(3):33–41. (In Russ.)]. DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-33-41.

13. Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Федорович А.А., Ефимочкин С.А., Зейналов В.Т. Колебательный контур регуляции числа функционирующих капилляров. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2006;5(3):54–58. [Krupatkin A.I., Sidorov V.V., Fedorovich A.A., Efimochkin S.A., Zeinalov V.T. The oscillatory circuit for the control of functional capillaries number. Region. Blood Circulat. Microcirculat. 2006;5(3):54–58 (In Russ.)].

14. Анисимова А.В., Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Захаркина М.В., Юцкова Е.В., Галкин С.С. Лазерная допплеровская флоуметрия в оценке состояния микроциркуляции у пациентов с острой и хронической цереброваскулярной недостаточностью. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2014;13(3):31–37. [Anisimova A.V., Krupatkin A.I., Sidorov V.V., Zacharkina M.V., Yutskova E.V., Galkin S.S. Laser Doppler flowmetry in the assessment of the microcirculation in patients with acute and chronic cerebrovascular insufficiency. Region. Blood Circulat. Microcirculat. 2014;13(3):31–37. (In Russ.)]. DOI: 10.24884/1682-6655-2014-13-3-31-37.

15. Фролов А.В., Ермолаева С.А., Маничев И.А. Гиповентиляционные упражнения йоги: влияние на газообмен. Вестн. восстановительной мед. 2021;20(5):73–80. [Frolov A.V., Ermolaeva S.A., Manichev I.A. Hypoventilation Yoga Exercises: Effects on Respiratory Metabolism. Bull. restor. Med. 2021;20(5):73–80. (In Russ.)]. DOI:10.38025/2078-1962-2021-20-5-73-80.

16. Ainslie P., Duffin J. Integration of cerebrovascular CO_2 reactivity and chemoreflex control of breathing: mechanisms of regulation, measurement, and interpretation. Amer. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2009;296(5):R1473–R1495. DOI: 10.1152/ ajpregu.91008.2008.

17. Peng H.L., Jensen P.E., Nilsson H., Aalkjaer C. Effect of acidosis on tension and [Ca2+] in rat cerebral arteries: is there a role for membrane potential? Amer. J. Physiol. 1998;274(2):H655–662. DOI: 10.1152/ajpheart.1998.274.2.H655

18. Fathi A.R., Yang C., Bakhtian K.D., Qi M., Lonser R.R., Pluta R.M. Carbon dioxide influence on nitric oxide production in endothelial cells and astrocytes: cellular mechanisms. Brain Res. 2011;1386:50–57. DOI: 10.1016/j.brainres.2011.02.066.

19. Tancredi F.B., Hoge R.D. Comparison of cerebral vascular reactivity measures obtained using breath-holding and CO2 inhalation. J. Cereb. Blood. Flow. Metab. 2013;33:1066–1074. DOI: 10.1038/jcbfm.2013.48.

20. Куликов В.П., Кузнецова Д.В., Заря А.Н. Цереброваскулярная и кардиоваскулярная CO_2-реактивность в патогенезе артериальной гипертензии. Артериальная гипертензия. 2017;23(5):433–446. [Kulikov V.P., Kuznetsova D.V., Zarya A.N. Role of Cerebrovascular and Cardiovascular CO_2-Reactivity in the Pathogenesis of Arterial Hypertension. Arterial Hypertension. 2017;23(5):433–446. (In Russ.)]. DOI: 10.18705/1607-419X-2017-23-5-433-446.

21. 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. [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 when performing the hatha yoga breathing technique. Region. Blood Circulat. Microcirculat. 2021;20(4):33–44. (In Russ.)]. DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44.

22. Красников Г.В., Тюрина М.Й., Пискунова Г. М., Крупаткин А. И., Танканаг А.В., Чемерис Н.К. Периодическая концентрация ментального внимания изменяет структуру колебательных процессов в сердечно-сосудистой системе. Физиология человека. 2020;46(1):54–68. [Krasnikov G.V., Tyurina M.Y., Piskunova G. M., Krupatkin A. I., Tankanag A.V., Chemeris N.K. Periodic concentration of mental attention changes the structure of oscillatory processes in the cardiovascular system. Physiol. Hum. 2020;46(1):54–68. (In Russ.)]. DOI: 10.31857/S0131164620010105.

23. Tsai A.G., Intaglietta M. Evidence of flowmotion induced changes in local tissue oxygenation. Int. J. Microcirc. clin. Exp. 1993;12(1):75–88.

24. Goldman D., Popel A.S. A Computational Study of the Effect of Vasomotion on Oxygen Transport from Capillary Networks. J. Theor. Biol. 2001;21;209(2):189–199. DOI: 10.1006/jtbi.2000.2254.

25. Thorn C.E., Kyte H., Slaff D.W., Shore A.C. An association between vasomotion and oxygen extraction. Amer. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 2011;301(2):H429–442. DOI: 10.1152/ajpheart.01316.2010.

26. Ellsworth M.L., Ellis C.G., Goldman D., Stephenson A.H., Dietrich H.H., Sprague R.S. Erythrocytes: Oxygen Sensors and Modulators of Vascular Tone. Physiology. 2009; 24:107–116. DOI: 10.1152/physiol.00038.2008.

27. Somers V.K., Mark A.L., Zavala D.C., Abboud F.M. Influence of ventilation and hypocapnia on sympathetic nerve responses to hypoxia in normal humans. J. Appl. Physiol. 1989; 67(5):2095–2100. DOI: 10.1152/jappl.1989.67.5.2095.

28. Anholm J.D., Johnson R.L., Ramanathan M. Changes in cardiac output during sustained maximal ventilation in humans. J. Appl. Physiol. 1987;63(1):181–187. DOI: 10.1152/jappl.1987.63.1.18.

29. Moster W.G., Reier C.E., Gardier R.W., Hamelberg W. Cardiac output and postganglionic sympathetic activity during acute respiratory alkalosis. Anesthesiology. 1969;31(1):28–34. DOI: 10.1097/00000542-196907000-00005.

30. Shoemaker J.K., Vovk A., Cunningham D.A. Peripheral chemoreceptor contributions to sympathetic and cardiovascular responses during hypercapnia. Canad. J. Physiol. Pharmacol. 2002;80(12):1136–1144. DOI: 10.1139/y02-148.

31. Rose C.E., Althaus J.A., Kaiser D.L., Miller E.D., Carey R.M. Acute Hypoxemia and Hypercapnia: Increase in Plasma Catecholamines in Conscious Dogs. Amer. J. Physiol. 1983;245(6):H924–929. DOI: 10.1152/ajpheart.1983.245.6.H924.

32. Blumberg H., Janig W., Rieckmann C., Szulczyk P. Baroreceptor and chemoreceptor reflexes in postganglionic neurones supplying skeletal muscle and hairy skin. J. Auton. Nerv. Syst. 1980;2(3):223–240. DOI: 10.1016/0165-1838(80)90013.

Информация об авторах:

Фролов Артем Владимирович – ректор, ООО «Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: polyclinic@list.ru, ORCID: 0000-0001-8774-6996.

Локтионова Юлия Игоревна – стажер-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Россия, e-mail: julya-loktionova@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6628-1285.

Жарких Елена Валерьевна – стажер-исследователь научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Россия, e-mail: ev.zharkikh@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5735-3366.

Сидоров Виктор Васильевич – канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «Научно-производственное предприятие „ЛАЗМА“», Москва, Россия, e-mail: victor.v.sidorov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0594-1534.

Танканаг Арина Владимировна – канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории клеточной нейробиологии, Институт биофизики клетки Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр „Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук“», г. Пущино, Россия, e-mail: tav@icb.psn.ru, ORCID: 0000-0002-9538-1939.

Дунаев Андрей Валерьевич – д-р техн. наук, доцент., ведущий научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, г. Орел, Россия, e-mail: inohvat@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4431-6288.

Authors information:

Frolov Artem V. – rector, Ltd. St. Petersburg Institute of Oriental Methods of Rehabilitation, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: polyclinic@list.ru, ORCID: 0000-0001-8774-6996.

Loktionova Yulia I. – research assistant of Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, e-mail: julya-loktionova@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6628-1285.

Zharkikh Elena V. – research assistant of Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, e-mail: ev.zharkikh@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5735-3366.

Sidorov Victor V. – Ph. D, CEO, SPE «LAZMA» Ltd., Moscow, Russia, e-mail: victor.v.sidorov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0594-1534.

Tankanag Arina V. – Ph. D leading researcher of Laboratory of cell neurobiology, Institute of Cell Biophysics of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia, e-mail: tav@icb.psn.ru, ORCID: 0000-0002-9538-1939.

Dunaev Andrey V. – Ph. D, associate professor, leading researcher of Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia, e-mail: inohvat@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4431-6288.