

УДК 616-005;616.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-62-69

Л. В. МЕЗЕНЦЕВА¹, Е. Н. ДУДНИК², Е. В. НИКЕНИНА^{1, 2},
М. А. ЗАПАРА², В. Г. САМАРЦЕВА², И. Р. ХУСАИНОВ²

Корреляционно-спектральный анализ изменений показателей микроциркуляции симметричных областей головы человека в условиях кратковременных гипоксических воздействий

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П. К. Анохина», Москва, Россия
125315, Россия, Москва, Балтийская ул., д. 8

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), Москва, Россия
119991, Россия, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2
E-mail: l.v.mezentseva@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.08.21 г.; принята к печати 12.11.21 г.

Резюме

Цель – изучение влияния кратковременных гипоксических воздействий на корреляционные взаимосвязи между показателями микроциркуляции (МЦР) симметричных областей головы человека. **Материалы и методы.** Показатели МЦР у 10 здоровых добровольцев мужского пола определяли методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Кратковременное гипоксическое воздействие осуществляли по методике гипоксического теста на установке ReOxy Cardio (S. A. Aimediq). Оценивали статистические показатели перфузии левой и правой сторон измерения, нейрогенный, миогенный, дыхательный и сердечный компоненты сосудистого тонуса, а также корреляционные взаимосвязи между ними в исходном состоянии и после гипоксических воздействий. **Результаты.** Обнаружена специфичность перестроенных процессов в системе регионарного кровообращения под воздействием гипоксических нагрузок, связанная с наличием функциональной асимметрии корреляционных взаимосвязей между различными составляющими тонуса сосудов симметричных областей головы. Установлено наличие сильной корреляционной взаимосвязи между исходными значениями перфузии слева и справа, которая ослабевает под влиянием гипоксических нагрузок. Изменения перфузии симметричных височных областей головы под влиянием гипоксических нагрузок коррелируют отрицательно с исходными значениями перфузии как одноименной, так и противоположной стороны измерения. **Выводы.** Под влиянием кратковременной гипоксической нагрузки в системе МЦР происходит перераспределение баланса между регуляторными влияниями различных компонент сосудистого тонуса симметричных областей головы с целью поддержания устойчивого функционирования целостной системы МЦР.

Ключевые слова: кратковременное гипоксическое воздействие, микроциркуляция, асимметрия, лазерная доплеровская флоуметрия

Для цитирования: Мезенцева Л. В., Дудник Е. Н., Никенина Е. В., Запара М. А., Самарцева В. Г., Хусаинов И. Р. Корреляционно-спектральный анализ изменений показателей микроциркуляции симметричных областей головы человека в условиях кратковременных гипоксических воздействий. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2021;20(4):62–69. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-62-69.

UDC 616-005;616.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-62-69

L. V. MEZENTSEVA¹, E. N. DUDNIK², E. V. NIKENINA^{1, 2},
M. A. ZAPARA², V. G. SAMARTSEVA², I. R. KHUSAINOV²
Correlation and spectral analysis of microcirculatory changes in symmetric areas of human head in short-term hypoxic exposure

¹ P. K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia
8, Baltiyskaya str., Moscow, Russia, 125315

² I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University), Moscow, Russia
8, Trubeckaya str., Moscow, Russia, 119991
E-mail: l.v.mezentseva@mail.ru

Received 31.08.21; accepted 12.11.21

Summary

Purpose. To study the effect of short-term hypoxic exposure on correlation between microcirculatory parameters (MCR) of symmetric areas of the human head. **Materials and methods.** MCR parameters of 10 healthy male volunteer were measured by laser Doppler flowmetry method. Short-term hypoxic exposure was produced according to the hypoxic test method using the ReOxy Cardio unit (S. A. Aimediq). We assessed the perfusion metrics left and right areas of interest, neurogenic, myogenic,

respiratory and cardiac contributors to vascular tone and correlations between baseline parameters and after hypoxic exposure. *Results.* We revealed the specificity of regional circulation system rearranging induced by hypoxic load. The specificity is caused by functional asymmetry of correlations between different vascular tone contributors in symmetrical head areas. Strong correlation declining under the hypoxic loads between baseline perfusion on left/right was found. The perfusion changes of symmetrical temporal areas under the hypoxic loads correlate negatively with the baseline perfusion of both the same and the opposite side. *Conclusion.* Short-term hypoxic load rearranges the balance of different vascular tone contributors regulatory role in MCR of symmetric head areas to maintain the sustainable activity of the whole MRC.

Keywords: short-term hypoxic exposure, microcirculation, asymmetry, laser Doppler flowmetry

For citation: Mezentseva L. V., Dudnik E. N., Nikenina E. V., Zapara M. A., Samartseva V. G., Khusainov I. R. Correlation and spectral analysis of microcirculatory changes in symmetric areas of human head in short-term hypoxic exposure. *Regional hemodynamics and microcirculation.* 2021;20(4):62–69. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-4-62-69.

Введение

Проблема устойчивости организма человека к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды, приводящих к снижению адаптационных возможностей организма и развитию гипоксических состояний [1, 2], является особенно актуальной для современного человека. Поскольку обеспечение кислородом органов и тканей достигается регуляторными механизмами, лежащими в основе функционирования системы МЦР, то при гипоксии именно система МЦР играет важную роль в компенсаторных процессах адаптации и поддержания устойчивого кровоснабжения органов и тканей [3–5]. Ранее было установлено, что в механизмах регуляции колебательных процессов перфузии в различных органах и тканях человека и животных важную роль играет лево-правосторонний баланс показателей МЦР симметричных областей [6–10]. Поэтому **целью** работы явилось изучение корреляционных взаимосвязей между показателями МЦР симметричных областей головы человека в условиях кратковременного гипоксического воздействия.

Материалы и методы исследования

Показатели МЦР у 10 здоровых добровольцев мужского пола (возраст 18–20 лет) определяли методом ЛДФ [11] с помощью прибора «ЛАКК-02» НПП «ЛАЗМА» (двухканальный). Датчики ЛДФ-сигнала фиксировали на наружной поверхности симметричных височных областей головы, расположенных на 1 см латеральнее волосяного покрова. Кратковременное гипоксическое воздействие осуществляли по методике гипоксического теста на установке ReOxy Cardio (S. A. AImediq, Люксембург) со встроенным пульсоксиметрическим датчиком (Masimo Rad-5, США). На лице обследуемого фиксировали плотноприлегающую ротоносовую маску, палец помещали в пульсоксиметрический датчик и предлагали спокойно дышать через маску в течение до 10 мин. Тест производился в покое, в положении сидя, на протяжении всего теста мониторируют величину насыщения артериальной крови кислородом (SpO_2) и частоту сердечных сокращений (ЧСС, уд./мин), при этом автоматически фиксировали индивидуальные значения минимального уровня SpO_2 и максимальной ЧСС. Концентрация кислорода во вдыхаемом воздухе составляла 11 %. Во время гипоксического теста проводилось измерение времени снижения SpO_2 с исходного уровня (96–99 %) до 80 % (время десатурации, в секундах). Критериями прекращения

«гипоксической фазы» теста служили снижение значения SpO_2 до 80 % и ниже, либо истечение 9 мин дыхания гипоксической газовой смесью. Отсчет времени производился встроенным в прибор электронным секундомером автоматически. Дополнительным критерием прекращения гипоксической фазы теста являлась выраженная тахикардия (устойчивое повышение значений ЧСС на 30 % и выше от исходного уровня).

Синхронные записи ЛДФ-сигнала симметричных височных областей головы проведены с частотой 20 Гц в течение 3 мин с интервалом отсчетов 0,05 с в исходном состоянии (до тестирования на гипоксию) и сразу после гипоксического воздействия. Для каждого фрагмента записи оценивали среднее значение перфузии (ПМ) и методом вейвлет-анализа рассчитывали показатели амплитудно-частотного спектра колебаний, отражающих выраженность различных составляющих спектра: нейрогенного Н (0,02–0,06 Гц), миогенного М (0,06–0,15 Гц), дыхательного Д (0,15–0,4 Гц) и сердечного С (0,4–1,6 Гц) [12, 13]. Для этой цели использовали программное обеспечение, прилагаемое к ЛДФ-анализатору.

Далее проводили корреляционный анализ сопряженности между изменениями всех показателей МЦР левой и правой сторон измерения. Степень сопряженности между признаками оценивали методами параметрической статистики по величине коэффициента корреляции Пирсона (r). Принималось, что при $|r| < 0,3$ степень связи практически отсутствует; при $0,3 < |r| < 0,6$ имеет место умеренная степень связи, при $0,6 < |r| < 1$ – сильная степень связи. Расчеты коэффициентов корреляции и их уровней значимости проводили с помощью программного обеспечения, входящего в пакеты прикладных программ «Excel for Windows» и «Statistica» (v. 6.0). Уровень статистической значимости при проверке нулевой гипотезы принимали соответствующим $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований показали, что кратковременная гипоксическая нагрузка вызывает изменения показателей МЦР как правой, так и левой сторон наблюдения, причем эти изменения отличаются большей индивидуальностью у разных испытуемых. Это можно видеть на рис. 1, где показаны примеры различных реакций на кратковременную гипоксическую нагрузку у разных испытуемых. Можно видеть, что у испытуемого 1 (рис. 1, а) в ответ на воздействие величина перфузии слева уменьшается ($\Delta P_{\text{Млев}} < 0$),

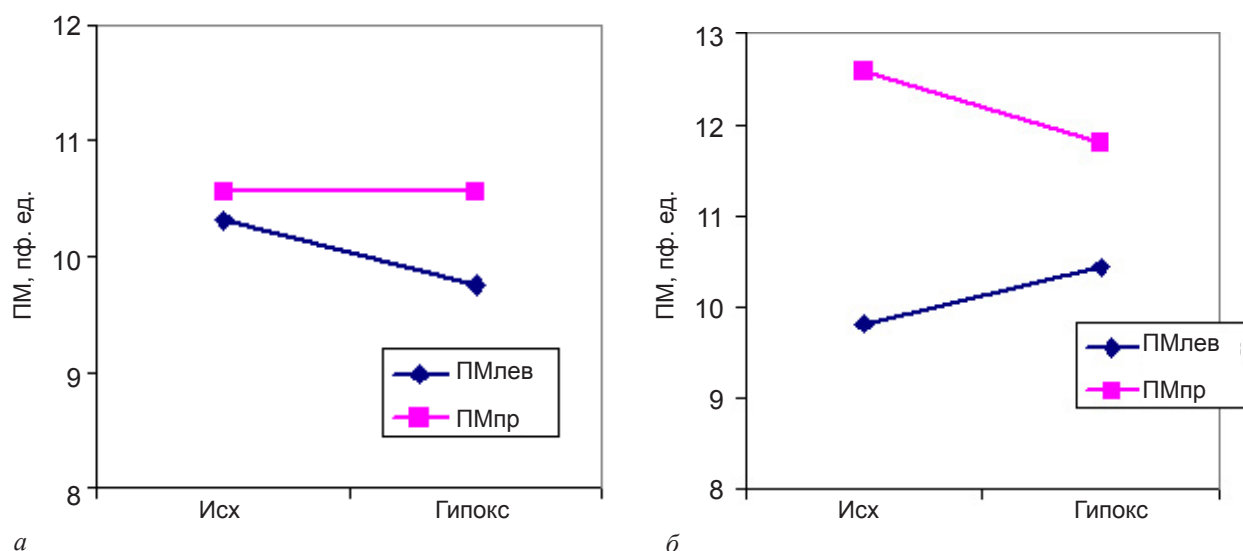


Рис. 1. Различные типы реакции на кратковременную гипоксическую нагрузку: а (исп. 1) – $\Delta\text{ПМлев}<0$, $\Delta\text{ПМпр}=0$; б (исп. 2) – $\Delta\text{ПМлев}>0$, $\Delta\text{ПМпр}<0$

Fig. 1. Different types of reactions to short-term hypoxic exposure: а (sub. 1) – $\Delta\text{ПМлев}<0$, $\Delta\text{ПМпр}=0$; б (sub. 2) – $\Delta\text{ПМлев}>0$, $\Delta\text{ПМпр}<0$

а величина перфузии справа не изменяется. В то время как у испытуемого 2 (рис. 1, б) в ответ на гипоксическую нагрузку величина перфузии слева возрастает ($\Delta\text{ПМлев}>0$), а величина перфузии справа уменьшается ($\Delta\text{ПМпр}<0$). Дальнейший анализ был направлен на оценку распределения испытуемых по индивидуальным типам реакций на кратковременную гипоксическую нагрузку: 1) $\{\Delta\text{ПМлев}>0, \Delta\text{ПМпр}>0\}$; 2) $\{\Delta\text{ПМлев}>0, \Delta\text{ПМпр}<0\}$; 3) $\{\Delta\text{ПМлев}<0, \Delta\text{ПМпр}<0\}$; 4) $\{\Delta\text{ПМлев}<0, \Delta\text{ПМпр}>0\}$. Результаты анализа показаны на рис.2, где можно видеть, что наиболее вероятным типом реакций было увеличение величины перфузии как справа, так и слева $\{\Delta\text{ПМлев}>0, \Delta\text{ПМпр}>0\}$. Этот тип реакций наблюдался у 50 % испытуемых. На 2-м месте по степени распространенности были противоположно направленные реакции $\{\Delta\text{ПМлев}>0, \Delta\text{ПМпр}<0\}$. Этот тип реакций наблюдался у 30 % испытуемых. На 3-м месте были реакции с одновременным уменьшением величины перфузии как справа, так и слева $\{\Delta\text{ПМлев}<0, \Delta\text{ПМпр}<0\}$. Этот тип реакций наблюдался у 20 % испытуемых. И, наконец, 4-й тип реакций $\{\Delta\text{ПМлев}<0, \Delta\text{ПМпр}>0\}$ не наблюдался ни у одного испытуемого.

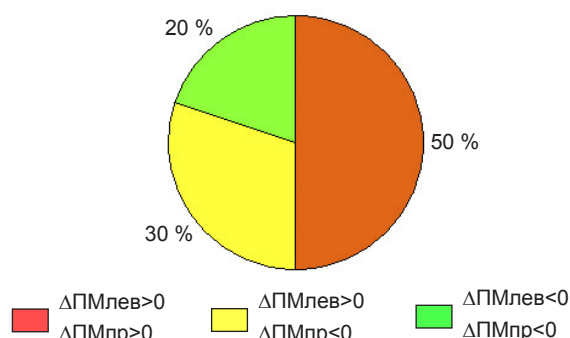


Рис. 2. Процентное распределение испытуемых по типам реакций на кратковременную гипоксическую нагрузку

Fig. 2. The percentage distribution of subjects by type of reactions to short hypoxic load

Таким образом, результаты исследований выявили особенности индивидуальных реакций показателей МЦР на кратковременную гипоксическую нагрузку, характеризующуюся выраженной лево-правосторонней асимметрией этих реакций. Дальнейший статистический анализ показал, что усреднение этих показателей у всех испытуемых не позволяет выявить особенности реакций на кратковременные гипоксические воздействия. Среднее исходное значение перфузии слева было $\text{ПМлев}(\text{исх})=9,44\pm0,54$ пф. ед., а после гипоксии $\text{ПМлев}(\text{гип})=10,55\pm0,60$. Тенденция к повышению есть, но изменения не были статистически значимыми. Для средних значений показателей МЦР справа статистически значимых изменений также не выявлено: $\text{ПМпр}(\text{исх})=9,91\pm0,75$ пф. ед., $\text{ПМпр}(\text{гип})=10,67\pm0,69$.

Следующим этапом исследований явился корреляционный анализ взаимосвязей между изменениями показателей МЦР левой и правой сторон измерения. Результаты анализа (табл. 1) показали, что изменения перфузии, вызванные гипоксией, зависят от исходных величин перфузии не только одноименной, но и противоположной стороны наблюдения. Из данных табл. 1 можно видеть, что изменения перфузии слева ($\Delta\text{ПМлев}$) взаимосвязаны как с исходным значением перфузии слева ПМлев ($r=-0,44$), так и с исходным значением перфузии справа ПМпр ($r=-0,36$). Аналогично, изменения перфузии справа ($\Delta\text{ПМпр}$) взаимосвязаны как с исходным значением перфузии справа ПМпр ($r=-0,73$), так и с исходным значением перфузии слева ПМлев ($r=-0,68$). Из данных табл. 1 можно видеть наличие сильной положительной корреляционной взаимосвязи ($r=0,91$) между исходными значениями перфузии левой (ПМлев) и правой (ПМпр) сторон наблюдения.

Таким образом, результаты исследований показали, что изменения перфузии симметричных височных областей головы под влиянием кратковременной гипоксической нагрузки зависят от исходных значений этих показателей не только с одноименной, но и с противоположной стороны наблюдения. Установлено,

Таблица 1

Числовые значения коэффициентов корреляции между вызванными гипоксией изменениями перфузии Δ ПМлев (пф. ед.), Δ ПМпр(пф. ед.) и их исходными значениями ПМлев (пф. ед.) и ПМпр (пф. ед.)

Table 1

The initial values of correlation coefficients between hypoxia-induced perfusion changes of Δ ПМлев (пф. ед.), Δ ПМпр (пф. ед.) and their initial values of ПМлев (пф. ед.) and ПМпр (пф. ед.)

Корреляции		Условия	Левая			Правая		
			исход	гипоксия	измен	исход	гипоксия	измен
сторона измерения	условия	параметр, пф. ед.	ПМлев	ПМлев	Δ ПМлев	ПМпр	ПМпр	Δ ПМпр
Левая	исход	ПМлев	1,00	0,48*	-0,44*	0,91**	0,01	-0,68**
	гипоксия	ПМлев	0,48*	1,00	0,58*	0,48*	0,65**	0,08
	измен	Δ ПМлев	-0,44*	0,58*	1,00	-0,36*	0,65**	0,71**
Правая	исход	ПМпр	0,91**	0,48*	-0,36*	1,00	0,04	-0,73**
	гипоксия	ПМпр	0,01	0,65**	0,65**	0,04	1,00	0,66**
	измен	Δ ПМпр	-0,68**	0,08	0,71**	-0,73**	0,65**	1,00

Примечание: здесь и далее * – $0,3 < |r| < 0,6$; $p < 0,05$; ** – $0,6 < |r| < 1$; $p < 0,05$.

что изменения перфузии симметричных височных областей головы под воздействием кратковременной гипоксической нагрузки отрицательно коррелируют с исходными значениями перфузии как одноименной, так и противоположной стороны измерения. Также установлено наличие сильной корреляционной взаимосвязи между исходными значениями перфузии слева и справа, которая ослабевает под влиянием гипоксических нагрузок: коэффициент корреляции между ПМлев и ПМпр при кратковременной гипоксической нагрузке снижается с 0,91 до 0,65.

Результаты корреляционного анализа позволяют объяснить большую индивидуальность реакций на гипоксические воздействия у разных испытуемых. Причина заключается в том, что реакция на гипоксию зависит от степени сбалансированности исходных значений перфузии слева и справа, которая различна у разных испытуемых. Именно эта сбалансированность определяет устойчивость к гипоксическим воздействиям и направленность реакций микроциркуляторного русла на эти воздействия.

Дальнейший анализ был направлен на выявление изменений показателей амплитудно-частотного спектра МЦР левой и правой сторон измерения. Результаты исследований показали, что под влиянием кратковременной гипоксической нагрузки статистически значимых изменений средних значений показателей амплитудно-частотного спектра МЦР не было. Так, исходное среднее значение нейрогенной компоненты сосудистого тонуса слева (Нлев исход) было равно $12,35 \pm 3,91$ пф. ед., а после воздействия гипоксии Нлев гипокс = $12,51 \pm 3,96$ пф. ед.; исходное среднее значение нейрогенной компоненты сосудистого тонуса справа (Нпр исход) было равно $11,92 \pm 3,48$ пф. ед., а после воздействия гипоксии Нлев гипокс = $12,76 \pm 4,04$ пф. ед. Достоверных изменений не выявлено. Аналогичное имело место и в отношении миогенной компоненты сосудистого тонуса: исходное среднее значение миогенной компоненты сосудистого тонуса слева (Млев исход) было равно $13,86 \pm 4,38$ пф. ед., а после воздействия гипоксии Млев гипокс = $15,18 \pm 4,80$ пф. ед.; исходное среднее значение миогенной компоненты

сосудистого тонуса справа (Мпр исход) было равно $13,99 \pm 4,42$ пф. ед., а после воздействия гипоксии Млев гипокс = $14,62 \pm 4,62$ пф. ед. Изменений не выявлено. Аналогичная картина имела место также для дыхательной и сердечной компонент спектра. Результаты исследований показали, что при отсутствии статистически значимых различий между средними величинами перфузии до и после гипоксических воздействий наблюдаются изменения тесноты корреляционных отношений между параметрами микрокровотока как в сторону ослабления, так и в сторону усиления этих связей (табл. 2; 3).

В табл. 2 приведены исходные значения коэффициентов корреляции между различными компонентами амплитудно-частотного спектра МЦР левой и правой стороны измерения, а в табл. 3 – их значения после кратковременной гипоксической нагрузки. Можно видеть, что под влиянием гипоксических воздействий ослабляются корреляционные взаимосвязи между левой и правой стороной наблюдения: если в исходном состоянии коэффициент корреляции между ПМлев и ПМпр был равен 0,91, то после воздействия гипоксии он снизился до 0,65 ($p < 0,05$). Кроме того, снижались корреляционные взаимосвязи между нейрогенной компонентой слева и перфузией правой и левой сторон наблюдения (в исходном состоянии $r(\text{Нлев}, \text{ПМлев}) = 0,50$, а после воздействия гипоксии – 0,15 ($p < 0,05$)). Аналогично и для правой стороны: в исходном состоянии $r(\text{Нлев}, \text{ПМпр}) = 0,44$, а после воздействия гипоксии – 0,15 ($p < 0,05$).

В то же время наблюдалось усиление корреляционных взаимосвязей в ответ на кратковременную гипоксическую нагрузку между нейрогенной компонентой слева и сердечной компонентой слева (в исходном состоянии $r(\text{Нлев}, \text{Слев}) = -0,43$, а после воздействия гипоксии – 0,70). Аналогичное усиление корреляционных взаимосвязей имело место между нейрогенной компонентой слева и сердечной компонентой справа (в исходном состоянии $r(\text{Нлев}, \text{Спр}) = -0,26$, а после воздействия гипоксии – 0,46).

Изучению функциональных особенностей системы МЦР в условиях воздействия неблагоприятных

Таблица 2

Исходные значения коэффициентов корреляции между различными компонентами амплитудно-частотного спектра МЦР левой и правой сторон измерения

Table 2

The initial values of the correlation coefficients between the various components of the MCR amplitude-frequency spectrum on the left and right sides of the measurement

Исход	ПМлев	Нлев	Млев	Длев	Слев	ПМпр	Нпр	Мпр	Дпр	Спр
ПМлев	1	0,50*	-0,43*	-0,10	-0,30*	0,91**	-0,21	-0,18	-0,25	-0,26
Нлев	0,50*	1	0,08	-0,09	-0,43*	0,44*	-0,06	-0,23	-0,10	-0,31*
Млев	-0,43*	0,08	1	0,07	-0,17	-0,33*	0,47*	0,49*	0,27	-0,25
Длев	-0,10	-0,09	0,07	1	-0,39*	-0,18	0,34*	0,04	0,76**	-0,59*
Слев	-0,30*	-0,43*	-0,17	-0,39*	1	-0,20	0,09	0,22	-0,50*	0,50*
ПМпр	0,91**	0,44*	-0,33*	-0,18	-0,20	1	-0,20	-0,26	-0,34*	-0,44*
Нпр	-0,21	-0,06	0,47*	0,34*	0,09	-0,20	1	0,76**	0,59*	-0,29
Мпр	-0,18	-0,23	0,49*	0,04	0,22	-0,26	0,76**	1	0,33*	0,13
Дпр	-0,25	-0,10	0,27	0,76**	-0,50*	-0,34*	0,59*	0,33*	1	-0,44*
Спр	-0,26	-0,31**	-0,25	-0,59*	0,50**	-0,44*	-0,29	0,13	-0,44*	1

факторов внешней среды посвящены многочисленные исследования [1, 2, 5]. Гипоксические тренировки в последние три десятилетия становятся все более распространенным подходом к немедикаментозной профилактике и реабилитации пациентов с различными заболеваниями, а также в спортивной медицине [14–17]. Предпринимаются попытки индивидуализировать подбор процедур гипокситренировок на основе предварительного проведения гипоксического теста, адаптированные для специальных групп спортсменов [17]. Результаты настоящих исследований показали, что реакции системы МЦР на гипоксическую нагрузку отличались большой индивидуальностью у разных испытуемых. Это подтверждает обоснованность подходов к оценке индивидуальной устойчивости к гипоксии, применяемых различными исследователями [16–18]. Так, исследования О. С. Глазачева и др. [18] были направлены на разработку индикаторов индивидуальной устойчивости к гипоксии у детей 8–12 лет. В ходе проведенных исследований авторами были выявлены индивидуальные типы реакции на гипоксию. Предложенный тест может применяться в качестве дополнительного диагностического инструмента в оценке адаптационных возможностей и неспецифической реактивности детского организма.

Исследования особенностей формирования индивидуальной устойчивости системы МЦР в период от младшего школьного до юношеского возраста в норме и его адаптация к изменяющимся условиям внешней и внутренней среды представляет интерес как с практической, так и с теоретической точки зрения, поскольку механизмы регуляции показателей МЦР имеют системный характер и они до настоящего времени окончательно не выяснены. В работах [19, 20] авторы исследовали состояние МЦР и ее регуляторных механизмов в группах лиц обоего пола на разных возрастных этапах: младшего школьного, подросткового и юношеского возраста. Обнаружены возрастные и половые различия этих показателей,

свидетельствующие о возрастных преобразованиях регуляторных механизмов системы МЦР.

Результаты наших исследований показали, что важную роль в поддержании устойчивого функционирования целостной системы МЦР играют особенности лево-правосторонней асимметрии ауторегуляторных процессов, поддерживающих баланс между кровотоком симметричных регионов. Исследования на животных [21] показали, что лево-правосторонняя асимметрия показателей МЦР и корреляционных взаимосвязей между различными составляющими спектра флуктуаций кровотока симметричных сторон парных органов присутствует на разных этапах их постнатального онтогенеза. В работе [22] авторы исследовали показатели МЦР на дистальных сегментах верхних и нижних конечностей у детей 6–7 лет. Результаты исследований обнаружили гендерные различия в протекании регуляторных перестроенных процессов в системе МЦР на различных этапах онтогенетического развития, а также особенности правосторонней асимметрии показателей МЦР на дистальных сегментах верхних и нижних конечностей.

Результаты наших исследований показали, что кратковременные гипоксические воздействия приводят к изменениям в структуре корреляционных взаимосвязей между различными компонентами амплитудно-частотного спектра флуктуаций микрокровотока симметричных областей МЦР: как к усилению взаимосвязей, так и к их ослаблению. В ранее полученных исследованиях показано, что моделирование острой кратковременной гипоксии влечет за собой активацию нейрогенных симпатобусловленных вазомоторных механизмов [3]. Можно предположить, что различные ответы МЦР на кратковременное гипоксическое воздействие, проявляющиеся как в усилении взаимосвязей, так и в их ослаблении, связаны с различным типом реагирования: чувствительность-устойчивость к гипоксии. Однако механизмы, лежащие в основе этих явлений, до сих пор не ясны и требуют дальнейших экспериментальных исследований.

Таблица 3

Значения коэффициентов корреляции между различными компонентами амплитудно-частотного спектра МЦР левой и правой стороны измерения после гипоксических нагрузок

Table 3

The values of the correlation coefficients between the various components of the amplitude-frequency spectrum of the MCR of the left and right sides after hypoxic loads

Гипокс	ПМлев	Нлев	Млев	Длев	Слев	ПМпр	Нпр	Мпр	Дпр	Спр
ПМлев	1	-0,15	-0,18	0,27	-0,11	0,65**	0,29	0,08	0,17	-0,35*
Нлев	-0,15	1	0,16	0,26	-0,70**	-0,15	0,57*	0,10	0,42*	-0,46*
Млев	-0,18	0,16	1	-0,29	-0,04	-0,64**	0,33*	0,91**	0,18	0,46*
Длев	0,27	0,26	-0,29	1	-0,64**	0,35*	0,32*	-0,09	0,74**	-0,69**
Слев	-0,11	-0,70**	-0,04	-0,64**	1	-0,32*	-0,59*	-0,20	-0,61**	0,73**
ПМпр	0,65**	-0,15	-0,64**	0,35*	-0,32*	1	-0,06	-0,39*	-0,07	-0,54*
Нпр	0,29	0,57*	0,33*	0,32*	-0,59*	-0,06	1	0,50*	0,63**	-0,57*
Мпр	0,08	0,10	0,91**	-0,09	-0,20	-0,39*	0,50*	1	0,41*	0,16
Дпр	0,17	0,42*	0,18	0,74**	-0,61**	-0,07	0,63**	0,41*	1	-0,64**
Спр	-0,35*	-0,46*	0,46*	-0,69**	0,73**	-0,54*	-0,57*	0,16	-0,64**	1

Результаты настоящих исследований показали, что корреляционно-спектральный анализ взаимосвязей между показателями МЦР слева и справа позволяет оценивать лево-правосторонний баланс МЦР и является информативным инструментом оценки устойчивости регионарного кровообращения. В результате проведенной работы впервые сформулировано положение о том, что под влиянием кратковременной гипоксической нагрузки в системе МЦР происходит перераспределение баланса между регуляторными влияниями различных компонент сосудистого тонуса симметричных областей головы с целью поддержания устойчивого функционирования целостной системы МЦР. Это означает, что для комплексной персонифицированной оценки устойчивости системы МЦР к гипоксии и другим негативным экологическим факторам внешней среды необходимо проводить синхронную регистрацию показателей МЦР симметричных областей правой и левой сторон наблюдения и оценивать перераспределение баланса между регуляторными влияниями симметричных регионов.

Выводы

1. Реакции системы МЦР на гипоксическую нагрузку отличались большой индивидуальностью у разных испытуемых. Наиболее распространенным типом реакций было увеличение перфузии как справа, так и слева; менее распространенные реакции – увеличение перфузии справа и уменьшение слева; еще меньше реакций уменьшения перфузии с обеих сторон измерения, и совсем отсутствовали реакции $\Delta\text{ПМлев} < 0$, $\Delta\text{ПМпр} > 0$.

2. Установлено наличие сильной положительной корреляционной взаимосвязи между исходными значениями перфузии слева и справа, которая ослабевает под влиянием гипоксических нагрузок.

3. Изменения перфузии симметричных височных областей головы под влиянием гипоксических нагрузок коррелируют отрицательно с исходными зна-

чениями перфузии как одноименной, так и противоположной стороны измерения.

4. Под влиянием кратковременной гипоксической нагрузки в системе МЦР происходит перераспределение баланса между регуляторными влияниями различных компонент сосудистого тонуса симметричных областей головы с целью поддержания устойчивого функционирования целостной системы МЦР.

5. Одноканальные регистрации перфузии в одной точке и простая констатация направленности изменений этих показателей в сторону увеличения или уменьшения являются малоинформативными. Для комплексной персонифицированной оценки устойчивости системы МЦР к гипоксии и другим негативным экологическим факторам внешней среды необходимо проводить синхронную регистрацию показателей МЦР симметричных областей правой и левой сторон наблюдения и оценивать перераспределение баланса между регуляторными влияниями симметричных регионов.

Этические нормы / Ethical standards

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Локальным биоэтическим комитетом ННН нормальной физиологии им. П. К. Анохина (Москва) / All studies were conducted in accordance with the principles of biomedical ethics formulated in the Helsinki Declaration of 1964 and its subsequent updates, and approved by the local Bioethical Committee of the P. K. Anokhin Institute of Normal Physiology (Moscow).

Информированное согласие / Informed consent

Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования. / Each participant of the study

submitted a voluntary written informed consent signed by him after explaining to him the potential risks and benefits, as well as the nature of the upcoming study

Финансирование / Financing

Работа выполнена за счет средств Федерального бюджета РФ в рамках выполнения Государственных заданий ФГБНУ «НИИНФ им. П. К. Анохина» и Института клинической медицины имени Н. В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И. М. Сеченова (Сеченовский университет, Москва) / The work was carried out at the expense of the Federal Budget of the Russian Federation as part of the fulfillment of State tasks of the P. K. Anokhin Research Institute and the N. V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine of the I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University, Moscow)

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Литература / References

1. Погоньшьева И. А., Погоньшев Д. А. Факторы риска снижения устойчивости к кислородной недостаточности у студентов Среднего Приобья // *Вестн. Нижневарт. гос. ун-та.* – 2015. – Т. 3. – С. 78–84. [Pogonyshcheva IA, Pogonyshchev DA. Faktory riska snizhenii ustoichivosti k kislorodnoi nedostatochnosti u studentov Srednego Priob'ya // *Vestnik Nizhnevartovskogo gos. un-ta.* 2015;(3):78–84. (In Russ.)].
2. Экология человека / В. С. Соловьев, И. А. Погоньшьева, Е. С. Овечкина, Д. А. Погоньшев. – Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2008. [Solov'ev VS, Pogonyshcheva IA, Ovechkina ES, Pogonyshchev DA. *Ekologiya cheloveka.* Khanty-Mansiysk, Poligrafist, 2008. (In Russ.)].
3. Глазачев О. С., Дудник Е. Н. Особенности реактивности сосудов микроциркуляторного русла практически здоровых людей при моделировании острой умеренной гипоксии и гипероксии // *Физиология человека.* – 2013. – Т. 39, № 4. – С. 74. [Glazachev OS, Dudnik EN. Microcirculatory reactivity features in apparently healthy individuals during acute moderate hypoxia and hyperoxia modeling // *Human Physiology.* 2013;39(4):400–406. (In Russ.)]. Doi: 10.1134/S0362119713030080.
4. Зеленкова И. Е., Зоткин С. В., Корнеев П. В. и др. Вариабельность гипоксической устойчивости у спортсменов различной квалификации и спортивной специализации // *Спортивная медицина: наука и практика.* – 2016. – Т. 6, № 4. – С. 5–10. Doi: 10.17238/ISSN2223-2524.2016.4.5. [Zelenkova IE, Zotkin SV, Korneev PV, Koprov SV, Al'myashev DKh, Glazachev OS, Grushin AA. Variabel'nost' gipoksicheskoi ustoichivosti u sportmenov razlichnoi kvalifikatsii i sportivnoi spetsializatsii // *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika.* 2016;6(4):5–10. (In Russ.)].
5. Литвин Ф. Б. Комплексное влияние экологических факторов на состояние системы микроциркуляции // *Физиология человека.* – 2010. – Т. 36, № 6. – С. 84–94. [Litvin FB. Integrated influence of environmental factors on the state of microcirculation. *Human Physiology.* 2010;36(6):691–699. Doi: 10.1134/S0362119710060101. (In Russ.)].
6. Мезентцева Л. В. Анализ показателей микроциркуляции симметричных органов человека в условиях изменения артериального давления // *Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова.* – 2020. – Т. 10, № 7. – С. 916–924.

[Mezentseva L.V. Analiz pokazatelei mikrotsirkulyatsii simmetrichnykh organov cheloveka v usloviyakh izmeneniya arterial'nogo davleniya. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal im IM. Sechenova.* 2020;106(7):916–924. (In Russ.)]. Doi: 10.31857/S0869813920070043.

7. Михайличенко Л. А. Показатели микроциркуляции парных органов и тканей экспериментальных животных в норме // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* – 2007. – Т. 6, № 21. – С. 164–167. [Mikhailichenko LA. Pokazateli mikrotsirkulyatsii parnykh organov i tkanei eksperimental'nykh zhivotnykh v norme // *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya.* 2007;6(21):164–167. (In Russ.)].

8. Benedicic M, Bernjak A, Stefanovska A, Bosnjak R. Continuous wavelet transform of laser-Doppler signals from facial microcirculation reveals vasomotion asymmetry // *Microvascular Research.* 2007;74(1):45–50.

9. Mikhailichenko LA, Tikhomirova IA. Parameters of microcirculation in paired formations after single aspirin administration: laser Doppler flowmetry data // *Bull. Exp. Biol. Med.* 2011; 151(1):16–21. Doi: 10.1007/s10517-011-1249-4.

10. Mezentseva LV, Pertsov SS. Synchronous Changes in Microcirculation Parameters of the Upper Limbs in Asymmetric Physical Loads // *Human Physiology.* 2020;46(6):671–676. Doi: 10.1134/S036211972004009X 2021.

11. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови: метод. пособие для врачей / В. И. Козлов, Г. А. Азизов, О. А. Гурова, Ф. Б. Литвин. М., 2012. – С. 32. [Kozlov VI, Azizov GA, Gurova OA, Litvin FB. *Lazernaja dopplerovskaja floumetrija v ocenke sostojaniya i rasstrojstv mikrocirkuljacii krovi. Metodicheskoe posobie dlja vrachej.* Moscow, 2012:32. (In Russ.)].

12. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: рук. для врачей. – М.: Либроком, 2013. – С. 496. [Krupatkin AI, Sidorov VV. *Functional diagnostics of microcirculatory-tissue systems: oscillations, information, nonlinearity: a guide for doctors.* Moscow, Librokom, 2013:496. (In Russ.)].

13. Козлов В. И., Морозов М. В., Гурова О. А. ЛДФ-метрия кожного кровотока в различных областях тела // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* – 2012. – Т. 11, № 1. – С. 58–61. [Kozlov VI, Morozov MV, Gurova OA. Laser Doppler fluxmetry of the skin microcirculation in different areas of the body // *Regionarnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya.* 2012;11(1):58–61 (In Russ.)].

14. Mateika JH, El-Chami M, Shaheen D, Ivers B. Intermittent hypoxia: a low-risk research tool with therapeutic value in humans // *J Appl Physiol.* 2015;118(5):520–32. Doi: 10.1152/japplphysiol.00564.2014.

15. Burykh EA, Soroko SI. Differences in the strategies and potentials of human adaptation to hypoxia // *Human Physiology.* 2007;33(3):309–319. Doi: 10.1134/S0362119707030085.

16. Бурых Э. А. Индивидуальные особенности потребления кислорода организмом человека при гипоксии // *Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова.* – 2007. – Т. 93, № 11. – С. 1292–1307. [Burykh EA. Individual'nye osobennosti potrebleniya kisloroda organizmom cheloveka pri gipoksii // *Ross. fiziol. zhurn. im. I. M. Sechenova.* 2007;93(11):1292–1307. (In Russ.)].

17. Малеев Д. О. Определение индивидуальной устойчивости организма лыжников-гонщиков высокой квалификации к острой гипоксии // *Человек. Спорт. Медицина.* – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 19–23. Doi: 10.14529/ozfk150403. [Maleev DO. Defining a highly skilled ski-racer's body individual resistance to acute hypoxia // *Chelovek. Sport. Meditsina = Human. Sport. Medicine.* 2015;15(4):19–23. (In Russ.)].

18. Глазачев О. С., Геппе Н. А., Тимофеев Ю. С. и др. Индикаторы индивидуальной устойчивости к гипоксии – путь оптимизации применения гипоксических тренировок у детей // *Рос. вестн. перинатологии и педиатрии*. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 78–84. [Glazachev OS, Geppe NA, Timofeev YUS, Samarceva VG, Dudnik EN, Zapara MA, CHEbysheva SN. Indikatory individual'noj ustojchivosti k gipoksii – put' optimizacii primeneniya gipoksicheskikh trenirovok u detej. Rossijskij vestnik perinatologii i pediatrii. 2020;65:(4):78–84. (In Russ.)]. Doi: 10.21508/1027-4065-2020-65-4-78-84.

19. Тихомирова И. А., Бабошина Н. В., Терехин С. С. Возможности метода лазерной доплеровской флоуметрии в оценке возрастных особенностей функционирования системы микроциркуляции // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. – 2018. – № 17 (3). – С. 80–86. [Tikhomirova IA, Baboshina NV, Terekhin SS. LDF method microcirculation system functioning. Regional blood circulation and microcirculation. 2018;17(3):80–86. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-80-86.

20. Baboshina NV. Parameters of microcirculation in both sexes at different ages // *Human Physiology*. 2018;44(4):466–473. Doi: 10.1134/S0362119718010048.

21. Mikhailichenko L. A., Mezentseva L. V. Correlation and spectral analysis of vascular tone regulator mechanisms in paired formations during postnatal ontogenesis in rats // *Bull. Exp. Biol. Med.* 2015;158(3):308–312. Doi: 10.1007/s10517-015-2748-5.

22. Оценка состояния микроциркуляции у детей 6–7 лет по данным лазерной доплеровской флоуметрии / В. И. Козлов, В. Н. Сахаров, О. А. Гурова, В. В. Сидоров // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 46–53. [Kozlov VI, Saharov VN, Gurova OA, Sidorov VV. Ocenka sostoyaniya mikrocirkulyacii u detej 6–7 let po dannym lazernoj dopplerovskoj floumetrii // *Regionar. krovoobrashchenie i mikrocirkulyaciya*. 2021;20(3):46–53. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2021-20-3-46-53.

Информация об авторах

Мезенцева Лариса Валентиновна – д-р биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории системных механизмов эмо-

ционального стресса, НИИ нормальной физиологии им. П. К. Анохина, Москва, Россия, e-mail: l.v.mezentseva@mail.ru.

Дудник Елена Николаевна – канд. биол. наук, доцент кафедры нормальной физиологии, Первый МГМУ им. И. М. Сеченова, Москва, Россия, e-mail: Elenad72@list.ru.

Никинина Екатерина Валерьевна – канд. биол. наук, младший научный сотрудник НИИ нормальной физиологии им. П. К. Анохина, ассистент кафедры нормальной физиологии, Первый МГМУ им. И. М. Сеченова, Москва, Россия, e-mail: nikenina@mail.ru.

Запара Максим Андреевич – аспирант, Первый МГМУ им. И. М. Сеченова, Москва, Россия, e-mail: mzapara4@mail.ru.

Самарцева Влада Германовна – аспирант, Первый МГМУ им. И. М. Сеченова, Москва, Россия, e-mail: vladasamartseva@yandex.ru.

Хусаинов Ильдар Русланович – студент, Первый МГМУ им. И. М. Сеченова, Москва, Россия, e-mail: ildar.khusainov2013@yandex.ru.

Authors information

Mezentseva Larisa V. – Dr. Biol. Sciences, senior researcher of system mechanisms of emotional stress Laboratory Anokhin Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia, e-mail: l.v.mezentseva@mail.ru.

Dudnik Elena N. – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Normal Physiology of the I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia, e-mail: Elenad72@list.ru.

Nikenina Ekaterina V. – Cand. of Biol. Sciences, junior researcher of the P. K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, assistant of the Department of Normal Physiology of the I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia, e-mail: nikenina@mail.ru.

Zapara Maxim A. – postgraduate student of the First Sechenov Moscow State Medical University, e-mail: mzapara4@mail.ru.

Samartseva Vlada G. – postgraduate student of the First Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia, e-mail: vladasamartseva@yandex.ru.

Khusainov Ildar Ruslanovich – student of the First Sechenov Moscow State Medical University, Moscow, Russia, e-mail: ildar.khusainov2013@yandex.ru.