

УДК 616-005;616.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2019-18-4-37-44

Л. В. МЕЗЕНЦЕВА

Особенности проявления функциональной асимметрии показателей микроциркуляции при физических нагрузках на верхние конечности

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П. К. Анохина» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Москва, Россия
125315, Россия, Москва, Балтийская ул., д. 8
e-mail: l.v.mezentseva@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.05.19; принята к печати 25.10.19

Резюме

Цель – изучение функциональной асимметрии колебательных процессов микроциркуляторного русла при физических нагрузках на верхние конечности. **Материал и методы.** Измерения параметров микроциркуляции проведены у 5 здоровых добровольцев (мужчины 50–55 лет) методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Датчики ЛДФ-сигнала устанавливали на симметричных сторонах нижних частей правого и левого плеча в точках, расположенных на 3 см выше локтевого сгиба. Физические нагрузки представляли собой махи левой или правой рукой в положении стоя в течение 1 мин. Измерения проводили в 3 состояниях: 1 – исходное состояние, 2 – сразу после физических нагрузок, 3 – спустя 5 мин после прекращения нагрузок. Оценивали изменения среднего значения перфузии и составляющих амплитудно-частотного спектра флуктуаций кровотока (миогенной, нейрогенной, дыхательной и сердечной), а также корреляционные взаимосвязи между изменениями всех показателей правой и левой сторон наблюдения. **Результаты.** Обнаружена асимметрия изменений показателей микроциркуляции и корреляционных взаимосвязей между ними под влиянием физических нагрузок на верхние конечности. Показано, что как при левых, так и при правых махах изменяются показатели микроциркуляции как левой, так и правой стороны измерения, причем изменения слева более выражены, чем справа. Показано, что при левых махах кровотока и слева, и справа возрастает, а при правых – снижается. После нагрузок правая сторона восстанавливается медленнее, чем левая. **Выводы.** Полученные данные иллюстрируют специфичность регуляции микрокровоотока парных органов, обусловленную наличием функциональной асимметрии. Физиологические механизмы, лежащие в основе этой асимметрии, требуют дальнейших экспериментальных и клинических исследований.

Ключевые слова: микроциркуляция, асимметрия, лазерная доплеровская флоуметрия

Для цитирования: Мезенцева Л. В. Особенности проявления функциональной асимметрии показателей микроциркуляции при физических нагрузках на верхние конечности. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2019;18(4):37–44. Doi: 10.24884/1682-6655-2019-18-4-37-44.

UDC 616-005;616.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2019-18-4-37-44

L. V. MEZENTSEVA

Specificity of manifestation of functional asymmetry microcirculation parameters at physical loads on the upper limbs

Research Institute of Normal Physiology Anokhin, Russia, Moscow
8 Baltiyskaya street, Moscow, Russia, 125315
e-mail: l.v.mezentseva@mail.ru

Received 18.05.19; accepted 25.10.19

Summary

Purpose – the study the functional asymmetry of oscillatory processes of microcirculatory bed at physical loads on the upper limbs. **Material and methods.** Microcirculation parameters were measured in 5 healthy volunteers (men aged 50–55 years) by laser Doppler flowmetry (LDF). LDF signal sensors were fixed symmetrically on the lower parts of the right and left shoulders (3 cm above the elbow bend). Physical exercise consisted of machs left or right hand in the standing position for 1 min. Measurements were performed in 3 conditions: 1 – initial state, 2 – immediately after exercise, 3 – 5 min after load termination The changes in the mean perfusion value and the components of the amplitude-frequency spectrum of blood flow fluctuations (myogenic, neurogenic, respiratory and cardiac), as well as the correlation between the changes in all parameters of the right and left sides of the observation were evaluated. **Results.** Asymmetry of changes in microcirculation parameters and correlations between them under the physical loads on the upper limbs was revealed. It is shown that both left and right machs change the microcirculation parameters of both the left and right sides, and the changes on the left are more pronounced than on the right. It is shown that after the left machs the blood flow on the left and right increases, and after the right machs – reduced. After loads the right side is recovering more slowly than the left. **Conclusions.** Our results illustrate the specific regulation of blood flow in micro vessels of paired organs, which is associated with functional asymmetry. The physiological mechanisms for this asymmetry require further experimental and clinical studies.

Keywords: microcirculation, asymmetry, laser Doppler flowmetry

For citation: Mezentseva L. V. Specificity of manifestation of functional asymmetry microcirculation parameters at physical loads on the upper limbs. Regional hemodynamics and microcirculation. 2019;18(4):37–44. (In Russ.). Doi: 10.24884/1682-6655-2019-18-4-37-44.

Введение

Проблеме функциональной асимметрии периферического отдела кровообращения посвящены многочисленные исследования, выполненные на различных животных [1–4]. Результаты экспериментальных исследований позволили выявить проявление морфофункциональной асимметрии в реакциях микрососудов животных, не зависящее от объекта исследования и характера тестирования [1]. В наших предыдущих исследованиях [5] с помощью математических методов нелинейного и корреляционно-спектрального анализа выявлены особенности лево-правосторонней асимметрии показателей микроциркуляции (МЦР) симметричных органов у человека. Для дальнейшего изучения физиологических механизмов ауторегуляции показателей МЦР необходимо знать динамику их изменения при различных внешних воздействиях, в том числе при физических нагрузках.

Поэтому **целью** работы явилось изучение особенностей проявления функциональной асимметрии показателей МЦР при физических нагрузках на верхние конечности.

Материал и методы исследования

Показатели МЦР измеряли у 5 здоровых добровольцев (мужчины 50–55 лет) в 3 состояниях:

- 1 – исходное состояние;
- 2 – сразу после физических нагрузок на верхние конечности;
- 3 – спустя 5 мин после прекращения нагрузок.

Все испытуемые были правшами, их исходное психоэмоциональное состояние было нормальное, исходные значения артериального давления находились в пределах нормы ($121/63 \div 147/80$ мм рт. ст.), частота сердечных сокращений – $56 \div 79$ уд./мин. Антропометрические и весовые показатели также находились в пределах нормы (рост – $164 \div 178$ см, вес – $63,7 \div 77,2$ кг). Измерения проводились в помещении с постоянной температурой окружающей среды ($23 \div 24$ °C). Физические нагрузки были асимметричными и представляли собой махи левой или правой рукой в положении стоя в течение 1 мин. Исходное положение: основная стойка, стопы на ширине плеч параллельно друг другу, руки опущены вдоль тела и расслаблены, пальцы слегка согнуты. Затем испытуемый на вдохе должен резко поднять одну руку вперед-вверх, после чего ее свободно опустить. При этом другая рука должна находиться опущенной вдоль тела в расслабленном состоянии. Махи совершались прямыми руками с максимальной амплитудой. Темп движений одинаковый у всех испытуемых и составлял – 30 махов в мин. Первая серия экспериментов включала в себя только махи левой рукой, вторая серия экспериментов включала в себя только махи правой рукой. Обе серии были независимы и проводились в разные дни. Измерения параметров флуктуаций микрокровотока проводили в положении сидя методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью прибора «ЛАКК-02» НПП «ЛАЗМА» – двухканальный. Датчики ЛДФ-сигнала фиксировали на наружной поверхности симметричных областей нижних частей правого и левого плеча в точках, расположенных на 3 см выше

локтевого сгиба. Синхронные измерения показателей МЦР слева и справа выполняли в дневное время суток 5 раз в сутки через каждые 3 ч в течение 5 дней. Итоговый объем выборки $N=125$ измерений. Частота дискретизации ЛДФ-сигнала – 20 Гц, интервал отсчетов 0,05 с, время записи – 2 мин.

Математическая обработка результатов измерений включала в себя как оценку статистических параметров МЦР каждого фрагмента (среднего значения перфузии ПМ, стандартного отклонения (σ) и коэффициента вариации $KV=(\sigma/\text{ПМ})100\%$), так и определение показателей амплитудно-частотного спектра колебаний, отражающих выраженность различных составляющих спектра [6, 7]: нейрогенного Н ($0,02 \div 0,06$ Гц), миогенного М ($0,06 \div 0,15$ Гц), дыхательного Д ($0,15 \div 0,4$ Гц) и сердечного С ($0,4 \div 1,6$ Гц). В соответствии с рекомендациями авторов работ [6, 7], анализу подвергались нормированные характеристики ритмов колебаний (амплитуда колебаний/ 3σ). Расчеты всех показателей МЦР проводили в условных (перфузионных) единицах с помощью программного обеспечения, прилагаемого к ЛДФ-анализатору [7]. Для количественной оценки влияния физических нагрузок на измеряемые показатели $X_i=\{\text{ПМ}, \text{Н}, \text{М}, \text{Д}, \text{С}\}$ рассчитывали их относительные изменения $\Delta X_i=[X_i(2)-X_i(1)]/X_i(1)$, где $X_i(1)$ – исходные значения каждого из исследуемых показателей (состояние 1) $X_i(2)$ – их значения сразу после нагрузок (состояние 2). Степень выраженности функциональной асимметрии оценивали по величине коэффициента асимметрии $KA=\text{ПМ}_{\text{лев}}/\text{ПМ}_{\text{прав}}$. Сопряженность между изменениями показателей МЦР левой и правой сторон измерения оценивали методом корреляционного анализа. С этой целью нами были рассчитаны корреляционные взаимосвязи $r(\Delta X_i, \Delta X_j)$ между изменениями всех показателей МЦР. Принималось, что при $|r|<0,4$ степень связи практически отсутствует; при $0,4<|r|<0,6$ – умеренная степень связи; при $0,6<|r|<1$ – сильная степень связи.

Статистический и корреляционный анализ изменений показателей МЦР проводили с помощью стандартных статистических методов, входящих в пакеты прикладных программ «Excel for Windows» (v. 6.0). Проверка выборок на нормальность проводилась по критерию асимметрии и эксцесса. Значимость различий между данными, полученными в исследуемых временных рядах, оценивали с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований показали, что асимметричные физические нагрузки вызывают изменения показателей МЦР не только одноименной, но и противоположной стороны наблюдения. Это иллюстрирует рис. 1, на котором показаны фрагменты записи флуктуаций микрокровотока симметричных областей правой и левой руки в исходном состоянии и сразу после махов левой (рис. 1, а, б) и правой (рис. 1, в, г) рукой. Из рис. 1, а можно видеть, что в исходном состоянии флуктуации ПМ правой и левой руки происходят примерно в одинаковом амплитудном диапазоне (средние значения $\text{ПМ}_{\text{лев}}$ и $\text{ПМ}_{\text{прав}}$ составляют

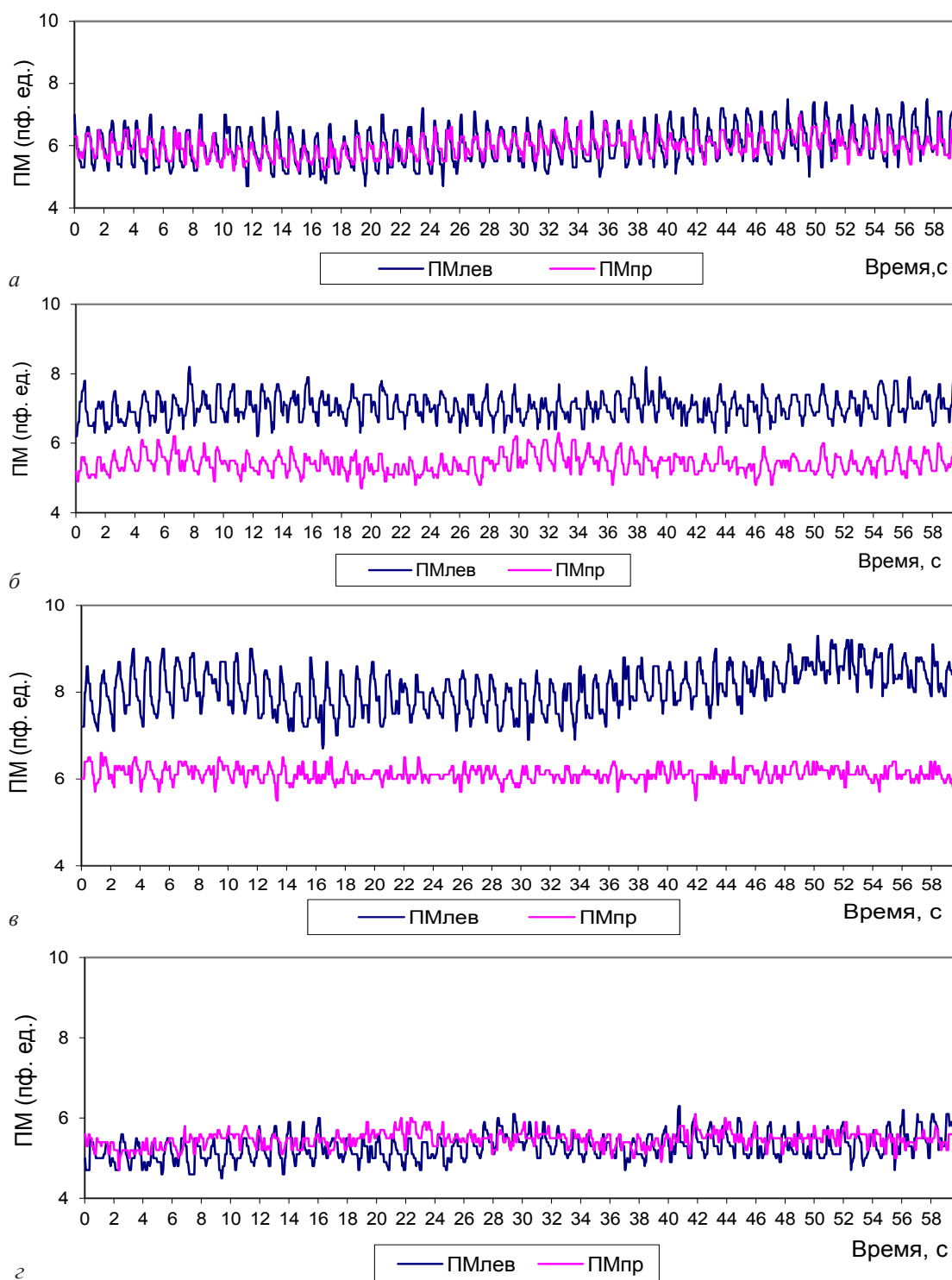


Рис. 1. Динамика синхронных изменений перфузии ПМ (пф. ед.) правой и левой руки одного испытуемого: а – исходное состояние до махов левой рукой; б – состояние сразу после махов левой рукой; в – исходное состояние до махов правой рукой; г – состояние сразу после махов правой рукой

Fig. 1. Dynamics of synchronous changes of perfusion ПМ (pf. ed.) right and left hands of one test subject: а – initial state before left machs; б – state immediately after left machs; в – initial state before right machs; г – state immediately after right machs

6,02 и 5,97 ед.), но вариабельность флуктуаций слева выше, чем справа (коэффициент вариации слева равен 9,78, а справа – 5,86). После махов левой рукой (рис. 1, б) имело место увеличение среднего значения показателя МЦР слева до 7,4 ед. при одновременном снижении его коэффициента вариации до 5,08 ед. Справа изменения показателей ПМ_{пр} и KV_{пр} были менее выраженные (ПМ_{пр}=5,42; KV_{пр}=5,20). Совсем другая картина наблюдалась у того же испытуемого

при махах правой рукой. Здесь в исходном состоянии (рис. 1, в) среднее значение показателя МЦР справа (6,11 ед.) было меньше, чем слева (8,08 ед.). Вариабельность микрокровотока справа (KV_{пр}=2,74) также исходно была ниже, чем слева (KV_{лев}=6,26 ед.). После махов правой рукой амплитуда флуктуаций кровотока левой руки снизилась до 5,28 ед., а справа снизилась до 5,47 ед. Приведенные на рис. 1 данные касаются одного испытуемого, но аналогичные зако-

Таблица 1

Средние значения показателей МЦР ($M \pm m$) до и после асимметричных физических нагрузок (махи левой или правой рукой)

Table 1

Average values of MCR ($M \pm m$) before and after asymmetric physical loads (machs left or right hand)

Вид эксперимента	Измерения	ПМ _{лев}	KV _{лев}	ПМ _{прав}	KV _{прав}	КА
Махи левой рукой	Исх. (N=125)	6,58±0,5	7,94±1,14	6,32±0,34	6,83±0,61	1,06±0,11
	После махов левой (N=125)	8,17±0,52	8,96±1,49	6,79±0,42	8,86±1,57	1,22±0,08
	Последействие (N=125)	7,97±0,7	6,73±0,80	6,90±0,60	9,0±1,56	1,19±0,14
Махи правой рукой	Исх. (N=125)	7,19±0,51	7,50±1,21	6,21±0,37	6,87±1,76	1,17±0,08
	После махов правой (N=125)	6,64±0,6	7,43±1,1	5,92±0,20	6,40±0,82	1,13±0,11
	Последействие (N=125)	6,67±0,6	4,92±0,72	5,73±0,34	6,32±1,00	1,20±0,16

номерности имели место и для других 4 испытуемых: при махах как левой рукой, так и правой рукой изменяются показатели МЦР как левой, так и правой стороны измерения. Причем, как правило, изменения показателей МЦР левой стороны более выражены, чем правой.

В табл. 1 приведены результаты статистического анализа (N=125) изменений показателей МЦР при махах левой и правой рукой. Из данных табл. 1 можно видеть, что в исходном состоянии средние значения ПМ и KV слева были чуть выше, чем справа, но разница была недостоверна. Сразу после левых махов

среднее значение показателя МЦР слева возрастало (с 6,58 до 8,17 ед.), а после правых махов – снижалось (с 7,19 до 6,64 ед.). То же самое имело место и для коэффициента вариации: при левых махах KV_{лев} возрастал, а при правых махах – немного снижался (с 7,50 до 7,43 ед.). Изменения показателей МЦР справа (ПМ_{пр} и KV_{пр}) имели такую же тенденцию: они возрастали при левых махах и снижались при правых махах. Из данных табл. 1 можно также видеть, что вызванные физической нагрузкой тенденции изменения показателей МЦР справа сохраняются в последствии, а слева имеет место тенденция к

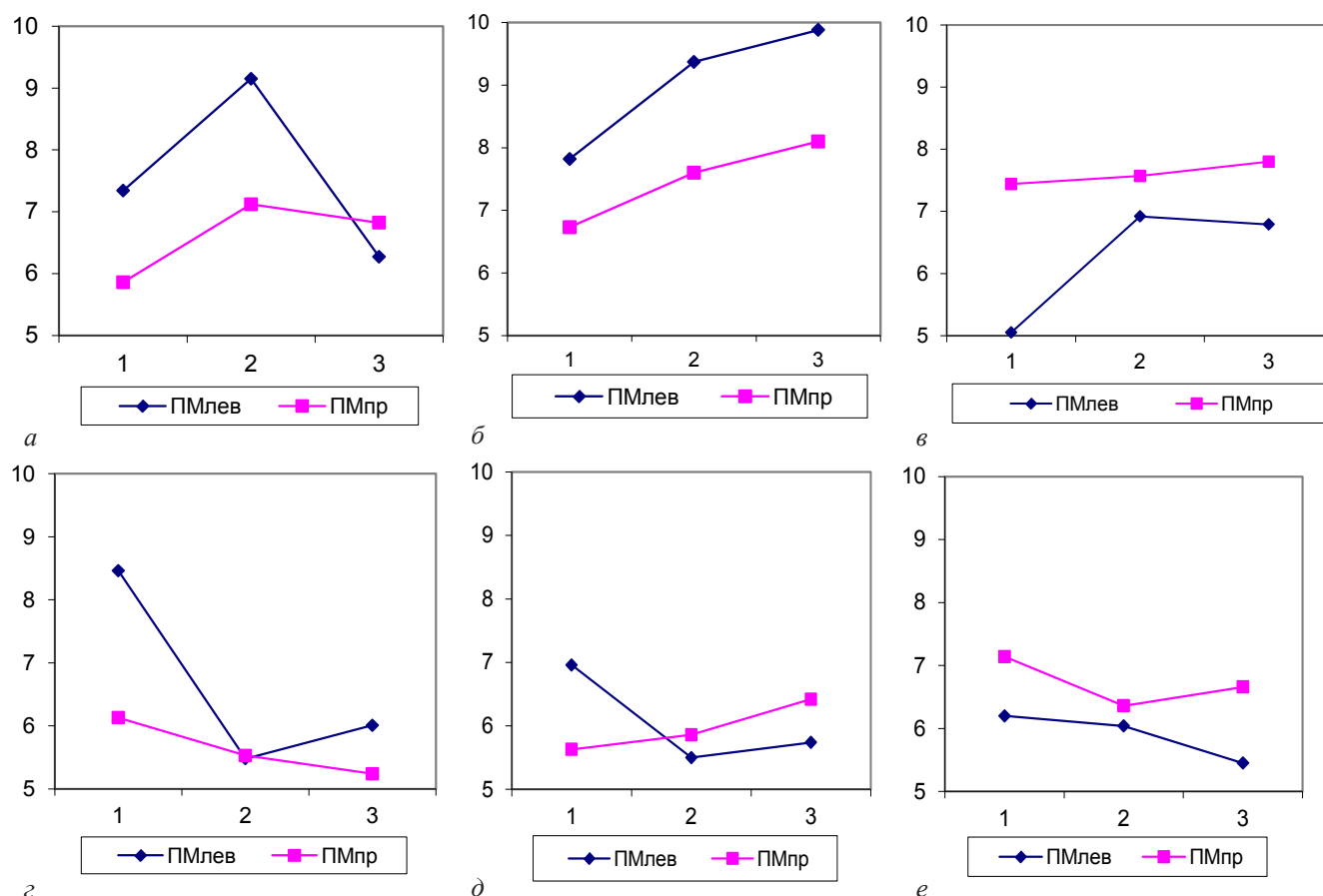


Рис. 2. Изменение среднего значения перфузии ПМ (пф. ед.) слева и справа у трех различных испытуемых: а–в – махи левой рукой; г–е – махи правой рукой. Оси абсцисс – различные фазы эксперимента: 1 – исходное состояние; 2 – сразу после махов; 3 – восстановление; оси ординат – среднее значение перфузии ПМ (пф. ед.)

Fig. 2. Changes in the mean perfusion PIM (pf. ed.) on the left and right in three different volunteers: а–в – mchs left hand; г–е – mchs right hand. X axis – the different phases of the experiment: 1 – initial state; 2 – after machs; 3 – recovery; Y axis – the mean perfusion PIM (pf. ed.)

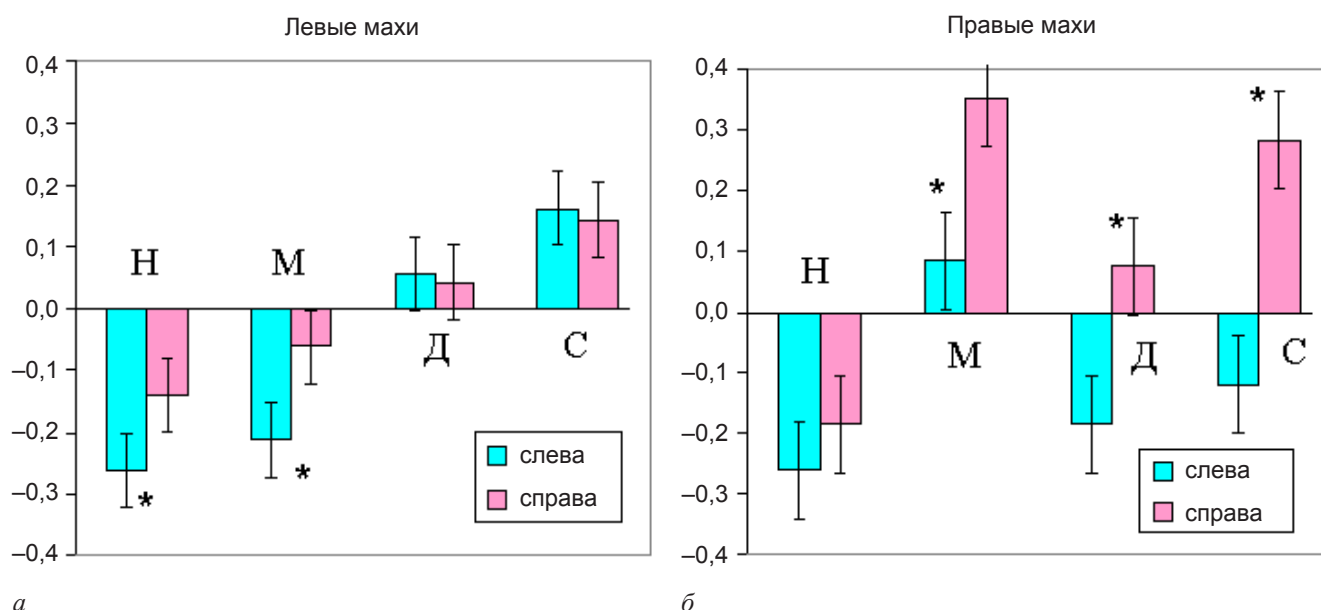


Рис. 3. Относительные изменения нейрогенной (ΔH), миогенной (ΔM), дыхательной (ΔD) и сердечной (ΔC) компоненты сосудистого тонуса при левых (а) и правых (б) махах ($N=125$, * – $P<0,05$)

Fig. 3. Relative changes in neurogenic (ΔH), myogenic (ΔM), respiratory (ΔD) and cardiac (ΔC) components of vascular tone at left (a) and right (б) machs ($N=125$, * – $P<0,05$)

более быстрому восстановлению кровотока, т. е. правая сторона восстанавливается медленнее, чем левая.

Результаты исследований показали, что особенности функциональной асимметрии микрокровотока при нагрузках на левые и правые верхние конечности отличаются большой индивидуальностью у разных испытуемых. Это относится не только к количественным, но и качественным характеристикам реакции микроциркуляторного русла. На рис. 2 показаны изменения показателей МЦР левой ($PM_{лев}$) и правой ($PM_{пр}$) сторон у трех различных испытуемых. Можно видеть, что в экспериментах с махами левой рукой у испытуемых 1 и 2 (рис. 2, а, б) в исходном состоянии $PM_{лев} > PM_{пр}$, а у испытуемого 3 (в) $PM_{лев} < PM_{пр}$. Сразу после махов левой рукой у всех испытуемых имеет место возрастание показателей МЦР, которое более выражено слева, чем справа. Но процесс восстановления у всех испытуемых происходит по-разному: в первом случае $PM_{лев}$ резко снижается, во втором – возрастает, а в третьем изменяется в сторону уменьшения незначительно. Что касается правой стороны, то $PM_{пр}$ также изменяется у всех испытуемых по-разному. Статистический анализ относительных изменений показателей МЦР у всех 5 испытуемых показал, что при махах левой рукой изменения слева более выражены, чем справа ($\Delta PM_{лев} = 0,20 \pm 0,02$, а $\Delta PM_{пр} = 0,06 \pm 0,05$). При правых махах происходит снижение показателей МЦР ($\Delta PM < 0$), причем изменения слева также более выражены, чем справа ($\Delta PM_{лев} = -0,12 \pm 0,05$, а $\Delta PM_{пр} = -0,05 \pm 0,04$). Таким образом, результаты исследований показали, что при всех видах махов реакция $PM_{пр}$ менее выраженная, чем $PM_{лев}$.

Следующим этапом исследований явилось изучение относительных изменений показателей амплитудно-частотного спектра колебаний микрокровотока и корреляционных взаимосвязей между этими изменениями. Результаты исследований (рис. 3) показали,

что нейрогенная компонента сосудистого тонуса, как слева, так и справа, сразу после махов уменьшается, причем в большей степени слева, чем справа. Аналогичная закономерность имеет место и для миогенной компоненты сосудистого тонуса при левых махах. Сердечная компонента сосудистого тонуса при левых махах, как слева, так и справа, возрастает, а дыхательная компонента возрастает незначительно. При правых махах, в отличие от левых, миогенная компонента возрастает, причем в большей степени справа, чем слева. Сердечная и дыхательная компоненты справа возрастают, а слева обе компоненты убывают. Из рис. 3 также можно видеть, что после махов правой рукой все компоненты сосудистого тонуса правой руки, в отличие от левой, возрастают, причем довольно значительно. Результаты анализа корреляционных взаимоотношений между изменениями показателей сосудистого тонуса симметричных сторон наблюдения приведены в табл. 2; 3.

Как можно видеть из данных табл. 2, при махах левой рукой сильное влияние на изменение компонент сосудистого тонуса оказывает сердечная компонента. Значимые корреляции $\Delta C_{лев}$ имеют с показателями как левой ($\Delta PM_{лев}$, $\Delta H_{лев}$, $\Delta M_{лев}$, $\Delta D_{лев}$), так и правой ($\Delta PM_{пр}$, $\Delta H_{пр}$) стороны измерения. При махах правой рукой (табл. 3) сердечная компонента $\Delta C_{лев}$ оказывает влияние на изменение показателей $\Delta PM_{лев}$, $\Delta PM_{пр}$, $\Delta M_{пр}$ и $\Delta C_{пр}$. Сердечная компонента правой руки при левых махах оказывает влияние на изменение дыхательной компоненты слева и справа, а также $\Delta PM_{пр}$. Более сильное влияние сердечная компонента правой руки оказывает на сосудистый тонус при правых махах (значимые корреляции $\Delta C_{пр}$ имеют место с $\Delta PM_{лев}$, $\Delta PM_{пр}$, $\Delta M_{лев}$, $\Delta M_{пр}$, $\Delta H_{пр}$, $\Delta C_{лев}$). Из данных табл. 2; 3 можно видеть, что значимые корреляционные взаимосвязи имеют место не только между одноименными, но и между противоположными сторонами измерения, что является свидетельством про-

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между изменениями показателей МЦР (ΔPM) и компонент сосудистого тонуса; нейрогенной (ΔH), миогенной (ΔM), дыхательной (ΔD) и сердечной (ΔC) левой и правой сторон наблюдения. Махи левой рукой

Table 2

Correlation coefficients between changes in MCR (ΔPM) and vascular tone components; neurogenic (ΔH), myogenic (ΔM), respiratory (ΔD) and cardiac (ΔC) left and right sides of the observation. Mahs left hand

Корреляция	$\Delta PM_{лев}$	$\Delta H_{лев}$	$\Delta M_{лев}$	$\Delta D_{лев}$	$\Delta C_{лев}$	$\Delta PM_{пр}$	$\Delta H_{пр}$	$\Delta M_{пр}$	$\Delta D_{пр}$	$\Delta C_{пр}$
$\Delta PM_{лев}$	1,00*	-0,55**	-0,11*	-0,05*	0,55**	0,03*	0,51**	0,15*	-0,02*	-0,07*
$\Delta H_{лев}$	-0,55**	1,00*	0,89***	-0,38*	-0,97***	-0,30*	0,71***	0,71***	0,20*	0,33*
$\Delta M_{лев}$	-0,11*	0,89***	1,00*	-0,40**	-0,83***	-0,44**	0,69***	0,95***	0,23*	0,36*
$\Delta D_{лев}$	-0,05*	-0,38*	-0,40**	1,00*	0,52**	-0,62***	-0,64***	-0,33*	0,48**	0,43**
$\Delta C_{лев}$	0,55**	-0,97***	-0,83***	0,52**	1,00*	-0,61***	-0,43**	0,09*	-0,17*	-0,29*
$\Delta PM_{пр}$	0,03*	-0,30*	-0,44**	-0,62***	-0,61***	1,00*	0,03*	-0,52**	-0,50**	-0,57**
$\Delta H_{пр}$	0,51**	0,71***	0,69***	-0,64***	-0,43**	0,03*	1,00*	0,20*	-0,46**	-0,39*
$\Delta M_{пр}$	0,15*	0,71***	0,95***	-0,33*	0,09*	-0,52**	0,20*	1,00*	0,15*	0,28*
$\Delta D_{пр}$	-0,02*	0,20*	0,23*	0,48**	-0,17*	-0,50**	-0,46**	0,15*	1,00*	0,99***
$\Delta C_{пр}$	-0,07*	0,33*	0,36*	0,43**	-0,29*	-0,57**	-0,39*	0,28*	0,99***	1,00*

Примечание: здесь и в табл. 3 * – $0 < |r| < 0,4$; ** – $0,4 \leq |r| < 0,6$; *** – $0,6 \leq |r| < 1$.

явления функциональной асимметрии показателей МЦР при исследуемых физических нагрузках. Кроме того, можно отметить наличие общих для левых и правых махов корреляций. К ним относятся сильные корреляционные связи между изменениями $\Delta PM_{пр}$ и $\Delta C_{лев}$, а также между $\Delta M_{лев}$ и $\Delta H_{лев}$. Общими для левых и правых махов являются также корреляционные взаимосвязи между изменениями показателей одноименных сторон наблюдения $\langle \Delta PM_{лев}, \Delta C_{лев} \rangle$, $\langle \Delta PM_{пр}, \Delta C_{пр} \rangle$, $\langle \Delta PM_{пр}, \Delta M_{пр} \rangle$, $\langle \Delta M_{лев}, \Delta D_{лев} \rangle$. Общие взаимосвязи, как для левых, так и для правых махов, имеют место также между показателями противоположных сторон наблюдения: $\langle \Delta PM_{лев}, \Delta H_{пр} \rangle$ и $\langle \Delta D_{лев}, \Delta D_{пр} \rangle$. В целом при махах правой рукой

общее число значимых корреляционных связей меньше, чем при левых махах (18 против 24). При махах левой рукой нами обнаружены более тесные корреляционные взаимосвязи между показателями МЦР одновременно со снижением нейрогенных влияний. Можно предположить, что при махах левой рукой более важное значение в регуляции показателей МЦР верхних конечностей имеют ауторегуляторные механизмы, которые преобладают над нейрогенными. Причем, как можно видеть из рис. 3, снижение нейрогенных влияний имеет место в большей степени для левой стороны. Изменение миогенной компоненты правой руки при левых махах также незначительное по сравнению с правыми махами, что также свиде-

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между изменениями показателей МЦР (ΔPM) и компонент сосудистого тонуса; нейрогенной (ΔH), миогенной (ΔM), дыхательной (ΔD) и сердечной (ΔC) левой и правой сторон наблюдения. Махи правой рукой

Table 3

Correlation coefficients between changes in MCR (ΔPM) and vascular tone components; neurogenic (ΔH), myogenic (ΔM), respiratory (ΔD) and cardiac (ΔC) left and right sides of the observation. Mahi right hand

Корреляция	$\Delta PM_{лев}$	$\Delta H_{лев}$	$\Delta M_{лев}$	$\Delta D_{лев}$	$\Delta C_{лев}$	$\Delta PM_{пр}$	$\Delta H_{пр}$	$\Delta M_{пр}$	$\Delta D_{пр}$	$\Delta C_{пр}$
$\Delta PM_{лев}$	1,00*	-0,39*	-0,36*	-0,33*	-0,40**	0,38*	-0,68***	-0,58**	0,37*	-0,48**
$\Delta H_{лев}$	-0,39*	1,00*	0,96***	0,94***	0,02*	-0,06*	0,14*	0,13*	-0,51**	0,28*
$\Delta M_{лев}$	-0,36*	0,96***	1,00*	0,83***	-0,10*	-0,04*	0,08*	0,22*	-0,27*	0,40**
$\Delta D_{лев}$	-0,33*	0,94***	0,83***	1,00*	0,22*	-0,15*	0,06*	-0,12*	-0,73***	0,00*
$\Delta C_{лев}$	-0,40**	0,02*	-0,10*	0,22*	1,00*	-0,92***	-0,23*	-0,47**	-0,39*	-0,59**
$\Delta PM_{пр}$	0,38*	-0,06*	-0,04*	-0,15*	-0,92***	1,00*	0,37*	0,41**	0,09*	0,47**
$\Delta H_{пр}$	-0,68***	0,14*	0,08*	0,06*	-0,23*	0,37*	1,00*	0,85*	-0,33*	0,73***
$\Delta M_{пр}$	-0,58**	0,13*	0,22*	-0,12*	-0,47**	0,41**	0,85***	1,00*	0,15*	0,97***
$\Delta D_{пр}$	0,37*	-0,51**	-0,27*	-0,73***	-0,39*	0,09*	-0,33*	0,15*	1,00*	0,20*
$\Delta C_{пр}$	-0,48**	0,28*	0,40**	0,00*	-0,59**	0,47**	0,73***	0,97***	0,20*	1,00*

тельствует о преобладании ауторегуляторных механизмов в формировании динамики микрокровоотока при левых махах.

Таким образом, результаты исследований выявили наличие функциональной асимметрии в регуляции параметров МЦР при асимметричных физических нагрузках на верхние конечности. Показано, что как при левых, так и при правых махах изменяются показатели МЦР как левой, так и правой стороны измерения. Причем, как правило, изменения показателей МЦР левой стороны более выражены, чем правой. Кроме того, при левых махах кровотока и слева, и справа возрастает, а при правых махах – снижается. Показано также, что правая сторона восстанавливается медленнее, чем левая. Результаты корреляционного анализа показали, что взаимосвязи между изменениями различных компонент сосудистого тонуса имеют место не только между показателями одноименных, но и противоположных сторон измерения, что также является свидетельством проявления функциональной асимметрии показателей МЦР. Реакции компонент сосудистого тонуса правой и левой сторон наблюдения также были различными как по величине, так и по направленности изменений той или иной компоненты. При левых махах сильное влияние на изменение компонент сосудистого тонуса оказывает сердечная компонента. Можно предположить, что функциональная асимметрия МЦР верхних конечностей объясняется анатомической асимметрией: слева находится сердце, и при всех физических нагрузках на верхние конечности в работу включается сердечная мышца. Несмотря на большое число исследований, посвященных изучению регуляции микрокровоотока [8–13], физиологические механизмы, лежащие в основе этих регуляторных процессов, до сих пор не ясны. Подавляющее большинство этих исследований касается сосудистой системы головного мозга. Показано, что сосудистая система мозга обладает способностью к ауторегуляции – поддержанию постоянства объемной скорости кровотока в ответ на изменения давления [14]. Но хорошо известно, что руки теснейшим образом связаны не только с областью грудной клетки и левосторонним расположением сердца, но и с головным мозгом и процессами, протекающими в нем. Из медицинской практики известно [15], что при физических нагрузках на конечности у пациентов изменяются показатели не только регионарного, но и церебрального кровотока. Обнаружена тесная функциональная взаимосвязь скорости кровотока поврежденной конечности и центров контралатеральной стороны головного мозга. Поэтому механизмы ауторегуляции регионарного и церебрального кровотока при физических нагрузках носят системный характер, относящийся к сердечно-сосудистой системе в целом. В ходе настоящих исследований нами впервые обнаружена взаимосвязь между изменениями показателей МЦР симметричных сторон верхних конечностей при физических нагрузках на них. Для выяснения физиологических механизмов, лежащих в основе регуляции микрокровоотока парных органов при физических нагрузках, требуются дальнейшие экспериментальные исследования.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Литература / References

1. Михайличенко Л. А. Показатели микроциркуляции парных органов и тканей экспериментальных животных в норме // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. – 2007. – Т. 6, № 1 (21). – С. 164–167. [Mikhailichenko LA. Indicators of microcirculation of paired organs and tissues of experimental animals in norma. *Regionarnoe krovoobrashchenie i micrtsirkulyatsiya*. 2007;6(1):164–167. (In Russ.)].
2. Михайличенко Л. А., Мезенцева Л. В. Корреляционно-спектральный анализ регуляторных механизмов тонуса сосудов парных образований в постнатальном онтогенезе крыс // Бюл. эксперим. биологии и медицины. – 2014. – Т. 158, № 9. – С. 287–292. [Mikhailichenko LA, Mezentseva LV. Correlation and spectral analysis of the regulation mechanisms of vessel tone of pair formations in postnatal ontogenesis in rats. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2014;158(9):287–293. (In Russ.)]. Doi: 10.1007/s10517-015-2748-5.
3. Mezentseva LV, Pertsov SS, Hugaeva VK. A Comparative Analysis of the Persistence of Capillary Blood Flow Oscillations in the Left and Right Rat Kidneys. *Biophysics*. 2016;61(4):656–660. Doi: 10.1134/S0006350916040163.
4. 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. Doi: 10.1016/j.mvr.2007.02.007.
5. Мезенцева Л. В. Нелинейный анализ флуктуаций показателей микроциркуляции сосудов симметричных органов у человека на основании данных лазерной доплеровской флоуметрии // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 67, № 4. – С. 33–39. [Mezentseva LV. Nonlinear analysis of fluctuations of microcirculation parameters in symmetrical organs of humans by laser doppler flowmetry. *Regionarnoe krovoobrashchenie i micrtsirkulyatsiya*. 2018;67(4):33–39. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-4-33-38.
6. Крупаткин А. И., Сидоров В. В., Кутенов И. А. Исследование информационных процессов в микрососудистых сетях с помощью вейвлет-анализа колебательных структур кровотока // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. – 2009. – Т. 8, № 3. – С. 21–31. [Krupatkin A. I., Sidorov V. V., Kutepov I. A. The study of information processes in microvascular nets by wavelet-analysis of oscillatory blood flow. *Regionarnoe Krovoobrashchenie i micrtsirkulyatsiya*. 2009;8(3):21–31. (In Russ.)].
7. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови: рук. для врачей / под ред. А. И. Крупаткина, В. В. Сидорова. – М.: Медицина, 2005. – 256 с. [Laser Doppler flowmetry of blood microcirculation. A guide for doctors / ed. A. I. Krupatkin, V. V. Sidorov. M., Medicine. 2005:256. (In Russ.)].
8. Goltsov A, Anisimova A, Zakharkina M, Krupatkin A, Sidorov V, Sokolovski S., Rafailov E. Bifurcation in Blood Oscillatory Rhythms for Patients with Ischemic Stroke: A Small Scale Clinical Trial using Laser Doppler Flowmetry and Computational Modeling of Vasomotion. *Frontiers in Physiology*. 2017;8:160. Doi: 10.3389/fphys.2017.00160.
9. Attwell D, Buchan AM, Charpak S, Lauritzen M, Macvicar BA, Newman EA. Glial and neuronal control of brain blood flow. *Nature*. 2010;468(7321):232–243. Doi: 10.1038/nature09613.

10. Koller A, Toth P. Contribution of Flow-Dependent Vasomotor Mechanisms to the Autoregulation of Cerebral Blood Flow. *J. Vasc. Res.* 2012;49:375–389. Doi: 10.1159/000338747.

11. Stefanovska A, Bracic M, Kvernmo HD. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser Doppler technique. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1999;46(10):1230–1239.

12. Cohen MA, Taylor JA. Short-term cardiovascular oscillations in man: measuring and modelling the physiologies. *The Journal of Physiology.* 2002;542(3):669–683. Doi: 10.1113/jphysiol.2002.017483.

13. Penzel T, Porta A, Stefanovska A, Wessel N. Recent advances in physiological oscillations. *Physiol Meas.* 2017;38(5):E1–E7. Doi: 10.1088/1361-6579/aa6780.

14. Attwell D, Buchan AM, Charpak S et al. Glial and neuronal control of brain blood flow. *Nature.* 2010;468(7321):232–243.

15. Щуров В. А. Динамика скорости кровотока по артериям костного регенерата конечностей и мозгового кровотока при выполнении функциональных проб и измене-

нии режима лечения // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 67, № 4. – С. 51–56. [Schurov VA. Dynamics of the speed of blood flow in the arteries of the bone regenerate of the limbs and in the brain arteries during functional tests and changes in the treatment mode. *Regionarnoe krovoobrashchenie i micrtsirkulyatsiya.* 2018;67(4):51–56. (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-4-51-56.

Информация об авторе

Мезентьева Лариса Валентиновна – д-р биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории системных механизмов эмоционального стресса ФГБНУ «НИИ нормальной физиологии им. П. К. Анохина», Москва, e-mail: l.v.mezentseva@mail.ru.

Author information

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