ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА, 2020, том 46, № 6, с. 101–107

УДК 612.13;616.1

СИНХРОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПРИ АСИММЕТРИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ НА НИХ

© 2020 г. Л. В. Мезенцева[1, *], С. С. Перцов[1, 2]

[1]*ФГБНУ Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П.К. Анохина, Москва, Россия*

[2]*ФГБОУ ВО Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова Минздрава РФ, Москва, Россия*

**E-mail: l.v.mezentseva@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.
После доработки 17.06.2019 г.
Принята к публикации 15.12.2019 г.

Впервые изучены синхронные изменения показателей микроциркуляции сосудов симметричных органов у человека при асимметричных физических нагрузках на верхние конечности. Измерения проведены на здоровых добровольцах методом лазерной допплеровской 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-х 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) симметричных сторон. Обнаружена асимметрия изменений показателей микроциркуляции под влиянием физических нагрузок. 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. Обнаружена нелинейная взаимосвязь между изменениями показателей микроциркуляции симметричных областей парных органов и частотой сердечных сокращений. Полученные данные иллюстрируют специфичность регуляции микрокровотока парных органов, обусловленную наличием функциональной асимметрии. Физиологические механизмы, лежащие в основе этой асимметрии, требуют дальнейших экспериментальных и клинических исследований.

Ключевые слова: микроциркуляция, асимметрия, лазерная допплеровская флоуметрия.

DOI: 10.31857/S0131164620040098

Микроциркуляция (МЦР) периферического отдела кровообращения изучена на широком спектре внутренних органов, конечностей, кожи и т.д. Описаны ее регионарные особенности [1, 2], а также изменения в результате различных внешних воздействий [3, 4], в том числе физических нагрузок [5]. Однако проблема парности в системе МЦР в этих работах не изучалась и этой проблеме посвящены исследования некоторых авторов [6–9]. Поэтому физиологические механизмы, лежащие в основе функциональной асимметрии микрокровотока парных органов, до сих пор не ясны. В наших предыдущих исследованиях [10] с помощью корреляционно-спектрального анализа выявлены особенности лево-правосторонней асимметрии показателей (МЦР) симметричных органов у человека. Для дальнейшего изучения механизмов регуляции микрокровотока парных органов необходимо знать динамику их изменения при различных внешних воздействиях, в том числе при физических нагрузках. Поэтому целью данной работы явилось изучение синхронных изменений показателей МЦР верхних конечностей при асимметричных физических нагрузках на них.

МЕТОДИКА

Показатели МЦР измеряли у 10 здоровых добровольцев (мужчины 50–55 лет) в 3-х состояниях: 1 – исходное состояние; 2 – сразу после физических нагрузок на верхние конечности; 3 – спустя 5 мин после прекращения нагрузок. Физические нагрузки были асимметричные 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 был резко поднять одну руку вперед-вверх, после чего ее свободно опустить. При этом другая рука должна была находиться опущенной вдоль тела в расслабленном состоянии. Махи совершали прямыми руками с максимальной амплитудой. Темп движений – 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 независимые и проводились в разные дни. Измерения параметров флуктуаций микрокровотока проводили в положении сидя методом лазерной допплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью прибора – двухканального "ЛАКК-02" (НПП "ЛАЗМА", Россия). 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 через каждые 3 ч в течение 5 дней. 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 [11]: 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). В соответствии с рекомендациями [11], анализу подвергали нормированные характеристики ритмов колебаний (амплитуда колебаний/3σ). Расчеты всех показателей МЦР проводили в условных (перфузионных) единицах с помощью программного обеспечения, прилагаемого к ЛДФ-анализатору. Для количественной оценки влияния физических нагрузок на измеряемые показатели Xi = {ПМ, Н, М, Д, С} рассчитывали их относительные изменения $\Delta Xi = [Xi(2) - Xi(1)]/Xi(1)$, где $Xi(1)$ – исходные значения каждого из исследуемых показателей (состояние 1), а $Xi(2)$ – их значения сразу после нагрузок (состояние 2). Степень выраженности функциональной асимметрии оценивали по величине коэффициента асимметрии КА = ПМлев/ПМпр. С целью изучения взаимосвязи между ЧСС и изменениями показателей МЦР (Xi) левой и правой сторон измерения методом корреляционного анализа оценивали сопряженность между изменениями этих показателей (r) (Xi, ЧСС). Считали, 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). Значимость различий между данными, полученными в исследуемых временных рядах, оценивали с использованием t-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследований показали, что асимметричные физические нагрузки вызывают изменения показателей МЦР не только одноименной, но и противоположной стороны наблюдения. На рис. 1 показаны фрагменты записи флуктуаций микрокровотока левой руки одного из испытуемых после правых махов и правой руки после левых махов. На рис. 1, *А* видно, что после махов правой рукой значительно снижается величина перфузии в левой руке, а после махов левой рукой (рис. 1, *Б*) снижается величина перфузии в правой руке, причем изменения перфузии слева более выражены, чем справа.

Анализ результатов измерений показал, 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 к качественным характеристикам реакции левого и правого микроциркуляторного русла. На рис. 2 показаны изменения показателей МЦР левой (ПМлев) и правой (ПМпр) сторон у двух различных испытуемых. В экспериментах с махами левой рукой у испытуемого 1 (рис. 2, *А*) в исходном состоянии ПМлев = ПМправ; у испытуемого 2 (рис. 2, *Б*) ПМпр > ПМлев. Сразу после левых махов у первого испытуемого ПМлев возрастает, а у второго – снижается, и эта тенденция сохраняется в последействии. После правых махов, наоборот, у первого испытуемого ПМлев снижается, а у второго – возрастает. В отличие от левой руки, изменения кровотока правой руки у обоих испытуемых имеют одинаковую направленность, эти изменения были менее выражены, чем ПМлев.

Таким образом, все испытуемые демонстрировали ярко выраженную лево-правостороннюю асимметрию реакции на физические нагрузки верхних конечностей с ярко выраженными индивидуальными особенностями, причем изменения перфузии слева более выражены, чем справа. Для выяснения причин индивидуальных особенностей проявления функциональной асимметрии

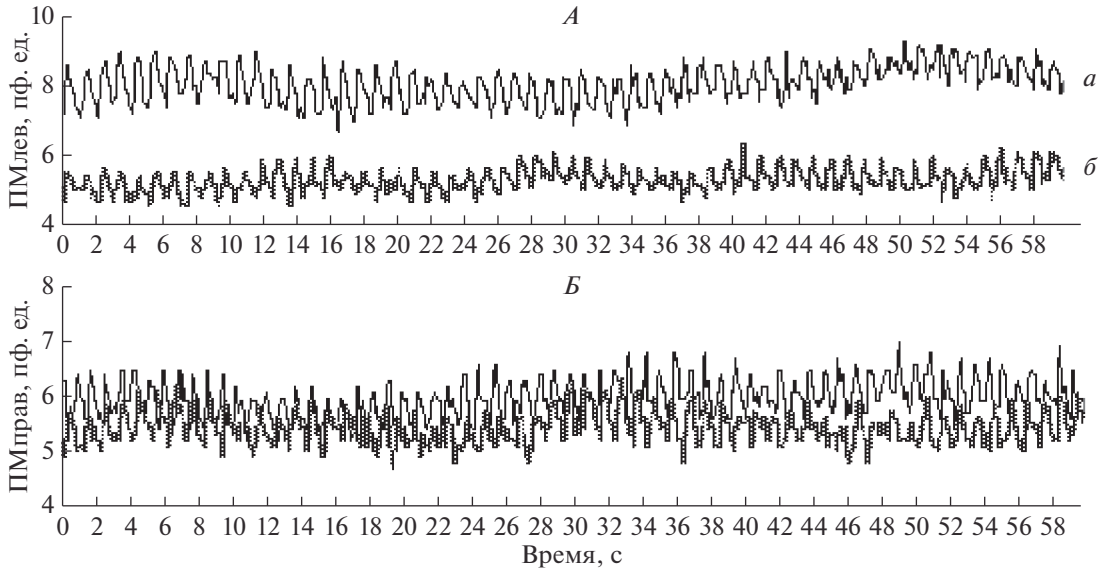

Рис. 1. Динамика синхронных изменений перфузии ПМ, пф. ед. правой и левой руки.
А – изменение ПМлев после правых махов, *Б* – изменение ПМправ после левых махов, *а* – исход, *б* – после махов.

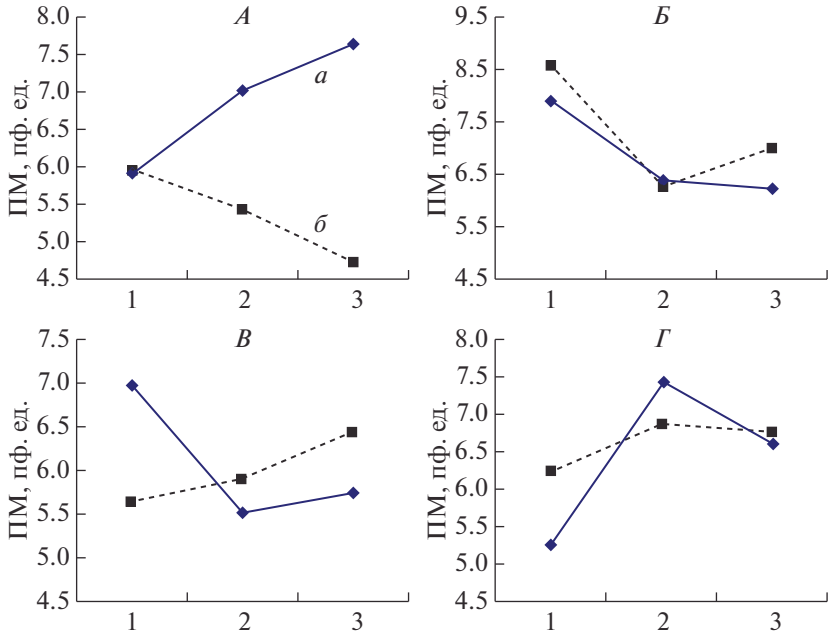

Рис. 2. Синхронные изменения перфузии левой (ПМлев) и правой (ПМправ) руки у двух различных испытуемых.
А, *Б* – махи левой рукой; *В*, *Г* – махи правой рукой. Ось абсцисс: 1 – исходное состояние, 2 – состояние после махов, 3 – восстановление. Ось ординат – величина перфузии ПМ, пф. ед. *А, В* – испытуемый 1 (ЧСС исх = 60.8 уд./мин); *Б*, *Г* – испытуемый 2 (ЧСС исх = 75.1 уд./мин). *а* – ПМлев, *б* – ПМправ.

при асимметричных физических нагрузках были рассчитаны количественные показатели относительных изменений показателей МЦР: $\Delta Xi = [Xi(2) - Xi(1)]/Xi(1)$, где $Xi(1)$ – исходные значения каждого из исследуемых показателей (состояние 1), а $Xi(2)$ – их значения сразу после нагрузок (состояние 2). Дальнейший анализ показал, что степень выраженности этих изменений зависит от исходных значений показателей МЦР. Был рассчитан коэффициент корреляции между исходным уровням перфузии и его относительным изменением после нагрузки, он оказался равным –0.693. Таким образом, результаты исследований подтверждают общебиологическую концепцию

Таблица 1. Исходные значения и относительные изменения ($M \pm m$) показателя перфузии, нейрогенной, миогенной, дыхательной и сердечной компонент спектра у испытуемых с низким и высоким исходным значением ЧСС сразу после физических нагрузок на верхние конечности

Вид нагрузки	Махи левой рукой				Махи правой рукой			
измерения	левая рука		правая рука		левая рука		правая рука	
показатель	Н	В	Н	В	Н	В	Н	В
ПМисх	6.6 ± 0.5	8.1 ± 0.8	6.3 ± 0.4^	9.7 ± 1.9	7.2 ± 0.5	7.7 ± 1.1	6.2 ± 0.4	8.2 ± 0.9
ΔПМ, %	19.7 ± 2.0*	−12.1 ± 1.9^	6.2 ± 0.5^	−20.6 ± 2.6	−12.1 ± 1.3*	26.8 ± 3.8^	−4.6 ± 4.0^	−18.6 ± 2.1
Нисх	14.8 ± 3.2^	7.6 ± 0.8	11.3 ± 2.4	7.1 ± 0.9	12.2 ± 2.7	7.2 ± 1.1	12.4 ± 3.1	7.1 ± 1.1
ΔН, %	−26.3 ± 3.2*, ^	−9.79 ± 1.3*	−13.9 ± 3.0^	1.1 ± 0.3	−26.1 ± 3.4^	−11.8 ± 1.9*	−18.4 ± 1.1^	−4.5 ± 0.8
Мисх	10.8 ± 4.6	7.09 ± 1.7	9.7 ± 3.5	7.3 ± 0.8	10.4 ± 2.8	7.4 ± 0.9	11.8 ± 2.4	7.9 ± 1.0
ΔМ, %	−21.2 ± 3.9*, ^	23.8 ± 3.5*	−6.2 ± 4.2^	18.0 ± 2.3	8.50 ± 3.2^, *	−38.0 ± 4.9	35.3 ± 1.1	28.0 ± 3.7
Дисх	5.2 ± 0.7	5.8 ± 0.8	6.3 ± 0.7	6.1 ± 0.9	5.41 ± 0.9	5.3 ± 0.6	5.8 ± 1.1	5.0 ± 0.9
ΔД, %	5.6 ± 0.9	10.2 ± 2.2	4.2 ± 1.2	12.2 ± 2.8	−18.5 ± 2.2*, ^	−6.8 ± 0.9*	7.6 ± 1.0^	39.6 ± 4.9
Сисх	29.9 ± 4.3	32.4 ± 3.8	28.0 ± 2.7	32.0 ± 4.1	20.6 ± 4.1	31.9 ± 4.0	28.1 ± 3.9	37.0 ± 4.5
ΔС, %	16.1 ± 1.0^	0.6 ± 0.1*	14.3 ± 0.9^	−3.1 ± 0.7	−11.9 ± 4.2*	8.5 ± 0.9^, *	28.3 ± 8.0^	−17.9 ± 2.1

Примечание: ПМ – показатель перфузии, Н – нейрогенная, М – миогенная, Д – дыхательная, С – сердечная компоненты спектра. Н – испытуемые с низким исходным значением ЧСС, В – испытуемые с высоким исходным значением ЧСС. * – $p < 0.05$ между показателями МЦР слева и справа. ^ – $p < 0.05$ между показателями МЦР у испытуемых из В и Н групп.

зависимости реакции на воздействие от исходного уровня показателя.

Кроме того, результаты проведенных исследований показали, что как направленность, так и степень выраженности этих изменений зависят от исходного значения ЧСС. Оказалось, что при махах левой рукой у испытуемых с относительно низкими исходными значениями ЧСС (< 70 уд./мин) ПМлев, как правило, возрастает (ΔПМ > 0), а ПМправ изменяется незначительно; у испытуемых с более высокими исходными значениями ЧСС (> 70 уд./мин) – как ПМлев, так и ПМправ, преимущественно убывают (ΔПМ < 0). Поэтому для дальнейшего анализа испытуемых разделили на 2 группы: первая группа ($n = 5$) – испытуемые с исходной ЧСС < 70 уд./мин (группа "Н"), вторая группа ($n = 5$) – испытуемые с исходной ЧСС > > 70 уд./мин (группа "В"). В первой группе ($n = 5$) среднее значение ЧСС было равно 62.13 уд./мин, а во второй группе ($n = 5$) среднее значение ЧСС – 74.81 уд./мин. При махах правой рукой у испытуемых группы "Н" величина ПМ слева преимущественно убывала (ΔПМ < 0), а справа изменялась незначительно; а у испытуемых группы "В" ПМлев преимущественно возрастала, а ПМправ убывала. Причем степень выраженности изменений у испытуемых "В" более значительная, чем у испытуемых "Н". Эти индивидуальные особенности функциональной асимметрии реакций на физические нагрузки левого и правого микроциркуляторного русла можно видеть на рис. 2, где *А*, *В* – реакции на физические нагрузки испытуемого с исходным значением ЧСС, равным 65 уд./мин, а Б, Г – реакции на физические нагрузки испытуемого с исходным значением ЧСС 75 уд./мин.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния физических нагрузок на изменения показателей сосудистого тонуса. Результаты исследований также показали, что у всех испытуемых отмечалась ярко выраженная лево-правосторонняя асимметрия реакции на физические нагрузки верхних конечностей, причем степень выраженности индивидуальных реакций также зависела от исходного значения ЧСС. Результаты статистического анализа изменений показателей МЦР у испытуемых с низким (Н) и высоким (В) исходным значением ЧСС представлены в табл. 1.

По данным табл. 1 видно, что исходные значения величины ПМ как слева, так и справа, у испытуемых группы "В" выше, чем "Н" с явно выраженной лево-правосторонней асимметрией реакций на физические нагрузки. При махах левой рукой для испытуемых "Н" величина ΔПМлев (19.67%) превышает ΔПМправ (6.21%) и имеет противоположную направленность (>0) по сравнению с испытуемыми "В". При махах правой рукой для испытуемых "Н" величина ΔПМлев (−12.12%) превышает ΔПМправ (−4.6%) и имеет противоположную направленность по сравнению с левыми махами. Для испытуемых "В" изменения ΔПМлев при левых и правых махах различаются по направленности, а ΔПМправ имеют одинаковую направленность (<0). Все компоненты сосудистого тонуса также обнаруживают функциональную асимметрию. Величина нейрогенной компоненты как при левых, так и при правых махах снижается (ΔН < 0) у всех испытуемых, но это снижение более выражено слева, чем справа. Изменения миогенной компоненты при левых махах как у испытуемых "Н", так и у испытуемых "В" однонаправлены и достоверно различа-

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции показателя перфузии, коэффициента вариации, нейрогенной, миогенной, дыхательной и сердечной компонент спектра с ЧСС для испытуемых с низким и высоким исходным значением ЧСС

Вид нагрузки	Махи левой рукой				Махи правой рукой			
измерения	левая рука		правая рука		левая рука		правая рука	
показатель	Н	В	Н	В	Н	В	Н	В
Корр. ПМ с ЧСС	0.42*	–0.57*	0.09	–0.54*	0.50*	0.40*	0.35	0.32
Корр. *KV* с ЧСС	0.25	0.25	–0.34	–0.30	–0.04	–0.14	0.24	–0.33
Корр. Н с ЧСС	–0.43*	0.15	–0.27	0.15	0.33	0.00	0.66**	–0.06
Корр. М с ЧСС	–0.27	–0.22	–0.31	0.54*	0.36	0.46*	0.59*	0.51*
Корр. Д с ЧСС	–0.79**	–0.02	–0.27	0.29	0.28	–0.27	–0.28	0.68**
Корр. С с ЧСС	0.67**	0.03	0.08	0.11	0.09	0.14	–0.25	–0.53*
Корр. КА с ЧСС	0.20	0.38	–	–	0.25	0.49*	–	–

Примечание: Корр. ПМ с ЧСС – коэффициент корреляции показателя перфузии с ЧСС. Корр. *KV* с ЧСС – коэффициент корреляции коэффициента вариации с ЧСС. Корр. Н, М, Д, С с ЧСС – коэффициенты корреляции нейрогенной, миогенной, дыхательной и сердечной компонент спектра с ЧСС. Корр. КА с ЧСС – коэффициент корреляции коэффициента асимметрии с ЧСС. Н – испытуемые с низким исходным значением ЧСС, В – испытуемые с высоким исходным значением ЧСС. * – $0.4 < |r| < 0.6$, ** – $0.6 < |r| < 1$.

ются по величине, но у испытуемых “Н” эти изменении <0, а у испытуемых “В” > 0. При правых махах для испытуемых “В” изменения миогенной компоненты справа и слева имеют противоположную направленность, а у испытуемых “Н” эти изменения однонаправлены и более значительны по величине, чем при левых махах. Изменение дыхательной компоненты слева (ΔДлев) у испытуемых “Н” достоверно выше при правых махах, чем при левых (–18.5% против 5.6%) и имеет противоположную направленность. У испытуемых “В” при левых махах дыхательная компонента и справа, и слева возрастает, при правых махах слева убывает, а справа возрастает. Изменение сердечной компоненты при махах левой у испытуемых “Н” достоверно выше, чем у испытуемых “В” как справа, так и слева. То же самое происходит и при правых махах. У испытуемых “В” сердечная компонента справа как при левых, так и при правых махах снижается ((ΔСправ) < 0), причем это снижение более выражено при правых махах, чем при левых. Следующим этапом исследований явилось изучение корреляционных взаимосвязей между показателями МЦР и ЧСС. Результаты представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что при левых махах имеет место положительная корреляционная взаимосвязь ПМлев с ЧСС для испытуемых “Н” и отрицательные корреляционные взаимосвязи ПМлев и ПМправ с ЧСС для испытуемых “В”. При правых махах для испытуемых “Н” и “В” выявлена положительная корреляция с ЧСС только для ПМлев. Что касается коэффициента вариации *KV*, то для всех испытуемых и всех видах физических нагрузок корреляционных взаимосвязей между ЧСС и этим показателем не выявлено.

Нейрогенная компонента слева отрицательно коррелирует с ЧСС только для испытуемых “Н” при махах левой рукой, а нейрогенная компонента справа у этих испытуемых имеет положительную корреляционную взаимосвязь с ЧСС при правых махах. Миогенная компонента имеет положительную корреляционную взаимосвязь с ЧСС при правых махах для испытуемых “В” как слева, так и справа, а для испытуемых “Н” – только справа. При левых махах достоверная положительная корреляция с ЧСС имеет место только для миогенной компоненты справа у испытуемых “В”. Высокая корреляционная взаимосвязь с ЧСС выявлена для дыхательной компоненты слева у испытуемых “Н” при левых махах, а также для дыхательной компоненты справа у испытуемых “В” при правых махах. Аналогичные корреляционные взаимосвязи, но с противоположным знаком имели место для сердечной компоненты. Достоверная корреляционная взаимосвязь между коэффициентом асимметрии КА и ЧСС имела место только для испытуемых “В” слева при махах правой рукой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

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 были более выражены, чем правой. Были выявлены особенности функциональной асимметрии показателей

МЦР и их взаимосвязи с ЧСС. Пульсовая волна – основное звено в регуляции работы сердечно-сосудистой системы, синхронизирующее работу всех органов, в том числе и показатели регионарного кровообращения. Полученные данные показали, что как при левых, так и при правых махах у всех испытуемых с изменением ЧСС изменяется величина перфузии слева. Показано, что при левых махах и низких ЧСС (испытуемые "Н") с ростом ЧСС перфузия левой руки возрастает ($r > 0$), а при высоких ЧСС (испытуемые "В") убывает ($r < 0$). Это свидетельствует о нелинейности процессов ауторегуляции показателей МЦР при данном виде физических нагрузок. При махах правой рукой коэффициенты корреляции между ПМ и ЧСС обеих сторон как при низких, так и при высоких ЧСС, положительны ($r > 0$), что свидетельствует о линейности процессов ауторегуляции показателей МЦР при правых махах. Линейность ауторегуляторных процессов при махах правой рукой свидетельствует о незначительности отклонений параметров системы от устойчивого состояния, в отличие от нелинейного характера и более значительном отклонении от устойчивого состояния системы МЦР при левых махах. Можно предположить, что нелинейность ауторегуляторных процессов системы МЦР при левых махах объясняется анатомической асимметрией: слева находится сердце и при левых махах в работу включается сердечная мышца в большей степени, чем при правых. Косвенным подтверждением этому является также отсутствие достоверных корреляционных взаимосвязей с ЧСС перфузии правой руки.

Таким образом, в ходе исследований впервые была обнаружена взаимосвязь между ЧСС и синхронными изменениями показателей МЦР правого и левого микроциркуляторного русла при физических нагрузках на верхние конечности. Уменьшение амплитуды нейрогенной компоненты сосудистого тонуса при физических нагрузках, а также значимые корреляционные взаимосвязи между ЧСС и параметрами МЦР свидетельствуют о том, что стабилизация параметров микрогемодинамики при исследуемых физических нагрузках происходит в большей степени за счет центральных механизмов ауторегуляции. Для выяснения физиологических механизмов, лежащих в основе регуляции микрокровотока парных органов при физических нагрузках, требуются дальнейшие экспериментальные исследования.

ВЫВОДЫ

1. Впервые изучены синхронные изменения показателей МЦР сосудов симметричных органов у человека при асимметричных физических нагрузках на верхние конечности.

2. Обнаружена асимметрия изменений показателей МЦР под влиянием физических нагрузок.

3. Как при левых, так и при правых махах изменяются показатели МЦР и левой, и правой сторон измерения, причем изменения этих показателей слева более выражены, чем справа.

4. Степень выраженности изменений показателей МЦР зависит от их исходных значений, что подтверждает общебиологическую концепцию зависимости реакции на воздействие от исходного уровня показателя.

5. Обнаружена нелинейная взаимосвязь между изменениями показателей микроциркуляции симметричных областей парных органов и ЧСС.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина (Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена за счет средств Федерального бюджета РФ в рамках выполнения Государственного задания НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина (Москва).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чернух А.М., Александров П.Н., Алексеев О.В.* Микроциркуляция. М.: Медицина, 1984. 429 с.
2. *Крупаткин А.И.* Значение колебательных процессов в диагностике состояния микроциркуляторно-тканевых систем // Физиология человека. 2018. Т. 44. № 5. С. 103.
Krupatkin A. I. Oscillatory Processes in the Diagnosis of the State of Microvascular-Tissue Systems // Human Physiology. 2018. V. 44. № 5. P. 581.
3. *Щуров В.А.* Динамика скорости кровотока по артериям костного регенерата конечностей и мозгового кровотока при выполнении функциональных проб и изменении режима лечения // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018. Т. 17. № 4. С. 51.
4. *Goltsov A., Anisimova A., Zakharkina A. et al.* Bifurcation in Blood Oscillatory Rhythms for Patients with Ischemic Stroke: A Small Scale Clinical Trial using Laser Doppler Flowmetry and Computational Modeling of Vasomotion // Front. Physiol. 2017. V. 8. P. 160.

5. *Козлов В.И., Тупицин И.О.* Микроциркуляция при мышечной деятельности. М.: Физкультура и спорт, 1982. 135 с.

6. *Михайличенко Л.А., Реутов М.И.* Проявления асимметрии в процессе регенерации микрососудов ушных раковин кролика // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1997. Т. 123. № 3. С. 343.

7. *Михайличенко Л.А., Александров П.Н.* Особенности микроциркуляции кожи крыс в окрестности очага воспаления на основании лазерной допплеровской флоуметрии // Региональное кровообращение и микроциркуляция. 2005. Т. 4. № 4(18). С. 79.

8. *Михайличенко Л.А.* Показатели микроциркуляции парных органов и тканей экспериментальных животных в норме // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2007. Т. 6. № 1(21). С. 164.

9. *Benedicic M., Dolenc V.V., Stefanovska A., Bosnjak R.* Left-right asymmetry of the facial microvascular control // Clin. Auton. Res. 2006. V. 16. № 1. P. 58.

10. *Мезенцева Л.В., Перцов С.С.* Корреляционно-спектральный анализ временных рядов показателей микроциркуляции сосудов симметричных органов // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2018. Т. 166. № 9. С. 268.

11. *Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Кутепов И.А.* Исследование информационных процессов в микрососудистых сетях с помощью вейвлет-анализа колебательных структур кровотока // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2009. Т. 8. № 3(31). С. 21.

Synchronous Changes in Microcirculation Parameters of the Upper Limbs in Asymmetric Physical Loads

L. V. Mezentseva[a, *], S. S. Pertsov[a, b]

[a] *Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia*

[b] *Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russia*

**E-mail: l.v.mezentseva@mail.ru*

This is the first study on the synchronous changes in microcirculation in symmetrical organs of humans during asymmetric physical loads of the upper limbs. The study was conducted in healthy volunteers using the method of laser Doppler flowmetry (LDF). LDF signal transducers were fixed symmetrically on the lower parts of the right and left shoulders (3 cm above the elbow bend). Physical loads included the left or right hand swings in standing position for 1 min. Measurements were made in 3 states: (1) initial state, (2) immediately after physical activity, and (3) 5 minutes after loads. Changes in the mean perfusion value and the components of amplitude-frequency spectrum of blood flow fluctuations (myogenic, neurogenic, respiratory, and cardiac) were evaluated in both sides of the body. We observed the asymmetry of changes in microcirculation parameters after the physical loads. It is shown that both left and right swings change the microcirculation parameters of both the left and right sides, and changes on the left are more pronounced than on the right. A nonlinear relationship was observed between changes in microcirculation parameters of symmetrical areas of paired organs and heart rate. Our data illustrate the specific regulation patterns of microcirculation blood flow in paired organs, which is associated with functional asymmetry. The physiological mechanisms of this asymmetry require further experimental and clinical research.

Keywords: microcirculation, asymmetry, laser Doppler flowmetry.