

УДК 612.13; 616.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-4-33-38

А. В. МЕЗЕНЦЕВА

Нелинейный анализ флуктуаций показателей микроциркуляции сосудов симметричных органов у человека на основании данных лазерной доплеровской флоуметрии

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

Статья поступила в редакцию 19.10.18; принята к печати 14.12.18

Резюме

Цель – изучение нелинейной динамики показателей микроциркуляции сосудов симметричных органов у человека.

Материал и методы. Измерения параметров микроциркуляции проведены у 5 здоровых добровольцев (возраст – 50–70 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. Оценивали степень хаотичности параметров микроциркуляции как нелинейного динамического процесса с помощью показателя Хаусдорфа, относительной энтропии и характеристик фазовых портретов. Кроме того, оценивали составляющие амплитудно-частотного спектра флуктуаций кровотока (миогенной, нейрогенной, дыхательной и сердечной) и корреляционные взаимосвязи между всеми показателями микроциркуляции симметричных сторон наблюдения.

Результаты. Обнаружена асимметрия корреляционных взаимосвязей показателей нелинейной динамики и составляющих амплитудно-частотного спектра флуктуаций кровотока правой и левой сторон наблюдения. Показатель Хаусдорфа слева коррелировал не только со средним значением перфузии и коэффициентом вариации той же стороны ($r_1 = -0,68$; $r_2 = -0,51$), но и с показателем корреляционной размерности хаоса противоположной стороны измерения ($r = 0,49$). Аналогично энтропия слева коррелировала не только со средним значением перфузии и коэффициентом вариации слева ($r_1 = 0,43$; $r_2 = 0,60$), но также с энтропией и корреляционной размерностью хаоса правой стороны измерения ($r_1 = 0,48$; $r_2 = -0,41$). Нейрогенная компонента слева положительно коррелировала с миогенной компонентой той же стороны измерения ($r = 0,71$), а справа – с миогенной компонентой противоположной стороны ($r = 0,57$). Асимметрия корреляционных взаимосвязей обнаружена также для дыхательной и сердечной составляющих спектра.

Выводы. 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: нелинейный анализ, микроциркуляция, асимметрия, лазерная доплеровская флоуметрия

Для цитирования: Мезенцева Л. В. Нелинейный анализ флуктуаций показателей микроциркуляции сосудов симметричных органов у человека на основании данных лазерной доплеровской флоуметрии. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2018; 17(4):33–38. Doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-4-33-38

UDC 612.13; 616.1

DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-4-33-38

L. V. MEZENTSEVA

Nonlinear analysis of fluctuations of microcirculation parameters in symmetrical organs of humans by laser doppler flowmetry

Federal State Scientific Institution «Research Institute of Normal Physiology Anokhin», Russia, Moscow
125315, Russia, Moscow, Baltiyskaya street, 8
E-mail: l.v.mezentseva@mail.ru

Received 19.10.18; accepted 14.12.18

Summary

Purpose – the study the nonlinear dynamics of microcirculation parameters in human symmetrical organs.

Material and Methods. Parameters of microcirculation were measured in healthy volunteers (aged between 50 and 70 years) by means 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). The degree of chaoticity of microcirculation parameters as a nonlinear dynamic process was estimated using Hausdorff's index, relative entropy and characteristics of phase portraits. Along with components of the amplitude-and-frequency range for blood flow fluctuations (myogenic, neurogenic, respiratory, and cardiac) was estimated and correlations between all characteristics of microcirculation in both sides of the body were done.

Results. Asymmetry of correlation relationships of nonlinear dynamics parameters and components of the amplitude-and-frequency range for blood flow fluctuations of right and left sides of the body was revealed. Hausdorff index in the left side correlated not only with the average value of perfusion and with the coefficient of variation in the same side ($r_1 = -0,68$; $r_2 = -0,51$), but also with correlation dimension of chaos in the opposite side ($r = 0,49$). Similarly, entropy in the left side correlated not only with the average value of perfusion and coefficient of variation in the left ($r_1 = 0,43$; $r_2 = 0,60$), but also with the entropy and correlation dimension of chaos in the right side ($r_1 = 0,48$; $r_2 = -0,41$). The neurogenic component in the left side positively correlated with the myogenic component in the same side ($r = 0,71$). A positive correlation was observed between the neurogenic component in right side and myogenic component in the opposite side ($r = 0,57$). Asymmetry of correlation relationships was also revealed for the respiratory and cardiac components.

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: nonlinear analysis, microcirculation, asymmetry, laser Doppler flowmetry

For citation: Mezentseva L. V. Nonlinear analysis of fluctuations of microcirculation parameters in symmetrical organs of humans by laser doppler flowmetry. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2018;17(4):33–38. Doi: 10.24884/1682-6655-2018-17-4-33-38

Введение

Известно, что кровоток в микроциркуляторном русле подвержен спонтанным флуктуациям, вследствие чего колебания перфузии регистрируются в виде сложного, непериодического процесса [1]. Хаотические колебания в системе микроциркуляции (МЦР) отражают состояние регуляции микрокровотока. Поэтому для изучения этих регуляторных процессов, наряду с традиционными статистическими методами, используются математические методы нелинейного, корреляционно-спектрального, вейвлет анализа и др. Эти методы позволили дифференцировать вклад в общую спектральную мощность процесса составляющих регуляции сосудистого тонуса различной природы: эндотелиальной, нейрогенной, миогенной, дыхательной, сердечной [1–3], а также выявить специфичность регуляции микрокровотока парных органов у животных, обусловленную наличием функциональной асимметрии [4–8]. Однако физиологические механизмы, лежащие в основе этой функциональной асимметрии, до сих пор не ясны, что во многом объясняется недостаточной изученностью вопросов корреляционных взаимосвязей между различными показателями МЦР сосудов симметричных органов у млекопитающих и человека. Поэтому **целью** настоящей работы явилось применение математических методов нелинейного и корреляционно-спектрального анализа для изучения особенностей лево-правосторонней асимметрии показателей МЦР симметричных органов у человека

Материал и методы исследования

Показатели МЦР у 5 здоровых добровольцев (возраст – 50–70 лет) определяли методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Исследования проведены с помощью прибора «ЛАКК-02» НПП «ЛАЗМА» – двухканальный. Датчики ЛДФ 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 суток. Записи ЛДФ-сигнала проведены с частотой 20 Гц в течение 1 мин с интервалом отсчетов 0,05 с. Математическая обработка результатов измерений включала в себя:

– оценку статистических параметров МЦР каждого фрагмента: среднего значения перфузии ПМ; среднеквадратичного отклонения (σ); коэффициента вариации $KV = (\sigma / \text{ПМ}) 100 \%$;

– определение показателей амплитудно-частотного спектра колебаний, отражающих выраженность различных составляющих спектра [1–3]: 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);

– определение степени хаотичности флуктуаций МЦР как нелинейного динамического процесса с помощью показателей Хаусдорфа (D_0) и относительной энтропии (H_0);

– построение фазового портрета и расчет его количественных характеристик (корреляционной размерности хаоса (D_2) и ее нормированного значения $D_2H = D_2/\sigma$).

Расчеты всех показателей проводили в условных единицах с помощью программного обеспечения, прилагаемого к ЛДФ-анализатору [9]. Следующими этапом исследований явилось изучение сопряженности между показателями МЦР симметричных областей. Сопряженность показателей определяли по величине коэффициента корреляции (r). Принималось, что при $|r| < 0,3$ степень связи практически отсутствует; при $0,3 < |r| < 0,5$ – слабая степень связи; при $0,5 < |r| < 0,7$ – умеренная степень связи; при $0,7 < |r| < 1$ – сильная степень связи. Статистический анализ показателей МЦР, а также оценку сопряженности между показателями 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 и их обсуждение

Общее представление о характере изменения показателей МЦР в течение всего периода измерений можно видеть из рис. 1, на котором показаны временные ряды, отражающие динамику синхронных изменений величин среднего значения перфузии (ПМ) симметричных областей, коэффициентов вариации (KV), показателя Хаусдорфа (D_0), относительной энтропии (H_0) и корреляционной размерности хаоса (D_2) у одного из испытуемых. Можно видеть, что временные ряды, описывающие динамику показате-

лей МЦР слева и справа – это разные, взаимно не накладывающиеся стохастические процессы. Статистический анализ этих процессов, выполненный для всех 5 испытуемых, показал, что среднее значение величины ПМ справа – $(7,57 \pm 0,94)$ – немного выше, чем слева – $(7,28 \pm 0,89)$, но эта разница недостоверна. Аналогичное имело место и для коэффициента вариации. Величина KV справа – $(7,56 \pm 0,36)$ – была немного выше, чем слева – $(7,31 \pm 0,51)$, но эта разница также не достоверна. Статистический анализ показателей нелинейной динамики симметричных сторон не выявил достоверных различий между их средними значениями справа и слева ($D_{0\text{лев}} = (0,94 \pm 0,09)$; $D_{0\text{прав}} = (0,88 \pm 0,08)$; $H_{0\text{лев}} = (0,25 \pm 0,04)$; $H_{0\text{прав}} = (0,29 \pm 0,05)$; $D_{2\text{лев}} = (1,25 \pm 0,05)$; $D_{2\text{прав}} = (1,24 \pm 0,06)$). В то же время, расчеты корреляционных взаимосвязей между показателями хаотической динамики выявили наличие достоверных взаимосвязей между ними не только применительно к одной и той же стороне измерения, но и между показателями противоположных сторон. Это можно видеть из данных табл. 1, в которой приведены значения коэффициентов корреляции между показателями хаотической динамики МЦР симметричных областей.

Из данных табл. 1 можно видеть, что показатель Хаусдорфа слева D_0 коррелирует не только с показателями ПМ_{лев} и KV_{лев} ($r_1 = -0,68$; $r_2 = -0,51$), но и с показателем D_2 правой стороны измерения ($r = 0,49$). Аналогично энтропия H_0 слева коррелирует не только с показателями ПМ_{лев}, KV_{лев}, $D_{0\text{лев}}$ и $D_{2\text{лев}}$ ($r_1 = 0,43$; $r_2 = 0,60$; $r_3 = -0,61$; $r_4 = -0,46$), но и с показателями H_0 и D_2H правой стороны измерения ($r_1 = 0,48$; $r_2 = -0,41$). То же самое можно сказать относительно корреляционной размерности $D_{2\text{лев}}$, которая коррелирует с показателями ПМ и D_0 правой стороны измерения ($r_1 = -0,51$; $r_2 = 0,52$). Нормированная корреляционная размерность $D_{2H\text{лев}}$ также имеет корреляцию с правосторонними показателями H_0 и D_2H ($r_1 = -0,43$; $r_2 = 0,32$). Таким образом, анализ сопряженности между показателями хаотической динамики МЦР выявил наличие достоверных взаимосвязей не только между показателями одноименных сторон, но и между показателями противоположных сторон измерения.

Анализ геометрических фигур фазовых портретов ПМ показал, что фазовые портреты, как правило, имели эллипсоидальную форму с различным направлением главных осей, как это можно видеть из рис. 2.

Эллипсоиды могли иметь вытянутую вдоль диагонали слева направо форму (рис. 2, а), с перпендикулярным к оси абсцисс направлением одной из главных осей (рис. 2, б), и вытянутую вдоль диагонали справа налево форму (рис. 2, в). Между количественными характеристиками фазовых портретов слева и справа достоверных различий не обнаружено.

Следующим этапом исследований явилось изучение амплитудно-частотного спектра колебаний МЦР, позволяющего оценить выраженность составляющих сосудистого тонуса: нейрогенного (Н), миогенного (М), дыхательного (Д) и сердечного (С), а также взаимосвязи между ними. Результаты корреляционного

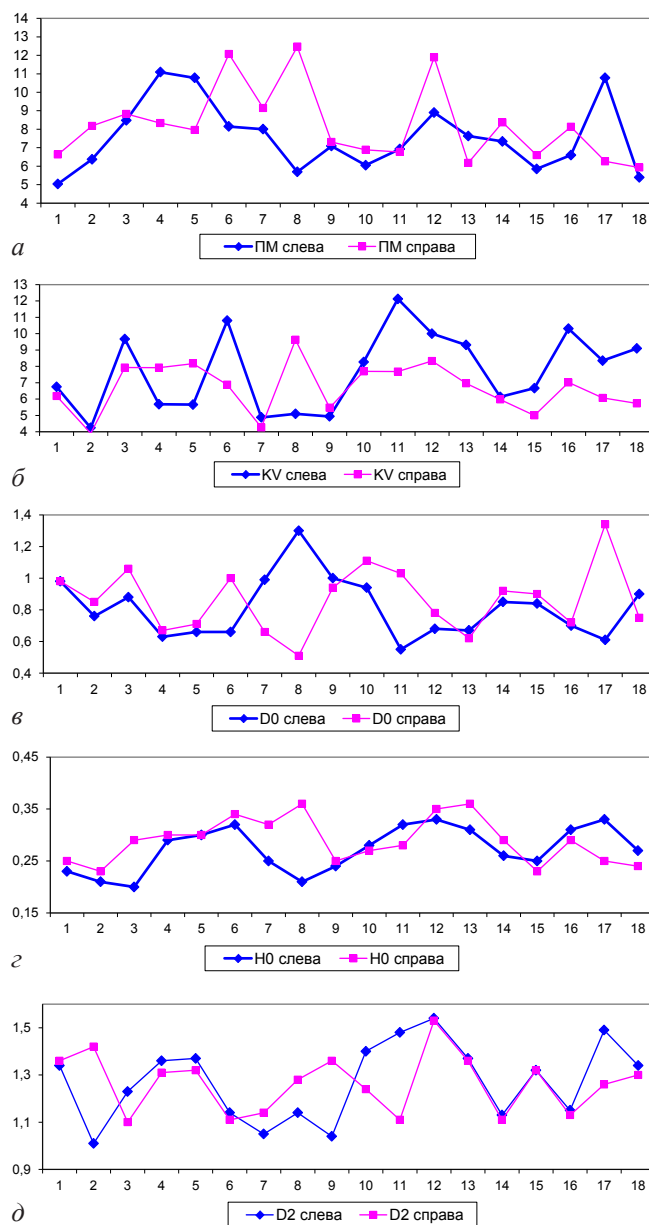


Рис. 1. Временные ряды, отражающие динамику синхронных изменений величин показателей МЦР (усл. ед.) симметричных областей: среднего значения перфузии ПМ (а); коэффициента вариации KV (б); показателя Хаусдорфа D_0 (в); относительной энтропии H_0 (г); корреляционной размерности хаоса D_2 (д)

Fig. 1. Time series reflecting the dynamics of synchronous changes in the indicators of microcirculation (conv. units) of symmetrical regions: the average value of perfusion PM (a); the coefficient of variation KV (б); Hausdorff index D_0 (в); relative entropy D_0 (г); correlation dimension of the chaos D_2 (д)

анализа выявили наличие выраженной асимметрии корреляционных взаимосвязей между показателями сосудистого тонуса левой и правой сторон измерения, что можно видеть из данных табл. 2.

Миогенная компонента слева положительно коррелировала с сердечной компонентой той же стороны измерения, а также с миогенной, нейрогенной и сердечной компонентами противоположной стороны. Нейрогенная компонента слева положительно коррелировала с миогенной компонентой той же стороны ($r = 0,71$), а H_{np} – с указанной компонентой противоположной стороны ($r = 0,57$). Дыхательная компонента спектра справа положительно коррелировала с нейрогенной, миогенной и сердечной компонентами той

Таблица 1

Значения коэффициентов корреляции между показателями хаотической динамики МЦР симметричных областей

Table 1

Values of correlation coefficients between the indices of chaotic dynamics of symmetrical regions

Показатель	ПМ _{лев}	KV _{лев}	D _{0лев}	H _{0лев}	D _{2лев}	D ₂ H _{лев}	ПМ _{пр}	KV _{пр}	D _{0пр}	H _{0пр}	D _{2пр}	D ₂ H _{пр}
ПМ _{лев}	1,00	0,15	-0,68**	0,43*	0,31*	0,13	0,13	0,07	0,08	0,31*	-0,57**	-0,28
KV _{лев}	0,15	1,00	-0,51**	0,60**	0,34*	0,88***	-0,02	0,35*	0,32*	0,51**	-0,18	-0,36*
D _{0лев}	-0,68**	-0,51**	1,00	-0,61**	-0,26	0,36*	0,02	-0,05	-0,26	-0,12	0,49*	0,23
H _{0лев}	0,43*	0,60**	-0,61**	1,00	0,12	-0,46*	0,27	0,25	0,17	0,48*	-0,13	-0,41*
D _{2лев}	0,31*	0,34*	-0,26	0,12	1,00	-0,13	-0,51**	0,17	0,52**	-0,13	0,15	-0,08
D ₂ H _{лев}	0,13	0,88***	0,36*	-0,46*	-0,13	1,00	-0,25	-0,24	-0,14	-0,43*	0,07	0,32*
ПМ _{пр}	0,13	-0,02	0,02	0,27	-0,51**	-0,25	1,00	0,32*	-0,29	0,70***	0,16	-0,22
KV _{пр}	0,07	0,35*	-0,05	0,25	0,17	-0,24	0,32*	1,00	-0,21	0,69**	0,23	-0,77***
D _{0пр}	0,08	0,32*	-0,26	0,17	0,52**	-0,14	-0,29	-0,21	1,00	-0,29	-0,04	0,21
H _{0пр}	0,31*	0,51**	-0,12	0,48*	-0,13	-0,43*	0,70***	0,69**	-0,29	1,00	0,26	-0,64**
D _{2пр}	-0,57**	-0,18	0,49*	-0,13	0,15	0,07	0,16	0,23	-0,04	0,26	1,00	0,23
D ₂ H _{пр}	-0,28	-0,36*	0,23	-0,41*	-0,08	0,32*	-0,22	-0,77***	0,21	-0,64**	0,23	1,00

Примечание: * - $0,3 < |r| < 0,5$; ** - $0,5 < |r| < 0,7$; *** - $0,7 < |r| < 1$.

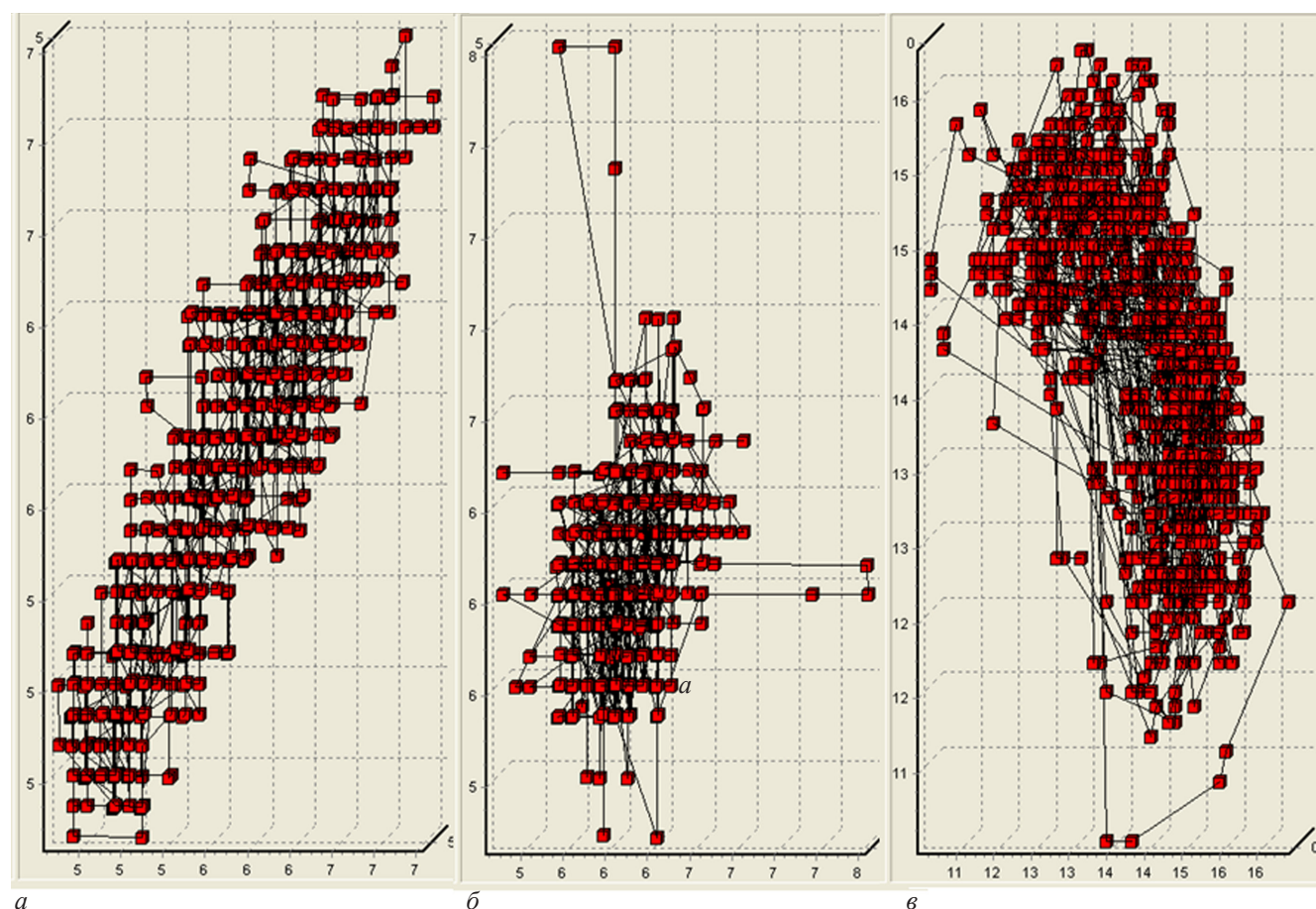


Рис. 2. Геометрические формы фазовых портретов показателей микроциркуляции ПМ:

a – эллипсоидальная, вытянутая вдоль диагонали слева направо; *б* – эллипсоидальная с перпендикулярным к оси абсцисс направлением одной из главных осей; *в* – эллипсоидальная, вытянутая вдоль диагонали справа налево. Ось абсцисс – предыдущее значение ПМ(*n*); ось ординат – последующее значение ПМ(*n*+1)

Fig. 2. The geometrical forms of phase portraits of indicators of microcirculation ПМ (conv. units):

a – ellipsoidal, elongated along the diagonal from left to right; *б* – ellipsoidal with a direction perpendicular to the abscissa axis of one of the main axes; *в* – ellipsoidal, elongated along the diagonal from right to left. Abscissa, the amplitude of the previous point ПМ(*i*) of the series; ordinate, amplitude of the next point ПМ(*i*+1) of the series

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции между показателями сосудистого тонуса симметричных областей

Table 2

Values of correlation coefficients between the indices of vascular tone of symmetrical regions

Показатель	Н _{лев}	М _{лев}	Д _{лев}	С _{лев}	Н _{пр}	М _{пр}	Д _{пр}	С _{пр}
Н _{лев}	1,00*	0,71***	0,26*	0,36*	0,39*	0,32*	0,45*	0,36*
М _{лев}	0,71***	1,00*	0,2*	0,55**	0,57**	0,55**	0,46*	0,53**
Д _{лев}	0,26*	0,20*	1,00*	0,37*	0,2*	0,01*	0,36*	0,25*
С _{лев}	0,36*	0,55**	0,37*	1,00*	0,34*	0,42*	0,46*	0,21*
Н _{пр}	0,39*	0,57**	0,20*	0,34*	1,00*	0,72**	0,58**	0,38*
М _{пр}	0,32*	0,55**	0,01*	0,42*	0,72**	1,00*	0,65**	0,72***
Д _{пр}	0,45*	0,46*	0,36*	0,46*	0,58*	0,65*	1,00*	0,57**
С _{пр}	0,36*	0,53**	0,25*	0,21*	0,38*	0,72**	0,57**	1,00*

Примечание: * – $0 < |r| < 0,5$; ** – $0,5 < |r| < 0,7$; *** – $0,7 < |r| < 1$.

же стороны. Асимметрия отмечена и при изучении взаимосвязей между сердечной и дыхательной компонентами спектра: значимые корреляции между указанными показателями выявлены с правой стороны ($r > 0,5$), но не с левой.

Результаты исследования выявили специфичность регуляции колебательных процессов в микроциркуляторном русле, связанную с наличием функциональной асимметрии корреляционных взаимосвязей между различными показателями МЦР. Если корреляционные взаимосвязи между различными показателями МЦР одной стороны измерения могут быть объяснены в рамках существующих представлений и математических моделей регуляции микрокровотока [10, 11], то относительно выявленного в настоящем исследовании феномена функциональной асимметрии корреляционных взаимосвязей между показателями МЦР противоположных сторон измерения этого сказать нельзя. Можно предположить, что одной из причин лево-правосторонней асимметрии показателей МЦР является исходная асимметрия морфологических характеристик сосудов симметричных органов [12], являющаяся проявлением одного из важных свойств морфофункциональной организации биологических систем – свойства хиральности. Хиральность [13, 14] является одним из основополагающих свойств живых организмов, проявляющихся на всех этапах их онто- и филогенетического развития. В физиологии проявления свойства хиральности описаны применительно к различным органам. Это межполушарная асимметрия мозга, функциональная асимметрия центральных и периферических сосудов, асимметрия в плотности распределения α - и β -рецепторов в сосудах и другие объекты. Однако вопросы хиральности показателей МЦР до сих пор мало изучены. Полученные результаты впервые доказывают наличие феномена лево-правосторонней асимметрии в механизмах регуляции микроциркуляторных процессов в периферических органах человека. Физиологические механизмы, лежащие в основе этой асимметрии, требуют дальнейших экспериментальных и клинических исследований.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Литература / References

1. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови / под ред. А. И. А. И. Крупаткина, В. В. Сидорова. – М.: Медицина, 2005. [Laser Doppler flowmetry of blood microcirculation, ed. A. I. Krupatkin, A. V. Sidorov. M., Medicine, 2005. (In Russ.).]
2. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови / В. И. Козлов, Г. А. Азизов, О. А. Гурова, Ф. Б. Лутвин. – М.: Медицина, 2012. [Kozlov VI, Azizov GA, Gurova OA, Litvin FB. Laser Doppler flowmetry in the assessment of the state and disorders of the blood microcirculation. M., Medicine, 2012. (In Russ.).]
3. 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. – С. 21–31. [Krupatkin AI, Sidorov VV, Kutevov IA. The study of information processes in microvascular nets by wavelet-analysis of oscillatory blood flow. Regionarnoe krovoobrashchenie i mircitsirkulyatsiya. 2009;8(3):21–31. (In Russ.).]
4. Мезенцева Л. В., Перцов С. С., Хугаева В. К. Анализ персистентности флуктуаций почечного кровотока крыс // Биофизика. – 2015. – Т. 60, № 6. – С. 1186–1190. [Mezentseva LV, Pertsov SS, Hugaeva VK. The Persistence of Blood Flow Oscillations in the Rat Kidney. Biophysics. 2015;60(6):988–991. (In Russ.).] Doi: 10.1134/S0006350915060196.
5. Мезенцева Л. В., Перцов С. С., Хугаева В. К. Сравнительный анализ персистентности флуктуаций капиллярного кровотока правой и левой почки крысы // Биофизика. – 2016. – Т. 61, № 4. – С. 777–781. [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. (In Russ.).]
6. Михайличенко Л. А. Эндотелиальный компонент в механизмах регуляции тонуса сосудов парных образований по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2008. – Т. 28, № 4. – С. 71–79. [Mikhailichenko LA. Endothelial component in mechanisms of regulation of a tone of vessels of pair formations according to laser Doppler flowmetry. Regional Haemodynamics and Microcirculation. 2008;28(4):71–79. (In Russ.).]

7. Михайличенко Л. А., Мезенцева Л. В. Корреляционно-спектральный анализ регуляторных механизмов тонуса сосудов парных образований в постнатальном онтогенезе крыс // Бюлл. эксперимент. биол. и мед. – 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. Epub 2015 Jan 9.
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. Doi: 10.1016/j.mvr.2007.02.007.
9. Анализатор лазерный микроциркуляции крови для врача общей практики «ЛАКК-ОП»: рук-во по эксплуатации / ООО Научно-производственное предприятие «ЛАЗМА». – М., 2005. [Laser analyzer of blood microcirculation for the general practitioner «LAKK-OP». User manual. ООО scientific and production enterprise «LASMA», M., 2005. (In Russ.)].
10. 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. *Frontiers in Physiology*. 2017;1.8(160):1–11. Doi: 10.3389/fphys.2017.00160.
11. Koenigsberger M, Sauser R, Seppey D, Bény J and Meister J. Calcium dynamics and vasomotion in arteries subject to isometric, isobaric, and isotonic conditions. *Biophys. J.* 2008;95(6):2728–2738. Doi: 10.1529/biophysj.108.131136.
12. Михайличенко Л. А., Тимкина М. И. Микрососуды защечных мешков хомячка в условиях снижения системного давления // Бюлл. эксперимент. биол. и мед. – 2004. – Т. 138, № 12. – С. 617–621. [Mikhailichenko LA, Timkina MI. Microvessels of hamster buccal pouches under conditions of reduced systemic blood pressure. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2004;138(12):617–621. (In Russ.)].
13. Архипов М. Е., Субботина Т. И., Яшина А. А. Хиральная асимметрия биоорганического мира: теория, эксперимент. Тула: Тульский полиграфист, 2002. [Arkhipov ME, Subbotina TI, Yashin AA. *Chiral asymmetry of the bioorganic world: theory, experiment*. Tula, Tula polygraphist, 2002. (In Russ.)].
14. Твердислов В. А., Малышко Е. В., Ильченко С. А. и др. Периодическая система хиральных структур в молекулярной биологии // Биофизика. – 2017. – Т. 62, № 3. – С. 421–434. [Tverdislov VA, Malysheko EV, Il'chenko SA, Zhulyabina OA, Yakovenko LV. A periodic system of chiral structures in molecular biology. *Biophysics*. 2017;62(3):421–434. (In Russ.)].

Информация об авторе

Мезенцева 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.