

УДК 612.15

DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-80-86

ТИХОМИРОВА И. А., БАБОШИНА Н. В., ТЕРЕХИН С. С.

## Возможности метода лазерной доплеровской флоуметрии в оценке возрастных особенностей функционирования системы микроциркуляции

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Ярославль, Россия

150000, Россия, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108/1

e-mail: tikhom-irina@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.03.18; принята к печати 11.04.18

### Резюме

Цель настоящего исследования – оценка возрастных особенностей функционирования системы микроциркуляции методом лазерной доплеровской флоуметрии. Изучение параметров микрокровотока выполнено у практически здоровых лиц зрелого возраста в одномоментном исследовании и в проспективном исследовании у детей в возрасте от 8 до 11 лет. Зафиксированы стабильные показатели микроциркуляции на разных этапах зрелого возраста с максимальными значениями в середине этого возрастного периода. В проспективном исследовании отмечены значительные изменения в функционировании системы микроциркуляции в период от 9 до 10 лет, свидетельствующие о начале подготовки организма детей к пубертатному периоду. Выявленные возрастные особенности функционирования системы микроциркуляции обусловлены уровнем метаболической активности организма.

**Ключевые слова:** микроциркуляция, возрастные особенности, лазерная доплеровская флоуметрия

**Для цитирования:** 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): 80–86. DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-80-86

УДК 612.15

DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-80-86

TIKHOMIROVA I. A., BABOSHINA N. V., TEREKHIN S. S.

## LDF method capabilities in the estimation of age-related features of the microcirculation system functioning

Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky

150000, Russia, Yaroslavl, Respublikanskaya street, 108/1

e-mail: tikhom-irina@yandex.ru

Received 23.03.18; accepted 11.04.18

### Summary

The aim of this study was to assess the age-related features of the functioning of the microcirculation system using the LDF method. The estimation of parameters of microcirculation was performed in practically healthy persons of mature age in a one-stage study and in a prospective study in children aged 8 to 11 years. Stable indices of microcirculation were recorded at different stages of adulthood with maximal values in the middle of this age period. In the prospective study, significant changes in the functioning of the microcirculation system in the period from 9 to 10 years, indicating the beginning of the transition to the pubertal period, were noted. The revealed age-specific features of the functioning of the microcirculation system are due to the level of metabolic activity of the body.

**Keywords:** microcirculation, age-related features, laser Doppler flowmetry

**For citation:** Tikhomirova I. A., Baboshina N. V., Terexhin S. S. LDF method capabilities in the estimation of age-related features of the microcirculation system functioning. Regional hemodynamics and microcirculation. 2018; 17(3): 80–86. DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-3-80-86

### Введение

Лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) имеет ряд преимуществ в сравнении с другими известными методами изучения системы микроциркуляции, что обусловлено неинвазивностью этого метода, доступностью объекта исследования (кожа) и возможностью оценки регуляторных механизмов модуляции микрокровотока [8, 13]. Этот метод признан высокочувствительным, отражающим тонкие перестройки

микроциркуляторного кровотока [14]. Одним из ограничений использования метода ЛДФ считается относительная вариабельность ЛДФ-сигнала, которая обусловлена пространственной неоднородностью распределения кровеносных сосудов тестируемой области и временной изменчивостью перфузии ткани [7, 9]. Пространственная гетерогенность микроциркуляции зависит как от анатомических особенностей васкуляризации ткани, так и от функционирования

регуляторных механизмов микрокровотока, обеспечивающих функциональное распределение перфузии. Временная изменчивость кровотока обусловлена адаптационными способностями микроциркуляторного русла [9, 13]. По мнению некоторых авторов, наибольшей диагностической ценностью обладает оценка изменения ЛДФ-картины микроциркуляторного русла в динамике: до, в процессе и по окончании лечения [2]. Также подчеркивается необходимость строгого соблюдения стандартных условий измерения, учета технических ограничений метода и критического анализа результатов измерений перфузии при использовании лазерной доплеровской флоуметрии [14, 15].

В последнее время появляется все больше экспериментальных данных, свидетельствующих о возможности применения метода ЛДФ не только в динамике, но и в оценке базального микрокровотока, адекватности и информативности полученных данных [16]. В наших исследованиях также были выявлены отличительные особенности характеристик базального микрокровотока при различных формах нарушений кровообращения (артериальной гипертензии, острых нарушениях мозгового кровообращения, хронической сердечной недостаточности) [18, 19]. В исследовании В. И. Козлова и др. (2012) с помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии были изучены отношения между параметрами кровотока в коже различных топографо-анатомических областей тела у здоровых лиц в возрасте 18–24 лет, и определены нормативные показатели состояния микроциркуляции в коже головы, туловища и основных сегментов верхней и нижней конечностей [5].

**Целью** исследования была оценка возрастных особенностей функционирования системы микроциркуляции с использованием метода ЛДФ.

#### Материал и методы исследования

В исследование после получения добровольного информированного согласия самих обследуемых либо их законных представителей (родителей или опекунов для несовершеннолетних детей) были включены практически здоровые лица разного возраста. Изучение возрастных особенностей микрокровотока проводилось с использованием двух подходов – в одномоментном (поперечном) исследовании и в проспективном (когортном, продольном) исследовании. В первом случае оценка состояния микроциркуляции и ее регуляторных механизмов производилась в группе разновозрастных лиц обоего пола; 50 человек в возрасте от 18 до 65 лет были разделены на три группы, по возрасту соответствующие началу, середине и заключительному этапам зрелого возрастного периода. Средний возраст обследуемых составил в I группе – 22,4±2,2 года; во II группе – 38,7±6,3 года и в III группе – 55,4±4,6 года. В проспективное исследование были включены 45 детей (23 мальчика и 22 девочки) в возрасте 8 лет на момент начала исследования. У детей на протяжении 4 лет – с 2013 по 2016 г. – каждый год в одно и то же время года (в сентябре) оценивали показатели микроциркуляции и ее регуляторные механизмы методом ЛДФ.

Исследование микроциркуляции проводили при помощи лазерного анализатора ЛАКК-02 (НПП «ЛАЗМА», Москва) в стандартных условиях (23±2 °C) после 10-минутного периода адаптации. Измерения выполняли в положении обследуемого сидя, рука с установленным датчиком находилась на уровне сердца. В качестве тестируемой области была выбрана дистальная фаланга 2-го пальца правой кисти. Величина показателя микроциркуляции (ПМ) зависит от анатомических особенностей кожи в области исследования. Высокие значения этого показателя определяются в тех областях кожи, где имеется большая плотность функционирующих капилляров и наибольшее количество артериовенозных анастомозов (АВА). Наибольшие значения показателей ПМ и характеристик его вариабельности отмечаются в коже пальцев кисти, что делает эту область оптимальной для проведения исследований методом ЛДФ [5]. Отмечается, что в этой области кожи, богатой артериоло-венулярными анастомозами, разброс величины ЛДФ-сигнала меньше, чем на ткани с меньшим числом шунтов. Эта область относительно богата не только исключительно зависимыми от симпатической иннервации артериоло-венулярными анастомозами, но вегетативными и сенсорными нервными волокнами [9].

Оценивали уровень перфузии, среднеквадратичное отклонение ( $\sigma$ ), коэффициент вариации  $K_v$  и амплитудно-частотные характеристики отраженного сигнала. Регистрируемый в ЛДФ-грамме колебательный процесс является результатом наложения колебаний, обусловленных функционированием «активных» и «пассивных» механизмов, которые в полосе частот от 0,005 до 3 Гц формируют несколько неперекрывающихся частотных диапазонов, среди которых 0,0095–0,02 Гц – диапазон эндотелиальной активности; 0,02–0,052 Гц – диапазон нейрогенной (симпатической адренергической) активности; 0,07–0,12 Гц – диапазон миогенной (гладкомышечной) активности; 0,2–0,4 Гц – диапазон респираторного ритма; 0,8–1,6 Гц – диапазон кардиального ритма [9].

Амплитудно-частотный спектр колебаний рассчитывали с помощью вейвлет-преобразования и оценивали вклад эндотелиальных (Э), нейрогенных (Н) и миогенных (М) компонентов тонуса микрососудов, а также дыхательных (Д) и сердечных (С) ритмов. Рассчитывали показатель шунтирования (ПШ) по формуле:

$$\text{ПШ} = A_{\text{акт}} / A_{\text{м}},$$

где  $A_{\text{акт}}$  – амплитуда преобладающего из активных факторов контроля микроциркуляции (нейрогенного или эндотелиального);  $A_{\text{м}}$  – амплитуда миогенных колебаний микроциркуляции [9].

Ввиду разброса результатов измерений амплитуд колебаний осуществлять диагностику работы того или иного механизма регуляции только по величинам амплитуд затруднительно. Поэтому, кроме  $A_{\text{max}}$ , анализировали функциональный вклад каждого звена в модуляцию микрокровотока –  $(A_{\text{max}}/3\sigma)100\%$  и вклад в общий уровень тканевой перфузии –  $(A/M)100\%$ . Данные нормированные параметры рассчитывались в автоматическом режиме после определения

значения  $A_{\max}$  в соответствующем частотном диапазоне [9].

В микроциркуляторном русле величина перфузии определяется не только средней величиной  $M$ , но и ее гармоническими изменениями, которые характеризуются величинами амплитуд колебаний кровотока в тонусформирующем диапазоне спектра осцилляций, что свидетельствует о приросте объемных и скоростных параметров микрокровотока. Показатель эффективной перфузии  $M_{\text{эфф}}$  рассчитывали как  $M_{\text{эфф}} = M \cdot A_{\max}$ , где  $A_{\max}$  – максимальная усредненная амплитуда осцилляций, доминирующая по величине среди амплитуд колебаний активных тонусформирующих диапазонов частот. Считается, что при определенных физиологических состояниях значение  $M_{\text{эфф}}$  может быть более информативным, чем величина  $M$  [9].

### Результаты исследования и их обсуждение

В начале обследования у мальчиков и девочек 8-летнего возраста показатели перфузии и ее вариабельности не имели статистически значимых

отличий, максимальные амплитуды осцилляций микрокровотока были отмечены в эндотелиальном диапазоне (табл. 1; 2). Через год (в возрасте 9 лет) при практически неизменных показателях перфузии ( $M$ ) и  $\sigma$  и у мальчиков, и у девочек зафиксировано выраженное снижение амплитуды сердечных осцилляций микрокровотока – на 43,2 и 51,2 % ( $p < 0,05$ ) и осцилляций в эндотелиальном диапазоне на 23,6 и 28 % соответственно ( $p < 0,05$ ). У девочек, в отличие от мальчиков, зафиксировано снижение амплитуд дыхательных осцилляций на 21,2 % ( $p < 0,05$ ) и нейрогенных колебаний на 27,5 % ( $p < 0,05$ ). В обеих группах отмечены тенденции к снижению показателя шунтирования и росту эффективной перфузии.

По достижении детьми 10-летнего возраста уровень перфузии существенно вырос у мальчиков (на 45,6 %,  $p < 0,05$ ) и у девочек (на 49,7,  $p < 0,05$ ) при значительном увеличении вариабельности микрокровотока, обусловленной высокоамплитудными осцилляциями как активных, так и пассивных регуляторных ритмов. Максимальный прирост размаха колебаний зафиксирован для респираторных осцилляций микроцир-

Таблица 1

Параметры микроциркуляции у мальчиков в возрасте от 8 до 11 лет ( $M \pm \sigma$ )

Table 1

Microcirculation parameters in boys aged 8 to 11 years ( $M \pm \sigma$ )

Показатель		Возраст, лет			
		8	9	10	11
$M$ , пф. ед.		18,4±7,2	18,8±4,2	26,8±6,8**	22,3±6,4•
$\sigma$ , пф. ед.		1,65±0,89	1,30±0,70	2,38±1,30**	1,91±0,85
$K_v$ , %		8,96±4,05	6,91±2,68*	8,88±2,99	8,57±3,36
Э	$A_{\max}$ , пф. ед.	0,791±0,449	0,604±0,324*	1,10±0,75*	1,02±0,61
	$(A_{\max}/3\sigma)100$ %, %	16,5±4,3	15,4±5,13	14,7±3,6	16,2±4,1
	$(A_{\max}/M)100$ %, %	4,21±2,09	3,18±1,63	3,74±1,97	4,47±2,06
Н	$A_{\max}$ , пф. ед.	0,693±0,391	0,597±0,317	1,07±0,54*	1,11±0,67*
	$(A_{\max}/3\sigma)100$ %, %	15,6±4,3	15,3±5,1	16,4±3,2	19,1±3,5*
	$(A_{\max}/M)100$ %, %	4,31±2,07	3,08±1,87*	3,94±1,69	4,97±2,12•
М	$A_{\max}$ , пф. ед.	0,550±0,254	0,508±0,218	1,03±0,45**	0,902±0,361*
	$(A_{\max}/3\sigma)100$ %, %	13,0±3,4	13,9±4,5	16,2±3,2	17,5±3,9
	$(A_{\max}/M)100$ %, %	3,34±1,48	2,68±1,11*	3,81±1,37	4,53±2,01*
Д	$A_{\max}$ , пф. ед.	0,256±0,088	0,255±0,101	0,617±0,210**	0,437±0,229*
	$(A_{\max}/3\sigma)100$ %, %	6,08±2,69	7,25±2,44*	10,3±3,4*	8,19±2,59**
	$(A_{\max}/M)100$ %, %	1,47±0,79	1,39±0,57	2,43±0,73*	2,13±0,85*
С	$A_{\max}$ , пф. ед.	0,250±0,109	0,142±0,042*	0,373±0,123*	0,282±0,152
	$(A_{\max}/3\sigma)100$ %, %	5,96±2,93	4,13±1,92*	6,14±1,91	4,73±2,00
	$(A_{\max}/M)100$ %, %	1,39±0,94	0,763±0,181*	1,45±0,44	1,24±0,58
ПШ, отн. ед.		1,21±0,33	1,06±0,40	1,02±0,15*	1,11±0,14
$M_{\text{эфф}}$ , пф. ед. <sup>2</sup>		21,6±4,9	28,9±5,4*	22,7±7,4	18,7±5,7

Примечание: здесь и далее  $M$  – среднее арифметическое значение показателя микроциркуляции;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение показателя микроциркуляции;  $K_v$  – коэффициент вариации показателя микроциркуляции; ПШ – показатель шунтирования;  $A_{\max}$  – максимальная амплитуда;  $(A_{\max}/3\sigma)100$  % – нормированная амплитуда;  $(A_{\max}/M)100$  % – приведенная амплитуда; Э, Н, М, Д, С – регуляторные механизмы микроциркуляции (эндотелиальные, нейрогенные, миогенные, дыхательные, сердечные);  $M_{\text{эфф}}$  – эффективная перфузия; статистически значимые отличия в сравнении с началом обследования (8 лет) обозначены: \* – при  $p < 0,05$ ; \*\* – при  $p < 0,01$ .

куляции как у мальчиков – на 141 % ( $p<0,01$ ), так и у девочек – на 95 % ( $p<0,05$ ). К 11-ти годам у детей изменения перфузии и характеристик регуляторных ритмов сохранились на уровне показателей 10-летнего возраста. Таким образом, в ходе обследования состояния микроциркуляции и ее регуляторных механизмов в период от 8 до 11 лет наиболее существенные изменения характеристик микрокровоотока отмечены в период от 9 до 10 лет.

Сравнение показателей микроциркуляции в разных возрастных группах зрелого периода продемонстрировало выраженную стабильность функционирования системы микроциркуляции. Однако максимальные значения показателя микроциркуляции и эффективной перфузии были отмечены для середины этого возрастного периода (в сравнении с начальным и заключительным этапами). В самой старшей возрастной группе при практически неизменной активности эндотелиальных, нейрогенных и кардиальных ритмов зафиксирована тенденция к снижению амплитуд осцилляций микроциркуляции в миогенном и дыхательном диапазонах (табл. 3).

Возрастной период от 8 до 11 лет характеризуется относительно равномерным развитием функциональных систем и организма в целом. Для данного возраста характерны морфофункциональные перестройки органов и систем, связанные с продолжающимися процессами роста и тканевой дифференциации, од-

нако этот период находится между двумя скачкообразными возрастными этапами: первый отмечается в 5–7 лет, когда происходит полуростовой скачок, характеризующийся активной перестройкой организма; второй – в 13–15 лет, пубертатный скачок, который является составной частью процессов полового созревания человека с его сложной картиной гормональной регуляции [12]. Поэтому у детей в возрасте от 8 до 11 лет интенсивность окислительных процессов остается весьма высокой, несмотря на то, что обменные процессы в этом возрастном периоде достаточно стабильны. Наблюдается расширение резервных возможностей большинства физиологических систем, в том числе кардиореспираторной [3]. Повышенная потребность органов и тканей детского организма в кислороде обуславливает своеобразную организацию функционирования сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Хотя экономичность работы кровообращения и дыхания в младшем возрасте еще не так велика, как у взрослых, степень их согласованности значительна [1, 3]. Адаптивные возможности и функционирование организма в целом, и системы микроциркуляции в частности, в различные возрастные периоды определяется морфофункциональной зрелостью физиологических систем и адекватностью воздействующих факторов на функциональные возможности организма [1]. С позиций сохранения гомеостаза, поддержание

Таблица 2

Параметры микроциркуляции у девочек в возрасте от 8 до 11 лет ( $M\pm\sigma$ )

Table 2

Microcirculation parameters in girls aged 8 to 11 years ( $M\pm\sigma$ )

Показатель		Возраст, лет			
		8	9	10	11
М, пф. ед.		19,9±6,6	18,9±2,7	29,8±4,5**	25,7±4,9**
σ, пф. ед.		1,64±0,54	1,22±0,59	2,47±0,84**	2,13±0,99*
$K_v$ , %		8,24±3,76	6,45±3,41*	8,28±3,24	8,29±3,42
Э	$A_{max}$ , пф. ед.	0,804±0,343	0,578±0,332*	1,35±0,80*	1,18±0,62*
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	15,2±3,3	14,1±3,9	15,3±4,5	17,6±3,6
	$(A_{max}/M)100$ %, %	4,46±1,85	3,14±1,93*	4,29±2,55	4,28±1,60
Н	$A_{max}$ , пф. ед.	0,800±0,341	0,580±0,351*	1,27±0,49*	1,23±0,62*
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	15,9±4,3	16,4±4,5	16,8±4,4	18,6±3,9*
	$(A_{max}/M)100$ %, %	4,20±1,76	3,36±2,17	4,30±1,67	4,52±1,69
М	$A_{max}$ , пф. ед.	0,635±0,270	0,574±0,313	1,07±0,42*	1,01±0,43*
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	13,1±4,6	14,7±3,3	15,1±4,6	17,0±3,4*
	$(A_{max}/M)100$ %, %	3,43±1,14	3,00±1,81	3,66±1,53	4,09±1,44*
Д	$A_{max}$ , пф. ед.	0,311±0,131	0,245±0,088*	0,606±0,188**	0,456±0,187*
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	6,37±2,44	7,34±2,03	8,50±2,89*	7,52±2,40
	$(A_{max}/M)100$ %, %	1,61±0,55	1,20±0,36*	2,08±0,70*	1,89±0,89*
С	$A_{max}$ , пф. ед.	0,328±0,173	0,160±0,051**	0,397±0,137	0,260±0,099
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	7,61±3,83	4,92±2,41*	5,32±1,36	4,29±1,22*
	$(A_{max}/M)100$ %, %	1,94±1,36	0,846±0,249*	1,34±0,46*	1,00±0,28*
ППШ, отн. ед.		1,27±0,40	1,07±0,33	1,15±0,43	1,06±0,20
$M_{эфф}$ , пф. ед. <sup>2</sup>		23,1±5,2	30,2±7,6*	20,5±4,3	19,4±3,5



оптимальной работы нутритивных микрососудов можно рассматривать как ключевое звено адаптации [8]. Гемодинамика в микроциркуляторном русле, и особенно в ее капиллярном звене, определяется не только внутренними силами кровообращения, но и метаболическими потребностями окружающих капилляры тканей [5].

Выявленные нами значительные изменения в функционировании системы микроциркуляции в период от 9 до 10 лет свидетельствуют о начале подготовки функционирования организма детей к последующему пубертатному периоду. Рост тканевой перфузии почти в 1,5 раза и значительное увеличение амплитуд регуляторных ритмов активного диапазона указывает на интенсификацию деятельности регуляторных механизмов микрокровотока, обеспечивающих питание и кислородное снабжение тканей в условиях усиленного метаболизма. Так как в вейвлет-спектре колебаний кровотока вряд ли можно ожидать единственного осцилляторного метаболического диапазона – эти влияния многокомпонентны и модулируют колебательную активность в разных диапазонах, зафиксированное в 10-летнем возрасте доминирование эндотелиальных регуляторных влияний и рост амплитуд колебаний нейрогенного и миогенного генеза подтверждает активацию метаболизма в этом возрасте. При прочих равных условиях активации метаболизма должны сопутствовать увеличение

эндотелийзависимой вазодилатации, снижение симпатической вазоконстрикторной активности и уменьшение прекапиллярного миогенного сопротивления [9], что и наблюдается на данном возрастном этапе.

Повышенные значения амплитуд осцилляций в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах колебаний в возрасте 10 лет свидетельствуют о снижении тонуса микрососудов. Увеличение вазомоторных амплитуд вызывает снижение периферического сопротивления и, следовательно, наблюдаемое повышение нутритивного кровотока. Прекапиллярная вазорелаксация является проявлением миогенной регуляции на изменение микроциркуляторного давления и состояния метаболизма. Снижение мышечного тонуса прекапилляров, регулирующих приток крови в нутритивное русло, наряду с ростом амплитуды пульсовых и дыхательных осцилляций, обеспечивает наблюдаемое повышение уровня тканевой перфузии с возрастом [17].

Респираторные колебания легче проникают в венулы при низком градиенте артериовенозного давления, поэтому увеличение амплитуды дыхательной волны указывает на снижение микроциркуляторного давления у детей в 10-летнем возрасте.

При анализе вейвлет-спектра отчетливое доминирование по амплитуде в диапазонах эндотелиальной и/или симпатической активности свидетельствует о преобладании вклада кровотока артериол, АВА и

Таблица 3

Базальные показатели микроциркуляции в разных возрастных группах зрелого возраста

Table 3

## Basal indices of microcirculation in different age groups of adulthood

Показатель		Группа		
		I (n=25)	II (n=12)	III (n=12)
М, пф. ед.		18,5±4,8	22,2±3,3*	16,2±5,2
σ, пф. ед.		1,39±0,53	1,59±0,58	1,53±0,57
$K_v$ , %		8,96±4,05	6,91±2,68*	8,88±2,99
Э	$A_{max}$ , пф. ед.	0,650±0,310	0,615±0,273	0,663±0,283
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	16,0±3,9	15,0±4,5	15,3±4,8
	$(A_{max}/M)100$ %, %	3,23±1,63	2,78±1,13	4,31±3,22
Н	$A_{max}$ , пф. ед.	0,657±0,341	0,690±0,311	0,682±0,351
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	16,3±5,6	16,3±6,8	15,5±4,8
	$(A_{max}/M)100$ %, %	3,19±1,65	3,64±1,75	3,47±1,67
М	$A_{max}$ , пф. ед.	0,597±0,300	0,538±0,217	0,511±0,279
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	13,9±4,3	14,5±6,5	12,6±4,8
	$(A_{max}/M)100$ %, %	3,23±1,63	2,78±1,13	4,31±3,22
Д	$A_{max}$ , пф. ед.	0,230±0,088	0,211±0,057	0,180±0,071
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	5,60±2,59	5,27±1,49	5,25±2,54
	$(A_{max}/M)100$ %, %	1,16±0,34	1,01±0,16	0,945±0,073
С	$A_{max}$ , пф. ед.	0,160±0,089	0,189 ±0,069	0,173±0,098
	$(A_{max}/3\sigma)100$ %, %	4,42±2,29	4,68±1,70	5,25±2,54
	$(A_{max}/M)100$ %, %	1,16±0,34	0,977±0,242	1,16±0,34
ППШ, отн. ед.		1,21±0,96	1,41±0,83	1,42±0,93
$M_{эфф}$ , пф. ед. <sup>2</sup>		26,5±6,19	30,3±6,15*	22,6±5,79

относительном снижении нутритивного кровотока. Наоборот, доминирование по амплитуде собственных миогенных осцилляций свидетельствует об активации капиллярной перфузии [9]. В 9-летнем возрасте у мальчиков и девочек амплитуды этих трех видов колебаний сопоставимы по величине, чем, возможно, и обусловлены самые высокие значения эффективной перфузии на этом возрастном этапе.

Онтогенез – это процессы роста и развития организма, т. е. увеличение его размеров при усложнении функциональных проявлений и одновременном увеличении надежности физиологических систем. В исследовании О. А. Гуровой (2014) отмечается, что формирование механизмов регуляции микроциркуляции приходится на 6 лет, тогда как эффективный уровень перфузии с доминированием активных механизмов модуляции тканевого кровотока и высоким уровнем функционального резерва капиллярного кровотока достигается у детей в период второго, или так называемого «нейтрального», детства (8–12 лет у мальчиков и 8–11 лет у девочек) [4, 10]. Окончательное становление особенностей функционирования системы микроциркуляции связано с периодом полового созревания, по завершении которого формируется дефинитивный тип микроциркуляции крови. Ф. Б. Литвин (2009) в своей работе отмечает, что с возрастом (от 7 до 20 лет) наблюдается тенденция к повышению уровня перфузии тканей кровью [11].

В микрососудистом русле с возрастом меняются емкость всей сети капилляров и скорость кровотока в них, при этом состояние каждого капилляра определяется местными условиями тканевого метаболизма и особенностями гемодинамики в сосудистой системе в целом. Кровоток на микроциркуляторном уровне не является стабильным, а подвержен временным и пространственным вариациям. Колебания кровотока периодически происходят в тканях, отражая изменчивость и приспособляемость кровотока к постоянно изменяющимся условиям гемодинамики и соответственно потребностям тканей в перфузии их кровью [6, 8].

Зрелый возраст отличается относительной стабильностью функционирования основных систем организма. В этом периоде происходит прекращение роста, масса тела остается постоянной, ее прирост может обеспечиваться только за счет увеличения массы жировой ткани. Этот возрастной период характеризуется уравновешенностью процессов образования и разрушения клеток и сохранением относительно неизменными размеров тела. Некоторый дисбаланс обмена веществ и гормональные сдвиги наступают в конце этого возрастного этапа при переходе к пожилому возрасту. Это находит свое отражение и в относительной стабильности показателей микрогемодициркуляции в течение всего этого достаточно длительного периода. Прирост тканевой перфузии на 20 % ( $p < 0,05$ ) и повышение эффективной перфузии в сравнении с предыдущим возрастным этапом отмечены для середины зрелого периода (возраст от 35 до 45 лет). После чего начинает снижаться и показатель микроциркуляции, и эффективная перфузия. В отличие от детского возраста, доминирующее регу-

ляторное влияние на микрокровооток кожи в зрелом периоде оказывает нейрогенный механизм контроля микрососудистого тонуса, что свидетельствует о преобладании эрготропной направленности регуляции микрогемодициркуляторно-тканевых систем [6].

Объемные характеристики микрокровоотока, которые обусловлены в основном функционированием пассивных звеньев модуляции микрогемодинамики – пульсовых волн (кардиальный ритм), отражающих объем притекающей к микроциркуляторному руслу артериальной крови, и дыхательных волн (венулярный ритм), характеризующих состояние ее оттока, – также остаются относительно стабильными на протяжении всего периода зрелого возраста [9, 15].

Таким образом, проведенные нами проспективное и одномоментное исследования состояния микроциркуляции на этапах второго детства и на разных этапах зрелого возраста позволили выявить основные особенности функционирования системы микроциркуляции, обусловленные уровнем метаболической активности организма.

### Конфликт интересов / Conflict of interest

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

### Литература / References

1. Безруких М. М., Фарбер Д. А. Актуальные проблемы физиологии развития ребенка // Новые исследов. – 2014. – № 3 (40). – С. 4–20. [Bezrukikh MM, Farber DA. Aktual'nyye problemy fiziologii razvitiya rebenka. Novyye issledovaniya. 2014;3(40):4–20 (In Russ.).]
2. Вчерашний Д. Б., Ерофеев И. П., Новосельцев С. В. Возможность и ограничения метода лазерной доплеровской флоуметрии // Науч. вестн. Белгород. гос. ун-та. Сер.: Медицина. Фармация. – 2014. – № 24 (195). – С. 35–41. [Vcherashniy DB, Erofeyev IP, Novosel'tsev SV. Vozmozhnosti i ogranicheniya metoda lazernoy dopplerovskoy floumetrii. Nauchnyye vedomosti. Seriya Meditsina. Farmatsiya. 2014;24(195):35–41 (In Russ.).]
3. Грибанов А. В., Гудков А. Б., Попова О. Н., Крайнова И. Н. Кровообращение и дыхание у школьников в циркумполярных условиях. – Архангельск: САФУ, 2016. [Gribanov AV, Gudkov AB, Popova ON, Krainova IN. Krovoobrashcheniye i dykhaniye u shkol'nikov v tsirkumpolyarnykh usloviyakh. Arkhangel'sk: SAFU; 2016 (In Russ.).]
4. Гурова О. А. Индивидуально-типологические особенности микроциркуляции крови у детей 4–7 лет // Новые исслед. – 2014. – № 2 (39). – С. 15–23. [Gurova OA. Individual'notipologicheskiye osobennosti mikrotsirkulyatsii krovi u detey 4–7 let. Novyye issledovaniya. 2014;2(39):15–23 (In Russ.).]
5. 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 (41). – 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.).]
6. Крупаткин А. И. Колебания кровотока – новый диагностический язык в исследовании микроциркуляции // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2014. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 83–99. [Krupatkin AI. Blood flow oscillations – new diagnostic language in microvascular research. Regionarnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya. 2014;13(1):83–99 (In Russ.).]

7. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови: рук-во для врачей. – М.: Медицина, 2005. [Krupatkin AI, Sidorov VV. *Lazernaya dopplerovskaya floumetriya mikrotsirkulyatsii krovi. Rukovodstvo dlya vrachey*. M.: Meditsina; 2005 (In Russ.)].
8. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Проблема адаптации и колебательные процессы в микроциркуляторном русле // Физиол. человека. – 2016. – Т. 42. – № 4. – С. 69–76. [Krupatkin AI, Sidorov VV. *Problem of Adaptation and Oscillatory Processes in Microvascular Bed. Fiziologiya cheloveka*. 2016;42(4):69–76 (In Russ.)]. Doi: 10.7868/S0131164616040093.
9. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: рук-во для врачей. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. [Krupatkin AI, Sidorov VV. *Funktsional'naya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost' (Rukovodstvo dlya vrachey)*. M.: LIBROKOM; 2013 (In Russ.)].
10. Кутырева О. И., Дьяконова Е. Н., Лобанова Л. В. Возрастные особенности микроциркуляции у здоровых детей // Вестн. новых мед. технол. – 2009. – Т. 16. – № 3. – С. 37–38. [Kutyreva OI, D'yakonova YeN, Lobanova LV. *Vozrastnyye osobennosti mikrotsirkulyatsii u zdorovykh detey. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*. 2009;16(3):37–38 (In Russ.)].
11. Литвин Ф. Б. Возрастные и индивидуально-типологические особенности микроциркуляции у мальчиков, подростков и юношей // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2006. – Т. 5. – № 1(17). – С. 44–50. [Litvin FB. *Age and specific-features typological of microcirculation at boys, teenagers and young men. Regionalnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya*. 2006; 5(1):44–50 (In Russ.)].
12. Сонькин В. Д., Тамбовцева Р. В. Развитие мышечной энергетики и работоспособности в онтогенезе. – М.: ИЛИБРОКОМ, 2011. [Son'kin VD, Tambovtseva RV. *Razvitiye myshechnoy energetiki i rabotosposobnosti v ontogeneze*. M.: LIBROKOM; 2011 (In Russ.)].
13. Федорович А. А. Микрососудистое русло кожи человека как объект исследования // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2017. – Т. 16. – № 4 (64). – С. 11–26. [Fedorovich AA. *Microcirculation of the human skin as an object of research. Regional hemodynamics and microcirculation*. 2017;16(4):11–26 (In Russ.)]. Doi: 10.24884/1682-6655-2017-16-4-11-26.
14. Jung F, Leithäuser B, Landgraf H et al. Doppler flux measurement for the assessment of cutaneous microcirculation – critical remarks. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2013;55(4):411–416. Doi: 10.3233/CH-131778.
15. Jung F, Pindur G, Ohlmann P et al. Microcirculation in hypertensive patients. *Biorheology*. 2013;50(5–6):241–255. Doi: 10.3233/BIR-130645.
16. Mrowietz C, Franke RP, Pindur G et al. Reference range and variability of Laser-Doppler-Fluxmetry. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2017;67(3–4):347–353. Doi: 10.3233/CH-179215.
17. Straface G, Landini L, Barrella M et al. Analysis of the microcirculatory pulse wave: age-related alterations. In: *Conf Proc Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 37th Annual International Conference of the IEEE; 2015 25–29 Aug; 2015:7362–7365*. Doi: 10.1109/EMBC.2015.7320092.
18. Tikhomirova I, Petrochenko E, Muravyov A et al. Microcirculation and blood rheology abnormalities in chronic heart failure. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2017;65(4):383–391. Doi: 10.3233/CH-16206.
19. Tikhomirova IA, Oslyakova AO, Mikhailova SG. Microcirculation and blood rheology in patients with cerebrovascular disorders. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2011;49(1–4):295–305. Doi: 10.3233/CH-2011-1480.

### Информация об авторах

**Тихомирова Ирина Александровна** – доктор биологических наук, зав. кафедрой медицины, биологии, теории и методики обучения биологии Ярославского государственного педагогического университета им. К. Д. Ушинского, e-mail: tikhom-irina@yandex.ru.

**Бабошина Наталья Владимировна** – аспирант Ярославского государственного педагогического университета им. К. Д. Ушинского, e-mail: pankrateva@bk.ru.

**Терехин Станислав Сергеевич** – аспирант Ярославского государственного педагогического университета им. К. Д. Ушинского, e-mail: stasterekhin@gmail.com.

### Author information

**Tikhomirova Irina A.** – Sc. D., Head of the Department of Medicine and Biology, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, e-mail: tikhom-irina@yandex.ru.

**Baboshina Natalia V.** – post graduate student, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, e-mail: pankrateva@bk.ru.

**Terekhin Stanislav S.** – post graduate student, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, e-mail: stasterekhin@gmail.com.