

БАБОШИНА Наталья Владимировна, аспирант кафедры медицины, биологии, теории и методики обучения биологии Ярославского государственного педагогического университета им. К.Д. Ушинского. Автор 18 научных публикаций

МАЛЫШЕВА Юлия Викторовна, аспирант кафедры медицины, биологии, теории и методики обучения биологии Ярославского государственного педагогического университета им. К.Д. Ушинского. Автор 21 научной публикации

ТИХОМИРОВА Ирина Александровна, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой медицины, биологии, теории и методики обучения биологии Ярославского государственного педагогического университета им. К.Д. Ушинского. Автор 257 научных публикаций, в т. ч. 4 монографий

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ У ДЕТЕЙ МЛАДШЕГО ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА

Изучение системы микрогемодициркуляции в онтогенезе – актуальное направление возрастной физиологии, выявляющее закономерности формирования, особенности функционирования микроциркуляторного русла человека на разных возрастных этапах. Периферический кровоток осуществляется в сосудах отдельных органов и тканей и направлен на обеспечение адекватного кровоснабжения в них в соответствии с постоянно меняющейся метаболической активностью. С помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с вейвлет-анализом амплитудно-частотного спектра колебаний микрокровотока в группе детей обоего пола дважды – в 2013 и 2015 году (по достижении ими возраста 8 и 10 лет) – оценивали состояние кожной микроциркуляции и функционирование ее регуляторных механизмов. В возрастном периоде от 8 до 10 лет у девочек и мальчиков отмечено повышение тканевой перфузии на 62,1 и 68,2 % ($p < 0,001$) соответственно. Увеличение значений показателя микроциркуляции в этом возрастном периоде обусловлено высокой интенсивностью обменных процессов, связанной с началом перестроек механизмов регуляции микроциркуляции при переходе к пубертатному периоду. В группе девочек и мальчиков за 2 года отмечено увеличение значений максимальной амплитуды во всех диапазонах активных факторов регуляции микрокровотока. При сравнении параметров микроциркуляции девочек и мальчиков в возрасте 10 лет достоверных отличий не обнаружено; у мальчиков значения нормированных амплитуд миогенных и дыхательных ритмов были выше, а сердечных осцилляций – ниже, чем у девочек ($p < 0,05$). Анализ полученных данных свидетельствует как о возрастных (в интервале от 8 до 10 лет) отличиях параметров микроциркуляции, так и о формирующихся в указанный период половых отличиях в функционировании регуляторных механизмов микрокровотока.

Ключевые слова: микроциркуляция у младших школьников, лазерная доплеровская флоуметрия, механизмы регуляции микроциркуляции, возрастные изменения.

Одной из наиболее актуальных проблем возрастной физиологии является оценка состояния регуляции кровоснабжения кожи и функциональных возможностей системы микроциркуляции крови [1]. Как известно, сосуды микроциркуляции являются не только структурно-функциональной единицей системы кровообращения, в которой происходит обмен между кровью и тканями, но и важнейшим источником информации о состоянии тканевого кровотока, органов и организма в целом [2].

От решения проблемы исследования регуляторных механизмов микроциркуляции зависит выяснение ряда вопросов, имеющих большое значение для теории и практики физиологии и медицины; изучение этой проблемы чрезвычайно важно для оценки индивидуальных особенностей кровообращения. Изыскания в данной области базируются на детальном знании морфофункциональных закономерностей функционирования кровеносных сосудов и понимании расстройств кровотока в них [3].

Микрогемоциркуляторное русло рассматривается как конечный отрезок сердечно-сосудистой системы, и именно в нем, в конечном счете, реализуется транспортная функция сердечно-сосудистой системы и обеспечивается транскпиллярный обмен, создающий необходимый для нормальной жизнедеятельности организма гомеостаз [4].

Кожа представляет собой традиционно доступный в клинической практике объект для функциональной диагностики состояния микроциркуляции [4]. В качестве одного из основных методов изучения состояния микроциркуляции применяется ЛДФ, позволяющая реализовать интегративную неинвазивную оценку состояния микроциркуляторной гемодинамики в органах и тканях, коррелирующую со сдвигами в центральной гемодинамике [5]. Достоинством метода ЛДФ является возможность измерения микрокровотока *in vivo* и бесконтактно, что очень важно для тестирования микрогемодинамики в детском возрасте. Данный метод позволяет оценить индивидуальную изменчивость кровотока и механизмы его регуляции.

Микрокровооток характеризуется большим разнообразием, обусловленным сложной комбинацией многочисленных факторов: функциональной и анатомической плотностью микрососудов, состоянием гемореологии, сложным сочетанием локальных, миогенных и нейрогенных механизмов регуляции сосудистого тонуса различных отделов микроциркуляторной системы и т. д. [6]. Причем с возрастом наблюдается перестройка механизмов регуляции микроциркуляции, что может быть связано со структурными изменениями микрососудистого русла кожи [7, 8].

Онтогенетическое изучение системы микроциркуляции – одно из перспективных и актуальных направлений в возрастной анатомии и физиологии, позволяющее раскрыть закономерности формирования микроциркуляторного русла на разных этапах развития ребенка, проанализировать и установить закономерности формирования, особенности функционирования микроциркуляции, определить функциональный резерв и, следовательно, эффективную адаптацию системы микроциркуляции к современным условиям социально-экономической среды обитания [9].

Исследования возрастных преобразований сердечно-сосудистой системы обеспечивают возможность выявления как степени зрелости и характера функционирования отдельных звеньев системы (центральная гемодинамика, периферический кровоток, микроциркуляция), так и специфики их взаимодействия на разных этапах развития ребенка. Было показано, что по мере развития ребенка периоды плавных перестроек сократительного миокарда и микрогемодинамики сменяются скачкообразными изменениями, отмеченными в возрасте 9-10 лет, в начале подросткового периода (12-13 лет) и к его завершению (16-17 лет), когда показатели центральной гемодинамики приближаются к дефинитивному уровню [10]. Возраст от 8 до 10 лет характеризуется высокой интенсивностью обменных процессов, связанных с существенными перестройками всех функций и систем организма, в т. ч. морфофункциональной организацией сердечно-сосудистой системы

и активно совершенствующимися механизмами ее регуляции.

Целью настоящего исследования стало изучение возрастных особенностей изменения микроциркуляции детей младшего школьного возраста по данным ЛДФ.

Материалы и методы. После получения добровольного письменного информированного согласия законных представителей (родителей) в исследование были включены дети младшего школьного возраста. С целью изучения возрастных изменений микроциркуляции показатели микрокровотока фиксировали в одной и той же группе испытуемых (23 мальчика и 27 девочек) дважды – в 2013 и 2015 годах, по достижении ими возраста 8 и 10 лет.

Оценку состояния микроциркуляции проводили методом ЛДФ с помощью лазерного анализатора капиллярного кровотока «ЛАКК-02» (НПП «ЛАЗМА», Москва) [4].

В качестве тестируемой области была выбрана дистальная фаланга второго пальца правой кисти. Эта область богата вегетативными и сенсорными нервными волокнами [4]. Измерения проводили в положении детей сидя после 10-минутного периода адаптации в помещении при температуре 23 ± 2 °С. Оценивали показатель микроциркуляции (ПМ), среднеквадратичное отклонение (σ) и коэффициент вариации (K_v) показателя микроциркуляции и амплитудно-частотные характеристики отраженного сигнала.

Среди звеньев регуляции микрокровотока выделяют пассивные и активные механизмы. Активные факторы контроля микроциркуляции (факторы, непосредственно воздействующие на систему микроциркуляции) – это эндотелиальный, миогенный и нейрогенный механизмы регуляции просвета сосудов, тонуса сосудов. Эти факторы контроля регуляции модулируют поток крови со стороны сосудистой стенки и реализуются через ее мышечный компонент. Пассивные факторы (факторы, вызывающие колебания кровотока вне системы микроциркуляции) – это пульсовая волна со стороны артерий и присасывающее действие «дыхательного насо-

са» со стороны вен. Эти колебания проникают с кровотоком в зондируемую область, т. к. микроциркуляторное русло топографически расположено между артериями и венами [4].

Влияние активных и пассивных факторов на поток крови приводит к изменению скорости и концентрации потока эритроцитов [4], которые в свою очередь играют важную роль в доставке кислорода и питательных веществ, необходимых для метаболических потребностей, к клеткам и тканям [11].

Активные и пассивные механизмы в полосе частот от 0,005 до 3 Гц формируют 5 перекрывающихся частотных диапазонов: 1) 0,0095–0,02 Гц – область эндотелиальной NO-зависимой активности; 2) 0,021–0,046 Гц – зона нейрогенной симпатической адренергической активности; 3) 0,047–0,145 Гц – зона миогенной активности; 4) 0,2–0,4 Гц – область респираторного ритма; 5) 0,8–1,6 Гц – диапазон кардиального ритма [4].

Амплитудно-частотный спектр колебаний рассчитывали с помощью вейвлет-преобразования [12] и оценивали влияние эндотелиальных, нейрогенных и миогенных механизмов на тонус микрососудов, а также дыхательных и сердечных ритмов [4, 13].

Рассчитывали миогенный и нейрогенный компоненты тонуса микрососудов и показатель шунтирования. Нейрогенный тонус прекапиллярных резистивных микрососудов (НТ) и миогенный тонус (МТ) метартериол и прекапиллярных сфинктеров, а также показатель шунтирования (ПШ) определяли по формулам:

$$\begin{aligned} \text{НТ} &= (\sigma \times P_{\text{cp}}) / (A_{\text{н}} \times M), \\ \text{МТ} &= (\sigma \times P_{\text{cp}}) / (A_{\text{м}} \times M), \\ \text{ПШ} &= A_{\text{н}} / A_{\text{м}}, \end{aligned}$$

где σ – среднеквадратичное отклонение, P_{cp} – среднее артериальное давление; M – среднеарифметическое значение, $A_{\text{н}}$ и $A_{\text{м}}$ – максимальные усредненные амплитуды осцилляций симпатического адренергического и миогенного диапазонов частот [4].

Ввиду разброса результатов измерений амплитуд колебаний осуществлять диагностику работы того или иного механизма регуляции

ФИЗИОЛОГИЯ

только по величинам амплитуд затруднительно. Поэтому кроме A_{\max} анализировали функциональный вклад каждого звена в модуляцию микрокровотока – $(A_{\max}/3\sigma) \times 100\%$ – и вклад в общий уровень тканевой перфузии – $(A_{\max}/M) \times 100\%$. Данные нормированные параметры рассчитывались в автоматическом режиме после определения значения A_{\max} в соответствующем частотном диапазоне [14].

Полученные данные представлены в виде средних значений с их стандартным отклонением ($M \pm \sigma$). Статистическую обработку полученных данных после проверки на соответствие выборки закону нормального распре-

деления проводили с использованием параметрического t-критерия Стьюдента. Поскольку в экспериментальное исследование состояния микроциркуляции были вовлечены одни и те же школьники с интервалом в 2 года, для оценки статистической значимости возрастных изменений параметров микроциркуляции использовали парный t-критерий Стьюдента для связанных выборок. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. В обследуемых группах отмечено повышение показателя микроциркуляции с возрастом: у девочек на 62 % ($p < 0,001$) (табл. 1), у мальчиков – на 72 %

Таблица 1

ВОЗРАСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ У ДЕВОЧЕК

Показатель		Возраст, лет	
		8,00±0,33	10,0±0,3
M, пф. ед.		18,2±7,8	29,5±6,2***
σ, пф. ед.		1,65±0,73	2,37±1,07***
K _v , %		10,0±4,2	8,45±5,18
Э	A_{\max}	0,761±0,363	1,25±0,81***
	$(A_{\max}/3\sigma) \times 100\%$	15,0±3,4	16,9±5,9
	$(A_{\max}/M) \times 100\%$	4,60±2,19	4,45±3,34
Н	A_{\max}	0,809±0,406	1,22±0,5***
	$(A_{\max}/3\sigma) \times 100\%$	16,4±4,5	17,4±4,6
	$(A_{\max}/M) \times 100\%$	4,77±2,10	4,28±2,35
М	A_{\max}	0,653±0,342	1,03±0,46***
	$(A_{\max}/3\sigma) \times 100\%$	13,0±4,1	15,0±4,1
	$(A_{\max}/M) \times 100\%$	3,72±1,25	3,67±2,12
Д	A_{\max}	0,301±0,137	0,597±0,247***
	$(A_{\max}/3\sigma) \times 100\%$	6,48±2,26	8,87±2,65**
	$(A_{\max}/M) \times 100\%$	1,79±0,69	2,16±1,46*
С	A_{\max}	0,323±0,187	0,381±0,161***
	$(A_{\max}/3\sigma) \times 100\%$	7,76±4,81	5,54±1,26
	$(A_{\max}/M) \times 100\%$	2,21±1,64	1,36±0,90*
НТ, отн. ед.		2,23±0,79	2,06±0,61
МТ, отн. ед.		2,79±0,96	2,40±0,73*
ПШ, отн. ед.		1,29±0,38	1,23±0,44

Примечания: 1. A_{\max} – максимальная амплитуда, $(A_{\max}/3\sigma) \times 100\%$ – нормированная амплитуда, $(A_{\max}/M) \times 100\%$ – приведенная амплитуда; Э, Н, М, Д, С – регуляторные механизмы микроциркуляции (эндотелиальные, нейрогенные, миогенные, дыхательные, сердечные); 2. Достоверно при: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

($p < 0,001$) (табл. 2). Выраженный рост перфузии обусловлен возрастными преобразованиями системы микроциркуляции, что является результатом повышения интенсивности метаболических процессов.

Вариабельность микрокровотока (σ) у девочек за 2 года увеличилась на 44 % ($p < 0,01$). У мальчиков значение этого показателя от 8 до 10 лет возросло на 68 % ($p < 0,001$). Величина K_v в обеих группах в период от 8 до 10 лет достоверно не изменилась, поскольку рост среднеквадратичного отклонения был сопоставим с ростом показателя микроциркуляции.

Параметр σ характеризует временную изменчивость перфузии, отражает среднюю модуля-

цию кровотока во всех частотных диапазонах. Повышение σ обусловлено преимущественно более интенсивным функционированием регуляторных механизмов активного контроля микроциркуляции.

Влияние активных и пассивных факторов на поток крови приводит к изменению скорости и концентрации потока эритроцитов, что в свою очередь вызывает модуляцию перфузии [4].

У девочек в период от 8 до 10 лет отмечено увеличение максимальной амплитуды эндотелиальных, нейрогенных и миогенных ритмов на 64,2 ($p < 0,01$), 50,8 и 57,7 % ($p < 0,001$) соответственно. У мальчиков значения максимальной амплитуды эндотелиального, нейрогенного

Таблица 2

ВОЗРАСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ У МАЛЬЧИКОВ

Показатель	Возраст, лет		
	8,13±0,34	10,0±0,3	
М, пф. ед.	17,3±7,25	29,1±7,20***	
σ , пф. ед.	1,45±0,75	2,43±1,13***	
K_v , %	10,4±5,77	8,55±4,12	
Э	A_{max}	0,720±0,365	1,18±0,7***
	$(A_{max}/3\sigma) \times 100\%$	16,7±4,54	15,4±3,8
	$(A_{max}/M) \times 100\%$	4,71±2,92	4,02±2,40
Н	A_{max}	0,672±0,321	1,17±0,55***
	$(A_{max}/3\sigma) \times 100\%$	16,0±4,6	16,6±3,44
	$(A_{max}/M) \times 100\%$	4,32±2,25	4,17±2,12
М	A_{max}	0,553±0,265	1,13±0,5***
	$(A_{max}/3\sigma) \times 100\%$	13,4±3,5	16,1±3,46
	$(A_{max}/M) \times 100\%$	3,66±2,15	4,01±1,96
Д	A_{max}	0,243±0,078	0,656±0,250***
	$(A_{max}/3\sigma) \times 100\%$	6,39±2,63	9,88±3,56**
	$(A_{max}/M) \times 100\%$	1,64±1,11	2,29±0,78***
С	A_{max}	0,237±0,108	0,389±0,122***
	$(A_{max}/3\sigma) \times 100\%$	6,50±3,47	5,87±1,81*
	$(A_{max}/M) \times 100\%$	1,99±2,28	1,37±0,45**
НТ, отн. ед.	2,29±0,79	2,11±0,52	
МТ, отн. ед.	2,71±0,96	2,19±0,57*	
ПШ, отн. ед.	1,23±0,34	1,04±0,14*	

См. прим. к табл. 1.

и миогенного ритмов в период от 8 до 10 лет возросли на 63,8, 74,1 ($p < 0,01$) и 104,3 % ($p < 0,001$) соответственно.

Максимальная амплитуда дыхательных ритмов в период от 8 до 10 лет существенно увеличилась как у девочек (на 98,3 %, $p < 0,001$), так и у мальчиков (на 170 %, $p < 0,001$). Вклад в модуляцию микрокровотока у девочек возрос за 2 года на 36,8 % ($p < 0,01$), у мальчиков – на 54,6 % ($p < 0,001$).

Максимальные амплитуды пульсовых колебаний у девочек и мальчиков за 2 года увеличились на 17,9 и 64,1 % ($p < 0,001$) соответственно; их вклад в обеспечение тканевой перфузии уменьшился на 38 % ($p < 0,05$) у девочек и на 31 % ($p < 0,01$) у мальчиков.

Показатели миогенного тонуса микрососудов снизились за 2 года у девочек и мальчиков на 13,9 и 19,1 % ($p < 0,05$) соответственно. Именно миогенный тонус является последним звеном контроля микрокровотока перед капиллярным руслом [4], и его уменьшение (увеличение амплитуды миогенных колебаний) способствует снижению показателя шунтирования у мальчиков на 15,4 % ($p < 0,01$), а следовательно, увеличению нутритивного кровотока.

Изучение особенностей микроциркуляции крови у детей позволяет раскрыть закономерности формирования сосудисто-тканевых отношений в онтогенезе. Период второго детства (8-12 лет у мальчиков и 8-11 лет у девочек) является важным этапом развития сердечно-сосудистой системы, поскольку морфофункциональными особенностями данного этапа является созревание физиологических механизмов, обеспечивающих поддержание устойчивой умственной и физической работоспособности [15].

Базальные показатели микроциркуляции и параметры микрососудистого тонуса у мальчиков и девочек в возрасте 8 лет не имели достоверных отличий. У мальчиков 8 лет значения максимальных амплитуд дыхательных и сердечных ритмов были достоверно ниже на 21,8 и 26,6 % ($p < 0,05$) в сравнении с этими показателями у девочек. В 10-летнем возрасте пара-

метры микроциркуляции у девочек и мальчиков также не имели статистически значимых отличий, однако значение показателя шунтирования у мальчиков было ниже на 15,4 % ($p < 0,05$), а значения нормированных амплитуд миогенных и дыхательных ритмов были на 15,2 и 20,5 % ($p < 0,05$) выше, сердечных осцилляций – на 15,3 % ($p < 0,05$) ниже, чем у девочек, что свидетельствует о начале формирования половых отличий в становлении регуляторных механизмов микрокровотока на данном возрастном этапе.

Возрастной период от 8 до 10 лет находится между двумя скачкообразными периодами: первый (5-7 лет, когда происходит полуростовой скачок) характеризуется активной перестройкой организма; второй (13-15 лет, во время пубертатного скачка) является составной частью процессов полового созревания человека с его сложной картиной гормональной регуляции. Однако по уровню физиологического развития девочки на этих этапах опережают мальчиков. Половое созревание у девочек начинается на 1-2 года раньше, чем у их сверстников-мальчиков, и заканчивается тоже раньше [15].

Необходимо подчеркнуть, что процессы роста и развития не только идут неравномерно, то ускоряясь, то замедляясь, но еще и у разных детей с разной скоростью, т. е. в зависимости от индивидуальных особенностей, что может быть связано как с внутренними, в т. ч. и генетическими, причинами, так и с внешними, составляющими условия жизни.

Микроциркуляторное русло находится под многоуровневым контролем, который организован через систему с обратной связью. В процессе самоорганизации кровотока эндотелиальная активность, нейрогенный и миогенный механизмы контроля, пульсовые и дыхательные ритмы образуют положительные и отрицательные обратные связи.

Увеличение амплитуд нейрогенных колебаний вызывает снижение сопротивления и уменьшение жесткости сосудистой стенки. Нейрогенная симпатическая активность накладывается на миогенные вазомоции резистивных

микрососудов и подчиняет их [4], чем, по всей видимости, и обусловлено увеличение амплитуды вазомоторных импульсов, приводящих к уменьшению мышечного сопротивления и увеличению нутритивного кровотока.

Любая биологическая система должна быть колебательной для того, чтобы она могла сохраниться и не погибнуть. Неэлектрические колебания проявляются в виде временных изменений концентрации химических веществ и механических колебаний. Микроваскулярный эндотелий является ключевым модулятором вазодилатации [16] и вызывает изменения мышечного тонуса сосудов секрецией в кровь периодически изменяющихся концентраций, путем синтеза и освобождения вазоактивных субстанций. Доминирование в вейвлет-спектре эндотелиальных осцилляций, особенно в сочетании с высокоамплитудным пульсовым ритмом, свидетельствует о дилатации артерий и крупных артериол [4], что указывает на повышение притока артериальной крови в микроциркуляторное русло.

Заключение. Результаты нашего исследования продемонстрировали, что в процессе онтогенеза система микроциркуляции развивается в соответствии с растущими потребностями организма. Отмеченный в возрастном периоде от 8 до 10 лет выраженный рост перфузии соответствует физиологическим закономерностям роста и развития, связанным с высокой интенсивностью обменных процессов, обуславливающих своеобразную организацию функционирования сердечно-сосудистой системы. В этом возрасте начинают проявляться половые отличия в функционировании регуляторных механизмов микроциркуляции у мальчиков и девочек – об этом свидетельствуют достоверные различия характеристик активных и пассивных механизмов модуляции микроциркуляции.

Таким образом, в ходе проведенного исследования были зафиксированы как возрастные (в интервале от 8 до 10 лет) изменения параметров микроциркуляции, так и начинающие формироваться в этот период половые отличия в функционировании регуляторных механизмов микроциркуляции.

Список литературы

1. Литвин Ф.Б. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке возрастных особенностей микроциркуляции при постуральной пробе // Применение лазерной доплеровской флоуметрии в медицинской практике: материалы III Всерос. симп. М., 2000. С. 80–84.
2. Маколкин В.И., Подзолков В.И., Бранько В.В. Микроциркуляция в кардиологии. М., 2004. 135 с.
3. Козлов В.И. Система микроциркуляции крови: клинико-морфологические аспекты изучения // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2006. Т. 5, № 1. С. 84–101.
4. Крутаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. М., 2005. 123 с.
5. Дьяконова Е.Н. Особенности микроциркуляции крови у мальчиков в возрасте от 9 до 12 лет в зависимости от интенсивности и продолжительности занятий спортом // Вестн. новых мед. технологий. 2009. Т. XVI, № 2. С. 54–56.
6. Васильев А.П., Стрельцова Н.Н., Секисова М.А., Зыкова Е.Л. Функциональные особенности и клинико-прогностическое значение различных гемодинамических типов микроциркуляции у больных артериальной гипертонией // Урал. мед. журн. 2008. № 9. С. 90–95.
7. Литвин Ф.Б. Морфофункциональная перестройка системы микроциркуляции у детей, подростков и юношей, проживающих в местах с разными радиоэкологическими условиями: дис. ... д-ра биол. наук. М., 2006. 320 с.
8. Тверитина Е.С. Механизмы регуляции кровотока кожи у лиц разных возрастных групп // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Мед.-биол. науки. 2014. № 3. С. 73–78.
9. Грибанов А.В. Динамика кровообращения у школьников в условиях Европейского Севера: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Архангельск, 1991. 38 с.
10. Безруких М.М., Фарбер Д.А. Актуальные проблемы физиологии развития ребенка // Нов. исслед. 2014. № 3. С. 4–19.

11. Kvietyš P.R. *The Gastrointestinal Circulation*. London Health Sciences Center. San Rafael (CA), 2010.
12. Сидоров В.В., Сахно Ю.Ф. Возможности метода лазерной доплеровской флоуметрии для оценки состояния микроциркуляции крови // Ультразвук. и функцион. диагностика. 2003. № 2. С. 122–127.
13. Stefanovska A., Hožič M. Spatial Synchronization in the Human Cardiovascular System // *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 2000. Vol. 139, № 13. P. 270–282.
14. Федорович А.А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2010. Т. 9, № 1(33). С. 49–60.
15. Сошкин В.Д. Законы растущего организма. М., 2007.
16. Kapela A., Nagaraja S., Parikh J., Tsoukias N.M. Modeling Ca²⁺ Signaling in the Microcirculation: Intercellular Communication and Vasoreactivity // *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 2011. Vol. 39, № 5. P. 435–460.

References

1. Litvin F.B. Lazernaya dopplerovskaya floumetriya v otsenke vozrastnykh osobennostey mikrotsirkulyatsii pri postural'noy probe [Laser Doppler Flowmetry in the Assessment of Age-Related Peculiarities of Microcirculation in the Postural Test]. *Primenenie lazernoy dopplerovskoy floumetrii v meditsinskoj praktike: materialy III Vseros. simp.* [The Use of Laser Doppler Flowmetry in Medical Practice: Proc. 3rd Russia-Wide Symp.]. Moscow, 2000, pp. 80–84.
2. Makolkin V.I., Podzolkov V.I., Bran'ko V.V. *Mikrotsirkulyatsiya v kardiologii* [Microcirculation in Cardiology]. Moscow, 2004. 135 p.
3. Kozlov V.I. Sistema mikrotsirkulyatsii krovi: kliniko-morfologicheskie aspekty izucheniya [The System of Microcirculation: Clinical-Morphological Aspects of Studying]. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*, 2006, vol. 5, no. 1, pp. 84–101.
4. Krupatkin A.I., Sidorov V.V. *Lazernaya dopplerovskaya floumetriya mikrotsirkulyatsii krovi* [Laser Doppler Flowmetry of Blood Microcirculation]. Moscow, 2005. 123 p.
5. D'yakonova E.N. Osobennosti mikrotsirkulyatsii krovi u mal'chikov v vozraste ot 9 do 12 let v zavisimosti ot intensivnosti i prodolzhitel'nosti zanyatiy sportom [Blood Microcirculation Peculiarities in Accordance with Intensity and Duration of Sport Exercises in Boys of the Age from 9 to 12 Years Old]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*, 2009, vol. XVI, no. 2, pp. 54–56.
6. Vasil'ev A.P., Strel'tsova N.N., Sekisova M.A., Zykova E.L. Funktsional'nye osobennosti i klinikoprognosticheskoe znachenie razlichnykh gemodinamicheskikh tipov mikrotsirkulyatsii u bol'nykh arterial'noy gipertoniei [Functional Characteristics and Clinical and Prognostic Value of Various Haemodynamic Types of Microcirculation in Patients with Arterial Hypertension]. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal*, 2008, no. 9, pp. 90–95.
7. Litvin F.B. *Morfofunktsional'naya perestroyka sistemy mikrotsirkulyatsii u detey, podrostkov i yunoshey, prozhivayushchikh v mestakh s raznymi radioekologicheskimi usloviyami: dis. ... d-ra biol. nauk* [Morphofunctional Restructuring of Microcirculation in Children, Adolescents and Young Males Living in Areas with Different Radioecological Conditions: Dr Biol. Sci. Diss.]. Moscow, 2006. 320 p.
8. Tveritina E.S. Mekhanizmy regulyatsii krovotoka kozhi u lits raznykh vozrastnykh grupp [Mechanisms Regulating Blood Flow to the Skin in Various Age Groups]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Mediko-biologicheskie nauki*, 2014, no. 3, pp. 73–78.
9. Griбанov A.V. *Dinamika krovoobrashcheniya u shkol'nikov v usloviyakh Evropeyskogo Severa: avtoref. dis. ... d-ra med. nauk* [Haemodynamics in Schoolchildren in the European North: Dr. Med. Sci. Diss. Abs.]. Arkhangelsk, 1991. 38 p.
10. Bezrukikh M.M., Farber D.A. Aktual'nye problemy fiziologii razvitiya rebenka [Current Issues of Child Developmental Physiology]. *Novye issledovaniya*, 2014, no. 3, pp. 4–19.
11. Kvietyš P.R. *The Gastrointestinal Circulation*. London Health Sciences Center. San Rafael (CA), 2010.
12. Sidorov V.V., Sakhno Yu.F. Vozmozhnosti metoda lazernoy dopplerovskoy floumetrii dlya otsenki sostoyaniya mikrotsirkulyatsii krovi [Opportunities of Laser Doppler Flowmetry to Assess the State of Blood Microcirculation]. *Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika*, 2003, no. 2, pp. 122–127.
13. Stefanovska A., Hožič M. Spatial Synchronization in the Human Cardiovascular System. *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 2000, no. 139, pp. 270–282.
14. Fedorovich A.A. Funktsional'noe sostoyanie regulyatornykh mekhanizmov mikrotsirkulyatornogo krovotoka v norme i pri arterial'noy gipertenzii po dannym lazernoy dopplerovskoy floumetrii [The Functional State of Regulatory Mechanisms of the Microcirculatory Blood Flow in Normal Conditions and in Arterial Hypertension According to Laser Doppler Flowmetry]. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*, 2010, vol. 9, no. 1(33), pp. 49–60.

15. Son'kin V.D. *Zakony rastushchego organizma* [The Laws of the Growing Body]. Moscow, 2007.

16. Kapela A., Nagaraja S., Parikh J., Tsoukias N.M. Modeling Ca²⁺ Signaling in the Microcirculation: Intercellular Communication and Vasoreactivity. *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 2011, vol. 39, no. 5, pp. 435–460.

doi: 10.17238/issn2308-3174.2016.1.13

Baboshina Natalya Vladimirovna

Postgraduate Student, Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky
108 Respublikanskaya St., Yaroslavl, 150000, Russian Federation;
e-mail: i.tikhomirova@yspu.org

Tikhomirova Irina Aleksandrovna

Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky
108 Respublikanskaya St., Yaroslavl, 150000, Russian Federation;
e-mail: pankrateva@bk.ru

Malysheva Yuliya Viktorovna

Postgraduate Student, Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky
108 Respublikanskaya St., Yaroslavl, 150000, Russian Federation;
e-mail: yulichkinka@mail.ru

AGE-RELATED CHANGES IN MICROCIRCULATION IN PRIMARY SCHOOL CHILDREN

The study of the microcirculation system in ontogenesis is an important area of developmental physiology. It looks at the formation and functioning of human microvasculature at different age stages. Peripheral blood flow takes place in the vessels of individual organs and tissues and provides adequate blood supply to them adjusting to the constantly changing metabolic activity. We used Laser Doppler Flowmetry (LDF) together with the wavelet analysis of the amplitude-frequency spectrum of microcirculatory fluctuations to evaluate skin microcirculation and its regulatory mechanisms in children of both sexes twice: in 2013 and 2015 (upon their reaching the age of 8 and 10 years). During the age period from 8 to 10 years, tissue perfusion increased by 62.1 % and 68.2 % ($p < 0.001$) in both girls and boys, respectively. The rising values of microcirculation within this age period are associated with high intensity of metabolic processes due to the changes in the mechanisms of microcirculatory regulation during the transition to adolescence. The values of maximum oscillation amplitudes in all active factor ranges of microcirculatory regulation increased over two years both in boys and in girls. No significant differences were observed between microcirculation parameters of girls and boys aged 10 years. The values of normalized amplitudes of myogenic and respiratory rhythms in boys were credibly higher, while those of cardiac oscillations lower than in girls ($p < 0.05$). The analysis of the obtained data indicates both age-related (between 8 and 10 years) differences in microcirculation and emerging during this period sex-related differences in the functioning of regulatory mechanisms of microcirculation.

Keywords: *microcirculation in primary school children, Laser Doppler Flowmetry, regulatory mechanisms of microcirculation, age-related changes.*

Контактная информация:

Бабошина Наталья Владимировна
адрес: 150000, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108;
e-mail: pankrateva@bk.ru

Тихомирова Ирина Александровна
адрес: 150000, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108;
e-mail: i.tikhomirova@yspu.org

Мальшева Юлия Викторовна
адрес: 150000, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108;
e-mail: yulichkinka@mail.ru