

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ У ДЕТЕЙ 8 И 10 ЛЕТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЫХАТЕЛЬНОЙ ПРОБЫ

Н. В. Бабошина ✉

Кафедра медицины, биологии, теории и методики преподавания биологии, естественно-географический факультет, Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского, Ярославль

В микроциркуляторном русле осуществляются процессы диффузии газов и транскапиллярный обмен. В связи с этим актуальной задачей является оценка состояния регуляции кровоснабжения кожи и функциональных возможностей системы микроциркуляции крови на отдельных этапах онтогенеза. С помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии в группе мальчиков ( $n = 15$ ) и девочек ( $n = 13$ ) по достижении ими возрастов 8 и 10 лет оценивали состояние кожной микроциркуляции и функционирование механизмов ее регуляции. Обнаружено увеличение показателя микроциркуляции в возрастном периоде от 8 до 10 лет, вызванное перераспределением механизмов регуляции микрокровотока. При сравнении базальных показателей микроциркуляции достоверных половых различий в возрастах 8 и 10 лет не выявлено, однако поддержание примерно равного уровня перфузии у мальчиков и девочек достигается при разном соотношении регуляторных влияний на микрокровоток. При проведении дыхательной пробы выявлено увеличение исходного показателя микроциркуляции и резерва капиллярного кровотока в группе мальчиков и девочек в возрасте 10 лет. В ходе проведенного исследования между детьми 8- и 10-летнего возраста выявлены различия в показателях микроциркуляции, в степени выраженности активных и пассивных ритмов колебаний кровотока и реакции на дыхательную пробу, что свидетельствует о возрастных преобразованиях системы микроциркуляции.

**Ключевые слова:** лазерная доплеровская флоуметрия, механизмы регуляции микрокровотока, дыхательная функциональная проба, резерв капиллярного кровотока

✉ **Для корреспонденции:** Наталья Владимировна Бабошина  
150000, г. Ярославль, ул. Республиканская, д. 108; pankrateva@bk.ru

Статья поступила: 01.06.2016 Статья принята к печати: 12.06.2016

## EVALUATION OF MICROCIRCULATION IN CHILDREN OF 8 AND 10 YEARS OF AGE USING INSPIRATORY BREATH HOLD

Baboshina NV ✉

Department of Medicine, Biology and Approaches to Teaching Biology, Faculty of Natural Sciences and Geography, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia

Gas diffusion and transcapillary exchange take place in the microvasculature. Therefore, the evaluation of skin blood flow regulation and functional capacities of the microcirculatory system at various ontogenesis stages is of great importance. Using laser Doppler flowmetry in the group of boys ( $n = 15$ ) and girls ( $n = 13$ ) of 8 and 10 years of age, skin microcirculation and its regulatory mechanisms were evaluated. The study found an increase in the perfusion index in children between the age of 8 and 10 induced by the shifting roles of mechanisms of the microcirculatory regulation. The comparison of basal microcirculatory parameters did not display statistically significant differences related to sex in 8- and 10-year old participants. However, almost equal perfusion in boys and girls was maintained by different contributions of regulatory mechanisms. The breath holding test showed an increase in the initial microcirculation index and capillary blood flow reserve in the group of 10-year-old boys and girls. Our study revealed differences in various microcirculation parameters, in the intensity of active and passive rhythms of blood flow oscillations and response to inspiratory breath hold, which indicates age-related transformations of microcirculation system.

**Keywords:** laser Doppler flowmetry, microcirculatory regulation, inspiratory breath hold, capillary flow reserve

✉ **Correspondence should be addressed:** Natalia Baboshina  
ul. Respublikanskaya, d. 108, Yaroslavl, Russia, 150000; pankrateva@bk.ru

Received: 01.06.2016 Accepted: 12.06.2016

Согласно современным представлениям все функции организма претерпевают изменения при тесном взаимодействии организма и среды. В соответствии с этим адаптивный характер функционирования организма в различные возрастные периоды определяется морфофункциональной зрелостью физиологических систем и адекватностью воздействующих средовых факторов функциональным возможностям организма [1].

Состояние сердечно-сосудистой системы, которая является одной из важных систем жизнеобеспечения, часто

рассматривают как индикатор функционального состояния целостного организма [2]. Однако предметом физиологических исследований все чаще становятся процессы функционального взаимодействия кровеносной и дыхательной систем [3].

Такое внимание к взаимодействию названных систем продиктовано тем, что кардиореспираторная система, обеспечивающая поступление кислорода к клеткам организма и в значительной степени обуславливающая состояние гомеостаза, является одной из важнейших физиоло-

гических систем. Она определяет как умственную, так и физическую работоспособность человека и возможности его адаптации к разным видам деятельности [4]. Периферический кровоток, осуществляющийся в сосудах отдельных органов и тканей, направлен на обеспечение адекватного кровоснабжения в них в соответствии с постоянно меняющейся метаболической активностью.

Одной из наиболее актуальных проблем возрастной физиологии является оценка состояния отдельных звеньев и регуляторных механизмов перфузии ткани кровью, определяющих в конечном счете нормальное функционирование органов и организма в целом. Крайне важно также исследование функциональных возможностей системы микроциркуляции крови в ходе онтогенеза [5], позволяющее раскрыть закономерности формирования и особенности функционирования микроциркуляторного русла, проанализировать его феноменологию и структуру, определить функциональный резерв и условия эффективной адаптации системы микроциркуляции на разных этапах развития ребенка [6, 7].

Интерес к микроциркуляции продиктован чрезвычайной важностью процессов, происходящих в регионе терминальных сосудов. Функциональный контакт микроциркуляторного русла с тканями является определяющим фактором, который обеспечивает гомеостаз организма посредством сложной и тонкой регуляции микроциркуляции в соответствии с метаболическими запросами тканей. В силу чего именно конечное сосудистое русло — это область, где прежде всего происходят сдвиги компенсаторно-приспособительного характера, во многом определяющие функциональное состояние организма [8]. В научной литературе представлено значительное количество работ, посвященных исследованию микроциркуляторного русла у детей младшего школьного возраста [7, 9–11]. Так, например, в работе Кутыревой и соавт. были продемонстрированы возрастные отличия в базальных показателях микроциркуляции и механизмах ее регуляции у детей 3–4 и 10–12 лет; установлены изменения функционального резерва микроциркуляции с возрастом.

В последние десятилетия наиболее широко для исследования кровотока применяют методы, основанные на доплерографии сосудистого русла. Одним из основных методов изучения состояния микроциркуляции и ее регуляторных механизмов служит лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) совместно с функциональными пробами [12]. Достоинством ЛДФ является возможность измерения микрокровотока *in vivo* и бесконтактно, что очень важно для тестирования микрогемодинамики в детском возрасте.

Применение функциональной дыхательной пробы (пробы с задержкой дыхания) позволяет получить большой объем информации о характере микрогемодинамики и ее резервных возможностях, а также оценить функциональный вклад различных звеньев модуляции микрокровотока. Величина снижения кровотока при дыхательной вазоконстрикторной пробе отражает как влияние со стороны симпатической иннервации, так и реактивность сосудистой стенки.

Дыхательная проба не только проста в применении, но и высокоинформативна. В участках кожи с высокой плотностью симпатической иннервации она положительна у всех здоровых лиц [13].

Исходя из вышеизложенного, целью работы было исследование микроциркуляции крови у детей 8 и 10 лет с использованием дыхательной пробы.

## ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

В исследование были включены практически здоровые дети обоих полов после получения письменного информированного согласия их законных представителей (родителей): группа мальчиков ( $n = 15$ ) и девочек ( $n = 13$ ). Обследование детей проводили дважды с интервалом в два года: в 2013 и 2015 гг. по достижении ими возрастов 8 и 10 лет. Оценку состояния микрогемодициркуляции производили методом лазерной доплеровской флоуметрии с помощью компьютеризированного лазерного анализатора ЛАКК-02 (НПП «ЛАЗМА», Россия).

Кожа представляет собой традиционно доступный в клинической практике объект для функциональной диагностики состояния микроциркуляции [14]. В качестве тестируемой области была выбрана дистальная фаланга второго пальца правой кисти. Эта область относится к гладкой коже, не имеющей волосяного покрова (glabrous skin). Она богата не только исключительно зависимыми от симпатической иннервации артериоловеноулярными анастомозами, но и вегетативными и сенсорными нервными волокнами [13].

Определяли следующие характеристики показателя микроциркуляции: его среднее арифметическое значение  $M$  (средняя перфузия), среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  (среднее колебание перфузии относительно среднего значения потока крови или средняя модуляция кровотока), коэффициент вариации  $K_v$  и амплитудно-частотные характеристики отраженного сигнала.

Среди звеньев регуляции микрокровотока выделяют пассивные и активные механизмы, которые в полосе 0,005–3 Гц формируют пять неперекрывающихся частотных диапазонов: 0,007–0,017 Гц — диапазон эндотелиальной активности; 0,023–0,046 Гц — нейрогенной (симпатической адренергической) активности; 0,05–0,145 Гц — миогенной (гладкомышечной) активности; 0,2–0,4 Гц — диапазон респираторного ритма; 0,8–1,6 Гц — кардиального ритма [15]. Регистрируемый в ЛДФ-грамме колебательный процесс является результатом наложения колебаний, обусловленных функционированием активных и пассивных механизмов. Активные механизмы (эндотелиальный, нейрогенный и миогенный механизмы регуляции просвета сосудов) создают поперечные колебания кровотока в результате чередования сокращения и расслабления мышц сосудов (сменяющие друг друга эпизоды вазоконстрикции и вазодилатации). Пассивные факторы (дыхательные и кардиальные ритмы) организуют продольные колебания кровотока, выражающиеся в периодическом изменении давления и объема крови в сосуде [13].

Амплитудно-частотный спектр колебаний рассчитывали с помощью вейвлет-преобразования и оценивали вклад эндотелиальных, нейрогенных и миогенных компонентов тонуса микрососудов, а также дыхательных и сердечных ритмов [16]. Рассчитывали нейрогенный тонус (НТ) прекапиллярных резистивных микрососудов и миогенный тонус (МТ) метартериол и прекапиллярных сфинктеров, а также показатель шунтирования (ПШ) по формулам:

$$НТ = (\sigma \times P_{cp}) / (A_n \times M),$$

$$МТ = (\sigma \times P_{cp}) / (A_m \times M),$$

$$ПШ = A_n / A_m,$$

где  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение показателя микроциркуляции;  $P_{cp}$  — среднее артериальное давление;  $M$  — среднее арифметическое значение показателя микроциркуляции;  $A_n$  и  $A_m$  — максимальные усредненные

амплитуды осцилляций симпатического адренергического и миогенного диапазонов частот [13].

Ввиду разброса результатов измерений амплитуд колебаний осуществлять диагностику работы того или иного механизма регуляции только по величинам амплитуд затруднительно. Поэтому кроме  $A_{max}$  анализировали функциональный вклад каждого звена в модуляцию микрокровотока:  $(A_{max} / 3\sigma) \times 100 \%$ , а также 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 [16, 17].

С целью исследования резервных возможностей микрокровотока использовали дыхательную вазоконстрикторную пробу. Функциональную пробу осуществляли путем 30-секундной задержки дыхания на высоте глубокого вдоха, что приводило к кратковременному снижению показателя микроциркуляции с дальнейшим восстановлением кривой до исходного уровня (рисунок).

При проведении дыхательной пробы регистрировали следующие показатели:  $M_{исх}$  — исходная величина показателя микроциркуляции;  $PF_{реакц}$  — минимальный уровень снижения перфузии при дыхательной пробе;  $M_{восст}$  — значение показателя микроциркуляции после восстановления дыхания; а также интервалы времени: T3–T1 — между началом задержки дыхания и началом спада уровня микрокровотока, T4–T3 — между началом спада уровня микрокровотока и минимальным значением показателя микроциркуляции, T5–T4 — от момента достижения минимального значения показателя микроциркуляции до восстановления дыхания.

По результатам пробы с задержкой дыхания определяли степень снижения показателя микроциркуляции ( $\Delta M$ ) и рассчитывали резерв капиллярного кровотока (РКК, %) по формулам:

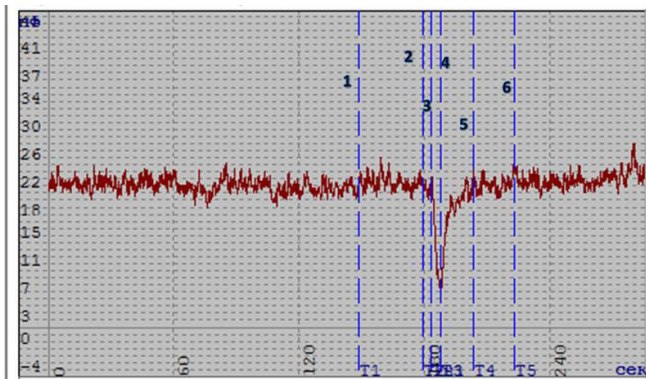
$$\Delta M = [(M_{исх} - M_{мин}) / M_{исх}] \times 100 \%,$$

$$РКК = (M_{мин} / M_{исх}) \times 100 \%,$$

где  $M_{мин}$  и  $M_{исх}$  — минимальная и исходная величины показателя микроциркуляции [13].

Полученные данные (в том числе для  $\sigma$  и  $K_v$ ) представлены в виде средних арифметических значений с их стандартным отклонением. Статистическую обработку полученных данных после проверки выборки на соответствие закону нормального распределения проводили

Функциональные пробы



Пример ЛДФ-граммы при 30-секундной задержке дыхания у ребенка 8 лет. Цифрами на рисунке обозначены: 1 — исходная величина показателя микроциркуляции; 2 — начало задержки дыхания; 3 — начало спада показателя микроциркуляции; 4 — минимальное значение показателя микроциркуляции; 5 — окончание задержки дыхания; 6 — значение показателя микроциркуляции после восстановления дыхания.

с использованием параметрического t-критерия Стьюдента с помощью программы Microsoft Excel. Поскольку в экспериментальное исследование состояния микроциркуляции были вовлечены одни и те же школьники с интервалом в два года (измерения выполнены в 2013 и 2015 гг.), 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 ИССЛЕДОВАНИЯ

В группах обследуемых лиц с возрастом наблюдали повышение показателя микроциркуляции у мальчиков и девочек на 36,0 и 42,5 % ( $p < 0,01$ ) соответственно. Достоверных изменений в модуляции кровотока ( $\sigma$ ) в обеих группах не выявлено. Вариабельность кровотока ( $K_v$ ) в группе мальчиков достоверно уменьшилась на 30,7 % ( $p < 0,01$ ), у девочек значение  $K_v$  достоверно не изменилось.

Расчетные параметры  $M$ ,  $\sigma$  и  $K_v$  дают общую оценку состояния микроциркуляции крови. Более детальный анализ функционирования микроциркуляторного русла проведен на втором этапе при обработке амплитудно-частотного спектра колебаний перфузии.

У мальчиков с возрастом нормированная амплитуда эндотелиальных ритмов уменьшилась на 19,7 % ( $p < 0,05$ ); амплитуда колебаний миогенных осцилляций возросла на 24,4 % ( $p < 0,01$ ). В группе мальчиков 10 лет значения максимальных, нормированных и приведенных амплитуд колебаний во всех диапазонах пассивных факторов регуляции микрокровотока (дыхательных и сердечных ритмов) были достоверно выше по сравнению с данными, полученными в возрасте 8 лет. Значения миогенного тонуса и показателя шунтирования с возрастом снизились на 12,2 % ( $p < 0,05$ ) и 22,5 % ( $p < 0,01$ ) соответственно (табл. 1).

У девочек в период от 8 до 10 лет отмечено снижение функционального вклада в модуляцию микрокровотока эндотелиального ритма и нейрогенных осцилляций на 23,6 и 20,9 % ( $p < 0,05$ ) соответственно. Вклад в общий уровень тканевой перфузии миогенных ритмов был снижен на 29,3 % ( $p < 0,05$ ). Максимальные амплитуды дыхательных и сердечных ритмов увеличились с возрастом на 84,2 % ( $p < 0,001$ ) и 38,9 % ( $p < 0,05$ ). Значение нейрогенного тонуса возросло на 31,4 % ( $p < 0,05$ ), показателя шунтирования снизилось на 15,2 % ( $p < 0,05$ ) (табл. 1).

Базальные показатели микроциркуляции достоверно не различались у мальчиков и девочек в возрастах 8 и 10 лет. У девочек 8 лет вклад нормированных амплитуд дыхательных и сердечных ритмов выше, чем у мальчиков их возраста, на 17,6 и 36,6 % ( $p < 0,05$ ) соответственно. У 10-летних мальчиков, в сравнении с данными девочек того же возраста, нормированная амплитуда миогенных ритмов выше на 27,5 % ( $p < 0,01$ ), а нейрогенный тонус снижен на 18 % ( $p < 0,05$ ).

Анализ результатов дыхательной пробы показал, что более высокий исходный уровень перфузии зафиксирован в группе мальчиков и девочек в возрасте 10 лет: у мальчиков выше на 36,0 %, у девочек — на 42,5 % по сравнению с аналогичными данными, полученными у них в возрасте 8 лет ( $p < 0,01$ ) (табл. 2).

Интервал между началом задержки дыхания и началом спада уровня микрокровотока у мальчиков за два года уменьшился на 18,3 %, у девочек он вырос на 23,3 % ( $p < 0,05$ ). С возрастом у мальчиков и девочек зафиксиро-

Таблица 1. Показатели микроциркуляции и механизмов ее регуляции у детей в возрасте от 8 до 10 лет

Показатель		Мальчики (n = 15)		Девочки (n = 13)	
		8,13 ± 0,34 года	10,00 ± 0,33 года	8,00 ± 0,33 года	10,00 ± 0,33 года
Показатель микроциркуляции	M, пф. ед.	19,65 ± 5,34	26,77 ± 6,00**	20,23 ± 4,03	28,89 ± 6,23**
	σ, пф. ед.	2,29 ± 0,85	2,22 ± 0,66	2,42 ± 0,92	2,70 ± 1,01
	K <sub>v</sub> , %	13,09 ± 4,91	9,07 ± 3,11**	12,22 ± 4,45	10,43 ± 4,65
Эндотелиальные ритмы	A <sub>max</sub> , пф. ед.	1,58 ± 0,83	1,28 ± 0,87	1,29 ± 0,45	1,40 ± 0,63
	(A <sub>max</sub> / 3σ) × 100 %	20,84 ± 5,17	16,72 ± 5,23*	21,16 ± 4,77	16,16 ± 2,87*
	(A <sub>max</sub> / M) × 100 %	8,23 ± 3,87	4,82 ± 2,88*	7,12 ± 2,68	5,35 ± 2,67
Нейрогенные ритмы	A <sub>max</sub> , пф. ед.	1,36 ± 0,49	1,35 ± 0,67	1,51 ± 0,68	1,43 ± 0,71
	(A <sub>max</sub> / 3σ) × 100 %	18,02 ± 3,19	18,33 ± 3,90	20,52 ± 4,28	16,15 ± 4,65*
	(A <sub>max</sub> / M) × 100 %	7,16 ± 2,67	5,13 ± 2,44*	7,53 ± 3,28	5,02 ± 2,49*
Миогенные ритмы	A <sub>max</sub> , пф. ед.	1,00 ± 0,35	1,12 ± 0,41	1,09 ± 0,42	1,19 ± 0,49
	(A <sub>max</sub> / 3σ) × 100 %	13,49 ± 2,92	16,84 ± 3,82**	15,26 ± 3,52	13,21 ± 3,38
	(A <sub>max</sub> / M) × 100 %	5,19 ± 1,36	4,25 ± 1,47	5,49 ± 2,07	3,88 ± 1,45*
Дыхательные ритмы	A <sub>max</sub> , пф. ед.	0,31 ± 0,10	0,58 ± 0,19***	0,33 ± 0,11	0,61 ± 0,18***
	(A <sub>max</sub> / 3σ) × 100 %	4,34 ± 1,08	8,41 ± 2,49***	5,28 ± 0,95	7,55 ± 2,48*
	(A <sub>max</sub> / M) × 100 %	1,52 ± 0,36	2,16 ± 0,54**	1,79 ± 0,67	2,14 ± 0,68
Сердечные ритмы	A <sub>max</sub> , пф. ед.	0,18 ± 0,04	0,35 ± 0,11***	0,28 ± 0,11	0,39 ± 0,14*
	(A <sub>max</sub> / 3σ) × 100 %	2,67 ± 1,02	5,28 ± 2,11**	4,21 ± 2,16	5,08 ± 1,52
	(A <sub>max</sub> / M) × 100 %	0,99 ± 0,24	1,32 ± 0,34**	1,33 ± 0,81	1,47 ± 0,52
НТ, отн. ед.		1,84 ± 0,38	1,82 ± 0,32	1,69 ± 0,38	2,22 ± 0,62*
МТ, отн. ед.		2,37 ± 0,48	2,08 ± 0,51*	2,29 ± 0,51	2,41 ± 0,61
ПШ, отн. ед.		1,38 ± 0,36	1,07 ± 0,15**	1,38 ± 0,32	1,17 ± 0,20*

Примечание: Здесь и в табл. 2 данные представлены как среднее арифметическое ± стандартное отклонение. M — среднее значение показателя микроциркуляции; σ — среднее квадратичное отклонение колебаний перфузии или средняя модуляция кровотока; K<sub>v</sub> — коэффициент вариации показателя микроциркуляции или вариабельность кровотока; НТ — нейрогенный тонус; МТ — миогенный тонус; ПШ — показатель шунтирования; A<sub>max</sub>, (A<sub>max</sub> / 3σ) × 100 % и (A<sub>max</sub> / M) × 100 % — максимальная, нормированная и приведенная амплитуды.

\* — p < 0,05; \*\* — p < 0,01; \*\*\* — p < 0,001 при сравнении с соответствующими показателями более раннего возраста.

Таблица 2. Показатели микроциркуляции при дыхательной пробе у детей в возрасте от 8 до 10 лет

Показатель	Мальчики (n = 15)		Девочки (n = 13)	
	8,13 ± 0,34 года	10,00 ± 0,33 года	8,00 ± 0,33 года	10,00 ± 0,33 года
M <sub>иск</sub> , пф. ед.	20,26 ± 5,49	26,91 ± 6,49**	19,73 ± 5,91	29,54 ± 6,36**
ПФ <sub>реакц</sub> , пф. ед.	10,12 ± 4,06	16,17 ± 7,90*	9,38 ± 2,58	18,68 ± 7,69**
M <sub>восст</sub> , пф. ед.	18,87 ± 4,40	26,90 ± 6,65**	19,93 ± 5,22	29,68 ± 6,94**
T3–T1, с	11,28 ± 3,95	9,23 ± 2,28*	10,34 ± 1,66	12,76 ± 3,03*
T4–T3, с	8,01 ± 4,10	4,74 ± 1,88*	9,65 ± 4,22	6,58 ± 2,45*
T5–T4, с	10,64 ± 4,64	17,81 ± 6,75**	9,35 ± 3,06	22,02 ± 6,00***
РКК, %	54,09 ± 17,81	59,57 ± 24,35	50,88 ± 13,32	66,78 ± 16,48**
ΔM, %	50,20 ± 26,10	39,70 ± 23,10*	52,40 ± 22,50	36,96 ± 20,77**

Примечание: M<sub>иск</sub> — исходное значение показателя микроциркуляции перед задержкой дыхания; ПФ<sub>реакц</sub> — минимальное значение перфузии при дыхательной пробе; M<sub>восст</sub> — значение показателя микроциркуляции после восстановления дыхания; T3–T1 — интервал времени между началом задержки дыхания и началом спада уровня микрокровотока; T4–T3 — интервал времени между началом спада уровня микрокровотока и минимальным значением показателя микроциркуляции; T5–T4 — интервал времени от момента достижения минимального значения показателя микроциркуляции до восстановления дыхания; РКК — резерв капиллярного кровотока; ΔM — степень снижения показателя микроциркуляции.

\* — p < 0,05; \*\* — p < 0,01; \*\*\* — p < 0,001 при сравнении с соответствующими показателями более раннего возраста.

ровано увеличение времени от момента достижения минимального значения показателя микроциркуляции до восстановления дыхания на 67,9 % (p < 0,01) и 135,0 % (p < 0,001) соответственно.

Резервный кровоток в микрососудах у мальчиков достоверно не изменился, однако наблюдалась тенденция к его увеличению; у девочек РКК увеличился на 31,5 % (p < 0,01).

У девочек в 10 лет нейрогенный тонус был выше на 31,4 % (p < 0,05) и значение ΔM ниже на 30,2 % (p < 0,01) по сравнению с данными, полученными у них в возрасте 8 лет. У 10-летних мальчиков нейрогенный тонус достоверно не изменился, относительная величина снижения показателя микроциркуляции при вазоконстрикторной пробе уменьшилась на 20,9 % (p < 0,05).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что развитие организма протекает неравномерно: продолжительные устойчивые периоды развития сменяются сравнительно короткими неустойчивыми, «критическими». Именно в эти «критические» периоды развития происходит усиленное формирование новых качественных свойств и отдельных физиологических систем, что сопряжено с активацией энергетического обмена [18].

Опубликованные данные показывают, что формирование механизмов регуляции микроциркуляции приходится на 6 лет, а окончательное становление особенностей функционирования системы микроциркуляции связано с периодом полового созревания, по завершении которого формируется дефинитивный тип микроциркуляции крови [19].

Литвин в своей работе отмечает, что с возрастом наблюдается тенденция к повышению уровня перфузии тканей кровью [1].

В нашем исследовании зафиксирован выраженный рост перфузии в интервале от 8 до 10 лет, обусловленный, по всей видимости, возрастными преобразованиями системы микроциркуляции, что является результатом повышения интенсивности метаболических процессов. Увеличение амплитуды пульсовой волны на фоне повышенной величины показателя микроциркуляции свидетельствует об увеличении притока в микроциркуляторное русло артериальной крови [16].

Снижение показателя шунтирования у обследуемых указывает на уменьшение мышечного тонуса прекапилляров, регулирующих приток крови в обменное (нутритивное) русло. Однако у мальчиков это достигается уменьшением миогенного тонуса, тогда как у девочек — повышением нейрогенного тонуса, что свидетельствует об увеличении объема крови, поступающей в нутритивное звено.

При сравнении базальных показателей микроциркуляции не выявлено достоверных различий между уровнем перфузии у мальчиков и девочек в возрастах 8 и 10 лет, однако поддержание примерно равного уровня перфузии в возрасте 10 лет у мальчиков и девочек достигалось при разном соотношении регуляторных влияний и параметров микрососудистого тонуса на микрокровоток.

В микроциркуляторное русло кожи дыхательные осцилляции проникают со стороны веноулярного звена и в основном регистрируются в венах. Формирование указанных колебаний в системе микроциркуляции кожи человека обусловлено по меньшей мере двумя механизмами: во-первых, механической трансмиссией респираторной динамики внутригрудного давления, опосредуемой венозной системой (присасывающее действие грудной клетки с ростом кровенаполнения вен на вдохе), а во-вторых, центральным вегетативным взаимодействием сердечно-сосудистого и дыхательных центров. В первом случае указанный механизм носит пассивный гидростатический характер, т. е. респираторнозависимые колебания реализуются за счет распространения волны давления, не затрагивая собственных активных механизмов регуляции сосудистого тонуса. Во втором случае представленные осцилляции кровотока формируют активные вазоконстрикторные механизмы нейрогенной природы, одним из которых является известный инспираторный вазомоторный рефлекс, который проявляется в кратковременном снижении перфузии ткани кровью в ответ на резкий глубокий вдох. Инспираторный вазомоторный рефлекс реализуется через симпатическую периферическую иннервацию [20].

Вазомоторный рефлекс, запускаемый быстрым и глубоким вдохом, вызывает констрикцию артериол и кратковременное уменьшение кожного кровотока. Снижение перфузии при дыхательной пробе отражает симпатическую регуляцию, ограниченную преимущественно нейрососудистым синапсом [13].

В исследовании Литвина [21] было показано, что с возрастом (от 7 до 20 лет) отмечается увеличение функциональных резервов системы микроциркуляции. В нашем исследовании в результате применения дыхательной функциональной пробы выявлены увеличение резервных возможностей микрокровотока при кратковременной гипоксии в группе девочек и выраженная тенденция к увеличению РКК в группе мальчиков.

Реакция сосуда на активацию адренергических волокон зависит как от влияний со стороны симпатической иннервации, так и от реактивности сосудистой стенки. Поэтому величина снижения кровотока при дыхательной пробе отражает результирующую этих двух процессов, которые трудно оценить изолированно. В связи с этим трактовку результатов ЛДФ для оценки функции симпатической периваскулярной иннервации целесообразно осуществлять по двум параметрам — исходному нейрогенному тону в покое и относительной величине снижения показателя микроциркуляции при дыхательной пробе [13]. Выявленные изменения НТ и  $\Delta M$  у девочек 10 лет позволяют сделать заключение о повышении симпатической активности при стимуляции вазоконстрикторными пробами, тогда как у мальчиков 10 лет изменение величины снижения кровотока вызвано уменьшением реактивности преангионарных нейронов при функциональной нагрузке [16].

Степень снижения показателя микроциркуляции при дыхательной пробе отражает симпатическую регуляцию, ограниченную преимущественно нейрососудистым синапсом. Следовательно, выявленное с возрастом снижение параметра  $\Delta M$  в группе мальчиков и девочек свидетельствует о менее выраженной реакции сосудистой стенки на задержку дыхания. С возрастом проявляется тенденция к менее выраженной реакции уменьшения перфузии при проведении дыхательной пробы.

С физиологических позиций изучение периода от 8 до 10 лет является актуальным, поскольку именно этот возраст находится между двумя критическими периодами: полуростовым и пубертатным. Первый период приходится обычно на возраст 5–6 лет и связан с существенными морфофункциональными перестройками преимущественно в нервной системе [22]. Пубертатный критический период связан с началом полового созревания и перестройкой гормональной и мышечной систем.

У детей в возрасте от 8 до 10 лет интенсивность окислительных процессов остается весьма высокой, несмотря на то, что обменные процессы в этом возрасте достаточно стабильны. Однако наблюдается расширение резервных возможностей большинства физиологических систем, в том числе кардиореспираторной. 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 [22]. Тесная функциональная взаимосвязь дыхательной и сердечно-сосудистой систем предполагает и их взаимозависимость. Изменения в функционировании дыхательной системы неизбежно приводят к адаптивным перестройкам в системе

кровообращения и кислородном питании тканей.

Развитие кардиореспираторной системы в онтогенезе происходит гетерохронно в тесной взаимосвязи с физическим развитием организма детей, морфологической перестройкой легких, сердца, грудной клетки, возрастной динамикой метаболических процессов и совершенствованием регуляторных механизмов. В связи с этим кардиореспираторная система ребенка школьного возраста в различные возрастные периоды имеет не только количественные, но и качественные различия. В их основе лежат процессы непрерывного развития морфологических структур и функциональных перестроек [23].

## Выводы

В ходе проведенного исследования выявлены изменения периферического кровотока, характеризующиеся увеличением перфузии тканей кровью с возрастом в группе мальчиков и девочек. Это, по всей видимости, обусловлено перераспределением влияния механизмов регуляции, а именно снижением вклада амплитуд колебаний активных звеньев модуляции и повышением вклада пассивных звеньев модуляции микрогемодинамики. Значительный рост пульсовой волны свидетельствует об увеличении притока артериальной крови в микроциркуляторное русло. Увели-

чение амплитуды дыхательной волны, обусловленное венозным давлением, указывает на снижение микроциркуляторного давления.

В результате исследования установлено, что в возрасте 8 и 10 лет базальные показатели микроциркуляции мальчиков и девочек достоверно не отличались. Однако поддержание примерно равного уровня перфузии достигалось благодаря разному соотношению влияния активных и пассивных факторов контроля микроциркуляторного русла.

При оценке резервных возможностей микроциркуляции с помощью дыхательной пробы отмечено, что совершенствование вегетативной регуляции микрокровотока в период от 8 до 10 лет выражалось в снижении реактивности сосудистой стенки микрососудов в ответ на симпатические адренергические стимулы.

Необходимы дальнейшие исследования, которые будут направлены на изучение микроциркуляторного русла и его регуляторных механизмов на разных этапах онтогенеза, в том числе при переходе к периоду полового созревания, когда начинают формироваться половые отличия в функционировании гемомикроциркуляции. Эти исследования позволят составить более полное представление о динамике состояния микроциркуляции человека и выявить возрастные особенности периферического кровообращения.

## Литература

1. Литвин Ф. Б. Особенности становления системы микроциркуляции в онтогенезе у детей и подростков из радиоэкологически неблагоприятных регионов. Нов. исслед. 2009; 1 (20): 38–44.
2. Литвин Ф. Б., Аносов И. П., Асямоллов П. О., Васильева Г. В., Мартынов С. В., Жигало В. Я. Сердечный ритм и система микроциркуляции у лыжников в предсоревновательном периоде спортивной подготовки. Вестн. УдГУ. Сер. Биол. 2012; 1: 67–74.
3. Кирилина Т. В., Красников Г. В., Танканаг А. В., Пискунова Г. М., Чемерис Н. К. Респираторнозависимые колебания кровотока в системе микроциркуляции кожи человека. Регионар. кровообращ. и микроциркул. 2009; 2 (30): 58–62.
4. Токаева Л. К., Павленкович С. С. Физическая работоспособность как интегральный показатель функционального состояния и физического здоровья студентов педагогического вуза. Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. 2011; (25): 645–9.
5. Чуян Е. Н., Горная О. И. Особенности микроциркуляции крови у юношей-студентов. Уч. зап. ТНУ. Сер. Биол., хим. 2009; 2: 166–74.
6. Грибанов А. В. Кровообращение и дыхание у школьников в циркулярных условиях. Архангельск: САФУ; 2016. 270 с.
7. Кутырева О. И., Дьяконова Е. Н., Лобанова Л. В. Возрастные особенности микроциркуляции у здоровых детей. Вестн. нов. мед. технол. 2009; 16 (3): 37–8.
8. 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 гипертензией. Кардиология. 2008; 9 (49): 90–5.
9. Гурова О. А., Козлов В. И. Особенности микроциркуляции крови в коже у детей. Вестн. РУДН. Сер. Мед. 2011; 1: 12–6.
10. Дьяконова Е. Н. Особенности микроциркуляции крови у мальчиков в возрасте от 9 до 12 лет в зависимости от интенсивности и продолжительности занятий спортом. Вестн. нов. мед. технол. 2009; 2: 54–6.
11. Гурова О. А. Изменения кожного кровотока при умеренной физической нагрузке у детей 4–7 лет с разным типом микроциркуляции крови. Нов. исслед. 2010; 4 (25): 30–5.
12. Roustit M, Cracowski JL. Non-invasive assessment of skin microvascular function in humans: an insight into methods. Microcirculation. 2012 Jan; 19 (1): 47–64.
13. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. М.: Медицина; 2005. 123 с.
14. Козлов В. И., Морозов М. В., Гурова О. А. ЛДФ-метрия кожного кровотока в различных областях тела. Регионар. кровообращ. и микроциркул. 2012; 1 (41): 58–61.
15. Jan YK, Brienza DM, Geyer MJ, Karg P. Wavelet-based spectrum analysis of sacral skin blood flow response to alternating pressure. Arch Phys Med Rehabil. 2008 Jan; 89 (1): 137–45.
16. Крупаткин А. И., Сидоров В. В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем. Колебания, информация, нелинейность. Руководство для врачей. М.: Либроком; 2014. 498 с.
17. Федорович А. А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии. Регионар. кровообращ. и микроциркул. 2010; 1 (33): 49–60.
18. Сонькин В. Д., Тамбовцева Р. В. Развитие мышечной энергетики и работоспособности в онтогенезе. М.: Либроком; 2011. 368 с.
19. Гурова О. А. Индивидуально-типологические особенности микроциркуляции крови у детей 4–7 лет. Нов. исслед. 2014; 2 (39): 15–23.
20. Тюрина М. И., Красников Г. В., Танканаг А. В., Пискунова Г. М., Чемерис Н. К. Формирование респираторнозависимых колебаний скорости кровотока в микроциркуляторном русле кожи человека в условиях контролируемого дыхания. Регионар. кровообращ. и микроциркул. 2011; 3 (39): 31–7.
21. Литвин Ф. Б. Возрастные и индивидуально-типологические особенности микроциркуляции у мальчиков, подростков и юношей. Регионар. кровообращ. и микроциркул. 2006; 1 (17): 44–50.
22. Безруких М. М., Фарбер Д. А. Актуальные проблемы физиологии развития ребенка. Нов. исслед. 2014; 3 (40): 4–19.
23. Ослякова А. О. Функционирование регуляторных механизмов периферического кровотока в норме и при нарушениях деятельности кардиореспираторной системы [диссертация]. Ярославль: ЯГПУ им. К. Д. Ушинского; 2013.

References

1. Litvin FB. Osobennosti stanovleniya sistemy mikrotsirkulyatsii v ontogeneze u detei i podrostkov iz radioekologicheskii neblagopoluchnykh regionov. *Novye issledovaniya*. 2009; 1 (20): 38–44. Russian.
2. Litvin FB, Anosov IP, Asyamolov PO, Vasil'eva GV, Martynov SV, Zhigalo VYa. Serdechnyi ritm i sistema mikrotsirkulyatsii u lyzhnikov v predsorevnovatel'nom periode sportivnoy podgotovki. *Bulletin of Udmurt University. Biology*. 2012; 1: 67–74. Russian.
3. Kirilina TV, Krasnikov GV, Tankanag AV, Piskunova GM, Chemeris NK. Respiratornozavisimye kolebaniya krovotoka v sisteme mikrotsirkulyatsii kozhi cheloveka. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*. 2009; 2 (30): 58–62. Russian.
4. Tokaeva LK, Pavlenkovich SS. Fizicheskaya rabotosposobnost' kak integral'nyi pokazatel' funktsional'nogo sostoyaniya i fizicheskogo zdorov'ya studentov pedagogicheskogo vuza. *Izvestiya PGPU im. V. G. Belinskogo*. 2011; (25): 645–9. Russian.
5. Chuyan EN, Gornaya OI. Osobennosti mikrotsirkulyatsii krovi u yunoshei-studentov. *Scientific notes of TNU. Series Biology and Chemistry*. 2009; 2: 166–74.
6. Gribanov AV. Krovoobrashchenie i dykhanie u shkol'nikov v tsirkumpolyarnykh usloviyakh. *Arkhangelsk: SAFU*; 2016. 270 p. Russian.
7. Kutyreva OI, D'yakonova EN, Lobanova LV. Vozrastnye osobennosti mikrotsirkulyatsii u zdorovykh detei. *Journal of New Medical Technologies*. 2009; 16 (3): 37–8. Russian.
8. Vasil'ev AP, Strel'tsova NN, Sekisova MA, Zykova EL. Funktsional'nye osobennosti i kliniko-prognosticheskoe znachenie razlichnykh gemodinamicheskikh tipov mikrotsirkulyatsii u bol'nykh arterial'noi gipertoniei. *Kardiologiya*. 2008; 9 (49): 90–5. Russian.
9. Gurova OA, Kozlov VI. Osobennosti mikrotsirkulyatsii krovi v kozhe u detei. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series Medicine*. 2011; 1: 12–6. Russian.
10. D'yakonova EN. Osobennosti mikrotsirkulyatsii krovi u mal'chikov v vozraste ot 9 do 12 let v zavisimosti ot intensivnosti i prodolzhitel'nosti zanyatii sportom. *Journal of New Medical Technologies*. 2009; 2: 54–6. Russian.
11. Gurova OA. Izmeneniya kozhnogo krovotoka pri umerennoi fizicheskoi nagruzke u detei 4–7 let s raznym tipom mikrotsirkulyatsii krovi. *Novye issledovaniya*. 2010; 4 (25): 30–5. Russian.
12. Roustit M, Cracowski JL. Non-invasive assessment of skin microvascular function in humans: an insight into methods. *Microcirculation*. 2012 Jan; 19 (1): 47–64.
13. Krupatkin AI, Sidorov VV. Lazernaya dopplerovskaya floumetriya mikrotsirkulyatsii krovi. *Moscow: Izdatelstvo Meditsina*; 2005. 123 p. Russian.
14. Kozlov VI, Morozov MV, Gurova OA. LDF-metriya kozhnogo krovotoka v razlichnykh oblastiakh tela. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*. 2012; 1 (41): 58–61. Russian.
15. Jan YK, Brienza DM, Geyer MJ, Karg P. Wavelet-based spectrum analysis of sacral skin blood flow response to alternating pressure. *Arch Phys Med Rehabil*. 2008 Jan; 89 (1): 137–45.
16. Krupatkin AI, Sidorov VV. Funktsional'naya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkanevykh system. *Kolebaniya, informatsiya, nelineinost'*. Rukovodstvo dlya vrachei. *Moscow: Librocom*; 2014. 498 p. Russian.
17. Fedorovich AA. Funktsional'noe sostoyanie regulatorynykh mekhanizmov mikrotsirkulyatornogo krovotoka v norme i pri arterial'noi gipertenzii po dannym lazernoii dopplerovskoi floumetrii. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*. 2010; 1 (33): 49–60. Russian.
18. Son'kin VD, Tambovtseva RV. Razvitie myshechnoi energetiki i rabotosposobnosti v ontogeneze. *Moscow: Librocom*; 2011. 368 p. Russian.
19. Gurova OA. Individual'no-tipologicheskii osobennosti mikrotsirkulyatsii krovi u detei 4–7 let. *Novye issledovaniya*. 2014; 2 (39): 15–23. Russian.
20. Tyurina MI, Krasnikov GV, Tankanag AV, Piskunova GM, Chemeris NK. Formirovanie respiratornozavisimykh kolebanii skorosti krovotoka v mikrotsirkulyatornom rusle kozhi cheloveka v usloviyakh kontroliruemogo dykhaniya. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*. 2011; 3 (39): 31–7. Russian.
21. Litvin FB. Vozrastnye i individual'no-tipologicheskii osobennosti mikrotsirkulyatsii u mal'chikov, podrostkov i yunoshei. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya*. 2006; 1 (17): 44–50. Russian.
22. Bezrukikh MM, Farber DA. Aktual'nye problemy fiziologii razvitiya rebenka. *Novye issledovaniya*. 2014; 3 (40): 4–19. Russian.
23. Oslyakova AO. Funktsionirovanie regulatorynykh mekhanizmov perifericheskogo krovotoka v norme i pri narusheniyakh deyatel'nosti kardiorespiratornoi sistemy [dissertation]. *Yaroslavl: YSPU*; 2013. Russian.