

На правах рукописи



Бабошина Наталья Владимировна

**ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
СИСТЕМЫ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ, ЕЕ РЕГУЛЯТОРНЫХ
МЕХАНИЗМОВ И РЕЗЕРВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В ПЕРИОДЫ
МЛАДШЕГО ШКОЛЬНОГО, ПОДРОСТКОВОГО И
ЮНОШЕСКОГО ВОЗРАСТА**

03.03.01 – Физиология

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук**

Ярославль, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского» (ФГБОУ ВО «ЯГПУ им. К.Д. Ушинского»)

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Тихомирова Ирина Александровна

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой физиологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет физической культуры, спорта, молодежи и туризма (ГЦОЛИФК)»
Мельников Андрей Александрович

кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории микроциркуляции и регионального кровообращения отдела фундаментальных и прикладных аспектов ожирения ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава РФ
Федорович Андрей Александрович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук (ИФ РАН)

Защита диссертации состоится «17» марта 2022 года в 11.00 часов на заседании Диссертационного совета Д.001.008.01 при ФГБНУ «НИИИФ им. П.К. Анохина» по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П.К. Анохина» и на сайте <http://nphys.ru/>. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125315, г. Москва, ул. Балтийская, д. 8.

Автореферат разослан «__»_____ 202_ г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор медицинских наук



Абрамова А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Сердечно-сосудистая система является интегрирующей системой в организме, играющей важное место в его адаптации. Известно, что показатели функционального состояния жизнеобеспечивающей сердечно-сосудистой системы весьма чувствительны, высоко информативны, доступны для регистрации, а их изменения под влиянием эндо- и экзогенных факторов отчетливо выражены у детей и взрослых (М.В. Антропова и соавт., 2009).

На развитие сердечно-сосудистой системы у детей школьного возраста оказывает влияние целый комплекс изменений, сочетающий в себе как возрастную перестройку всей системы, так и ее отдельных звеньев (А.В. Грибанов, 2016). Микрогемодицирующее русло, являющееся мельчайшей структурно-функциональной единицей системы кровообращения, обеспечивает транспорт кислорода и питательных веществ ко всем клеткам и тканям организма, а также удаление продуктов обмена и поддержание нормального объема тканевой жидкости, благодаря чему достигается поддержание постоянства внутренней среды – гомеостаз (J.W. Kuiper, D. Tibboel, C. Ince, 2016).

Микроциркуляторная перфузия подчиняется миогенным, метаболическим и нейрогенным механизмам, которые контролируют региональные кровотоки. Миогенная ауторегуляция – это внутренняя способность кровеносного сосуда сжиматься или расширяться в ответ на изменение внутрипросветного давления. Нейрогенные механизмы регуляции микрокровотока осуществляются под воздействием вегетативной нервной системы (симпатические и парасимпатические влияния), вызывающей вазоконстрикцию или вазодилатацию резистивных сосудов. Метаболический механизм регуляции связан с изменением просвета сосудов под влиянием веществ, участвующих в обменных процессах. По мере взросления человека происходят процессы непрерывного развития морфологических структур и функциональных процессов микрососудистого русла, в основе которых лежит перестройка механизмов регуляции, поэтому необходима объективная оценка состояния микрокровотока на разных возрастных этапах, особенно сенситивных.

Вся система кровообращения в каждом возрастном периоде претерпевает анатомические и функциональные изменения, обусловленные физиологической целесообразностью (А.В. Грибанов, И.Н. Малофеевская, 2011). Микрокровоток лабильно реагирует на изменения потребностей организма во время физиологического стресса. Таким физиологическим стрессом можно считать сенситивные этапы онтогенеза: препубертатный, пубертатный и постпубертатный, в которые отмечается становление и переход к дефинитивному кровообращению (Ф.Б. Литвин, 2006).

Исследование формирования и функционирования микрокровотока и механизмов его регуляции в период от младшего школьного до юношеского возраста в норме и его адаптация к изменяющимся условиям внешней и внутренней среды представляет интерес не только с теоретической, но и практической точки зрения, поскольку может использоваться как диагностические и прогностические критерии в совокупной оценке общего физиологического состояния организма и здоровья.

Цель исследования: изучить возрастные особенности формирования системы микроциркуляции, ее регуляторных механизмов и резервных возможностей в периоды младшего школьного, подросткового и юношеского возраста.

Задачи:

1. Проследить этапы формирования системы микроциркуляции и становления ее регуляторных механизмов у детей в период от 8 до 11 лет в ходе лонгитюдного исследования.

2. Оценить возрастные и половые особенности состояния микроциркуляции кожи и функционирования механизмов регуляции микрокровотока у школьников на этапах от младшего школьного до юношеского возраста.

3. Исследовать возрастные преобразования функциональных резервов системы микроциркуляции и реактивности микрососудов в условиях кратковременной гипоксии на этапе от младшего школьного до юношеского возраста.

4. Оценить реакцию системы микроциркуляции и ее регуляторных механизмов на дозированную физическую нагрузку у лиц препубертатного, пубертатного и постпубертатного возраста.

Научная новизна исследования. Впервые в ходе 4-хлетнего лонгитюдного исследования получены данные о динамике формирования системы микроциркуляции и функционировании ее регуляторных механизмов на возрастном этапе от 8 до 11 лет у мальчиков и девочек. В ходе кроссекционального исследования выявлены особенности микрососудистой перфузии у школьников от младшего школьного до юношеского возраста, свидетельствующие о разных темпах формирования функциональной зрелости микрососудистого русла и его резервных возможностей у девушек и юношей в зависимости от метаболических потребностей тканей на разных возрастных этапах. Продемонстрировано перераспределение регуляторных влияний на микрокровоток, обеспечивающее его оптимальную адаптацию в ответ на физическую нагрузку и локальную гипоксию на этапах препубертата, пубертата и постпубертата.

В результате исследования показаны различия в функционировании регуляторных механизмов и адаптации системы микроциркуляции в зависимости от пола, начиная от младшего школьного возраста и заканчивая юношеским периодом онтогенеза.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты диссертационного исследования о состоянии периферического кровотока, его регуляторных механизмов и резервных возможностей на разных этапах онтогенеза расширяют и дополняют современные теоретические представления о возрастной физиологии периферического кровообращения. Важным в теоретическом отношении является определение не только характерных особенностей функционирования системы микроциркуляции на разных возрастных этапах (от младшего школьного до юношеского возраста) в зависимости от пола, но и особенностей адаптивных механизмов, реализующихся на уровне микрокровотока в ответ на дозированную физическую нагрузку и дыхательную пробу.

Результаты исследования становления системы микроциркуляции и ее регуляторных механизмов в онтогенезе могут применяться для оценки функционального состояния периферического кровотока на разных возрастных этапах с целью выявления адаптационных возможностей, в том числе при локальной гипоксии и в условиях физической нагрузки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Скачкообразный прирост перфузии и вариабельности микрокровотока происходит на этапе от 9 до 10 лет. У девочек ведущая роль в регуляции микрокровотока в период от 8 до 11 лет принадлежит активным механизмам контроля, у мальчиков на этом возрастном этапе наряду с миогенными ритмами доминируют пассивные механизмы регуляции.

2. Половые отличия в становлении микроциркуляции и ее регуляторных механизмов выражаются в постепенном росте перфузии у мальчиков от младшего школьного к юношескому возрасту, у девочек наиболее высокие значения перфузии характерны для подросткового возраста.

3. Резервные возможности микрокровотока в условиях локальной гипоксии достигают оптимума к юношескому возрасту. Адаптационные перестройки периферического кровотока в ответ на дозированную физическую нагрузку на разных возрастных этапах у мальчиков и девочек реализуются с участием различных регуляторных механизмов.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на XIII, XV Всероссийских молодежных научных конференциях Института физиологии Коми НЦ УрО РАН «Физиология человека и животных: от эксперимента к клинической практике» (Сыктывкар, 2014, 2018); VIII Всероссийской с международным участием конференции с элементами научной школы по физиологии мышц и мышечной деятельности «Новые подходы к изучению классических проблем» (ИМБП РАН, Москва, 2015); XXIII, XXVI Международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2016, 2019); VI Всероссийской с международным участием школе-конференции по физиологии кровообращения (МГУ, Москва, 2016); III Всероссийской научной конференции молодых ученых «Проблемы биомедицинской науки третьего тысячелетия» (Санкт-Петербург, 2016); на XXIII съезде физиологического общества им. И.П. Павлова (Воронеж, 2017); XI, XII Международных конференциях «Микроциркуляция и гемореология» (Ярославль, 2017, 2019), VII Всероссийской с международным участием школе-конференции «Физиология и патология кровообращения» (Москва, 2020).

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Работа изложена на 178 страницах печатного текста и состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы и списка сокращений. Диссертация содержит 21 таблицу и 17 рисунков. Библиографический указатель включает 288 источников: 198 отечественных и 90 зарубежных.

ОРГАНИЗАЦИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лонгитюдное исследование, после получения добровольного информированного согласия их законных представителей были включены 45 практически здоровых младших школьников: девочки (n=23) и мальчики (n=22) (возраст детей на начало обследования составил $8,0 \pm 0,3$ лет). Обследование проводилось ежегодно в одно и то же время года (в октябре и ноябре) на протяжении 4 лет с 2013 по 2016 год. В кроссекциональное исследование были включены 203 участника: I группа – младшие школьники (средний возраст $10,5 \pm 0,3$ лет; мальчики, n=55, девочки, n=55); II группа – дети подросткового возраста (средний возраст $14,5 \pm 1,0$ лет; мальчики, n=28, девочки, n=24); группа III – обследуемые юношеского возраста (средний возраст $18,0 \pm 1,6$ лет, юноши, n=16, девушки, n=25).

Исследование микроциркуляции проводили в стандартных условиях ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) после десятиминутного периода адаптации.

1. Оценка состояния микроциркуляции. Для исследования микроциркуляции, ее регуляторных механизмов и резервных возможностей был использован метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Оценка состояния микрокровотока осуществляли при помощи лазерного анализатора капиллярного кровотока ЛАКК-02 (НПП «Лазма», Москва) на коже дистальной фаланги II пальца правой кисти. Оценивали следующие характеристики показателя микроциркуляции: его среднеарифметическое значение (ПМ), среднеквадратичное отклонение (σ), коэффициент вариации (K_v), индекс эффективности микроциркуляции (ИЭМ) ($\text{ИЭМ} = (A_{\text{Эmax}} + A_{\text{Hmax}} + A_{\text{Mmax}}) / (A_{\text{Дmax}} + A_{\text{Сmax}})$). С помощью вейвлет-анализа оценивали вклад регуляторных влияний в модуляцию микрокровотока: активных (эндотелиальные, нейрогенные, миогенные ритмы) и пассивных (дыхательные и сердечные ритмы). Активные факторы регуляции модулируют поток крови со стороны сосудистой стенки и реализуются через ее мышечно-тонический компонент. Пассивные факторы организуют продольные колебания кровотока, выражающиеся в периодическом изменении давления и объема крови в сосуде. С целью оценки резервных возможностей микроциркуляции в условиях кратковременной гипоксии показатели микроциркуляции фиксировали в состоянии покоя и в ходе функциональной дыхательной пробы, по результатам которой регистрировали следующие показатели: Мисх - исходная величина ПМ; $\Delta\text{ПМ}$ – степень снижения ПМ при задержке дыхания ($\Delta\text{ПМ} = [(M_{\text{исх}} - M_{\text{мин}}) / M_{\text{исх}}] \cdot 100\%$); РКК - резерв кровотока ($\text{РКК} = (M_{\text{мин}} / M_{\text{исх}}) \cdot 100\%$).

Для оценки адекватности процессов регуляции гемодинамики и ее резервных возможностей в условиях мышечной деятельности использовали умеренную дозированную физическую нагрузку (одномоментную пробу с 10 приседаниями).

2. Оценка антропометрических и физиометрических показателей. У всех обследуемых измеряли рост и массу (m) тела, окружность грудной клетки (ОГК). Силу мышц кисти испытуемых регистрировали при помощи динамометра электронного ручного ДМЭР-120. В качестве критериев оценки состояния кардиореспираторной системы были использованы: частота сердечных сокращений (ЧСС), величина систолического (САД) и диастолического (ДАД)

артериального давления; жизненная емкость легких (ЖЕЛ), на основе полученных данных рассчитывали следующие показатели: жизненный индекс (ЖИ=ЖЕЛ /m), индекс массы тела ($BMI = m / h^2$), среднее артериальное давление (АДср) ($AD_{ср} = ((САД - ДАД) \cdot 1/3) + ДАД$) и двойное произведение (ДП= (САД · ЧСС) / 100).

Статистическая обработка данных. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием непараметрических критериев. Для сравнения двух независимых выборок применяли критерий U Манна-Уитни, результаты которого не зависят от формы распределения сравниваемого признака. Для сравнения двух зависимых выборок использовали парный критерий Вилкоксона. Результаты представлены в виде медиан (Me) и квартилей (25 и 75%). За уровень статистически значимых принимали изменения при $p < 0,05$ (М.Н. Жуков и соавт., 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лонгитюдное исследование. Антропометрические и физиометрические показатели девочек и мальчиков. Особенностью детского возраста является увеличение в наибольшей степени значений массы тела и его роста. Нами выявлено статистически значимое повышение показателей роста и массы тела в каждый год наблюдения от 8 до 11 лет у девочек и мальчиков, соответствующее возрастной норме.

В ходе лонгитюдного исследования у девочек в период от 8 до 11-летнего возраста отмечен значительный рост показателя жизненной емкости легких (на 86,6% $p < 0,001$). Значение жизненного индекса значительно возросло к 9-летнему возрасту на 28,8% ($p < 0,001$). Систолическое артериальное давление изменялось неравномерно, увеличиваясь к 9-летнему (на 10,3%, $p < 0,01$) и 11-летнему возрасту (на 9,90%, $p < 0,001$). Показатели ДАД и ЧСС достоверно не изменялись. За период наблюдения от 8 до 11 лет сила мышц кисти постепенно увеличивалась с каждым годом, и к 11 годам прирост по сравнению с исходным возрастом (8 лет) составил: для правой кисти – 47,8%, для левой – 52,4% ($p < 0,001$).

У мальчиков отмечен рост жизненной емкости легких и жизненного индекса в период от 8 до 11 лет (на 63,8%, $p < 0,001$ и 29,5%, $p < 0,001$, соответственно). Повышение показателей ЖЕЛ указывают на оптимальное приспособление вентиляционной системы дыхания по мере взросления, на развитие резервных возможностей дыхательного аппарата, значительную степень эффективности легочной вентиляции (С.С. Гречишкина, Т.Г. Петрова, А.А. Намитокова, 2011).

Систолическое артериальное давление у мальчиков увеличилось к 9-летнему возрасту (на 9,18%, $p < 0,01$), за 3 года прирост составил 10,2% ($p < 0,01$). Показатели диастолического артериального давления (ДАД) уменьшались каждый год наблюдения до 10 летнего возраста. ЧСС постепенно снижалась ежегодно от 8 до 11 лет. Выявлено постепенное увеличение силы мышц кисти с каждым годом. К 11 годам прирост составил по сравнению с исходным периодом (8 лет): для правой кисти – 57,1% ($p < 0,001$), для левой – 33,0% ($p < 0,001$).

Полученные данные подтверждают возрастные особенности функционирования сердечно-сосудистой и дыхательной систем, заключающиеся в урежении частоты сердечных сокращений, возрастании артериального давления, увеличении жизненной емкости легких. До подросткового периода объем сердца

несколько отстает от суммарного просвета сосудов, а просвет капилляров и прекапилляров относительно больше, чем у взрослых, что является одной из причин низкого АД в этом возрасте. Обследование детей младшего школьного возраста показало, что в процессе развития и роста изменения функциональных и адаптивных возможностей кардиореспираторной системы у мальчиков протекает более равномерно, в то время как у девочек носит скачкообразный характер (А.А. Псеунок и соавт., 2013).

Параметры микроциркуляции девочек и мальчиков. Очевидно, что изменения в центральной гемодинамике тесно коррелируют со сдвигами в системе микроциркуляции (А.А. Ахапкина и соавт, 2013).

У девочек в период от 8 до 9 лет показатель микроциркуляции оставался практически неизменным, к 10-летнему возрасту увеличился на 63,8% ($p < 0,001$). У мальчиков в период от 9 до 10 лет показатель микроциркуляции увеличился на 50,3% ($p < 0,001$). К 11 годам ПМ несколько снизился в сравнении с предшествующим годом у девочек и мальчиков на 17,5% ($p < 0,01$) и 16,5% ($p < 0,05$), соответственно (рис. 1). Прирост показателя перфузии к 10-летнему возрасту в обеих группах связан с увеличением интенсивности периферического кровотока, соответствующего возрастающей роли метаболических процессов организма.

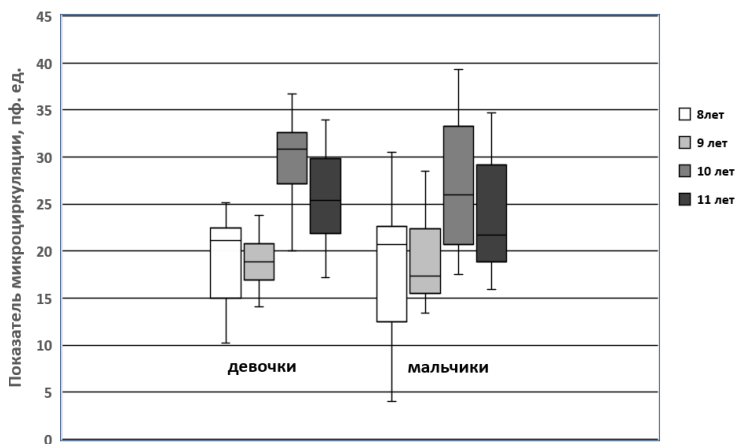


Рис. 1. Изменение показателя микроциркуляции у девочек и мальчиков на разных этапах наблюдения (от 8 до 11 лет).

Вариабельность микрокровотока изменялась неравномерно: уменьшаясь к 9 годам и возрастая к 10-летнему возрасту в обеих группах. Повышение величины коэффициента вариации в сочетании с возрастанием среднеквадратичного отклонения с возрастом связано с более интенсивным функционированием механизмов активного контроля микроциркуляции (А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров, 2014).

Кровоток в микроциркуляторном русле кожи подвержен колебаниям, которые отражают текущее функциональное состояние систем его регуляции.

У девочек отмечено значительное повышение нормированных амплитуд колебаний в диапазоне активных регуляторных механизмов к 11-летнему возрасту (эндотелиальных ритмов на 23,5%, $p<0,05$, нейрогенных – на 15,5%, $p<0,01$ и миогенных – на 44,5%, $p<0,01$). У мальчиков в период от 8 до 11 лет зафиксировано увеличение функционального вклада миогенных и нейрогенных влияний (на 32,0 $p<0,001$, и 24,8%, $p<0,01$, соответственно) в модуляцию микрокровотока. Более высокие значения амплитуд осцилляций микроциркуляции в нейрогенном и миогенном диапазонах у 11-летних девочек и мальчиков свидетельствуют о прекапиллярной вазорелаксации и снижении давления в посткапиллярном сосудистом русле, и, следовательно, об увеличении нутритивного кровотока. Прекапиллярная вазорелаксация является проявлением миогенной регуляции на изменение микроциркуляторного давления и состояния метаболизма (А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров, 2014).

Возрастание амплитуды дыхательной волны на фоне увеличения ПМ у девочек в период от 8 до 10 лет (на 39,0%, $p<0,01$) указывает на снижение трансмурального давления в посткапиллярном звене. Увеличение функционального вклада пульсовых колебаний в модуляцию микрокровотока на 19,2% ($p<0,001$) к 10-летнему возрасту у мальчиков свидетельствует об увеличении притока артериальной крови в микроциркуляторное русло (А.А. Федорович, 2013). 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. Данный факт подтверждает и индекс эффективности микроциркуляции, отражающий соотношение активных и пассивных механизмов в регуляции кровотока по микрососудам. За период наблюдения (от 8 до 11 лет) индекс эффективности микроциркуляции в обеих группах изменялся неравномерно: достигал минимального значения в возрасте 10 лет у девочек и мальчиков и значительно возрастал к 11 годам. По К. В. Жмеренецкому и соавт. (2012), возрастание ИЭМ у детей к 11-летнему возрасту может быть обусловлено интенсивными морфологическими преобразованиями терминального звена сосудистого русла: укрупнением сосудов в процессе развития, уменьшением числа функционирующих капилляров, преобладанием шунтирующего характера кровотока.

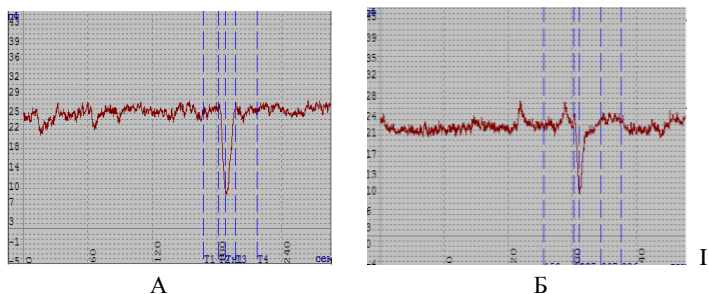
В каждый возрастной период растущего организма система микроциркуляции претерпевает изменения, продиктованные физиологической целесообразностью. Всё вышесказанное свидетельствует о перераспределении влияния активных и пассивных факторов регуляции микрокровотока, направленных на достижение оптимального кровоснабжения органов и тканей организма.

Результаты дыхательной функциональной пробы. 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. респираторно-зависимые 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 в ответ на резкий глубокий вдох (М.Й. Тюрина и соавт., 2011).

Вазомоторный рефлекс, запускаемый быстрым и глубоким вдохом, вызывает констрикцию артериол и кратковременное уменьшение кожного кровотока (А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров, 2014). Вазоконстрикторный ответ при дыхательной функциональной пробе зависит от состояния вегетативной регуляции. У девочек за период от 8 до 11 лет удлинился временной интервал от начала задержки дыхания до начала снижения микрокровотока (Т3-Т1) и период восстановления кровотока до исходного уровня во время проведения дыхательной пробы (Т5-Т4) на 11,7% и 22,4% ($p < 0,001$), соответственно, что указывает на повышение уровня согласованности в деятельности вегетативных функций и их соразмерности с силой действующего стимула (рис. 2).

У мальчиков временной интервал Т3-Т1 изменялся неравномерно на всем протяжении исследования. Интервал времени между началом спада уровня микрокровотока и минимальным значением показателя микроциркуляции (Т4-Т3) к 11-летнему возрасту достиг наибольшего значения, свидетельствуя о более медленном достижении констрикторного ответа, а период восстановления микрокровотока до исходного уровня в течение дыхательной пробы (Т5-Т4) становился короче каждый год наблюдения, начиная с 9-летнего возраста, свидетельствуя о более быстром восстановлении исходного уровня перфузии (рис. 2.).



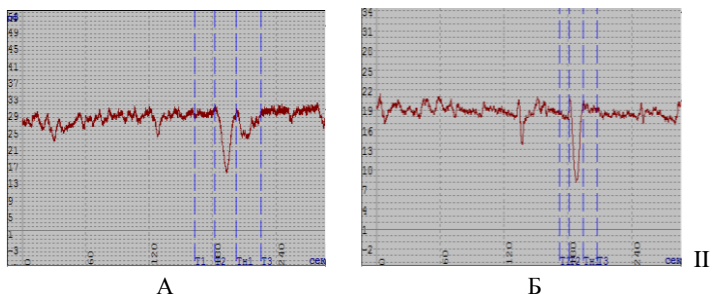


Рис. 2. Фрагменты ЛДФ-граммы при 30-секундной задержке дыхания у девочек (I) и мальчиков (II) в возрасте 8 (А) и 11 (Б) лет.

Примечание: по оси абсцисс отображается время записи ЛДФ-граммы (сек), по оси ординат – уровень перфузии (в перфузионных единицах).

У девочек зафиксирован постепенный рост резервных возможностей микрокровотока в период от 9 до 11 лет в условиях дыхательной пробы, вызванный изменением тонуса артериальных сосудов, что отражается на объеме крови, протекающей через орган. В результате меняющаяся активность прекапиллярных сфинктеров сказывается на количестве функционирующих капилляров (рост резервных возможностей вызывает увеличение функционирующих капилляров), а состояние посткапиллярных сосудов приводит к изменению трансмурального транспорта веществ. В конечном счете, адаптация всей системы микроциркуляции обеспечивает полноценную компенсацию затраченных во время пробы пластических и энергетических ресурсов (Б.Е. Залмаев, Т.М. Соболева, 1993). В исследовании О.А. Гуровой (2014) отмечается, что эффективный уровень перфузии с высоким уровнем функционального резерва капиллярного кровотока достигает у детей в период второго, или так называемого «нейтрального» детства (8-12 лет у мальчиков и 8-11 лет у девочек) (Е.Н. Дьяконова, 2009).

В возрасте до 12 лет в микрососудистом русле происходят интенсивные морфологические преобразования, проявляющиеся увеличением плотности функционирующих капилляров, их просвета, перераспределением крови в организме между органами и снижением миогенного и нейрогенного компонентов контроля микрососудистого кровотока (П.О. Асямолов, 2013), что обеспечивает вывленное нами в ходе дыхательной пробы увеличение резервных возможностей микрокровотока при кратковременной гипоксии в группе девочек. Система кровообращения выполняет важную функцию кислородообеспечения жизненно важных органов и систем организма; резервные возможности характеризуют уровень экономизации функций в покое и степень вовлеченности капилляров во время функциональной пробы. Увеличение работоспособности системы переноса кислорода обеспечивает организму человека выполнение работы большого объема на основе расширения функциональных возможностей его систем.

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 тонусу в покое и относительной величине снижения показателя микроциркуляции при дыхательной пробе (А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров, 2014). Выявленные изменения нейрогенного тонуса (НТ) (снижение на 11,8% у девочек, и 11,2% у мальчиков ($p < 0,05$) в период от 8 до 11-летнего возраста) и амплитуды спада перфузии при дыхательной пробе (ΔПМ) (снижение на 14,8%, $p < 0,05$ у девочек) позволяют сделать заключение о снижении с возрастом симпатической активности при реализации вазоконстрикторных проб.

Степень снижения показателя микроциркуляции при дыхательной пробе отражает симпатическую регуляцию, ограниченную преимущественно нейрососудистым синапсом. Следовательно, выявленное с возрастом снижение параметра ΔПМ у девочек свидетельствует о менее выраженной реакции уменьшения перфузии при проведении дыхательной пробы.

По мнению ряда авторов (В.Д. Сонькин, Р.В. Тамбовцева, 2011; Б.А. Титов, 2015), возрастной период от 8 до 11 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. 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. 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 (М.М. Безруких, Д.А. Фарбер, 2014).

Возраст от 8 до 11 лет – младший школьный возраст, с 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 (О.Г. Литовченко, М.С. Ишбулатова, 2015). В период второго детства начинает возрастать роль гипоталамо-гипофизарной системы (Ю.Е. Маляренко, Т.Н. Маляренко, Е.П. Громько, 1996). Возраст от 12-13 до 15-16 лет называют подростковым. Он представляет собой один из наиболее сложных и противоречивых этапов постнатального онтогенеза. Данный период характеризуется началом полового созревания, особенностями которого являются увеличение интенсивности обменных процессов и нейроэндокринные перестройки (В.Д. Сонькин, 2007). После периода полового созревания юношеский возраст является следующим этапом развития организма на пути к зрелости. В соответствии с возрастной периодизацией к нему относят лиц 16-20 лет (девушки) и 17-21 года (юноши). В данном возрасте завершается

рассогласованность в гормональной регуляции обмена веществ и физиологических функций в результате морфофункционального созревания организма. Наступает период половой зрелости (Е.С. Тверитина, М.З. Федорова, 2010).

Кроссекциональное исследование. Антропометрические и физиометрические показатели девочек на разных возрастных этапах. Известно, что такие важные параметры как рост и масса тела, являются информативными показателями соматического здоровья ребенка, характеризующими особенности пластических процессов, протекающих в организме и характеризующими уровень физического развития (В.А. Петеркова и соавт., 2016).

В ходе кроссекционального исследования наибольший скачок роста отмечен в подростковом периоде на 26,1% ($p < 0,001$), в сравнении с предыдущим возрастным этапом, что соответствует возрастным нормам и половым особенностям темпов физического развития.

Наибольший прирост ЖЕЛ отмечался у девочек при переходе от младшего школьного к подростковому возрасту (на 60%, $p < 0,001$). Значение жизненного индекса (ЖИ) оставалось практически неизменным от 10 до 17 лет, что указывает на возрастные преобразования дыхательной системы и формирование биомеханических свойств органов дыхания, и совершенствование регуляторных механизмов.

Систолическое артериальное давление у девочек изменялось неравномерно, увеличиваясь к подростковому возрасту (на 8,33%, $p < 0,01$) и незначительно снижаясь к юношескому (на 5,98%, $p > 0,05$). В подростковом периоде рост сердца опережает рост кровеносных сосудов. Это отражается на повышении величины кровяного давления (И.П. Ильин, 2010). Показатели диастолического артериального давления (ДАД) у обследуемых лиц разных возрастных групп в состоянии покоя не имели статистически значимых различий. У девочек частота сердечных сокращений с возрастом постепенно снижалась, что соответствует норме.

Под влиянием дозированной физической нагрузки у девочек отмечены закономерные изменения ЧСС и артериального давления: САД возросло у младших школьниц (на 6%, $p < 0,001$), ЧСС увеличилась после приседаний во всех возрастных группах.

Параметры микроциркуляции у девочек на разных возрастных этапах.

При переходе от младшего школьного возраста к подростковому отмечается незначительное повышение показателя кожной микроциркуляции. У девушек показатель перфузии был на 19,5% ($p < 0,01$) ниже, чем у подростков, что обусловлено снижением интенсивности метаболических процессов и свидетельствует об экономизации функций системы микрогемоциркуляции с возрастом.

Окончательное становление особенностей функционирования системы микроциркуляции связано с периодом полового созревания, по завершении которого формируется дефинитивный тип микроциркуляции крови. Р.Э. Мазо (1973) в своей работе отмечает, что микрокровооток с возрастом снижается в связи с удлинением сосудистого русла, снижением интенсивности обмена веществ, уменьшением эластичности сосудов, урежением пульса, уменьшением

циркулирующей крови на 1 кг массы ребенка. Сходные результаты по снижению микрокровотока к юношескому возрасту у девушек, обусловленные повышением общего периферического сопротивления артериальных сосудов, сопровождающееся уменьшением относительного количества циркулирующей крови, были получены В.Д. Сонькиным (2011).

При оценке базального микрокровотока в обследуемых возрастных группах не зафиксировано значимых отличий среднеквадратичного отклонения показателя микроциркуляции (σ).

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.

У девочек младшего школьного возраста в регуляции микроциркуляции преобладали амплитуды колебаний нейрогенного ритма. К подростковому возрасту максимальный прирост размаха колебаний зафиксирован для сердечных осцилляций микроциркуляции – на 9,1% ($p < 0,05$), что на фоне увеличения величины M свидетельствует об увеличении притока артериальной крови в микроциркуляторное русло на этом возрастном этапе. В. Н. Швадев (1983) отмечает, что активация деятельности гипофиза, надпочечников, щитовидной железы и половых желез являются причиной резкого усиления симпатических воздействий на весь организм подростков и, в особенности, на микроциркуляторное русло. В периоде полового созревания на микрососуды начинает оказывать влияние изменившаяся функция эндокринных желез.

При переходе к юношескому периоду выявлены более высокие (на 21,9%, $p < 0,05$), чем у девочек-подростков значения нормированных амплитуд колебаний микрокровотока эндотелиального генеза. Такое увеличение функционального вклада амплитуд эндотелиальных колебаний в модуляцию микрокровотока указывает на уменьшение сосудистого сопротивления. Величина ПМ пропорциональна скорости движения и количеству эритроцитов в тестируемом объеме ткани (Крупаткин А.И., Сидоров В.В., 2013). Выявленное более низкое сосудистое сопротивление у девушек юношеского возраста при сниженном уровне перфузии может свидетельствовать о замедлении кровотока, связанном с морфологическими преобразованиями сосудистой сети и некоторым снижением уровня метаболизма с возрастом.

Физическая активность – нормальное проявление жизнедеятельности, требующее определенной адаптации организма в целом и системы микроциркуляции в частности, поскольку периферическое кровообращение определяет конечную цель функционирования сердечно-сосудистой системы и играет ключевую роль в трофическом снабжении тканей и поддержании тканевого метаболизма. Поэтому особый интерес представляет становление адаптационных реакций в онтогенезе, обеспечивающих оптимальное функционирование растущего организма в условиях мышечной деятельности.

После дозированной нагрузки статистически значимых изменений показателя перфузии не зафиксировано во всех обследуемых возрастных группах девочек, что свидетельствует о том, что адаптационных резервов системы

микроциркуляции было достаточно как для обеспечения работающих мышц в условиях повышенной потребности в кровоснабжении, так и для поддержания на должном уровне кожного микрокровотока. Это потребовало напряжения механизмов регуляции, что нашло отражение в изменении показателей средней модуляции кровотока и его вариабельности, наиболее выраженном на этапах препубертата и пубертата. Значение показателя σ увеличилась на 25,4% ($p < 0,001$) у младших школьников, на 26,7% ($p < 0,01$) у девочек-подростков и на 12,4% ($p < 0,01$) у девушек.

Вариабельность микрокровотока после нагрузки стала выше у младших школьников (на 26,3%, $p < 0,001$) и девочек-подростков (на 15,9%, $p < 0,01$), в сравнении с аналогичным показателем, измеренным в состоянии покоя; у девушек юношеского возраста отмечена тенденция к увеличению вариабельности микрокровотока.

После дозированной нагрузки у младших школьников отмечено статистически значимое увеличение (на 18,3%, $p < 0,01$) нормированной амплитуды колебаний в диапазоне эндотелиальных ритмов, у девочек-подростков выявлены более низкие значения нормированных амплитуд пульсовых колебаний (на 23,1%, $p < 0,05$), по сравнению с аналогичными показателями, измеренными в состоянии покоя. Известно, что при рабочей гиперемии функционируют почти все капилляры, тогда как в условиях покоя большая часть их выключается из кровотока. Во время физической нагрузки происходит перераспределение крови. Так, в начале выполнения упражнений кровью в большей степени обеспечиваются активные мышцы. Однако по мере увеличения интенсивности нагрузки возникает необходимость увеличения кожного кровотока с целью осуществления эффективной теплоотдачи и поддержания теплового гомеостаза (О.А. Гурова, Ф.Б. Литвин, 2000; А.А. Ахапкина и соавт., 2013).

У 17-летних девушек после дозированной нагрузки функциональный вклад активных и пассивных ритмов в модуляцию микрокровотока достоверно не изменился.

Результаты дыхательной функциональной пробы у девочек на разных возрастных этапах. В состоянии покоя у девочек вазоконстрикторный ответ (минимальное значение показателя микроциркуляции (M_{\min}) на локальную гипоксию был относительно стабильным на разных возрастных этапах, восстановление перфузии после задержки дыхания ($M_{\text{восст}}$) вернуло показатели микроциркуляции к исходному соотношению – с несколько сниженной перфузией у 18-летних девушек (на 13%, $p < 0,05$), в сравнении с девушками-подростками.

Резерв капиллярного кровотока остался неизменным у девочек при переходе от младшего школьного возраста к подростковому, в юношеском возрасте отмечено его повышение (на 13,2%, $p < 0,05$); при этом по мере взросления отмечается более медленное достижение констрикторного ответа и быстрое восстановление исходного уровня перфузии.

После физической нагрузки минимальный уровень перфузии при задержке дыхания у 10-летних девочек (M_{\min}) снизился на 18,5% ($p < 0,05$) по сравнению с этим показателем в состоянии покоя.

Физическая нагрузка вызвала у младших школьников снижение резерва капиллярного кровотока (РКК) на 10,7% ($p<0,05$) и более выраженное падение перфузии (на 29,5%, $p<0,01$), что свидетельствует о недостаточной функциональной зрелости микроциркуляторного русла на данном возрастном этапе. У девушек подросткового и юношеского возраста значения резерва капиллярного кровотока (РКК) и уровня снижения показателя микроциркуляции (ДПМ) после нагрузки достоверно не изменились (Табл. 1).

Таблица 1

Изменение показателей дыхательной пробы
у девочек в разные возрастные периоды после дозированной нагрузки

Показатель	Возрастные периоды					
	До нагрузки			После нагрузки		
	Младший школьный	Подростковый	Юношеский	Младший школьный	Подростковый	Юношеский
РКК, %	57,6 [42,7;69,2]	55,1 [43,4;66,7]	62,4 [53,3;79,7] [#]	51,4 [35,5;63,8] [†]	59,3 [45,7;72,5]	64,0 [50,2;81,6]
ДПМ, %	42,0 [32,1;57,9]	44,4 [30,5;58,0]	41,3 [25,1;49,3]	54,4 [40,1;65,7] ^{**}	46,3 [30,3;56,0]	42,1 [33,2;50,6]

Обозначения РКК - резерв капиллярного кровотока; ДПМ – степень снижения показателя микроциркуляции в результате пробы с задержкой дыхания.

Примечание: [#] - при $p<0,05$; ^{##} - при $p<0,01$

Различия статистически значимы: [†] - между показателями в подростковом и юношеском периоде; ^{*} - до и после дозированной нагрузки.

Антропометрические и физиометрические показатели у мальчиков на разных возрастных этапах. У мальчиков средние значения роста и массы тела постепенно увеличивались с возрастом.

Отмечено статистически значимое увеличение жизненной емкости легких с возрастом: от 10 до 15 лет прирост составил 27,6% ($p<0,001$), от 15 до 18 лет – 35,1% ($p<0,001$). В группе юношей жизненный индекс (ЖИ) был выше на 4,70% ($p<0,001$), чем в группе подростков.

В состоянии покоя систолическое артериальное давление в 15-летнем возрасте было выше (на 12,4%, $p<0,001$), чем в 10 лет. Не выявлено статистически значимых отличий частоты сердечных сокращений в покое у обследуемых разных возрастных групп.

После дозированной физической нагрузки у мальчиков в младшем школьном и подростковом возрасте увеличилась величина систолического артериального давления (на 4,76%, и 4,23%, $p<0,001$ соответственно) и ЧСС (на 9,33% и 16,4%, $p<0,001$, соответственно), что еще раз подтверждает активное участие сердечно-сосудистой системы в процессах адаптации к физическим нагрузкам, ее лабильную реакцию на малейшие изменения потребностей отдельных органов и систем, направленную на согласование кровотока в них с гемодинамическими параметрами на организменном уровне (Р.М. Багирова, Ю.Н. Кулиев, 2017).

Параметры микроциркуляции у мальчиков на разных возрастных этапах. У мальчиков разного возраста не выявлено достоверных отличий между

показателями микроциркуляции, однако отмечена тенденция к росту ПМ с возрастом.

Показатель колебания перфузии относительно среднего значения потока крови М достоверно не отличался в 10- и 15-летнем возрасте, а в 18 лет он был на 15% ($p < 0,05$) ниже, чем у подростков. Самое высокое значение коэффициента вариации показателя микроциркуляции отмечено в 15 лет – на 28,1% и 31,2% ($p < 0,05$) выше, чем у младших школьников и юношей, соответственно.

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 (И.В. Бархатов, 2013).

В состоянии покоя у мальчиков младшего школьного периода в системе микроциркуляции преобладающими были колебания в нейрогенном диапазоне, свидетельствуя о снижении тонуса периферических сосудов, и, следовательно, дилатации артерий и крупных артериол. У подростков выявлено снижение значений нормированной амплитуды миогенных колебаний ($(A_{\max}/3\sigma) \cdot 100\%$) на 11% ($p < 0,05$), в сравнении с младшими школьниками; у юношей – амплитуды колебаний в диапазоне миогенного ритма были достоверно ниже (на 9,6%, $p < 0,05$), в сравнении с подростками, что указывает на выраженную сократительную активность миоцитов резистивных микрососудов с возрастом и на повышение периферического сопротивления. В.Д. Сонькин (2011) отмечает, что к юношескому возрасту повышается общее периферическое сопротивление артериальных микрососудов, сопровождающееся уменьшением относительного количества циркулирующей крови.

С возрастом происходят функциональные и структурные изменения во всех системах организма, в том числе и в микроциркуляторном русле (Е.С. Тверитина, 2014). Л.О. Гуцол и соавт. (2014) отмечают, что к концу периода полового созревания практически завершается дифференциация микрососудистого русла: изменяется соотношение размеров микрососудов, совершенствуется регуляция деятельности системы микроциркуляции, структура сосудов становится такой же, как у взрослых. По мере взросления происходит увеличение эластичности и снижение тонуса периферических сосудов, улучшение кровоснабжения при нарастании диаметров артериального и венозного отделов капилляров (А.В. Грибанов, 2016). При этом следует отметить, что изменения диаметра сосудов у девочек происходят несколько раньше, чем у мальчиков. Ю.В. Костина с соавт. (2011) указывает, что в период от 8 до 16 лет в организме осуществляются нейроэндокринные перестройки, благодаря которым происходит усиленное формирование механизмов, регулирующих гемодинамику, увеличивающих емкость дренирующих кровеносных микрососудов и образование специализированных структур для обеспечения транкапиллярного обмена.

После дозированной нагрузки зафиксирована тенденция к росту уровня перфузии у младших школьников; у юношей ПМ достоверно уменьшился на 10,6% ($p < 0,05$); среднеквадратичное отклонение показателя микроциркуляции (σ)

возросло у младших школьников (на 11,6%, $p < 0,05$), у подростков и юношей отмечена тенденция к его росту.

После нагрузки коэффициент вариации показателя микроциркуляции (K_v) в 15- и 18-летнем возрасте повысился на 10,3 и 40,2% ($p < 0,05$), соответственно, что свидетельствует об увеличении активности факторов регуляции, направленных на сохранение оптимального кровоснабжения тканей и органов в данных условиях; у 10-летних мальчиков этот показатель достоверно не изменился.

Функциональный контакт микроциркуляторного русла с тканями является определяющим фактором, обеспечивающим гомеостаз организма посредством сложной и тонкой регуляции микроциркуляции, направленный на обеспечение адекватного кровоснабжения в органах и тканях в соответствии с постоянно меняющейся метаболической активностью.

Колебания кровотока периодически происходят в тканях, отражая изменчивость и приспособляемость кровотока к постоянно изменяющимся условиям гемодинамики и соответственно потребностям тканей в перфузии их кровью, в том числе в условиях мышечной деятельности.

Высокая изменчивость регуляции капиллярного русла создает условия для адаптации микроциркуляторного кровотока к потребностям тканей в питательных веществах и удалении метаболитов (В.В. Баранов, и соавт., 2007). В результате воздействия нагрузки у 10-летних мальчиков нормированная амплитуда осцилляций эндотелиального генеза увеличилась на 13,8% ($p < 0,05$), у юношей стала достоверно ниже на 12,9% ($p < 0,05$); у мальчиков подросткового возраста отмечена тенденция к возрастанию роли всех активных факторов регуляции микроциркуляции. То обстоятельство, что различия в регуляции микрокровотока наиболее отчетливо проявляются в период полового созревания и по его завершении, указывает на выраженное влияние половых гормонов на регуляторные факторы, контролирующие микрогемодинамику. Более низкий функциональный вклад эндотелиальных ритмов совместно со сниженным показателем микроциркуляции после дозированной нагрузки у лиц юношеского возраста свидетельствует о преобладании эрготропной направленности регуляции микрокровотока в условиях рабочей гиперемии.

Результаты дыхательной функциональной пробы у мальчиков на разных возрастных этапах. Исходный уровень микрокровотока ($M_{исх}$), минимальное значение показателя микроциркуляции, наблюдаемое в результате кратковременной задержки дыхания ($M_{мин}$) и уровень кровотока в микроциркуляторном русле после восстановления дыхания ($M_{восст}$) в состоянии покоя не имели статистических различий между обследуемыми группами лиц мужского пола. Нами отмечена тенденция к увеличению резервного кровотока (РКК) в микрососудах на каждом возрастном этапе, что свидетельствует о расширении резервных возможностей микроциркуляции. Это согласуется с опубликованным ранее исследованием Ф.Б. Литвина (2006), в котором было показано, что с возрастом (от 7 до 20 лет) отмечается увеличение функциональных резервов системы микроциркуляции.

У мальчиков младшего школьного возраста устойчивость к локальной гипоксии после физической нагрузки снизилась - падение показателя микроциркуляции в результате пробы с задержкой дыхания стало более

выраженным – на 17,9% ($p < 0,05$), в сравнении со значением, измеренным в состоянии покоя. Статистически значимых различий между уровнем снижения показателя микроциркуляции (Δ ПМ) у подростков и лиц юношеского возраста до и после дозированной нагрузки не обнаружено (Табл. 2).

Таблица 2

Изменение показателей дыхательной пробы
у мальчиков в разные возрастные периоды после дозированной нагрузки

Показатель	До нагрузки			После нагрузки		
	Возрастной период			Возрастной период		
	Младший школьный	Подростковый	Юношеский	Младший школьный	Подростковый	Юношеский
РКК, %	55,9 [42,6;66,9]	59,9 [51,7;74,2] [#]	60,1 [50,7;77,0]	52,5 [39,0;64,1]	57,6 [47,5;70,6]	56,9 [48,3;81,4]
Δ ПМ, %	42,3 [26,2;56,7]	41,3 [25,8;51,8]	43,8 [29,7;53,9]	49,9 [39,0;61,2] [*]	42,3 [29,4;52,5]	45,3 [18,7;49,7]

Обозначения РКК - резерв капиллярного кровотока; Δ ПМ – степень снижения показателя микроциркуляции в результате пробы с задержкой дыхания.

Примечание: [#] - при $p < 0,05$

Различия статистически значимы: [#] - между показателями в младшем школьном и подростковом периоде; ^{*} - до и после дозированной нагрузки группы

Из табл. 2 видно, что младший школьный возраст отличается недостаточными резервными возможностями микроциркуляции, что ведет к существенному снижению перфузии (повышению Δ ПМ) в условиях локальной гипоксии после дозированной нагрузки; на следующих возрастных этапах система микроциркуляции приобретает значительную устойчивость к гипоксии и изменения перфузии в этих условиях становятся менее выраженными (за счет снижения симпатических влияний и «усиления активности парасимпатического контура регуляции» вазоконстрикторный ответ ослабевает).

В исследовании Ю.В. Башкатовой и соавт. (2015) было показано, что избирательная реактивность динамики функционального состояния и поддержания сердечно-сосудистого гомеостаза осуществляется за счет усиления активности парасимпатического контура регуляции в адапционных реакциях организма. На дозированную физическую нагрузку организм реагирует мобилизацией функциональных резервных механизмов, сглаживающих и компенсирующих возможные нарушения гомеостаза. Организм взрослых обследуемых более устойчив к стрессорным факторам, создаваемым дозированной физической нагрузкой, чем организм младших школьников, и более длительное время сохраняет состояние оптимальной адаптации к физическим нагрузкам, что и продемонстрировано в нашем исследовании для лиц юношеского возраста (Ю.В. Башкатова и соавт., 2015).

Таким образом, с возрастом увеличивается динамичность взаимодействия элементов сердечно-сосудистой и дыхательной систем, что обуславливает совершенствование адаптивных реакций развивающегося организма в процессе

усложнения его контактов с внешней средой и приспособительный характер функционирования к дозированным нагрузкам на каждом этапе онтогенеза.

ВЫВОДЫ

1. В ходе лонгитюдного исследования у детей младшего школьного возраста выявлен постепенный рост микрососудистой перфузии (ПМ) и ее вариабельности (σ) от 8 до 10 лет и некоторое снижение показателя микроциркуляции в период от 10 до 11 лет. Доминирующая роль в регуляции микрокровотока у девочек принадлежала активным механизмам контроля (эндотелиальным, нейрогенным и миогенным), у мальчиков основной вклад в модуляцию микрокровотока до 10 лет вносили пассивные (кардиальные и респираторные) ритмы, к 11 годам возросла роль активных (нейрогенных и миогенных) влияний.

2. По результатам кроссекционального исследования у девочек максимальный уровень перфузии отмечен в подростковом периоде. У девушек-подростков, в сравнении с младшими школьниками, возрос функциональный вклад сердечных ритмов в модуляцию микрокровотока и снизилась роль эндотелиальных влияний, что способствовало повышению нутритивного кровотока в условиях интенсивно протекающих метаболических процессов. При переходе к юношескому возрасту увеличился вклад колебаний эндотелиального генеза, обеспечивающий снижение сосудистого сопротивления за счет вазодилатации резистивных микрососудов.

3. У мальчиков отмечено постепенное повышение уровня перфузии при переходе от младшего школьного к юношескому возрасту. По сравнению с младшими школьниками, у мальчиков-подростков снижен вклад миогенных ритмов в модуляцию микроциркуляции, повышен миогенный тонус резистивных микрососудов, способствующий рациональному транскапиллярному обмену в условиях высокой интенсивности обменных процессов. Дальнейшее снижение функционального вклада в модуляцию тканевой перфузии миогенных регуляторных механизмов и повышение сосудистого сопротивления свидетельствовало о преобладании эрготропной направленности регуляции микроциркуляции у 18-летних юношей.

4. Выраженное увеличение резервов капиллярного кровотока, возрастание эффективности микроциркуляции и вазомоторной активности артериол зафиксировано у мальчиков в период от младшего школьного к юношескому возрасту, а у девочек от подросткового к юношескому возрастному этапу, что свидетельствует о расширении функциональных возможностей микроциркуляторного русла с возрастом и разных темпах формирования функциональной зрелости микрососудистого русла у девушек и юношей.

5. Снижение сосудистого сопротивления и увеличение нутритивного кровотока в условиях дозированной физической нагрузки у детей младшего школьного и подросткового возраста достигалось за счет интенсификации активных тонусформирующих звеньев регуляции микроциркуляции. Адаптация системы микроциркуляции к физической нагрузке у девушек и юношей достигалась разными путями: у юношей – за счет усиления респираторных и ослабления эндотелиальных влияний, что выразилось в снижении

микроциркуляторного давления в венозном отделе и увеличении прекапиллярного сосудистого сопротивления, у девушек - за счет усиления вклада активных тонусформирующих механизмов микроциркуляции (миогенных, нейрогенных и эндотелиальных ритмов).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых в ВАК:

1. Бабошина Н.В. Возрастные особенности микроциркуляции у детей младшего школьного возраста / Н.В. Бабошина, И.А. Тихомирова, Ю.А. Малышева // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. – 2016. – №1. – С. 13-22.
2. Бабошина Н.В. Исследование микроциркуляции крови у детей 8 и 10 лет с использованием дыхательной пробы / Н.В. Бабошина // Вестник Российского государственного медицинского университета. – 2016. – №3. – С. 56-63.
3. Бабошина Н.В. Возможности метода лазерной доплеровской флоуметрии в оценке возрастных особенностей функционирования системы микроциркуляции / И.А. Тихомирова, Н.В. Бабошина, С.С. Терехин // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 17, №3. – С. 80-86.

в Scopus:

4. Бабошина Н.В. Особенности функционирования системы микроциркуляции у лиц обоего пола на разных возрастных этапах / Н.В. Бабошина // Физиология человека. – 2018. – Т. 44, № 4. – С. 107–115.

в журналах и сборниках конференций:

5. Бабошина Н.В. Оценка функционирования системы микроциркуляции у младших школьников методом лазерной доплеровской флоуметрии / Н.В. Бабошина // Материалы XIII Всероссийской молодежной научной конференции Института физиологии Коми НЦ УрО РАН «Физиология человека и животных: от эксперимента к клинической практике». – Сыктывкар, 2014. – С. 107-110.
6. Бабошина Н.В. Оценка возрастных особенностей регуляции микроциркуляции по результатам дыхательной пробы / Н.В. Бабошина, А.А. Ахапкина // Материалы Международной научной конференции «Микроциркуляция и гемореология (Клиника и эксперимент: из лаборатории к постели больного)». – Ярославль, 2015. – С. 115.
7. Бабошина Н.В. Механизмы регуляции и резервные возможности микроциркуляции у младших школьников / Н.В. Бабошина, И.А. Тихомирова, А.А. Ахапкина и др. // Материалы VIII Всероссийской конференции с элементами школы по физиологии мышц и мышечной деятельности. – Москва, 2015. – С. 107.
8. Бабошина Н.В. Оценка возрастных изменений функционирования системы микроциркуляции методом лазерной доплеровской флоуметрии / Н.В. Бабошина, А.А. Ахапкина, Ю.В. Малышева // Материалы X Международной (XIX Всероссийской) Пироговской научной медицинской конференции студентов и молодых ученых. – Москва, 2015. – № 2. – С. 278-279.
9. Бабошина Н.В. Адаптационные резервы микроциркуляции у младших школьников / Н.В. Бабошина, И.А. Тихомирова // Материалы VI Всероссийской с

международным участием школы-конференции «Физиология кровообращения». – Москва, 2016. – С. 20.

10. Бабошина Н.В. Оценка микроциркуляции у младших школьников при проведении пробы с дозированной мышечной нагрузкой / Н.В. Бабошина // Медицинский академический журнал. – 2016. – Т. 16, №4. – С. 12.

11. Бабошина Н.В. Влияние дозированной физической нагрузки на состояние микроциркуляции у детей младшего школьного возраста / Н.В. Бабошина, А.А. Ахапкина, Ю.В. Малышева // Материалы XI Международной (XX Всероссийской) Пироговской научной конференции студентов и молодых ученых. – Москва, 2016. – С. 230.

12. Бабошина Н.В. Особенности системы микроциркуляции у лиц подросткового и юношеского возраста / Н.В. Бабошина // *Juvenis scientia*. – 2017. – № 7. – С. 4-7.

13. Бабошина Н.В. Оценка микроциркуляции на разных возрастных этапах с помощью лазерной доплеровской флоуметрии / Н.В. Бабошина // Материалы XXIII съезда физиологического общества им. И.П. Павлова. – Воронеж, 2017. – С. 2262-2264.

14. Бабошина Н.В. Особенности функционирования микроциркуляции и ее резервных возможностей у детей от 8 до 11 лет / Н.В. Бабошина // Материалы XI Международной научной конференции «Микроциркуляция и гемореология». – Ярославль, 2017. – С. 62.

15. Бабошина, Н.В. Оценка функционирования системы микроциркуляции / Н.В. Бабошина // Тезисы XX Международной медико-биологической конференции молодых исследователей «Фундаментальная наука и клиническая медицина». – Санкт-Петербург, 2017. – Т.20. – С. 56-57.

16. Бабошина Н.В. Оценка состояния микроциркуляции крови в подростковом и юношеском возрасте с использованием дыхательной пробы / Н.В. Бабошина // Материалы III Всероссийской (XVIII) молодежной научной конференции «Молодежь и наука на севере». – Сыктывкар, 2018. – С. 92.

17. Бабошина Н.В. Реакция системы микроциркуляции на выполнение дозированной нагрузки у лиц обоего пола подросткового возраста / Н.В. Бабошина, И.А. Тихомирова // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Медико-физиологические основы спортивной деятельности на Севере». – Сыктывкар, 2019. – С. 3-6.

18. Бабошина Н.В. Влияние дозированной нагрузки на резервные возможности микрокровотока у лиц подросткового возраста / Н.В. Бабошина // Физиология и патология кровообращения: VII Всероссийская с международным участием школа-конференция: Тезисы докладов. – М.: РА «Ильф», 2020. – С. 11-12.