

DOI: 10.26693/jmbs03.04.199

УДК 612.135:613.73-053.81

Розова Е. В.¹, Тимошенко Е. Р.¹, Сидоряк Н. Г.²

ОСОБЕННОСТИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ, МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КАПИЛЛЯРОВ И МИТОХОНДРИЙ В МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ ПРИ ДОЗИРОВАННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

¹Институт физиологии им. А. А. Богомольца НАН Украины, Киев, Украина²Межведомственная лаборатория медико-биологического мониторинга:
Мелитопольский государственный педагогический университет,
Таврический агротехнологический университет, Мелитополь, Украина

rozova@ukr.net

Изучена взаимосвязь изменений микроциркуляции крови и ультраструктуры капилляров и митохондрий в мышцах в ответ на дозированную физическую нагрузку у молодых людей разной степени тренированности и животных в условиях эксперимента. Выявлено, что отсутствие тренированности и/или исходно низкий показатель микроциркуляции сопровождаются снижением эффективности регуляции кровотока в ответ на дозированную физическую нагрузку. В то время как исходно высокие значения показателя микроциркуляции у спортсменов указывают на возможность компенсаторного повышения эффективности регуляции кровотока в системе микроциркуляции крови при дозированной физической нагрузке за счет преобладания ее активных механизмов. В эксперименте с дозированной физической нагрузкой показаны ультраструктурные проявления адаптации мышц, в частности определялись признаки первичного ангиогенеза; выявлена активация морфогенеза митохондрий, что указывает на формирование компенсаторно-приспособительных механизмов, направленных на обеспечение адекватного энергетического метаболизма и предупреждение развития вторичной тканевой гипоксии. Наряду с этим в мышечной ткани имели место участки гипертрофии, увеличение количества структурно поврежденных митохондрий. Такой спектр изменений может указывать на индивидуальные особенности формирования адаптивных механизмов в организме в ответ на дозированную физическую нагрузку и объяснять разнонаправленные изменения в системе микроциркуляции.

Ключевые слова: микроциркуляция, физическая нагрузка, лазерная доплеровская флоуметрия, капилляризация мышечной ткани, митохондрии.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Данная работа является фрагментом НИР «Возрастные особенности реактивности сердечно-сосудистой системы и микроциркуляции крови у студентов и спортсменов при действии физической нагрузки», № гос. регистрации 0106U006061 и «Механізми змін функціонального стану і структурної організації мітохондрій при оксидативному стресі різного генезу», № гос. регистрации 0112U008232.

Введение. Изменения функционирования сердечно-сосудистой системы под влиянием мышечной деятельности привлекают внимание физиологов, медиков и специалистов в области физической культуры и спорта. Это обусловлено тем, что деятельность данной системы под влиянием физических нагрузок варьирует в широких пределах в зависимости как от интенсивности нагрузки, так и от набора предшествующих факторов – эмоциональные перегрузки, малоподвижный образ жизни, нерациональное питание и т.п. [1, 14].

Одними из важных характеристик формирования ответных реакций сердечно-сосудистой системы на физические нагрузки являются особенности механизмов регуляции микроциркуляции крови (МЦК). МЦК доступна для наблюдения и регистрации ее количественных характеристик. Результаты исследований последних десятилетий позволяют считать, что именно периферическое кровообращение обеспечивает основу нормальной жизнедеятельности органов и систем, полноценное функционирование клеточных элементов при различных эндо- и экзогенных воздействиях на организм, в том числе и при физических нагрузках. Однако изучение реактивности системы микроциркуляции в условиях мышечной деятельности требует ясного понимания механизмов перестроек во всех

звеньях микроциркуляторного русла. При этом до настоящего времени не ясно, отражают ли изменения микрокровотока при мышечной нагрузке общие закономерности адаптивных реакций [15, 17, 18].

Имеющиеся данные по изменению параметров макроциркуляции показывают, что в процессе спортивной тренировки происходит определенная морфофункциональная перестройка всего микроциркуляторного русла, направленная на поддержание оптимальной оксигенации в скелетных мышцах, что может также характеризовать и функциональное состояние сердечно-сосудистой системы в целом. Количественная оценка параметров системы микроциркуляции свидетельствует о том, что плотность функционирующих капилляров в наибольшей степени изменяется при различных функциональных состояниях, являясь самой лабильной характеристикой микроциркуляторного русла [17]. При этом для исследования особенностей адаптации при различной степени тренированности организма и разной интенсивности физических нагрузок необходимо знание основных структурно-приспособительных механизмов, регулирующих гемодициркуляцию в тканях. В частности, необходимо учитывать, что при возрастании физической нагрузки в организме развивается гипоксическое состояние, классифицируемое как гипоксия нагрузки [6]. Последняя лимитирует работоспособность и сопровождается ограничениями диффузии кислорода в тканях. Для уменьшения влияния этого фактора необходимыми (и часто достаточными) условиями являются: возрастание капилляризации тканей, что способствует улучшению доставки O_2 к митохондриям, и/или активация морфогенеза и функциональной активности митохондрий [2, 16].

Исследователи отмечают противоречивость данных, касающихся изменения плотности функционирующих капилляров под воздействием физической нагрузки. В частности, в зависимости от мощности нагрузки наблюдают либо увеличение плотности функционирующих капилляров в активных и неактивных органах, либо снижение данного показателя в неактивных тканях [9, 12]. С другой стороны, структурные и функциональные перестройки митохондриального аппарата клеток различных тканей организма сопровождают формирование адаптивных либо патологических реакций в ответ на развитие гипоксических состояний различного генеза, включая гипоксию нагрузки, и также зависят от мощности нагрузки [3, 10].

Указанные особенности и противоречия указывают на необходимость изучения различных звеньев микроциркуляторного русла, механизмов регуляции микроциркуляции, морфофункционального состояния митохондриального аппарата

клеток и тех изменений, которые происходят под влиянием физических нагрузок.

Целью исследования было изучение изменений микроциркуляции крови, ультраструктуры капилляров и митохондрий в мышцах в ответ на физическую нагрузку у молодых людей разной степени тренированности и животных в условиях эксперимента.

Объект и методы исследования. Для выявления особенностей МЦК обследовали мужчин в возрасте 21 год: 15 студентов не занимающихся спортом, и 15 спортсменов (вольная борьба, уровень кандидатов в мастера спорта). Дозированная физическая нагрузка (ДФН) выполнялась на велоэргометре и подбиралась индивидуально – скорость потребления O_2 составляла 70–75% от максимальной [20]. Выбор такой программы физической нагрузки дает возможность установить функциональные перестройки в организме тренированных и нетренированных лиц со стороны системы МЦК [8, 19]. От каждого участника получено письменное согласие на проведение исследования, согласно рекомендациям этических комитетов по вопросам биомедицинских исследований, законодательства Украины об охране здоровья и Хельсинкской декларации 2000 г., директивы Европейского общества 86/609 об участии людей в медико-биологических исследованиях.

МЦК оценивали с помощью лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с использованием аппарата ЛАКК-01 (НПП, «Лазма» Россия) на вентральной поверхности дистальной фаланги 4-го пальца кисти. Анализ ЛДФ-граммы выполняли в соответствии с инструкцией к прибору [7]. Регистрируемая величина перфузии или показатель микроциркуляции (ПМ), характеризующий среднюю величину перфузии единицы объема ткани за единицу времени (измеряется в перфузионных единицах – пф. ед.), имеет переменный и случайный характер, поэтому, для расчета применяется математический аппарат анализа случайных процессов [11].

Экспериментальные исследования проведены на половозрелых крысах-самцах линии Вистар массой 220–250 г (основная группа, $n = 10$). ДФН создавали плаванием животных (30 мин. однократно или ежедневно на протяжении 3-х недель) в подогретой до 30–32 °С воде при высоте водяного столба 80 см, скорость потребления O_2 составляла 70–75% от максимальной, что соответствовало условиям, создаваемым при тренировке студентов и спортсменов [19, 20]. Контрольная группа включала 10 интактных животных.

По окончании экспериментов животных декапитировали под слабым эфирным наркозом. Работа на всех этапах эксперимента выполнялась в

соответствии с Положениями «Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» (Страсбург, 1986) и принципов Хельсинкской Декларации (2000).

В морфологических и морфометрических исследованиях использовали образцы икроножной мышцы. Препараты для электронномикроскопических исследований готовили по общепринятой методике [5]. Просмотр ультратонких срезов (толщиной 40–60 нм) осуществляли с помощью электронного микроскопа "ПЕМ-125К" (Украина).

Общее количество функционирующих капилляров (ФК) определяли в соответствии с методикой, предложенной Н. Норрелер и соавт. [4], на экране электронного микроскопа при малом (x 1800–2000) увеличении. Морфометрическое изучение митохондрий в ткани икроножной мышцы осуществляли с помощью компьютерной программы Image Tool Version 3.0 (США) на 130–150 полях в каждой исследуемой группе.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью пакета прикладных программ «Microsoft Excel» с использованием критерия t Стьюдента. Результаты представляли в виде $M \pm m$, поскольку полученные данные укладывались в нормальное распределение величин. Различия между средними значениями считали достоверными при $p < 0,05$ [13].

Результаты исследований и их обсуждение.

Проведенная оценка средней величины перфузии единицы объема ткани за единицу времени, т.е. МП, выявила, что обследуемый контингент должен быть разделен на 2 подгруппы: у лиц I-й подгруппы величина ПМ колебалась в пределах от 0,5 пф. ед. до 12 пф. ед.; у лиц II-й подгруппы величина ПМ составляла от 12 до 25 пф. ед. Последующие исследования показали, что такое разделение является оправданным, поскольку величины и изменения остальных параметров, характеризующих микроциркуляцию, в обеих подгруппах также существенно различались.

В покое ПМ у спортсменов в обеих подгруппах был выше, чем у студентов, на 44% и 26% соответственно подгруппе ($p < 0,05$), что свидетельствует о более интенсивном кровотоке в единице объема мышечной ткани, т.е. об улучшении снабжения тканей кислородом у спортсменов (рис. 1).

После выполнения ДФН ПМ у студентов I подгруппы возрастал на 83%, тогда как во II подгруппе уменьшался на 14%. У спортсменов I подгруппы ПМ после выполнения физической нагрузки увеличился на 34%, тогда как во II подгруппе он снижался на 33% (рис. 1). Разница в ответах на физическую нагрузку студентов и спортсменов I и II под-

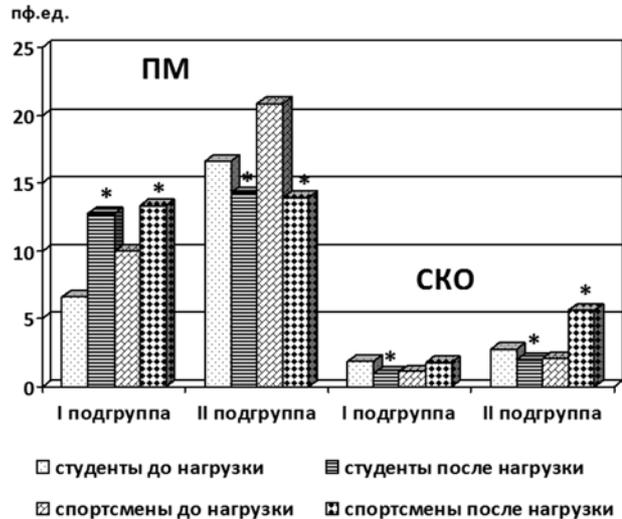


Рис. 1. Изменения ПМ и СКО у студентов и спортсменов до и после ДФН.

Примечание: * – $p < 0,05$.

групп может указывать на включение различных адаптивных механизмов влияния вегетативной нервной системы на МЦК: в первом случае – симпатической нервной системы, во втором – парасимпатической.

Величина среднего квадратического отклонения (СКО), характеризующая временную изменчивость микроциркуляции, и у студентов, и у спортсменов I подгруппы была ниже, чем во II подгруппе (рис. 1); по-видимому, во II подгруппе в состоянии покоя активнее задействованы механизмы модуляции тканевого кровотока.

После ДФН величина СКО уменьшалась в обеих подгруппах студентов (на 28% и 51% соответственно), что может свидетельствовать о снижении функциональных возможностей модуляции тканевого кровотока. У спортсменов после ДФН отмечалась противоположная картина: в I подгруппе отмечалась тенденция к увеличению СКО ($0,1 < p < 0,2$), во II – отмечался рост СКО в 2,7 раза (рис. 1). Такие изменения могут свидетельствовать о большей адаптивной лабильности тканевого кровотока при ДФН у тренированных лиц, направленной на оптимизацию перфузии кровью мышечной ткани.

Анализ коэффициента вариации (K_v), дающего информацию о вкладе вазомоторного компонента в модуляцию тканевого кровотока, показал наличие разнонаправленного ответа на ДФН в зависимости от величины ПМ у тренированных и нетренированных лиц: у студентов I подгруппы и спортсменов II подгруппы не происходило достоверных изменений K_v ; у студентов I подгруппы K_v снижался на 71%, а у спортсменов II подгруппы – возрастал в 4,1 раза (рис. 2). Следовательно, у студентов с

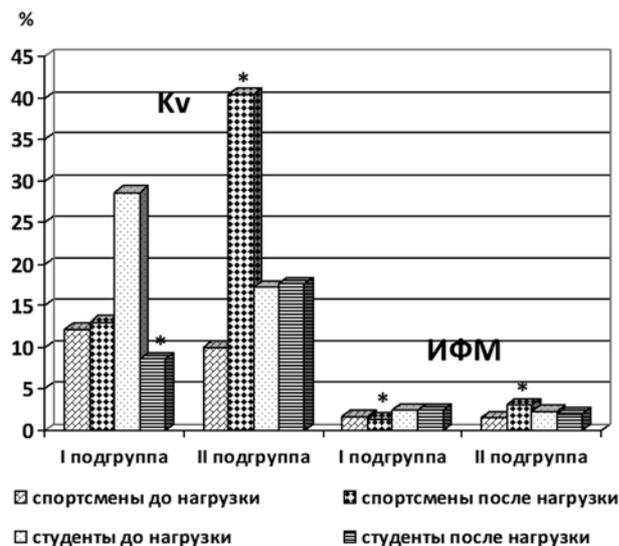


Рис. 2. Изменения K_v и ИФМ у студентов и спортсменов до и после физической загрузки.

Примечание: * – $p < 0,05$.

низким уровнем ПМ ДФН снижает эффективность данного защитного механизма в ответ на возмущающий фактор, в то время как у спортсменов с высоким ПМ вклад вазомоторного компонента в модуляцию кровотока резко возрастает.

Интегральную характеристику соотношения механизмов активной (обусловленной миогенной и нейрогенной активностью прекапиллярных вазомоторов и собственно сосудистым тонусом) и пассивной (обусловленной флуктуациями кровотока, синхронизированными с кардио- и дыхательным ритмами) модуляции кровотока дает индекс флаксомций (ИФМ).

У студентов I подгруппы в покое величина ИФМ составляла $1,74 \pm 0,046$, а II – $1,47 \pm 0,001$ (т.е., была на 15,6% меньше), что указывает на преобладание влияния сосудистого тонуса над пассивными модуляциями у лиц с меньшими значениями ПМ. После воздействия ДФН у студентов I подгруппы ИФМ понижался на 14%, а во II подгруппе не изменялся. У спортсменов же I подгруппы после ДФН ИФМ достоверно не изменялся, в то время как во II подгруппе он возрастал в 2,1 раза (рис. 2). Такая динамика может свидетельствовать о низкой эффективности регуляции кровотока в системе микроциркуляции у студентов II подгруппы и спортсменов I подгруппы и повышении эффективности регуляции кровотока, за счет активных механизмов модуляции.

Полученные результаты показывают, что сердечно-сосудистая система студентов и спортсменов по-разному реагирует на ДФН. Такая особенность может быть обусловлена структурными особенностями

капиллярной сети, сформировавшимися под влиянием длительных спортивных тренировок.

В эксперименте с ДФН были выявлены структурные проявления адаптации мышц: практически не наблюдалось запустевших или спавшихся капилляров; возрастало количество ФК на единицу площади мышечной ткани у крыс основной группы относительно нетренированных особей (табл.), т.е. выявлялись признаки первичного ангиогенеза, как компенсаторного ответа на физическую нагрузку.

Таблица – Изменения некоторых морфометрических характеристики ткани икроножной мышцы при ДФН ($M \pm m$)

Показатели	Контрольная группа (n = 10)	Основная группа (n = 10)
Общее количество митохондрий, ед.·мкм ⁻² : субсарколеммальные митохондрии интрамиофибриллярные митохондрии	10,3 ± 2,4 6,1 ± 1,3	17,8 ± 3,1* 10,1 ± 1,6*
Количество структурно измененных митохондрий, %: субсарколеммальные митохондрии интрамиофибриллярные митохондрии	3,8 ± 0,7 0,9 ± 0,2	13,2 ± 1,4** 11,0 ± 2,1**
Количество функционирующих капилляров, ед.·мкм ⁻²	10,8 ± 1,4	19,5 ± 2,0*

Примечания: * – $p < 0,05$ относительно показателей контрольной группы, ** – $p < 0,01$ относительно показателей контрольной группы.

Формирование компенсаторных механизмов в системе микроциркуляции крови направлено на улучшение метаболических процессов, связанных с обеспечением мышцы кислородом в условиях ДФН. В эндотелиальных клетках капиллярной выстилки выявлялась активация пиноцитоза, что принято рассматривать как отражение интенсификации метаболических процессов в ответ на различные воздействия, в том числе и на ДФН [21].

Наблюдалось достоверное увеличение общего количества митохондрий субсарколеммальной и интрамиофибриллярной субпопуляций на 72,8% и 65,6% соответственно, следовательно, происходила активация морфогенеза митохондрий, что частично компенсировало возрастание под воздействием ДФН количества структурно измененных оргanelл (табл.).

Отмеченные изменения принято считать проявлением формирования компенсаторно-приспособительных механизмов, направленных на обеспечение адекватного энергетического метаболизма и предотвращение развития вторичной тканевой гипоксии [4].

Наряду с указанным выше, в мышечной ткани имели место и участки гипертрофии мышечных волокон, увеличение количества вакуолей между ними; существенно возрастал (как отмечалось) процент структурно поврежденных митохондрий: основные нарушения заключались в наличии частично либо полностью вакуолизованных органелл. Такой спектр изменений может указывать на индивидуальные особенности формирования адаптивных механизмов в организме в ответ на ДФН и, в определенной степени, объяснять разнонаправленность ответов в системе микроциркуляции у лиц при ДФН.

Проведенные исследования позволили также выявить, что отсутствие тренированности и/или исходно низкий ПМ сопровождаются снижением эффективности регуляции кровотока в ответ на ДФН. Исходно высокие значения ПМ у спортсменов указывают на возможность компенсаторного повышения эффективности регуляции кровотока в системе микроциркуляции при ДФН за счет преобладания его активных механизмов.

Выводы

1. Исходно высокие значения показателя микроциркуляции у спортсменов свидетельствуют о возможности компенсаторного повышения эффективности регуляции кровотока в системе микроциркуляции при дозированной физической нагрузке за счет преобладания активных механизмов регуляции.

2. Отсутствие тренированности и/или исходно низкий показатель микроциркуляции сопровождаются снижением эффективности регуляции кровотока в ответ на дозированную физическую нагрузку.
3. Отмечены изменения ультраструктуры мышечной ткани, которые принято считать проявлением формирования компенсаторно-приспособительных механизмов, направленных на обеспечение адекватного энергетического метаболизма и предотвращение развития вторичной тканевой гипоксии. К ним, в первую очередь, можно отнести возрастание количества функционирующих капилляров на единицу площади мышцы и активацию морфогенеза митохондрий.
4. Широкий спектр выявленных изменений может указывать на индивидуальные особенности формирования адаптивных механизмов в организме в ответ на дозированную физическую нагрузку и, в определенной степени, объяснять разнонаправленность ответов в системе микроциркуляции у лиц при нагрузке.

Перспективы дальнейших исследований.

Полученные результаты указывают на целесообразность проведения дальнейших исследований формирования компенсаторно-приспособительных механизмов в системе микроциркуляции в ответ на физические нагрузки с целью поиска путей повышения работоспособности организма и предотвращения развития тканевой гипоксии.

References

1. Banks L, Wells GD, McCrindle BW. Cardiac energy metabolism is positively associated with skeletal muscle energy metabolism in physically active adolescents and young adults. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2014; 39 (3): 363-8. PMID: 24552379. DOI: 10.1139/apnm-2013-0312.
2. Calbet J, Losa-Reyna J, Torres-Peralta R, Rasmussen P, Ponce-González J, Sheel A. Limitations to oxygen transport and utilization during sprint exercise in humans: evidence for a functional reserve in muscle O₂ diffusing capacity. *J Physiol*. 2015; 593 (20): 4649-64. PMID: 26258623. DOI: 10.1113/JP270408.
3. Close GL, Kayani A, Vasilaki A, McArdle A. Skeletal muscle damage with exercise and aging. *Sports Med*. 2005; 35 (5): 413-27. PMID: 15896090.
4. Hoppler H, Vogt M. Muscle tissue adaptation to hypoxia. *J Exp Biol*. 2001; 204 (18): 3133-9. PMID: 11581327.
5. Karupu B. *Electron microscopy*. Kiev: Vishcha shkola, 1982. 208 p. [Russian].
6. Kolchinskaja AZ. Classification of hypoxic states. *Patol Fiziol Eksp Ter*. 1981; (4): 3-10. PMID: 6793986. [Russian].
7. Kozlov VI, Mach ES, Sidorov VV. *Instructions for the use of a laser analyzer of capillary blood flow*. Moscow, 2002. 40 p. [Russian].
8. Kramer K, Dijkstra H, Bast A. Control of physical exercise of rats in a swimming basin. *Physiol Behav*. 1993; 53 (2): 271-6. PMID: 8446689.
9. Kraus RM, Stallings HW, Yeager RC. Circulating plasma VEGF response to exercise in sedentary and endurance – trained men. *J Appl Physiol*. 2004; 96 (4): 1445–50. PMID:14660505, DOI: 10.1152/jappphysiol.01031.2003.
10. Lukyanova LD. Molecular mechanisms of tissue hypoxia and organism adaptation. *Fiziol Zh*. 2003; 49 (3): 17-35. PMID: 12918247. [Russian].
11. Makolin VI, Branko VV, Bogdanova EA, Kamshilina LS, Sidorov VV *The method of laser Doppler flowmetry in cardiology. Manual for doctors*. Moscow, 1999. 48 p. [Russian].
12. Mankovska IM, Gavenauskas BL, Nosar BI, Nasarenko AI, Rosova KV, Bratus LV. Mechanisms of muscle tissue adaptation to exercise-induced hypoxia in interval hypoxic hypoxia conditions. *Sport Medicine*. 2005; 1: 3-11. [Russian].
13. Osipov VP, Lukyanova EM, Antipkin YuG, Brusilova EM, Marushko RV. *The technique of statistical processing of medical information in scientific research*. Kiev: Planet of people, 2002. 200 p. ISBN 966-96027-0-X. [Russian].

14. Pendergast DR. Cardiovascular, respiratory, and metabolic responses to upper body exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 1989; 21 (5 Suppl): S121-5. PMID: 2691823.
15. Phillips BE, Atherton PJ, Varadhan K, Limb MC, Wilkinson DJ, Sjøberg KA, Smith K, Williams JP. The effects of resistance exercise training on macro- and micro-circulatory responses to feeding and skeletal muscle protein anabolism in older men. *J Physiol.* 2015; 593 (12): 2721-34. PMID: 25867865. DOI: 10.1113/JP270343.
16. Rozova KV, Vinnichuk YuD, Gunina LM, Bezugla VV. Structural-functional alterations of tissues of skeletal muscles, lungs and hearts in conditions of hypoxia loading in the experiment. *Fiziol Zh.* 2016; 62 (6): 72-80.
17. Sydoriak NH, Rozova EV. Peculiarities of the hypoxic state formation in rats under nitrite methemoglobinemia. *Indian J Appl. Res.* 2016; 6 (2): 618-20.
18. Sidoryak NG, Tymoshenko ER, Belikova MV, Rozova EV Age changes in blood microcirculation in students and athletes under the influence of physical activity. *East Europ Sci J.* 2016; (9): 4-12.
19. Filippov MM. *The process of mass transfer of respiratory gases during muscle activity. The degree of hypoxia load: The secondary tissue hypoxia.* Kiev: Naukova Dumka, 1983. P. 197-216. [Russian].
20. Wilmore JH, David L. Costill W., Kenney L. *Physiology of Sport and Exercise 2008.* Creative Printing USA. 574 p. ISBN 13: 978-0-7360-5583-3.
21. Yang C, Mora S, Ryder J, Coker K, Hansen P, Allen L. VAMP3 null mice display normal constitutive, insulin- and exercise-regulated vesicle trafficking. *Molecular and Cellular Biology.* 2001; 21 (5): 1573-80. PMID: 11238894. DOI: 10.1128/MCB.21.5.1573-1580.2001.

УДК 612.135:613.73-053.81

**ОСОБЛИВОСТІ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ КРОВІ, МОРФОФУНКЦІОНАЛЬНОГО
СТАНУ КАПІЛЯРІВ ТА МІТОХОНДРІЙ У М'ЯЗОВІЙ ТКАНИНІ
ПРИ ДОЗОВАНОМУ ФІЗИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Розова К. В., Тимошенко К. Р., Сидоряк Н. Г.

Резюме. Досліджено взаємозв'язок змін мікроциркуляції крові та ультраструктури капілярів і мітохондрій в м'язах у відповідь на дозоване фізичне навантаження у молодих людей різного ступеня тренуваності і тварин в умовах експерименту. Виявлено, що відсутність тренуваності та/або вихідний низький показник мікроциркуляції супроводжуються зниженням ефективності регуляції кровотоку у відповідь на дозоване фізичне навантаження, в той час як вихідні високі значення показника мікроциркуляції у спортсменів вказують на можливість компенсаторного підвищення ефективності регуляції кровотоку в системі мікроциркуляції крові при дозованому фізичному навантаженні за рахунок переважання її активних механізмів. В експерименті з дозованим фізичним навантаженням показані ультраструктурні прояви адаптації м'язів, зокрема визначалися ознаки первинного ангиогенезу; виявлена активація морфогенезу мітохондрій, що вказує на формування компенсаторно-приспосувальних механізмів, спрямованих на забезпечення адекватного енергетичного метаболізму та попередження розвитку вторинної тканинної гіпоксії. Поряд з цим у м'язовій тканині мали місце ділянки гіпертрофії, збільшення кількості структурно пошкоджених мітохондрій. Такий спектр змін може вказувати на індивідуальні особливості формування адаптивних механізмів в організмі у відповідь на дозоване фізичне навантаження і пояснювати різноспрямовані зміни в системі мікроциркуляції крові.

Ключові слова: мікроциркуляція, фізичне навантаження, лазерна доплерівська флоуметрія, капіляризація м'язової тканини, мітохондрії.

UDC 612.135:613.73-053.81

**Features of blood microcirculation, morphofunctional state
of capillaries and mitochondria in muscle tissue at a dosed physical training**

Rozova E. V., Timoshenko E. R., Sydoriak N. G.

Abstract. One of the important characteristics of the formation of the cardiovascular system responses to physical activity are the features of the mechanisms of blood microcirculation (BM) regulation. However, the study of the microcirculation system reactivity in conditions of muscular activity requires a clear understanding of the mechanisms of rearrangements in all parts of the microvasculature. The inconsistency of data concerning changes in the density of functioning capillaries under the influence of physical exertion is noted. Depending on the load power either an increase in the density of functioning capillaries in active and inactive organs is observed, or a decrease of this index in inactive tissues. On the other hand, structural and functional rearrangements of the mitochondrial apparatus of cells in the body tissues accompany the formation of adaptive or pathological reactions in response to the development of hypoxic states of various geneses, including hypoxia of the load. These features and contradictions point to the need to study the various links of the microvasculature, the

mechanisms of regulation of microcirculation, the morpho-functional state of the mitochondrial apparatus of cells and those changes that occur under the influence of physical training.

The purpose of the research was to investigate the relationships between changes of blood microcirculation and the ultrastructure of capillaries and mitochondria in muscle in response to exercise in young people of varying degrees of fitness and in animals under the experimental conditions.

Materials and methods. Experimental studies were carried out on adult male rats (Wistar) weighing 220–250 g (n = 10). The dosed physical training (DPT) was created by swimming of the animals (30 minutes, once daily, or once a day within 3 weeks) in heated to 30–32 °C water at the height of water column of 80 cm. The consumption rate of O₂ was 70–75% of the maximum. The control group included 10 intact animals. The preparation of the tissue samples of calf muscle for electron microscopic investigations was performed by the usual method. Viewing of ultrathin sections (40–60 nm thick) was carried out using an electron microscope TEM-125K (Ukraine). Morphometric assessment of mitochondria was carried out using the computer program Image Tool Version 3 (USA). The total number of functioning capillaries (FC) was determined according to the methodology, proposed by H. Hoppeler et al. (2001). To identify the characteristics of BM, men at the age of 21 were examined: 15 students and 15 sportsmen. The DPT was performed on a veloergometer and was selected individually – the O₂ consumption rate was 70–75% of the maximum. The BM was evaluated using laser Doppler flowmetry (LDF) by LAKK-01 (Lazma, Russia). Analysis of LDF-grams was performed in accordance with the instruction for the apparatus.

Results and discussion. It was found that lack of fitness and/or initially low microcirculation index (BMI) is accompanied by a decrease in the effectiveness of blood flow regulation in response to DPT, while initially high values of BMI in sportsman indicate the possibility of compensatory increase in blood flow efficiency in the microcirculation system at DPT due to predominance of active regulatory mechanisms. In the experiment with DPT the ultrastructural manifestations of muscle adaptation were revealed, including initial signs of primary angiogenesis, the activation of mitochondrial (MC) morphogenesis. The formation of such compensatory and adaptive changes aimed at providing adequate energy metabolism and preventing the development of secondary tissue hypoxia. Along with this, in the muscular tissue there were sites of hypertrophy of muscles, and sometimes an increase in the percentage of structurally damaged MC.

Conclusions. Such wide range of changes in the morpho-functional state of the microvasculature can indicate individual features of the formation of adaptive mechanisms in the organism in response to DPT and explain the multidirectional changes in the microcirculation system.

Keywords: microcirculation, dosed physical training, laser Doppler flowmetry, capillarization of muscle tissue, mitochondria.

Стаття надійшла 31.03.2018 р.

Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування