

А. А. Ахапкина, П. В. Михайлов, А. А. Муравьев, А. А. Овцынова, П. Ю. Буланов

### Изменение макро- и микроциркуляции под влиянием дозированных мышечных нагрузок

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0214 и при поддержке ведомственной целевой программы № 01201276739*

Целью данного исследования было изучение параметров микроциркуляции при воздействии мышечных нагрузок. Наблюдения проводили в группах здоровых лиц в возрасте от 18 до 25 лет ( $n=52$ ). Характеристики микроциркуляции регистрировали при помощи лазерной доплеровской визуализации (метод LDI) с параллельной регистрацией микроциркуляторного русла ногтевого валика и бульбарной конъюнктивы. Было показано, что по данным LDI микрокровоток в коже предплечья при нагрузке усиливается более чем на 50 %. При этом заметно возрастает число функционирующих капилляров (на 10 %). На основании полученных данных можно заключить, что микроциркуляция кожи существенным образом отражает общие реакции системы на нагрузку.

**Ключевые слова:** микроциркуляция, лазерная доплеровская визуализация, мышечные нагрузки, бимикроскопия микрососудов.

A. A. Akhapkina, P. V. Mikhailov, A. A. Muraviov, A. A. Ovtsynova, P. Ju. Bulanov

### Change of Macro- and Microcirculation under the Influence of Dosed Muscular Loadings

The aim of the study was to investigate changes of parameters of macro- and microcirculation after exercise. The study involved 52 healthy volunteers aged from 18 to 25 years. The test PWC<sub>170</sub> was used as a physical loading. Methods. In all the subjects the heart rate (HR) before and after exercise was measured. Microcirculation parameters were recorded using LDI (Laser Doppler Imaging, Switzerland) and conjunctiva and nail fold biomicroscopy methods. HR was increased by 118 % after exercise vs. baseline. The analysis of LDI has shown that blood perfusion was raised by 50 %. It has been found that the capillary density of the nail bed was increased (by 10 %). Taken together some significant changes were observed in the system of microcirculation under the muscular activity.

**Keywords:** microcirculation, heart rate, Laser Doppler Imaging, biomicroscopy of the microvessel, a muscular exercise.

Механизмы срочной адаптации организма человека к мышечным нагрузкам охватывают все структурные компоненты сердечно-сосудистой системы [5, 6]. Однако, в отличие от функциональных перестроек в работе сердца, которым посвящено большое количество литературных источников [2, 3, 4], роль звена микроциркуляции и изменения его физиологических параметров при выполнении физических упражнений изучены в меньшей степени. В то же время известно, что вся деятельность кардиореспираторной системы направлена на обеспечение эффективности трансапиллярного обмена [10], что позволяет судить о лимитирующем значении адаптационных перестроек, охватывающих непосредственно микроциркуляторный уровень.

Кроме того, формирующаяся в процессе адаптации функциональная система предполагает

тесную связь между сердцем и сосудами всех уровней. Так, в частности, в работах В. Л. Карпмана [4, 5] отмечается, что увеличение производительности сердца у спортсменов под влиянием спортивной тренировки невозможно без увеличения гидравлической проводимости сосудов большого круга кровообращения [5]. Это, в свою очередь, определяет изменения скорости кровотока и в сосудах микроциркуляторного русла.

Во время физической нагрузки происходит перераспределение кровотока. 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.

С учетом вышесказанного **целью** данного исследования являлось изучение комплекса изменений макро- и микроциркуляции под влиянием дозированных мышечных нагрузок.

### Материал и методы

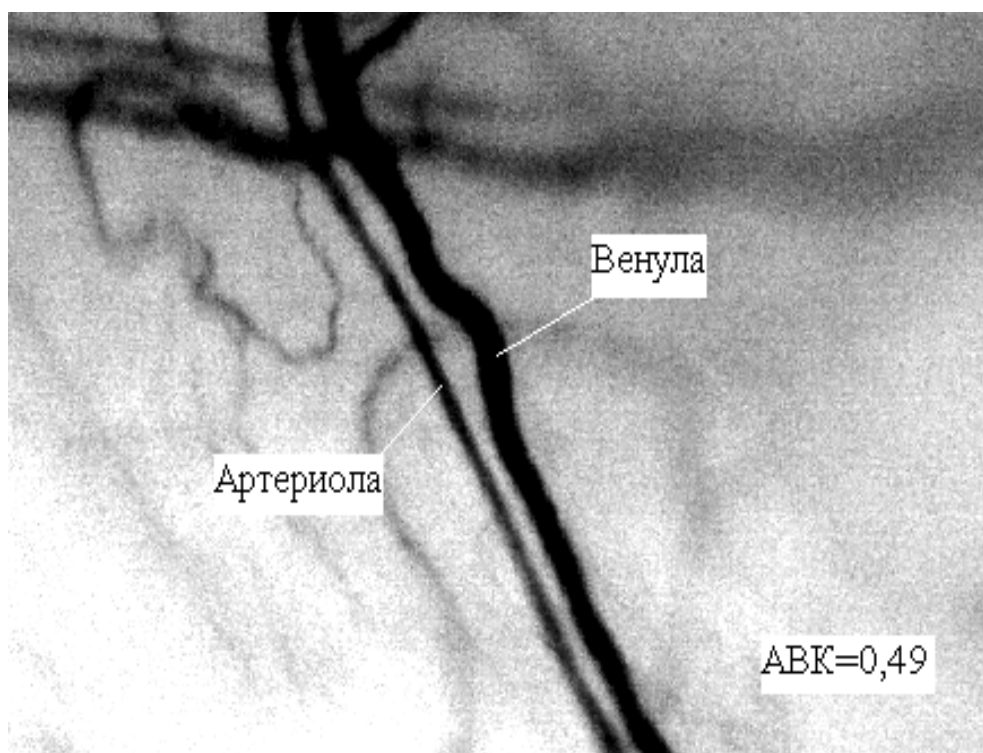
В исследовании приняли участие здоровые мужчины ( $n=32$ ) и женщины ( $n=20$ ) в возрасте от 18 до 26 лет, давшие добровольное согласие на проведение наблюдений за изменением параметров кровообращения при мышечной нагрузке. В состоянии покоя у испытуемых регистрировали частоту сердечных сокращений (ЧСС) и артериальное давление (АД), на основании которых рассчитывали среднее АД и двойное произведение (ДП). Кроме того, оценивали жизненную емкость легких (ЖЕЛ) (спиротест УСПЦ) и степень оксигенации артериальной крови (пульсооксиметр Nonin 8500).

В качестве дозированной мышечной нагрузки применяли велоэргометрический тест (Велоэргометр Kettler, X3) со ступенчато возрастающей нагрузкой 25Вт, на основании результатов кото-

рого рассчитывали относительные и абсолютные показатели уровня физической работоспособности  $PWC_{170}$  (В. Л. Карпман и др., 1978) и величину максимального потребления кислорода (МПК).

Исследование микроциркуляции включало в себя использование методов биомикроскопии сосудов бульбарной конъюнктивы и ногтевого ложа, а также метода лазерной доплеровской визуализации (LDI, Швейцария) непосредственно до и после велоэргометрической нагрузки.

Установка, которая использовалась для биомикроскопии сосудов, состояла из микроскопа и цифрового окуляра и предполагала использование светодиодного источника освещения. С помощью компьютерных программ, предназначенных для анализа изображений, оценивали диаметры параллельно идущих артериол и венул, на основании которых рассчитывали артериоло-венулярное соотношение (АВС) (см. рис.1), и определяли число функционирующих капилляров в  $1\text{мм}^2$  (ФПК) (см. рис. 3).



**Рис. 1. Биомикрофото бульбарной конъюнктивы**  
АВК – артериоло-венулярный коэффициент.

Исследование LDI проводилось на аппарате Easy-LDI компании AIMAGO SA (Швейцария; рис. 2), с помощью которого определяли число относительных перфузионных единиц (AVG),

отражающих то количество крови, которое протекает в единицу времени в одной кубической единице объема ткани. Исследуемая область – предплечье правой руки.



Рис. 2. Аппарат Easy-LDI для исследования микроциркуляции компании AIMAGO SA (Швейцария)

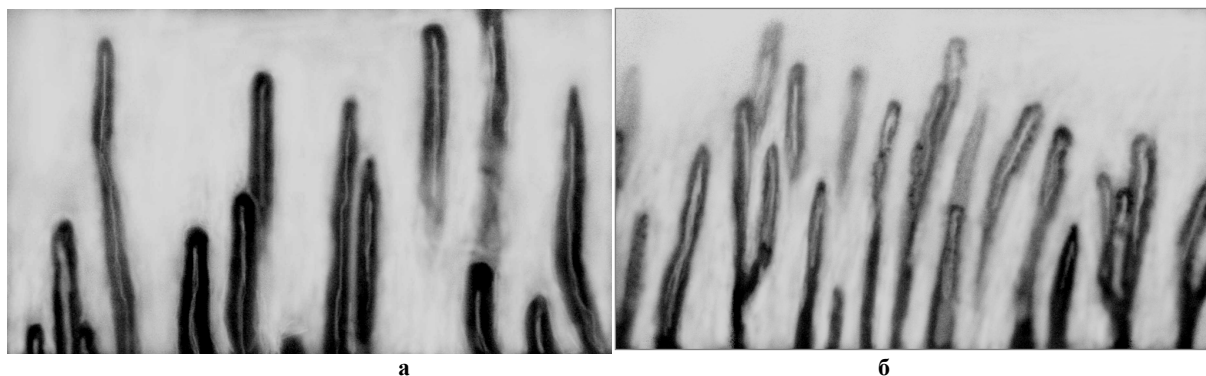


Рис. 3. Плотность функционирующих капилляров до и после нагрузки  
а – до нагрузки; б – после нагрузки.

Статистическая обработка полученных данных производилась с помощью программы MS Excel. Данные в тексте и таблицах представлены как  $M \pm \sigma$ .

**Результаты исследования и их обсуждение**  
Результаты оценки антропометрических показателей и функционального состояния испытуемых до нагрузки представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты оценки антропометрических характеристик и функционального состояния в покое

| Показатель           | $M \pm \sigma$     |
|----------------------|--------------------|
| Рост, см             | 172,8 $\pm$ 8,6    |
| Вес, кг              | 65,4 $\pm$ 10,2    |
| Весоростовой индекс  | 377,1 $\pm$ 46,9   |
| АДс, мм рт. ст.      | 118,6 $\pm$ 10,8   |
| АДд, мм рт. ст.      | 70,6 $\pm$ 8,8     |
| АДср.                | 86,5 $\pm$ 8,5     |
| ДП                   | 83,6 $\pm$ 15,3    |
| ЖЕЛ, мл              | 4342,3 $\pm$ 892,5 |
| ЖИ, мл/кг            | 66,5 $\pm$ 9,2     |
| SpO <sub>2</sub> , % | 98,2 $\pm$ 0,6     |

Уровень физической работоспособности по тесту  $PWC_{170}$  составил  $1267,5 \pm 372,0$  кгм/мин в абсолютном значении и  $19,2 \pm 4,1$  кгм/мин/кг при расчете на массу тела. В свою очередь, среднее значение МПК у испытуемых составило  $3,4 \pm 0,6$  л/мин, а относительное –  $52,0 \pm 6,2$  мл/мин/кг, что соответствует показателям нормы для взрослого здорового человека [1].

Оценка изменений таких показателей, как диаметр артериол (DA) и венул (DB) до и после нагрузки, не позволяет выявить статистически

достоверных изменений: до нагрузки DB и DA равны  $36,8 \pm 11,5$  и  $21,1 \pm 5,2$ , после нагрузки соответственно –  $36,5 \pm 10,0$  и  $20,7 \pm 4,7$ . Это в полной мере объясняет равенство ABC до и после нагрузки. Похожие результаты были получены и другими авторами [8, 9].

Интересными представляются данные исследования микроциркуляции методом биомикроскопии и LDI в сопоставлении с показателями системной кардиогемодинамики (рис. 4).

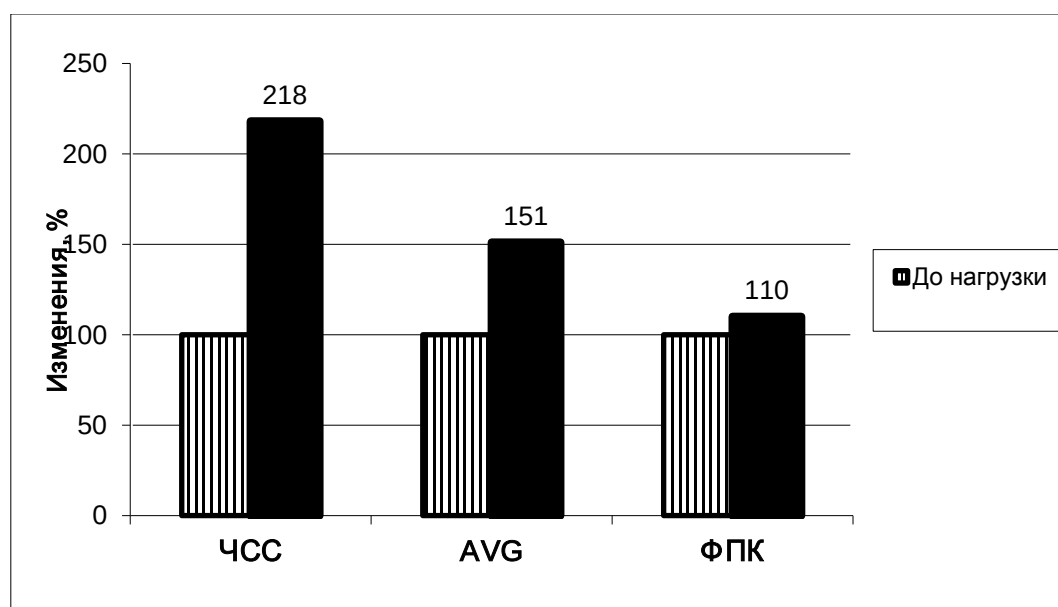


Рис. 4. Изменения ЧСС, перфузии (AVG) и функциональной плотности капилляров (ФПК) до и после нагрузки (разница в %)

ЧСС в покое была равной  $72,3 \pm 13,9$  уд/мин, а после нагрузки ее величина возросла более чем в 2 раза. Это соответствует положению о том, что прирост ЧСС во время выполнения упражнений пропорционален интенсивности нагрузки [1, 2, 4]. Подтверждением данного положения являются результаты исследования В. Л. Карпмана [4], согласно которым ЧСС – важный показатель гемодинамики, обеспечивающий увеличение МОК как при небольших, так и при интенсивных физических нагрузках [2, 5].

Методом лазерной доплеровской визуализации (LDI) было установлено, что число относительных перфузионных единиц (AVG) составило 51 %. До нагрузки данный показатель был равен  $8,1 \pm 2,3$ , в процессе ее выполнения повысился до  $12,6 \pm 3,8$ . Это прирост перфузии составил 56 % и был статистически достоверным ( $p < 0,05$ ). Метод LDI позволяет оперативно во время нагрузки оценивать изменения микрокровотока работающих и неработающих мышечных регионов (велозерго-

метрический тест: микроциркуляция кожи рук и ног). Поскольку одной из важных задач кровообращения во время мышечной деятельности является терморегуляция, то, вероятно, что усиление микрососудистой перфузии в неработающих частях тела связано с интенсификацией теплоотдач во время физических нагрузок [11, 13].

Параллельно усилению микрососудистой перфузии кожи предплечья происходило нарастание числа функционирующих капилляров ногтевого ложа. После нагрузки их количество увеличилось на 10 % ( $p < 0,05$ ). До нагрузки оно составляло  $50,4 \pm 10,2$  капилляра в  $1 \text{ мм}^2$ , а после –  $55 \pm 9,8$ . Принято считать, что число открытых капилляров определяет функциональную емкость капиллярного русла и, как следствие, в большой мере объемную скорость кровотока, а также размер площади капиллярной фильтрации, то есть потенциальную величину транкапиллярного обмена [12]. Полученные в исследовании данные не позволяют считать, что микро-

циркуляция рассматриваемых областей имеет ключевое значение для срочной адаптации к мышечным нагрузкам. Однако на этой модели изучены типичные ответы сосудистой системы на действие возмущающих факторов среды, к которым относится физическая нагрузка.

### Заключение

Полученные данные позволяют судить о том, что механизмы срочной адаптации к дозированным мышечным нагрузкам охватывают все зве-

нья сердечно-сосудистой системы. В то же время изменения гемодинамики на разных уровнях выражены в различной степени.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность С. Ю. Каменскому за любезно предоставленную возможность провести исследования микроциркуляции на аппарате Easy-LDI компании AIMAGO SA (Швейцария).

### Библиографический список

1. Аулик, И. В. Определение физической работоспособности в клинике и спорте [Текст] / И. В. Аулик. – М. : Медицина, 1990. – 192 с.
2. Белоцерковский, З. Б. Эргометрические и кардиологические критерии физической работоспособности у спортсменов [Текст] / З. Б. Белоцерковский – М. : Советский спорт, 2009. – 348 с.
3. Дембо, А. Г., Земцовский, Э. В. Спортивная кардиология [Текст] / А. Г. Дембо, Э. В. Земцовский. – Л. : Медицина, 1989. – 464 с.
4. Карпман, В. Л. Сердце и работоспособность спортсмена [Текст] / В. Л. Карпман, С. В. Хрущев, Ю. А. Борисова. – М. : ФиС, 1978. – 120 с.
5. Карпман, В. Л., Любина, Б. Г. Динамика кровообращения у спортсменов [Текст] / В. Л. Карпман, Б. Г. Любина. – М. : ФиС. – 1982. – 135 с.
6. Козлов, В. И., Тупицын, И. О. Микроциркуляция при мышечной деятельности [Текст] / В. И. Козлов, И. О. Тупицын. – М. : ФиС. – 1982. – 135 с.
7. Михайлов, П. В. Состояние микроциркуляции у лиц с разным уровнем аэробной работоспособности [Текст] / П. В. Михайлов [и др.] // Ярославский педагогический вестник. – 2011. – № 3. – Том III (Естественные науки). – С. 87–93.
8. Михайлов, П. В. Реакция системы микроциркуляции на физическую нагрузку разной интенсивности [Текст] / П. В. Михайлов [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2012. – Т. 18. – С. 25.
9. Михайлов, П. В. Возрастные особенности изменения микроциркуляторных характеристик в ответ на дозированную физическую нагрузку [Текст] / П. В. Михайлов [и др.] // Ярославский педагогический вестник. – 2012. – № 2. – Том III (Естественные науки). – С. 119–123.
10. Сиротин, Б. З., Жмерецкий, К. В. Микроциркуляция при сердечно-сосудистых заболеваниях [Текст] / Б. З. Сиротин, К. В. Жмерецкий. – Хабаровск : ДВГМУ. – 2008. – 156 с.
11. Уилмор, Дж. Х., Костилл, Д. Л. Физиология спорта [Текст] / Дж. Х. Уилмор, Д. Л. Костилл. – Киев : Олимпийская литература, 1997. – 504 с.
12. Чернух, А. М. Микроциркуляция [Текст] / А. М. Чернух, П. Н. Александров, О. В. Алексеев. – М. : Медицина, 1975. – 456 с.
13. Шмидт, Р., Тевс, Г. Физиология человека [Текст]. В 3 т. Т. 3. [пер. с англ.] / Р. Шмидт, Г. Тевс. – М. : Мир, 2005. – 228 с.

### Bibliograficheskiy spisok

1. Aulik, I. V. Opredeleniye fizicheskoy rabotosposobnosti v klinike i sporte [Tekst] / I. V. Aulik. – M. : Meditsina, 1990. – 192 s.
2. Belotserkovskiy, Z. B. Ergometricheskiye i kardiologicheskiye kriterii fizicheskoy rabotosposobnosti u sportmenov [Tekst] / Z. B. Belotserkovskiy – M. : Sovetskiy sport, 2009. – 348 s.
3. Dembo, A. G., Zemtsovskiy, E. V. Sportivnaya kardiologiya [Tekst] / A. G. Dembo, E. V. Zemtsovskiy. – L. : Meditsina, 1989. – 464 s.
4. Karpman, V. L. Serdtse i rabotosposobnost' sportsmena [Tekst] / V. L. Karpman, S. V. Khrushchev, Yu. A. Borisova. – M. : FiS, 1978. – 120 c.
5. Karpman, V. L., Lyubina, B. G. Dinamika krovoobrashcheniya u sportmenov [Tekst] / V. L. Karpman, B. G. Lyubina. – M. : FiS. – 1982. – 135 s.
6. Kozlov, V. I., Tupitsyn, I. O. Mikrotsirkulyatsiya pri myshechnoy deyatel'nosti [Tekst] / V. I. Kozlov, I. O. Tupitsyn. – M. : FiS. – 1982. – 135 s.
7. Mihaylov, P. V. Sostoyaniye mikrotsirkulyatsii u lits s razny'm urovnem aerobnoy rabotosposobnosti [Tekst] / P. V. Mikhaylov [i dr.] // Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. – 2011. – № 3. – Tom III (Yestestvenny'ye nauki). – S. 87–93.
8. Mihaylov, P. V. Reaktsiya sistemy' mikrotsirkulyatsii na fizicheskuyu nagruzku raznoy intensivnosti [Tekst] / P. V. Mihaylov [i dr.] // Angiologiya i sosudistaya hirurgiya. – 2012. – T. 18. – S. 25.
9. Mihaylov, P. V. Vozrastny'ye osobennosti izmeneniya mikrotsirkulyatornykh harakteristik v otvet na dozirovannuyu fizicheskuyu nagruzku [Tekst] / P. V. Mikhaylov [i dr.] // Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. – 2012. – № 2. – Tom III (Yestestvenny'ye nauki). – S. 119–123.
10. Sirotin, B. Z., Zhmeretskiy, K. V.

Mikrotsirkulyatsiya pri serdechno-sosudisty'h zabollevaniyah [Tekst] / B. Z. Sirotin, K. V. Zhmeretskiy. – Habarovsk : DVGMU. – 2008. – 156 s.

11. Uilmor, Dzh. H., Kostill, D. L. Fiziologiya sporta [Tekst] / Dzh. H. Uilmor, D. L. Kostill. – Kiyev : Olimpiyskaya literatura, 1997. – 504 s.

12. Chernuh, A. M. Mikrotsirkulyatsiya [Tekst] / A. M. Chernuh, P. N. Aleksandrov, O. V. Alekseyev. – M. : Meditsina, 1975. – 456 s.

13. Shmidt, R., Tevs, G. Fiziologiya cheloveka [Tekst]. V 3 t. T. 3. [per. s angl.] / R. Shmidt, G. Tevs. – M. : Mir, 2005. – 228 s.