

## ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОГЕМОЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕЛОЭРГОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРОБЫ У ЛИЦ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ТОЛЕРАНТНОСТИ К ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

**А.В. Харин**

*Научно-исследовательский институт «Арктика» ДВО РАН, г. Магадан, Россия*

**Цель** – выявление адаптивных перестроек системы микроциркуляции крови у лиц с различным уровнем толерантности к физической нагрузке. **Объект и методы исследования.** В исследовании приняло участие 40 практически здоровых юношей в возрасте 17–21 года. Исследование параметров микроциркуляции проведено методом компьютерной капилляроскопии в зоне кожного валика ногтевого ложа. **Результаты.** В ответ на велоэргометрический тест было выявлено увеличение диаметра венозного и переходного отдела капилляра, увеличение температуры исследуемого участка кожи. Выявлены различия по показателю скорости капиллярного кровотока среди групп с различным уровнем толерантности к физической нагрузке. **Заключение.** Отмеченные изменения показателей микроциркуляции указывают на разную степень реактивности сосудистого русла в зависимости от уровня толерантности к физической нагрузке. Показано, что скорость капиллярного кровотока может рассматриваться как один из информативных маркеров, определяющих уровень работоспособности, а также характеризующих функциональное состояние организма.

**Ключевые слова:** микроциркуляция, физическая нагрузка, капилляры, кровоток, велоэргометрия, капилляроскопия.

**Введение.** Микроциркуляторное русло является морфологически и функционально сложно устроенной частью сердечно-сосудистой системы, состояние которой во многом определяет уровень гомеостаза. Известно, что система микроциркуляции обладает изменчивостью динамических характеристик [10], что является основой для поддержания гомеостатических потребностей тканей и создаёт условия для адаптации кровотока к внешним нагрузкам [9, 13].

Понимание всех структурно-приспособительных механизмов, регулирующих циркуляцию крови, необходимо для выявления информативных маркеров толерантности к физической нагрузке. В связи с чем изучение показателей микроциркуляции крови имеет важное практическое значение в различных сферах прикладной физиологии (для разработки методов совершенствования спортивного мастерства, при отборе специализированного контингента для работы в экстремальных природно-климатических условиях окружающей среды). Именно при витальном исследовании удаётся получить результаты, отражающие реактивность микрососудов и их структурные связи. В настоящее время эффективное изучение показателей микроцир-

куляции возможно при помощи компьютерной капилляроскопии.

При исследовании функционального состояния организма и уровня его работоспособности широкое распространение получили физические тестовые нагрузки, так как они обладают высокой диагностической ценностью и с их помощью возможно моделировать различные виды деятельности человека. Одним из наиболее предпочтительных и доступных в общепринятой практике нагрузочных тестов является велоэргометрическая проба [1].

Исследованиями последних лет [5] было показано, что даже среди сопоставимых групп лиц, ведущих одинаковый образ жизни, встречаются индивидуумы, у которых показатели капиллярного кровотока могут существенно отличаться. В связи с вышесказанным представляет интерес изучение особенностей капиллярного кровотока в состоянии покоя и при велоэргометрической нагрузке, а также выявление адаптивных перестроек изучаемых характеристик микроциркуляции у лиц с различным уровнем толерантности к физической нагрузке.

**Организация и методы исследования.** В исследовании приняло участие 40 практи-

чески здоровых юношей в возрасте 17–21 года с одинаковым уровнем физической активности в рамках плана образовательного учреждения.

Регистрация скорости капиллярного кровотока оценивалась по перемещению эритроцитов в капилляре в зоне кожного валика ногтевого ложа при помощи компьютерного капилляроскопа «Капилляроскан-1» (Москва, ООО «Новые энергетические технологии»). Программное обеспечение прибора позволяло проводить оценку усреднённой скорости движения эритроцитов по конкретно исследованным капиллярам. При этом принималось во внимание то, что во внутренних висцеральных органах скорость капиллярного кровотока находится в пределах 100–500 мкм/с, а в структурах кожи может быть существенно ниже, вплоть до временного прекращения движения эритроцитов при выраженной вазоконстрикции сосудов. Температура в зоне исследования микроциркуляции измерялась с помощью приемника инфракрасного излучения, встроенного в капилляроскоп.

Испытуемым был предложен модифицированный тест PWC<sub>170</sub> со стандартной нагрузкой [8], в соответствии с которой на велоэргометре устанавливалась нагрузка 900 кгм/мин (150 Вт) со скоростью педалирования 60 об/мин и продолжительностью 3 минуты. Измерения микроциркуляции производились по выбранным капиллярам как в состоянии покоя (фон), так и на пике велоэргометрической пробы. Дифференциация обследуемых юношей по уровню устойчивости к физической нагрузке проводилась на основе показателя частоты сердечных сокращений на пике проведения пробы, где в случае увеличения данного показателя выше 140 уд./мин на пике нагрузки испытуемый был отнесён к группе со сниженной толерантностью к нагрузке, тогда как при ЧСС ниже 140 уд./мин обследуемый характеризовался нормальной устойчивостью к нагрузке [4].

Статистическая обработка полученных данных производилась с применением пакета программы Statistica 7.0. Проверка на нормальность распределения измеренных переменных осуществлялась на основе теста Шапиро-Уилка. Результаты представлены в виде среднего значения (M) и ошибки средней арифметической ( $\pm m$ ). Статистическая значимость различий определялась с помощью критерия Стьюдента. Критический уровень зна-

чимости (p) в работе принимался равным 0,05; 0,01; 0,001 [2].

**Результаты исследования и обсуждение.** В таблице представлены показатели микроциркуляции крови и морфологии капилляров среди юношей, разделённых на группы по уровню устойчивости к физической нагрузке. Анализ показателей микроциркуляции выявил статистически значимые различия между значениями, полученными до велоэргометрической пробы и после неё. В обеих группах было выявлено увеличение диаметра венозного отдела и переходного отдела капилляра, рост температуры исследуемого участка кожи в ответ на велонагрузку. В группе с нормальным уровнем устойчивости к нагрузке было выявлено снижение скорости движения эритроцитов и уменьшение количества сладжей на пике пробы.

Известно, что диаметр капилляра является тем структурным параметром, который во многом определяет объём кровотока, проходящего через микроциркуляторное русло на всём его протяжении [7]. При этом под диаметром капилляра подразумевается область сосуда, заполненная видимыми эритроцитами, сами же стенки капилляров практически не различимы при световой микроскопии. В ходе анализа полученных данных было выявлено расширение диаметра капилляров, что указывает на увеличение объёма массопереноса эритроцитов. Данное изменение стоит рассматривать как одно из проявлений адаптивной перестройки микроциркуляции, направленной на улучшение трансапикалярного обмена.

Скорость кровотока и ёмкость капиллярной сети постоянно варьируют в широких пределах в зависимости от метаболических потребностей окружающих тканей и функционального состояния органа. Во время интенсивной физической нагрузки возникает рабочая гиперемия и функционируют почти все капилляры, тогда как в состоянии покоя часть капилляров выключается из кровообращения и становится неактивной [6]. Таким образом, количество одновременно включённых в кровоток капилляров характеризует интенсивность трансапикалярного обмена и его суммарную площадь [7]. В данном исследовании не было выявлено значимых изменений количества функционирующих сосудов в ответ на велонагрузку. Были отмечены как непродолжительные остановки кровотока (стаз)

**Показатели микрогемодикуляции у лиц с различной толерантностью к физической нагрузке до и после выполнения велоэргометрической пробы**  
**Microhemocirculation indicators in persons with different tolerance to physical load before and after the cycle ergometer test**

| Показатель<br>Indicator   | Фон<br>Baseline<br>values | Велопроба, 3 мин<br>Exercise, 3 min | Уровень значимости<br>Differences<br>significance |
|---|---------------------------|-------------------------------------|---|
| Группа с низкой толерантностью к нагрузке<br>Low exercise tolerance group             |                           |                                     | Фон-проба<br>Baseline values –<br>exercise        |
| Диаметр артериального отдела, мкм<br>Diameter of the arterial segment, mcm            | 9,3 ± 0,3                 | 8,7 ± 0,3*                          | P = 0,10  |
| Диаметр венозного отдела, мкм<br>Diameter of the venous segment, mcm                  | 13,9 ± 0,4                | 15,8 ± 0,3*                         | P < 0,001   |
| Диаметр переходного отдела, мкм<br>Diameter of the transition segment, mcm            | 18,1 ± 0,5                | 20,7 ± 1,1                          | P < 0,05  |
| Длина капилляра, мкм<br>Capillary length, mcm   | 337,2 ± 17,8              | 325,0 ± 18,4                        | P = 0,32  |
| Плотность капиллярной сети, усл. ед.<br>Density of the capillary network, cond. units | 0,036 ± 0,001             | 0,035 ± 0,001                       | P = 0,28  |
| Величина периваскулярной зоны, мкм<br>Perivascular zone, mcm                          | 104,5 ± 3,9               | 95,0 ± 4,0                          | P < 0,05  |
| Скорость в артериальном отделе, мкм/с<br>Speed in the arterial segment, mcm/s         | 239,0 ± 15,8*             | 260,8 ± 18,8*                       | P = 0,19  |
| Скорость в венозном отделе, мкм/с<br>Speed in the venous segment, mcm/s               | 170,3 ± 14,1              | 179,7 ± 13,3*                       | P = 0,32  |
| Скорость в переходном отделе, мкм/с<br>Speed in the transition segment, mcm/s         | 189,3 ± 13,0              | 186,8 ± 16,1                        | P = 0,45  |
| Частота сладжей, ед.<br>Sludge frequency, units                                       | 2,7 ± 0,2                 | 2,3 ± 0,2                           | P = 0,10  |
| Температура, °C / Temperature, °C   | 30,1 ± 0,6                | 31,7 ± 0,2*                         | P < 0,01  |
| Группа с нормальной толерантностью к нагрузке<br>Normal exercise tolerance group      |                           |                                     | Фон-проба<br>Baseline values –<br>exercise        |
| Диаметр артериального отдела, мкм<br>Diameter of the arterial segment, mcm            | 9,0 ± 0,4                 | 9,8 ± 0,3                           | P = 0,08  |
| Диаметр венозного отдела, мкм<br>Diameter of the venous segment, mcm                  | 12,6 ± 0,50,5             | 14,8 ± 0,2                          | P < 0,001   |
| Диаметр переходного отдела, мкм<br>Diameter of the transition segment, mcm            | 17,7 ± 0,7                | 21,9 ± 0,7                          | P < 0,001   |
| Длина капилляра, мкм<br>Capillary length, mcm   | 326,2 ± 14,3              | 349,2 ± 11,7                        | P = 0,11  |
| Плотность капиллярной сети, усл. ед.<br>Density of the capillary network, cond. units | 0,038 ± 0,001             | 0,038 ± 0,001                       | P = 0,50  |
| Величина периваскулярной зоны, мкм<br>Perivascular zone, mcm                          | 98,6 ± 5,0                | 99,4 ± 3,4                          | P = 0,45  |
| Скорость в артериальном отделе, мкм/с<br>Speed in the arterial segment, mcm/s         | 374,4 ± 30,0              | 317,6 ± 11,2                        | P < 0,05  |
| Скорость в венозном отделе, мкм/с<br>Speed in the venous segment, mcm/s               | 217,8 ± 19,7              | 241,1 ± 13,4                        | P = 0,39  |
| Скорость в переходном отделе, мкм/с<br>Speed in the transition segment, mcm/s         | 222,2 ± 23,1              | 169,5 ± 9,1                         | P < 0,05  |
| Частота сладжей, ед.<br>Sludge frequency, units                                       | 3,0 ± 0,2                 | 2,2 ± 0,3                           | P < 0,01  |
| Температура, °C / Temperature, °C   | 31,2 ± 0,6                | 34,1 ± 0,1                          | P < 0,001   |

Примечание: \* обозначены статистически значимые различия между группами с различной устойчивостью к физической нагрузке.

Note: \* denotes statistically significant differences between groups with different exercise tolerance.

с сохранением видимых форменных элементов в одном и более капиллярах, так и полностью плазматические капилляры. Вероятно, при данном виде нагрузки не происходит активных вазомоций прекапиллярных микрососудов, которые могли бы привести к изменению числа функционирующих капилляров посредством шунтирующего кровотока, при котором кровь, поступающая в микроциркуляторное русло, минует часть капилляров по артериоло-веноулярным анастомозам [14].

При интенсивной физической нагрузке наглядно проявляется значение рационального перераспределения кровотока в организме [7]. В группе с низким уровнем устойчивости отсутствовала динамика скорости движения эритроцитов при воздействии велоэргометрической пробы, тогда как наблюдаемое в группе с нормальной устойчивостью снижение скорости движения эритроцитов, по-видимому, обусловлено оттоком крови к активно работающим мышцам. Исследованиями показано, что такой механизм перераспределения кровотока способствует скорейшему восполнению трофических потребностей функционально активных тканей [12], напротив, при уменьшении кровенаполнения работающих мышц, вскоре развивается мышечное утомление [3].

Полученные данные о росте температуры кожи в исследуемой зоне у юношей из обеих групп свидетельствуют об интенсификации кровотока. Поскольку кровообращение отвечает также за эффективность терморегуляции, повышение значений температуры и кровенаполнения в неработающих частях тела связано с ростом теплоотдачи во время физической нагрузки для поддержания теплового гомеостаза [11]. В самом начале велоэргометрической пробы кровоснабжение в большей степени происходит в активных мышцах, затем по мере роста интенсивности нагрузки увеличивается кровоток в коже для эффективного теплообмена и поддержания температурного равновесия [15].

**Заключение.** Полученные данные свидетельствуют о том, что в ответ на велоэргометрическую нагрузку реактивные изменения в капиллярах ногтевого ложа проявляются в виде увеличения диаметра сосудов и повышения температуры поверхности кожи вследствие роста объема кровенаполнения и изменения скорости кровотока. При этом выявленные изменения показателей микроциркуляции указывают на то, что, в зависимости от уровня

толерантности к физической нагрузке, реактивность сосудистого русла может быть выражена в различной степени. Наиболее выраженные изменения микроциркуляции выявлены среди лиц с нормальным уровнем толерантности к физической нагрузке. Показано, что скорость капиллярного кровотока может рассматриваться как один из информативных маркеров, определяющих уровень работоспособности, а также характеризующих функциональное состояние организма в целом.

Выявленные изменения показателей микроциркуляции носят направленный адаптационный характер при воздействии физической нагрузки, тем самым обеспечивая оптимизацию перераспределения метаболической активности.

Отсутствие динамики скорости кровотока в ответ на велопробу у юношей с низкой толерантностью к физической нагрузке, судя по всему, указывает на ригидность регуляторных механизмов сосудистого русла в данной группе, что может являться одним из факторов снижения физической работоспособности.

#### Литература

1. Аулик, И.В. *Определение физической работоспособности в клинике и спорте* / И.В. Аулик. – М.: Медицина, 1990. – 192 с.
2. Боровиков, В. *Statistica. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов* / В. Боровиков. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
3. Залмаев, Б.Е. *Методологические аспекты изучения МЦР крови у спортсменов* / Б.Е. Залмаев, Т.М. Соболева // Труды ученых ГЦОЛИФКа: 75 лет. – М.: [б. и.], 1993. – С. 280–292.
4. Максимов, А.Л. *Информативность пробы с респирацией для оценки устойчивости организма юношей к сочетанному действию гипоксии и гиперкапнии* / А.Л. Максимов, И.В. Аверьянова // Рос. физиол. журнал им. И.М. Сеченова. – 2017. – Т. 103, № 9. – С. 1057–1068.
5. Максимов, А.Л. *Морфофункциональные особенности состояния капиллярного кровотока у аборигенов и европеоидов Магаданской области* / А.Л. Максимов, А.В. Харин // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2014. – № 4 (52). – С. 12–17.
6. Михайлов, П.В. *Реакция системы микроциркуляции на физическую нагрузку разной*

интенсивности / П.В. Михайлов, А.В. Муравьев, А.М. Тельнова и др. // *Ангиология и сосудистая хирургия*. – 2012. – Т. 18. – С. 25.

7. Козлов, В.И. Гистофизиология системы микроциркуляции / В.И. Козлов // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. – 2003. – Т. 2, № 3. – С. 79–85.

8. Aydaraliev, A.A. *Adaptation of human under extreme conditions. Prediction experience* / A.A. Aydaraliev, A.L. Maksimov. – L.: Nauka, 1988. – 126 s.

9. Hu, D. *Blood vessel adaptation with fluctuations in capillary flow distribution* / D. Hu, D. Cai, A.V. Rangan // *PLoS One*. – 2012. – Vol. 7, № 9. – e45444.

10. Johnson, J.M. *Physical training and the control of skin blood flow* / J.M. Johnson // *J. Med. Sci. Sports. Exerc.* – 1998. – Vol. 30, № 3. – P. 382–386.

11. Johnson, J.M. *Thermoregulatory and thermal control in the human cutaneous circu-*

*lation* / J.M. Johnson // *Front Biosci. (Schol. Ed.)*. – 2010. – Vol. 2. – P. 825–853.

12. Laughlin, M.H. *Peripheral circulation* / M.H. Laughlin, M.J. Davis, N.H. Secher et al. // *J. Compr. Physiol.* – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. 321–447.

13. Pries, A.R. *Physiological basis of the microcirculation: vascular adaptation* / A.R. Pries // *Klin. Monbl. Augenheilkd.* – 2015. – Vol. 232, № 2. – P. 127.

14. Rossi, M. *Spectral analysis of skin blood flow motion before and after exercise in healthy trained subjects* / M. Rossi, G. Santoro, S. Maurizio, A. Carpi // *Int. J. Sports Med.* – 2006. – Vol. 27, № 7. – P. 540–545.

15. Simmons, G.H. *Changes in the control of skin blood flow with exercise training: where do cutaneous vascular adaptations fit in?* / G.H. Simmons, B.J. Wong, L.A. Holowatz, W.L. Kenney // *J. Exp. Physiol.* – 2011. – Vol. 96, № 9. – P. 822–828.

**Харин Антон Владимирович**, младший научный сотрудник лаборатории «Физиологии экстремальных состояний человека», Научно-исследовательский институт «Арктика» ДВО РАН. 685000, г. Магадан, пр. Карла Маркса, 24. E-mail: anton-harin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8983-2553.

*Поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.*

DOI: 10.14529/hsm180402

## CHANGE OF MICROHEMOCIRCULATION UNDER CYCLE ERGOMETER TEST IN PERSONS WITH VARIOUS LEVELS OF TOLERANCE TO PHYSICAL LOAD

**A.V. Kharin**, anton-harin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8983-2553

Scientific Research Center “Arktika” Far-eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russian Federation

**Aim.** The article deals with establishing adaptation changes in the system of microhemocirculation in persons with various levels of tolerance to physical load. **Materials and methods.** 40 apparently healthy males aged 17–21 participated in the study. We studied microcirculation indicators using computer capillaroscopy in the area of the nail fold. **Results.** As a result of cycle ergometer test we revealed the increase in diameter of venous and transition capillary segments as well as the increase in the temperature of the area studied. We also revealed differences in the speed of capillary circulation between the groups with various levels of tolerance to physical load. **Conclusion.** The abovementioned changes in microcirculation indicators demonstrate various levels of vessel bed reactivity depending on the level of tolerance to physical load. We established that the speed of capillary circulation can be regarded as one of the informative markers, determining performance level and characterizing functional status of the body.

**Keywords:** microcirculation, physical load, capillaries, blood circulation, cycle ergometry, capillaroscopy.

## References

1. Aulik I.V. *Opredeleeniye fizicheskoy rabotosposobnosti v klinike i sporte* [Determination of Physical Performance in Clinics and Sports]. Moscow, Medicine Publ., 1990. 192 p.
2. Borovikov V. *Statistica. Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere. Dlya professionalov* [Statistica. The Art of Data Analysis on a Computer. For Professionals]. St. Petersburg, Peter Publ., 2003. 688 p.
3. Zalmayev B.E., Soboleva T.M. [Methodological Aspects of Studying the Microcirculation of Blood in Athletes]. *Trudy uchenykh GTSOLIFKa. 75 let* [Proceedings of Scientists SCOLIFE. 75 Years], 1993, pp. 280–292. (in Russ.)
4. Maksimov A.L., Aver'yanova I.V. [Informative Value of a Rebreathing Test in Assessing Young Males Resistance to the Combined Impact of Hypoxia and Hypercapnia]. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova* [Neuroscience and Behavioral Physiology – Sechenov Physiology Journal], 2017, no. 9, pp. 1057–1068. (in Russ.)
5. Maksimov A.L., Kharin A.V. [Morphofunctional Profiles of Capillary Blood Flow in Aborigines and Europeoids Residing in Magadan Region]. *Regionarnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya* [Regional Haemodynamics and Microcirculation], 2014, no. 4, pp. 12–17. (in Russ.)
6. Mikhaylov P.V., Murav'yev A.V., Tel'nova A.M. et al. [The Reaction of the Microcirculation System to the Physical Load of Different Intensity]. *Angiologiya i sosudistaya khirurgiya* [Angiology and Vascular Surgery], 2012, vol. 18, p. 25. (in Russ.)
7. Kozlov V.I. [Histophysiology of Microcirculation System]. *Regionarnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya* [Regional Haemodynamics and Microcirculation], 2003, vol. 2, no. 3, pp. 79–85. (in Russ.)
8. Aydaraliev A.A., Maksimov A.L. *Adaptation of Human under Extreme Conditions. Prediction Experience*. L.: Nauka; 1988. 126 p.
9. Hu D., Cai D., Rangan A.V. Blood Vessel Adaptation with Fluctuations in Capillary Flow Distribution. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 9, e45444. DOI: 10.1371/journal.pone.0045444
10. Johnson J.M. Physical Training and the Control of Skin Blood Flow. *J. Med. Sci. Sports. Exerc.*, 1998, vol. 30, no. 3, pp. 382–386. DOI: 10.1097/00005768-199803000-00007
11. Johnson J.M. Thermoregulatory and Thermal Control in the Human Cutaneous Circulation. *Front Biosci. (Schol. Ed.)*, 2010, vol. 2, pp. 825–853.
12. Laughlin M.H., Davis M.J., Secher N.H. et al. Peripheral Circulation. *J. Compr. Physiol.*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 321–447.
13. Pries A.R. Physiological Basis of the Microcirculation: Vascular Adaptation. *Klin. Monbl. Augenheilkd.*, 2015, vol. 232, no. 2, p. 127.
14. Rossi M., Santoro G., Maurizio S., Carpi A. Spectral Analysis of Skin Blood Flow motion before and after Exercise in Healthy Trained Subjects. *Int. J. Sports Med.*, 2006, vol. 27, no. 7, pp. 540–545. DOI: 10.1055/s-2005-865825
15. Simmons G.H., Wong B.J., Holowatz L.A., Kenney W.L. Changes in the Control of Skin Blood Flow with Exercise Training: where do Cutaneous Vascular Adaptations Fit in? *J. Exp. Physiol.*, 2011, vol. 96, no. 9, pp. 822–828. DOI: 10.1113/expphysiol.2010.056176

Received 17 September 2018

## ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Харин, А.В. Изменение микрогемодициркуляции при воздействии велоэргометрической пробы у лиц с различным уровнем толерантности к физической нагрузке / А.В. Харин // Человек. Спорт. Медицина. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 14–19. DOI: 10.14529/hsm180402

## FOR CITATION

Kharin A.V. Change of Microhemocirculation under Cycle Ergometer Test in Persons with Various Levels of Tolerance to Physical Load. *Human. Sport. Medicine*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 14–19. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm180402