Дата публикации: 01.12.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_12
УДК 612.15

Publication date: 01.12.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_12
UDC 612.15

ВАРИАТИВНОСТЬ МЕХАНИЗМОВ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ В НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЯХ

А.А. Коршунова[1], А.С. Башкина[1], В.В. Ключевский[2,3]
[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Ярославль, Россия
[2]Частное учреждение здравоохранения «Клиническая больница «РЖД-медицина» города Ярославль», г. Ярославль, Россия
[3]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Ярославль, Россия

Аннотация. ***Введение.*** Микроциркуляция тканей – сложный неоднородный процесс. В данной работе исследуется вопрос асимметрии кровообращения в нижних конечностях путем измерения интегрального показателя перфузии в микроциркуляторном русле. ***Методы.*** Были обследованы 62 добровольца среднего возраста (48,2±12,5 лет). Оценивали состояние микроциркуляции в коже на уровне нижней трети голени методом лазерной допплеровской флоуметрии. ***Результаты.*** Была выявлена разница кровотока правой и левой нижних конечностей: показатели перфузии составили в правой конечности 7,7 пф. ед., в левой конечности – 6,1 пф. ед. ($p<0,001$). Была выявлена асимметрия управляющих процессов микроциркуляции и, собственно, самих показателей микроциркуляции в правой и левой нижних конечностях. ***Заключение.*** Механизмы регуляции микрокровотока в контрлатеральных конечностях имеют неоднородную природу, связанную с анатомическими и нейрорегуляторными факторами.
Ключевые слова: микроциркуляция, активные факторы, пассивные факторы, капилляры, лазерная допплеровская флоуметрия.

VARIABILITY OF MICROCIRCULATION MECHANISMS IN THE LOWER EXTREMITIES

A.A. Korshunova[1], A.S. Bashkina[1], V.V. Klyuchevskij[2,3]
[1]Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, Yaroslavl, Russia
[2]Clinical Hospital “RZD-Medicine” Yaroslavl”, Yaroslavl, Russia
[3]Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russia

Abstract. ***Introduction.*** Tissue microcirculation is a complex, heterogeneous process. In this paper, the issue of blood circulation asymmetry in the lower extremities is investigated by measuring the integral perfusion index in the microcirculatory bed. ***Methods.*** 62 middle-aged volunteers (48.2±12.5 years old) were examined. The state of microcirculation in the skin at the level of the lower third of the shin was assessed using laser Doppler flowmetry. ***Results.*** The difference in blood flow of the right and left lower extremities was revealed, namely, perfusion indices relative to the average blood flow in the right limb were 7.7 peripheral units, in the left limb 6.1 peripheral units ($p<0.001$). The asymmetry of the microcirculation control processes and, in fact, the microcirculation parameters themselves in the right and left lower extremities was revealed. ***Conclusion.*** The mechanisms of regulation of microcirculation in the contralateral extremities are heterogeneous in nature, associated with anatomical and neuro-regulatory factors.
Keywords: microcirculation, active factors, passive factors, capillaries, laser Doppler flowmetry.

Введение. Сердечно-сосудистая система отвечает за кровообращение, в конечных отделах этой системы происходит основной обмен кислородом и молекулами, необходимыми для жизнедеятельности тканей. Эти важнейшие отделы имеют в своем составе артериолы, капилляры, венулы, артериоловенозные анастомозы, а также лимфатические сосуды, которые играют важную роль в отведении избыточной жидкости и продуктов обмена и воспаления.

Одним из самых важных физиологических параметров микроциркуляции является скорость движения крови по

сосудам различного калибра. Именно скорость движения крови по сосудам и ее объем определяют возможности обеспечения тканей кислородом в норме и при различных синдромах, связанных с недостатком кислорода в тканях. Возможности определения показателей перфузии крови и ее колебаний в зависимости от разных ритмов являются большим преимуществом современных исследований в области физиологии.

При движении крови по мелким сосудам происходит падение обеспечиваемого сердечной деятельностью гидравлического давления крови. Давление также способствует процессам диффузии и фильтрации, и, поскольку ткани имеют разную потребность и жизненную необходимость в обеспечении кислородом, микроциркуляция в разных тканях имеет свои физиологические особенности. Плотность капилляров мышечной ткани составляет от 300 до 1000 на мм^3 и зависит от анаэробного порога и степени кровоснабжения мышцы [1]. Точный подсчет количества капилляров кожи несколько осложнен ограниченностью методов и выбором участка кожи, но в среднем составляет от 300 до 1000 на мм^3 [2], при этом микрососудистое русло кожи может депонировать до 1,5 литров крови и активно участвовать в процессах терморегуляции и активации кровообращения при физических нагрузках.

В системе микроциркуляции основной регулирующей функцией обладает мышечный слой артериол, который при своем сокращении может направлять кровоток к ткани либо сбрасывать его по артериоловенозному шунту. Этот мышечный слой артериол регулируется влиянием вегетативной нервной системы и, в частности, сигнальными молекулами, которые образуются во время процессов обмена в областях, которые расположены в непосредственной близости от сосудов [3]. При этом прекапиллярные сфинктеры на артериолах кожи реагируют на нейроэндокринные воздействия в сторону сужения в ответ на воздействие норадреналина и в сторону расширения в ответ на воздействие адреналина и продуктов тканевого обмена [4].

Капиллярное русло охватывает практически все органы и ткани, каждый капилляр имеет три слоя, внутренний слой состоит из эндотелиальных клеток, имеющих ключевое значение для процессов тканевого дыхания. На внутренней стороне эндотелия расположен гелеобразный слой гликокаликса, участвующий в транспортной функции, адгезии тромбоцитов и лейкоцитов [5]. При прохождении через капилляр эритроциты несколько деформируются за счет своей эластичной мембраны, состоящей из фосфолипидов различного строения. При изменении размеров эритроцита или его эластических свойств происходит шунтирование крови по анастомозам и уменьшение кислородной насыщенности тканей [6]. Работа анастомозов зависит от многих факторов, в норме они работают частично, при повышении температуры окружающей среды кровенаполнение сосудов кожи увеличивается и, наоборот, снижается при уменьшении. Кроме сокращения мышечного слоя артериол на сброс крови могут влиять физиологические состояния, такие как изменение артериального давления во время стресса, а также ряд заболеваний [7, 8].

Кровоснабжение ткани зависит от уровня метаболизма ткани и ее функциональной значимости для организма, т.е. органы наибольшей значимости, такие как мозг и сердце, будут снабжаться кровью в первую очередь, в то время как кровоснабжение кожи широко варьируется в зависимости от факторов внешней и внутренней среды.

Если в тканях усиленно идут процессы катаболизма в результате, например, пережатия сосуда, то там накапливаются молочная кислота, углекислый газ и оксид азота, что способствует расширению сосудов и реактивной гиперемии после того, как проходимость крови по сосуду восстановлена. Появление этих веществ при развитии гипоксии и исчезновение их по приходу в физиологическую норму после гипоксии отнюдь не означает, что данные вещества ослабляют гипоксические воздействия [9].

Если в организме происходит усиленная мышечная работа, то расширение прекапиллярных сфинктеров (и, следовательно, усиление кровотока) происходит в ответ на положительные сигналы с рецепторов венул (на недостаток кислорода). Также происходит высвобождение аденозинтрифосфата из эритроцитов, что способствует локальной выработке простоциклина и оксида азота. Оксид азота является короткоживущей

молекулой, однако способен вырабатываться длительное время. Интересным моментом является способность эндотелия передавать электрическую поляризацию и, соответственно, метаболическую активность на соседние клетки [10].

Микроциркуляция в коже в наибольшей степени зависит от температуры окружающей среды. Например, при последовательном охлаждении, а затем нагревании пальцев рук поток крови может увеличиться в 100 раз за счет закрытия, а затем открытия анастомозов. Именно поэтому крайне важно, чтобы при измерении микроциркуляции была одна и та же температура воздуха в кабинете, положение человека и определенное время для адаптации.

Таким образом, микроциркуляция тканей – это неоднородный процесс, который контролируется активными и пассивными факторами. Активные факторы – это миогенный, эндотелиальный и нейрогенный механизмы, которые способствуют периодическому сжатию и расширению прекапиллярных сфинктеров и артериол, открытию/закрытию части капилляров. Пассивные факторы, формирующиеся вне системы микроциркуляции, – это «присасывающее действие дыхательного насоса» со стороны вен и пульсовая волна со стороны артерий [11].

При анализе причин возникновения асимметрии кровообращения возможным представляется следующее. Доминирование одного из полушарий приводит к асимметрии мягких тканей и скелета, заметной при письме и двигательной активности (в особенности у спортсменов). Так, были обнаружены различия в электромиографии мышц голени во время физической нагрузки у условно здоровых людей среднего возраста [12]. У биатлонистов высокой квалификации также была обнаружена моторная асимметрия нижних конечностей несмотря на то, что в отличие, например, от тенниса, биатлон – спорт достаточно гармоничный [13].

Существует много работ, посвященных асимметрии мышечной деятельности нижних конечностей, что косвенно говорит об асимметрии кровоснабжения нижних конечностей. Кровоснабжение кожи передней поверхности голени происходит посредством передней большеберцовой артерии, которая одновременно кровоснабжает мышцы голени. Дополнительно кожа передней части голени получает кровь из артерий, питающих кость [14]. Разница в артериальном давлении при измерении на бедренных артериях может говорить о разном тонусе и диаметре бедренных и, как следствие, большеберцовых артерий.

Ранее были исследованы различия в микроциркуляции парных органов у животных [15]. Также сходные данные были получены при изучении асимметрии микрокровотока кожи конечностей у профессиональных спортсменов до и после нагрузки [16].

На сегодняшний день наиболее распространенным методом оценки микроциркуляции является метод лазерной допплеровской флоуметрии, который работает путем измерения изменения отраженного лазерного излучения от движущихся форменных элементов крови. Колебания скорости микрокровотока могут происходить в разных частотах, что и отражает активные и пассивные факторы регуляции.

Цель исследования: изучить вопросы работы регуляторных механизмов микроциркуляции в нижних конечностях при помощи метода лазерной допплеровской флоуметрии.

Методы и организация исследования. Исследование проводилось на базе травматологического отделения ЧУЗ «КБ «РЖД-Медицина» г. Ярославль». В исследование после получения добровольного информационного согласия были включены 62 практически здоровых добровольца среднего возраста (48,2±12,5 лет), 31 женщина и 31 мужчина. Для оценки уровня перфузии и состояния микроциркуляторного русла на уровне кожного кровотока применялся метод лазерной допплеровской флоуметрии (ЛДФ), который предназначен для неинвазивной диагностики периферического кровотока с помощью портативного одноканального анализатора «ЛАЗМА ПФ» (НПП «ЛАЗМА», Россия).

Датчики анализатора прикреплялись симметрично к коже на уровне нижней трети голени в передних отделах и одновременно фиксировали сигнал с обеих конечностей. Во время измерения в комнате была постоянная температура 24±1 °С, субъекты перед измерением в течение 10-15 мин находились в покое, чтобы исключить

влияние теплового фактора и уменьшить стрессовое воздействие.

Рассчитывали среднее значение показателя перфузии (М), его среднеквадратичное отклонение (σ) и коэффициент вариации (Kv), показатели нутритивного (Мнутр) и шунтового (Мшунт) кровотока. Амплитудно-частотный спектр колебаний микрокровотока анализировали при помощи вейвлет-преобразования, рассчитывали амплитудные характеристики основных регуляторных ритмов микроциркуляции: эндотелиальных, нейрогенных, миогенных, дыхательных и сердечных [17]. Таким образом, рассчитывался вклад активных механизмов, создающих поперечные колебания кровотока в результате чередования сокращения и расслабления мышц сосудов (эндотелиальных, нейрогенных, миогенных), и пассивных факторов, организующих продольные колебания, выражающиеся в периодическом изменении объема крови в сосуде (дыхательных, сердечных).

Для оценки резервных возможностей микрокровотока применяли дыхательную пробу с задержкой дыхания в течение 30 с на высоте глубокого резкого вдоха, с помощью программного обеспечения рассчитывали индекс дыхательной пробы (ИДП), который отражает степень изменения перфузии (в %) в условиях гипоксии.

Расчеты показателей микроциркуляторного русла и их разницы проводили в условных и перфузионных единицах с оценкой средних величин (М), стандартных ошибок (m), стандартного отклонения (σ) и достоверности, выявленных на основе методов описательной статистики. Нормальность распределения оценивали по критерию Колмогорова-Смирнова. Статистическую обработку полученных данных после проверки на нормальность распределения проводили с использованием параметрического t-критерия Стьюдента. За уровень статистически значимых различий принимали разницу при $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение. При анализе результатов ЛДФ была выявлена явная закономерность в разнице кровотока правой и левой нижних конечностей. В правой конечности показатель перфузии составил 7,7 пф. ед., в левой конечности – 6,1 пф. ед., разница составила 21%, и она достоверна ($p<0,001$). Также мы видим разницу в значении σ (0,6 пф. ед. к 0,84 пф. ед.) между контрлатеральными конечностями, что говорит о разнице в среднем колебании перфузии относительно тока крови. Также можно отметить достоверную разницу в коэффициенте вариации, который, очевидно, связан с первыми двумя показателями, и все три показателя дают общее представление о картине кровотока в конечностях (табл.).

Свои результаты мы можем связать с тем, что существует физиологическая асимметрия при закладке кровеносных сосудов справа и слева. Кроме того, вероятно, в правой конечности мышечные усилия выполняются более интенсивно. Также на развитие вариативности влияет разный диаметр приводящих артерий. Поскольку выполнялись условия наблюдения, и измерения проводились в одинаковых условиях для правой и левой нижних конечностей, мы можем утверждать, что наблюдается асимметрия базовых показателей микрокровотока между нижними конечностями.

Далее детально рассмотрим вклад активных и пассивных факторов в структуру механизмов микроциркуляции. Известно, что к активным механизмам микроциркуляции относят эндотелиальную активность, нейрогенный и миогенный компоненты. К пассивным механизмам регуляции микроциркуляторного русла относят пульсовый и дыхательный ритм с более медленными волнами ритмических сокращений.

Амплитуды нейрогенных осцилляций микрокровотока в левой конечности были на 38% ($p<0,01$) выше, чем в правой, что указывает на снижение нейрогенного тонуса микрососудов справа, при этом разница амплитуд эндотелиального и миогенного ритмов была статистически незначимой. Данные результаты говорят о том, что ослабление вегетативного влияния со стороны нервной системы приводит к снижению тонуса сосудов, дальнейшему увеличению колебаний перфузии и увеличению притока крови [18].

У обследуемых более высокими были амплитуды кардиогенных ритмов слева на 28% ($p<0,001$), что говорит об увеличении вклада артериолярного притока крови в микроциркуляторное русло слева через более

высокие пульсовые волны, т.е. отмечается больший вклад пассивных факторов кровообращения в физиологические параметры микроциркуляторного русла.

Таблица

Показатели микроциркуляции и ее резервных возможностей у условно здоровых лиц, M+σ

Обозначения		Левая конечность	Правая конечность
Показатель микроциркуляции, пф. ед.	М	6,08±1,96	7,72±159***
	М нутр	2,56±1,70	3,33±1,98*
	М шунт	3,52±1,56	4,40±1,69***
	σ	0,84±0,39	0,60±0,31***
	Kv	14,26±6,84	8,11±4,57***
Максимальная амплитуда (Amax), отн. ед.	Аэ	0,17±0,14	0,13±0,14
	Ан	0,34±0,22	0,25±0,21**
	Ам	0,29±0,23	0.23±0,21
	Ад	0,17±0,08	0,15±0,04
	Ас	0,33±0,14	0,26±0,09***
ИДП %		26,6±10,92	18,81±7,80***

Примечание: М – средние колебания перфузии относительно среднего тока крови; Мнутр – средние колебания перфузии относительно нутритивного кровотока; Мшунт – средние колебания перфузии относительно шунтового кровотока; σ – среднее колебание перфузии относительно значения потока крови М; Kv – коэффициент вариации; Аэ – максимальная амплитуда эндотелиальных ритмов микроциркуляции; Ан – максимальная амплитуда нейрогенных ритмов; Ам – максимальная амплитуда миогенных колебаний; Ад – максимальная амплитуда респираторных ритмов; Ас – максимальная амплитуда кардиальных ритмов; ИДП% – индекс дыхательной пробы; * – различия по отношению к контролю – контрлатеральная конечность: значимы при $p<0,05$, ** – $p<0,01$, *** – $p<0,001$.

При более подробном изучении подобной разницы в показателях микроциркуляции было выявлено, что показатели нутритивного кровотока были выше (3,33 отн. ед.) в правой конечности против 2,26 отн. ед. в левой конечности, что составило 32% ($p<0,05$). В то же время показатели шунтирования были достоверно выше (4,4 отн. ед.) в правой против 3,52 отн. ед. в левой, что составило 20% ($p<0,001$). Таким образом, несмотря на то, что в правой конечности мы видим больший сброс по артериоловенозным анастомозам, тем не менее, справа нутритивный и общий кровоток выше, чем в левой конечности, что может говорить о большем притоке крови в правую конечность. Часть кровотока направляется по шунтам, в то же время обеспечивается даже больший обмен кислородом и питательными веществами в микроциркуляторном русле кожи правой конечности.

Соответственно, более низкая амплитуда сердечных ритмов говорит о парадоксальном вкладе амплитуды пульсовой волны в кровоток, возможное объяснение состоит в том, что кровоток усиливается выше уровня микроциркуляции, и волна больше по протяженности, чем по амплитуде. Амплитуда нейрогенных ритмов также выше в левой конечности, что говорит о рассогласовании местной вегетативной нервной системы в двух конечностях. Также мы можем предположить, что в правую конечность, а конкретно – в кожу нижней трети голени, поступает более мощная волна крови, которая частично сбрасывается по анастомозам и имеет менее выраженные колебания кровотока.

Дыхательная проба считается одной из самых важных в отношении верификации полученной разницы в системе кровотока [19]. В нашей работе индекс дыхательной пробы был значительно выше в левой конечности на 36% ($p<0,001$), что кроме ответа на дефицит кислорода означает рассогласованность в передаче импульсов от нейронов симпатической нервной системы, примыкающей к сосудам. Подобная рассогласованность является следствием разной активности периферического звена вегетативной

нервной системы в связи с анатомическими особенностями, либо следствием вариации прохождения нервных импульсов в ответ на гипоксию.

Заключение. Таким образом, в условиях нормы отмечена асимметрия кровоснабжения нижних конечностей на уровне микроциркуляции с более высокими показателями перфузии, нутритивного и шунтового кровотока для правой конечности. Перераспределение и поддержание оптимального уровня микроциркуляции в левой конечности обеспечивалось за счет снижения микрососудистого тонуса и увеличения притока крови в артериолярное звено. Возможным объяснением наблюдаемых явлений можно считать неодинаковые просветы магистральных сосудов правой и левой нижних конечностей, а также более активное развитие левого полушария, и, соответственно, большие объем и сила мышц, а также большее нейрональное обеспечение правой нижней конечности, которые приводят к усилению кожного кровотока.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skeletal muscle capillary density is related to anaerobic threshold and claudication in peripheral artery disease / B.D. Duscha, W.E. Kraus, W.S. Jones [et al.] // Vasc Med. – 2020. – No. 25(5). – P. 411-418. DOI: 10.1177/1358863X20945794.
2. Observation and density estimation of a large number of skin capillaries using wide-field portable video capillaroscopy and semantic segmentation / B. Takimoto, K. Bito, S. Hari [et al.] // J Biomed Opt. – 2023. – No. 28(10). – P. 106003.
3. Цапаева, Н.Л. Микроциркуляция (часть 1 – главные действующие «лица» и их роль в системе кровообращения) / Н.Л. Цапаева, В.Г. Цапаев // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. – 2023. – Т. 7. – № 2. – С. 1903-1910. DOI: 10.51922/2616-633X.2023.7.2.1903
4. Jacob, M. Regulation of blood f low and volume exchange across the microcirculation / M. Jacob, D. Chappell, F. Becker Bernhard // Critical Care. – 2016. – Vol. 20. – No. 1. – P. 1-13.
5. Guven, G. Microcirculation: Physiology, Pathophysiology, and Clinical Application. / G. Guven, M.P. Hilty, C. Ince // Blood Purif. – 2020. – No. 49(1-2). – P. 143-150. DOI: 10.1186/s13054-016-1485-0.
6. Тихомирова, И.А. Реология крови и микроциркуляция / И.А. Тихомирова // Успехи физиологических наук. – 2023. – Т. 54. – № 1. – С. 3-25. DOI: 10.31857/S0301179823010071.
7. Золотницкая, В.П. Диагностика артериовенозного шунтирования крови в легких методом перфузионной сцинтиграфии в клинике и эксперименте / В.П. Золотницкая // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2011. – № 10(4). – С. 49-53. DOI: 10.24884/1682-6655-2011-10-4-49-53.
8. Фаттахов, В.В. Неинвазивные методы выявления микроваскулярной патологии / В.В. Фаттахов, Н.В. Максумова // ПМ. – 2018. – № 1. – С. 43-48.
9. Иванов, К.П. Современные медицинские проблемы микроциркуляции и гипоксического синдрома / К.П. Иванов // Вестник РАМН. – 2014. – № 1-2. – С. 57-63.
10. Цапаева, Н.Л. Микроциркуляция (часть 2): «Функциональные обязанности» системы микроциркуляции / Н.Л. Цапаева, В.Г. Цапаев // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. – 2024. – Т. 8. – № 1. – С. 2063-2072. DOI: 10.51922/2616-633X.2024.8.1.2063.
11. Крупаткин, А.И. Лазерная допплеровская флоуметрия микроциркуляции крови / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М., 2005. – 123 с.
12. Muscular lower leg asymmetry in middle-aged people / V. Valderrabano, B.M. Nigg, B. Hintermann [et al.] // Foot Ankle Int. – 2007. – No. 28(2). – P. 242-249. DOI: 10.3113/FAI.2007.0242.
13. Влияние межконечностной функциональной асимметрии мышц ног на моторную производительность циклических и ациклических локомоций у биатлонистов высокой квалификации / А.С. Крючков, В.Л. Ростовцев, П.Е. Мякинченко [и др.] // Ученые записки университета Лесгафта. – 2023. – № 7(221). – P. 203-210. DOI: 10.34835/issn.2308-1961.2023.07.p203-211.
14. Пеньковский, В.И. Модель циркуляции крови в нижних конечностях человека / В.И. Пеньковский, Н.К. Корсакова // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – № 3. – С. 88-93. DOI: 10.15372/PMTF20180309.
15. Михайличенко, Л.А. Показатели микроциркуляции парных органов и тканей экспериментальных животных в норме / Л.А. Михайличенко // Регионар. кровообращение и микроциркуляция. – 2007. – Т. 6. – № 1(21). – С. 164-167.
16. Литвин, Ф.Б. Сравнительный анализ микроциркуляторных реакций на физическую

нагрузку у баскетболистов / Ф.Б. Литвин, К.А. Кротова, В.Я. Жигало // Современные вопросы биомедицины. – 2024. – Т. 8. – № 1. DOI: 10.24412/2588-0500-2024_08_01_9.
17. Чуян, Е.Н. Индивидуально-типологический подход к исследованию процессов микроциркуляции крови / Е.Н. Чуян, М.Н. Ананченко // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2009. – № 3(61). – С. 159-173.
18. Овчинникова, О.А. Диагностика состояния микроциркуляции методом ЛДФ / О.А. Овчинникова, И.А. Тихомирова // Ярославский педагогический вестник. – 2012. – № 2. – С. 98-102.
19. Крупаткин, А.И. Функциональная оценка пери- васкулярной иннервации кожи конечностей с помощью лазерной допплеровской флоуметрии / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2004. – Т. 30. – № 1. – С. 99.

REFERENCES

1. Duscha B.D., Kraus W.E., Jones W.S., Robbins J.L., Piner L.W., Huffman K.M., Allen J.D., Annex B.H. Skeletal muscle capillary density is related to anaerobic threshold and claudication in peripheral artery disease. *Vasc Med*, 2020, no. 25(5), pp. 411-418. DOI: 10.1177/1358863X20945794.
2. Takimoto B., Bito K., Hari S., Taguchi H., Haneishi H. Observation and density estimation of a large number of skin capillaries using wide-field portable video capillaroscopy and semantic segmentation. *J Biomed Opt*, 2023, no. 28(10), p. 106003.
3. Tsapaeva N.L., Tsapaev V.G. Microcirculation (part 1 – main players and their role in the circulatory system). *Emergency cardiology and cardiovascular risks*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 1903-1910. DOI: 10.51922/2616-633X. 2023.7.2.1903. (in Russ.)
4. Jacob M., Chappell D., Becker Bernhard F. Regulation of blood f low and volume exchange across the microcirculation. *Critical Care*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 1-13.
5. Guven G., Hilty M.P., Ince C. Microcirculation: Physiology, Pathophysiology, and Clinical Application. *Blood Purif*, 2020, no. 49(1-2), pp. 143-150. DOI: 10.1186/s13054-016-1485-0.
6. Tikhomirova I.A. Blood Rheology and Microcirculation. *Uspehi fiziologičeskih nauk*, 2023, vol. 54, no. 1, pp. 3-25. DOI: 10.31857/S0301 179823010071. (in Russ.)
7. Zolotnitskaya V.P. Diagnosis of arteriovenous blood shunting in the lungs by means of perfusion scintigraphy in clinical practice and experiment. *Regional blood circulation and microcirculation*, 2011, no. 10(4), pp. 49-53. DOI: 10.24884/1682-6655-2011-10-4-49-53. (in Russ.)
8. Fattakhov V.V., Maksumova N.V. Modern methods of detection of microvascular pathology. *Practical medicine*, 2018, no. 1, pp. 43-48. (in Russ.)
9. Ivanov K.P. Modern medical problems of microcirculation and hypoxic syndrome. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2014, no. 1-2, pp. 57-63. (in Russ.)
10. Tsapaeva N.L., Tsapaev V.G. Microcirculation (part 2): "Functional responsibilities" of microcarculation system. *Emergency cardiology and cardiovascular risks*, 2024, vol. 8, no. 1, pp. 2063-2072. DOI:10.51922/2616-633X.2024.8.1.2063.(inRuss.)
11. Krupatkin A.I., Sidorov V.V. Laser Doppler flowmetry of blood microcirculation. Moscow, 2005. 123 p. (in Russ.)
12. Valderrabano V., Nigg B.M., Hintermann B., Goepfert B., Dick W., Frank C.B., Herzog W., von Tscharner V. Muscular lower leg asymmetry in middle-aged people. *Foot Ankle Int*, 2007, no. 28(2), pp. 242-249. DOI: 10.3113/FAI.2007.0242.
13. Kryuchkov A.S., Rostovtsev V.L., Myakinchenko P.E., Myakinchenko E.B., Fendel T.V. The influence of interfacial functional asymmetry of leg muscles on the motor performance of cyclic and acyclic locomotion in highly qualified biathletes. *Scientific Notes of the P.F. Lesgaft University*, 2023, no. 7(221), pp. 203-210. DOI: 10.34835/ issn.2308-1961.2023.07.p203-211 (in Russ.)
14. Pen'kovskij V.I., Korsakova N.K. Model of blood circulation in human lower extremities. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2018, no. 3, pp. 88-93. DOI: 10.15372/ PMTF20180309. (in Russ.)
15. Mikhajlichenko L.A. Microcirculation parameters of paired organs and tissues of experimental animals within normal. *Regional blood circulation and microcirculation*, 2007, no. 1(21). pp. 164-167. (in Russ.)
16. Litvin F.B., Krotova K.A., Zhigalo V.Ya., Kalosha A.I. Comparative analysis of microcirculatory response to physical activity of basketball players. *Modern Issues of Biomedicine*, 2024, vol. 8, no. 1. DOI: 10.24412/2588-0500-2024_08_01_9. (in Russ.)
17. Chuyan E.N., Ananchenko M.N. Individually-tipological approach to research of processes of microblood circulation. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 2009, no. 3(61), pp. 159-173. (in Russ.)
18. Ovchinnikova O.A., Tikhomirova I.A. Diagnostics of Microcirculation State by Means of Laser Doppler Flowmetry Method. *Yaroslavl Pedagogical Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 98-102. (in Russ.)
19. Krupatkin A.I. Functional assessment of vascular innervation of limb skin using laser Doppler flowmetry. *Human Physiology*, 2004, vol. 30, no. 1, p. 99. (in Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:
Александра Александровна Коршунова – аспирант кафедры медицины ЯГПУ им. К.Д. Ушинского, инструктор ЛФК отделения медицинской реабилитации центра травматологии и ортопедии ЧУЗ «КБ «РЖД-Медицина» г. Ярославль», Ярославль, e-mail: alexandra.corshunowa@yandex.ru.
Александра Сергеевна Башкина – доктор медицинских наук, доцент кафедры медицины ЯГПУ им. К.Д. Ушинского, Ярославль, e-mail: a.s.bashkina@mail.ru.
Василий Вячеславович Ключевский – кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии и ортопедии ЯГМУ; руководитель центра травматологии и ортопедии ЧУЗ «КБ «РЖД-Медицина» г. Ярославль», Ярославль, e-mail: kluchevsky@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Aleksandra A. Korshunova – Postgraduate Student of the Department of Medicine, Yaroslavl State Pedagogical University; Physical Therapy Coach of the Department of Medical Rehabilitation, Center for Traumatology and Orthopedics, Clinical Hospital "RZD-Medicine" Yaroslavl", Yaroslavl, e-mail: alexandra.corshunowa@yandex.ru.
Aleksandra S. Bashkina – Doctor of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Medicine, Yaroslavl State Pedagogical University, Yaroslavl, e-mail: a.s.bashkina@mail.ru.
Vasilij V. Klyuchevskij – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics, Yaroslavl State Medical University; Head of the Center for Traumatology and Orthopedics, Clinical Hospital "RZD-Medicine" Yaroslavl", Yaroslavl, e-mail: kluchevsky@inbox.ru.

Для цитирования: Коршунова, А.А. Вариативность механизмов микроциркуляции в нижних конечностях / А.А. Коршунова, А.С. Башкина, В.В. Ключевский // Современные вопросы биомедицины. – 2025. – Т. 9. – № 4(34). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_12

For citation: Korshunova A.A., Bashkina A.S., Klyuchevskij V.V. Variability of microcirculation mechanisms in the lower extremities. *Modern Issues of Biomedicine*, 2025, vol. 9, no. 4(34). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_04_12