



БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 53–66
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 53–66
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-53-66>, EDN: KUJMJE

Научная статья
УДК 616-072.7:612.13

Проявление вено-артериолярного рефлекса, вызванного изменением положения руки, при измерениях микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии

Ан. В. Скрипаль^{1✉}, Д. Г. Верхов¹, Фракад Аль-Бадри¹, К. В. Машков¹, А. Д. Усанов¹, А. А. Сагайдачный¹, В. А. Клочков²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, AuthorID: 33340

Верхов Дмитрий Геннадиевич, ассистент кафедры медицинской физики, werchowdg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9943-8376>, AuthorID: 682390

Аль-Бадри Фракад, аспирант кафедры медицинской физики, farqad@uowasit.edu.iq, <https://orcid.org/0009-0009-9411-1740>, AuthorID: 1222944

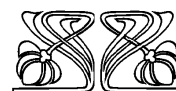
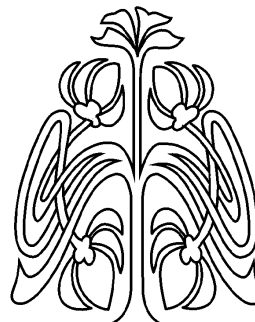
Машков Константин Владимирович, аспирант кафедры медицинской физики, konstantinpluss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5835-9428>, AuthorID: 1214916

Усанов Андрей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, aka_norton@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4004-875X>, AuthorID: 110433

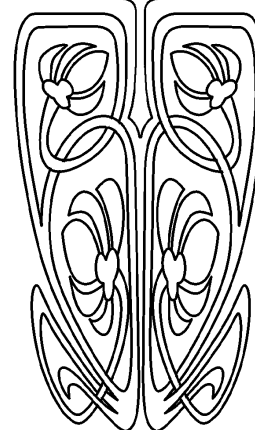
Сагайдачный Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>, AuthorID: 612410

Клочков Виктор Александрович доктор медицинских наук, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней, v-klochkov1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7076-4610>, AuthorID: 559773

Аннотация. В системе регуляции кровообращения важным элементом является вено-артериолярный рефлекс. Особенно выражено он проявляется в нижних конечностях (по сравнению с верхними конечностями) из-за большего трансмурального давления в артериях и венах ног. При проведении проб с изменением положения руки обычно проверяют сосудистую реакцию на повышение артериального давления при опускании ноги или руки ниже уровня сердца. В предложенной нами пробе исследовалась сосудистая реакция как на понижение артериального давления, так и на ее повышение до исходного уровня. С помощью метода лазерной доплеровской флоуметрии измерялся показатель микроциркуляции при проведении последовательности проб с изменением положения руки по набору параметров, характеризующих динамику циркуляции крови в микрососудах пальца руки молодых и возрастных добровольцев. При поднимании руки показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» у молодых добровольцев значительно уменьшался, в то время как в возрастной группе показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» после резкого снижения имел тенденцию к увеличению. Такое значительное расхождение в реакции кровотока молодых и возрастных добровольцев нами соотнесено с проявлением вено-артериолярного рефлекса. Амплитуды нейрогенных и миогенных колебаний микрососудистого кровотока имели в основном разнонаправленный характер у разных возрастных групп.



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Экспериментально измеренное увеличение кровенаполнения сосудов руки у возрастных добровольцев за счет появления колебаний кровотока в нейрогенном диапазоне объясняется реакцией симпатического отдела нервной системы, приводящей к проявлению веноуло-артериолярного рефлекса, который способствует восстановлению величины объемного кровенаполнения. В молодом возрасте веноуло-артериолярный рефлекс, вызванный изменением положения руки, может не проявляться. Тест с изменением положения конечности может дать ценную информацию о сохранности периферической иннервации микрососудов, что обосновывает перспективность использования данного теста при выявлении различных форм невропатий и возрастных особенностей регуляции кровотока.

Ключевые слова: веноуло-артериолярный рефлекс, микроциркуляция, функциональная проба, лазерная доплеровская флоуметрия, кровоснабжение конечности, вазоконстрикция, вазодилатация, миогенная реакция Бейлисса, гладкомышечные клетки, тонус сосудов

Для цитирования: Скрипаль Ан. В., Верхов Д. Г., Аль-Бадри Фарад, Машков К. В., Усанов А. Д., Сагайдачный А. А., Клочков В. А. Проявление веноуло-артериолярного рефлекса, вызванного изменением положения руки, при измерениях микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 53–66. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-53-66>, EDN: KUJMJE

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

The appearance of the venuloarteriolar reflex during measurements microcirculation of blood by laser Doppler flowmetry caused by a change in the position of the hand

An. V. Skripal¹✉, D. G. Verkhov¹, Farqad Al-Badri¹, K. V. Mashkov¹, A. D. Usanov¹, A. A. Sagaidachnyi¹, V. A. Klochkov²

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 112 Bolshaya Kazachya St., Saratov 410012, Russia

Anatoly V. Skripal, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, AuthorID: 33340

Dmitry G. Verkhov, werchowdg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9943-8376>, AuthorID: 682390

Al-Badri Farqad, farqad@uowasit.edu.iq, <https://orcid.org/0009-0009-9411-1740>, AuthorID: 1222944

Konstantin V. Mashkov, konstantinpluss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5835-9428>, AuthorID: 1214916

Andrey D. Usanov, aka_norton@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4004-875X>, AuthorID: 110433

Andrey A. Sagaidachnyi, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>, AuthorID: 612410

Victor A. Klochkov, klochkov1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7076-4610>, AuthorID: 559773

Abstract. Background and Objectives: The venuloarteriolar reflex is a crucial part of the circulation regulation system, and it's particularly evident in the lower limbs compared to the upper limbs due to the higher transmural pressure in the arteries and veins of the legs. When testing with changes in arm position, vascular responses to increased blood pressure are usually checked by lowering the arm below heart level. The proposed sample examines the vascular response to both a decrease in blood pressure and an increase to its initial level. **Materials and Methods:** The study was conducted on two groups of volunteers, one of which included 7 healthy young people aged 21–28 years, who did not have a pronounced venuloarteriolar reflex during the exercise test, and the second 7 people aged 45–65 years, in whom the venuloarteriolar reflex was well expressed. Using the method of laser Doppler flowmetry we measured the microcirculation index during the sequence of tests with the change of the hand position according to the set of parameters characterising the dynamics of blood circulation in the microvessels of the finger. **Results:** When raising the arm, the microcirculation index in the “up” arm position in young volunteers has decreased significantly, while in the age group, the microcirculation index in the “up” arm position has tended to increase after a sharp decrease. We have defined such a significant discrepancy in the blood flow response of young and aged volunteers as an appearance of the venulo-arteriolar reflex. The amplitudes of neurogenic and myogenic fluctuations of microvascular blood flow were mainly multidirectional in different age groups. The experimentally measured increase in blood filling of the arm vessels in age-related volunteers, caused by the appearance of fluctuations in blood flow in the neurogenic range, is explained by the reaction of the sympathetic nervous system, leading to the appearance of the venulo-arteriolar reflex, which helps to restore the volume of blood filling. At a young age, the venulo-arteriolar reflex caused by a change in the position of the arm may not appear. **Conclusion:** The test with the change of limb position can provide valuable information on the preservation of peripheral innervation of microvessels, which justifies the prospect of using this test in the detection of various forms of neuropathies and age-related peculiarities of blood flow regulation.

Keywords: venuloarteriolar reflex, microcirculation, functional test, laser Doppler flowmetry, limb blood supply, vasoconstriction, vasodilation, Bayliss myogenic response, smooth muscle cells, regulation of arterial vessel tone

For citation: Skripal An. V., Verkhov D. G., Al-Badri Farqad, Mashkov K. V., Usanov A. D., Sagaidachnyi A. A., Klochkov V. A. The appearance of the venuloarteriolar reflex during measurements microcirculation of blood by laser Doppler flowmetry caused by a change in the position of the hand. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 53–66 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-53-66>, EDN: KUJMJE

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)



Введение

Веноуло-артериолярный рефлекс (ВАР) является одним из механизмов регуляции кровотока на уровне микрососудов и может включать вклад как местных, так и центральных влияний в рамках сложной системы передачи физиологических сигналов [1, 2].

Известно, что веноуло-артериолярный рефлекс реализуется через взаимодействие сопряженных артериол и венул, и выполняет функцию предотвращения отека тканей [3]. Одним из механизмов реализации ВАР является констрикция артериол в ответ на увеличение напряжения сдвига и/или давления сопряженных венул, эндотелий которых вырабатывает оксид азота NO [4]. По другим данным, ВАР относят к местному симпатическому аксонному рефлексу [5]. Проведенные исследования ВАР демонстрируют, что любые изменения в веноулярном отделе микроциркуляторного русла, в том числе внутривенное введение вазоактивных веществ (норадреналина, ацетилхолина, аденозина, аденозинтрифосфата), отражаются на функциональном состоянии сопряженных питающих артериол. В ряде работ отмечается влияние симпатического отдела нервной системы на проявление ВАР [1, 6, 7].

Веноуло-артериолярный рефлекс особенно выражено проявляется в нижних конечностях, по сравнению с верхними конечностями из-за большего значения трансмурального давления в артериях и венах ног [5]. Так, выявлено, что опускание ноги на 50 см ниже уровня сердца в положении лежа [1] или изменение положения тела с помощью наклонного стола [8] увеличивает венозное давление в ноге, что способствует включению в работу механизма ВАР и влечет за собой снижение перфузии в заданной конечности [9].

В работе [10] установлено, что при поднятии руки выше уровня сердца в 50% опытов регистрируется вазодилатация, при опускании руки ниже уровня сердца – в 35% случаев наблюдается вазоконстрикция. Показано, что в группе возрастных испытуемых опускание руки приводило к меньшему росту сосудистого сопротивления по сравнению с группой молодых [11]. Сделан вывод о том, что сосудистая реакция при опускании нижней конечности ниже уровня сердца обеспечивается взаимодействием миогенной и эндотелиальной регуляции, при этом не исключается наличие центральных нейрогенных влияний [1]. Активизация центральных механизмов

регуляции кровотока в кардиальном и дыхательном диапазонах частот была показана в [12] при проведении ортостатической пробы.

При обеспечении свободного венозного оттока и опорожнения вен руки наблюдается кратковременная дилатация как при поднимании руки выше уровня сердца, так и при ее опускании ниже уровня сердца [13]. В то же время в работе [10] констатируется и сужение сосудов, и их расширение при изменении положения руки относительно уровня сердца.

В работах [14, 15] делается вывод о том, что при развитии артериальной гипертонии доминирующим нарушением в системе микроциркуляции является затруднение оттока крови от капиллярного русла, т. е. застойные явления в венозном русле. Нормальное функционирование ВАР способствует снижению колебаний артериального давления, что может компенсировать дефицит ауторегуляторных возможностей [16].

Нарушение веноуло-артериолярного рефлекса наблюдается при сахарном диабете 1-го и 2-го типов [17, 18]. У пациентов с автономной диабетической периферической нейропатией выявляется нарушение ВАР с увеличением фильтрации жидкости через капилляры, развитием ортостатической гипотензии и отеков, приводящих к появлению язв и развитию синдрома диабетической стопы [17, 20]. Нарушение веноуло-артериолярного рефлекса прогрессирует вместе с увеличением степени диабетической периферической нейропатии, что связывают с изменением свойств симпатических нервных волокон и снижением реактивности микрососудов кожи [19]. Как у пациентов с сахарным диабетом, так и у пациентов с артериальной гипертонией, опускание ног в процессе проведения постуральной пробы приводит к снижению вейвлет-когерентности вариабельности ритма сердца и колебаний кожного кровотока конечностей в низкочастотном диапазоне [21].

Проявление ВАР наиболее полно исследовано при изменении положения нижней конечности ниже уровня сердца [22] и в меньшей степени исследовано при изменении положения верхней конечности и положения выше уровня сердца, что обосновывает актуальность данного направления работ.

Целью работы явилось выявление особенностей веноуло-артериолярного рефлекса методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) при проведении последовательности проб с изменением положения руки по набору параметров,



характеризующих динамику циркуляции крови в микрососудах пальца руки.

Материалы и методы

Исследование проведено на двух разновозрастных группах добровольцев. Первая включала 7 мужчин в возрасте 21–28 лет, у которых не было проявления выраженного веноу-артериолярного рефлекса в процессе проведения нагрузочной пробы, а вторая группа – 7 человек в возрасте 45–65 лет, у которых веноу-артериолярный рефлекс хорошо проявлялся. Участники эксперимента считались условно здоровыми и не имели сердечно-сосудистых заболеваний. Критериями исключения являлись: курение, высокое давление, сахарный диабет, любые проявления ОРВИ и прием спазмолитических препаратов.

Настоящее исследование одобрено Комитетом по этике Саратовского государственного медицинского университета им. В. И. Разумовского (протокол № 9 от 4.04.2023 г.) и осуществлялось в клинических условиях под наблюдением медицинского персонала. Все испытуемые перед участием подписывали информированное согласие на проведение исследования.

Эксперимент проводился в помещении с температурой воздуха $23 \pm 1^\circ\text{C}$ в положении сидя. На подушечку среднего пальца правой руки размещалось устройство «ЛАЗМА ПФ» (Россия) в котором применялся одночастотный лазер с длиной волны 850 нм, выходной мощностью непрерывного излучения не более 1 мВт и глубиной проникновения в кожу около 1 мм [23–25].

У каждого добровольца измерялись параметры микроциркуляции при двух положениях руки: «на уровне сердца» и при вертикально поднятой конечности (положение «вверх») [26]. Запись ЛДФ-граммы проводилась непрерывно в течение 18 мин: в течение первых 3 мин рука с датчиком находилась «на уровне сердца», затем рука переводилась и удерживалась в положении «вверх» в течение следующих 3 мин, далее рука возвращалась в исходное положение и цикл измерений повторялся ещё два раза. Таким образом, в ходе пробы непрерывный сигнал микроциркуляции регистрировался трехкратно в положении руки «на уровне сердца» и трехкратно в положении руки «вверх».

Затем ЛДФ-грамма разбивалась на шесть частей, каждая из которых анализировалась с помощью прилагаемого к устройству «ЛАЗМА-ПФ» программного обеспечения, включающего

спектральный вейвлет-анализ выбранных участков ЛДФ-граммы. Выбранный интервал времени обеспечивал возможность оценки параметров колебаний кровотока в миогенном и нейрогенном диапазонах, вычисляемых по вейвлет-спектру ЛДФ-граммы, при этом исключался переходной участок длительностью около 10 с.

Величины амплитуд нейрогенных колебаний, миогенных колебаний Ам, дыхательных колебаний Ад и сердечных колебаний Ас определялись по значению максимальной величины вейвлет-спектра соответствующего участка ЛДФ-граммы в частотных диапазонах нейрогенной (0.02–0.06 Гц), миогенной (0.06–0.2 Гц), дыхательной (0.2–0.6 Гц) и сердечной (0.6–1.6 Гц) регуляций. Амплитуда эндотелиальных колебаний не рассчитывалась, поскольку временной интервал ЛДФ-граммы для нее был очень мал.

Статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием стандартных статистических методов пакета программ STATISTICA 10 (StatSoft, Inc.). Сравнение количественных переменных в двух зависимых выборках проводилось с помощью Т-критерия Вилкоксона. Этот выбор обусловлен размером выборки, которая не имеет нормальное распределение. За уровень статистически значимых принимали изменения при $p < 0.05$.

Результаты исследования

На рис. 1 приведены ЛДФ-граммы двух добровольцев при двух положениях руки: 1, 3, 5 – рука с датчиком «на уровне сердца»; 2, 4, 6 – рука с датчиком в положении «вверх». График показателя микроциркуляции показан красной линией, сигнал датчика движения показан черной линией (внизу), изменение температуры в области контроля микроциркуляции показано синей линией (вверху).

У обоих добровольцев в исходном положении руки фиксировался высокий уровень показателя микроциркуляции крови. При изменении ориентации руки из положения «на уровне сердца» в положение «вверх» в первые секунды происходило резкое уменьшение показателя микроциркуляции для обоих добровольцев. Однако у первого добровольца в течение следующих трех минут наблюдалось снижение показателя микроциркуляции и низкое значение среднеквадратического отклонения, а у второго добровольца – рост показателя микроциркуляции и высокое значение среднеквадратического отклонения.

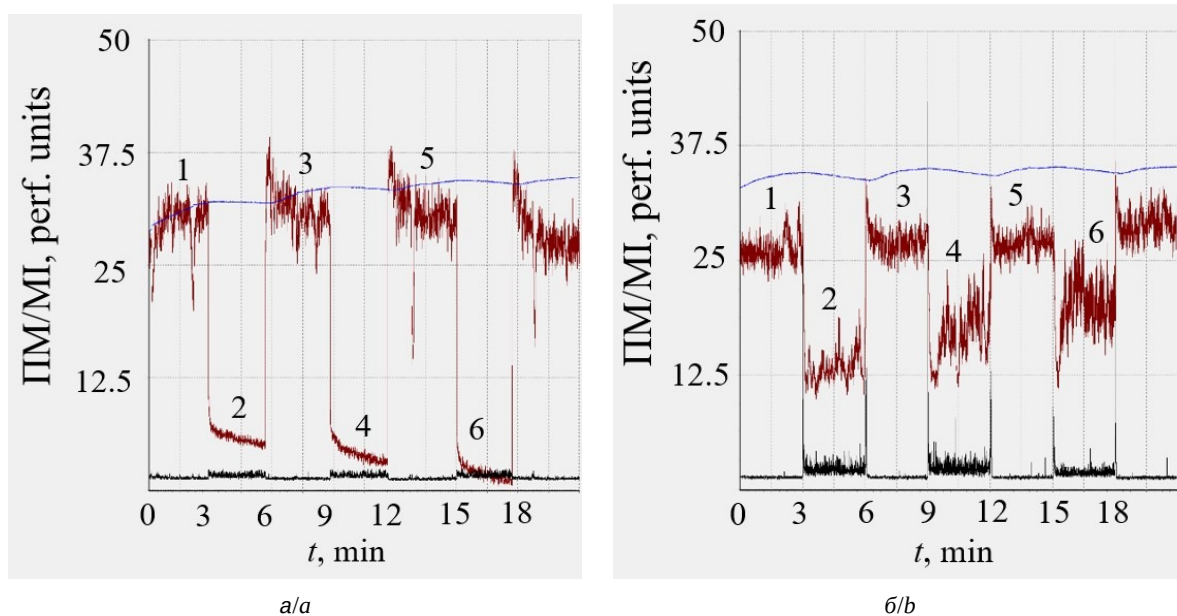


Рис. 1. Примеры типичных ЛДФ-грамм для двух испытуемых при двух положениях руки: 1, 3, 5 – рука с датчиком «на уровне сердца», 2, 4, 6 – рука с датчиком при поднятой конечности в положении «вверх»: а – возраст добровольца 26 лет, б – возраст добровольца 65 лет. Показатель микроциркуляции (красная линия), сигнал датчика движения (черная линия), кривая температуры (синяя линия) (цвет онлайн)

Fig. 1. Examples of typical LDF grams in two arm positions: 1, 3, 5 – arm with a sensor “at heart level”, 2, 4, 6 – arm with a sensor with a raised limb in the “up” position, for two subjects: *a* – the age of the volunteer is 26 years old, *b* – the age of the volunteer is 65 years old. Microcirculation indicator (red line), motion sensor signal (black line), temperature curve (blue line) (color online)

На рис. 2 приведены графики усредненного за три минуты (в каждом положении руки) показателя микроциркуляции (ПМ) для 7 здоровых молодых добровольцев первой группы (рис. 2, а) и 7 возрастных добровольцев второй группы (рис. 2, б). На рис. 2, в приведена динамика, усредненного по всей группе показателя микроциркуляции, при изменении положения руки здоровых молодых добровольцев первой группы, а на рис. 2, г – возрастных добровольцев второй группы.

Усредненные графики (см. рис. 2) демонстрируют одинаковый характер изменения показателя микроциркуляции, проявляющийся в его уменьшении при поднимании руки и связанный с уменьшением как давления в сосудах конечности, так и объема циркулирующей в ней крови. Как видно из рис. 2, в, г, среднее значение показателя микроциркуляции было больше в возрастной группе, а размах изменения показателя микроциркуляции при изменении положения руки был больше у группы молодых добровольцев.

По результатам измерений показателя микроциркуляции, на основании проведенного анализа статистических данных была обнаружена статистически значимая разница между положе-

ниями руки «на уровне сердца» и «вверх». Эта разница была выявлена в каждом цикле измерений. Для оценки статистической значимости использовался критерий Вилкоксона для зависимых выборок, и в каждом случае значение *p* было меньше 0.05.

Иной характер изменения демонстрируют рассчитанные по соответствующим диапазонам частот амплитуды нейрогенный и миогенных колебаний. На рис. 3 приведены графики изменения амплитуды нейрогенных колебаний при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 3, графики изменения амплитуды нейрогенных колебаний у двух групп существенно различаются. Размах изменения амплитуды нейрогенных колебаний при изменении положения руки был больше у группы молодых добровольцев. Кроме того, в положении руки «вверх» у группы молодых добровольцев наблюдается уменьшение амплитуды нейрогенных колебаний, в то время как у группы возрастных добровольцев наблюдается ее увеличение. Причем с каждым следующим изменением положения руки это различие увеличивается.

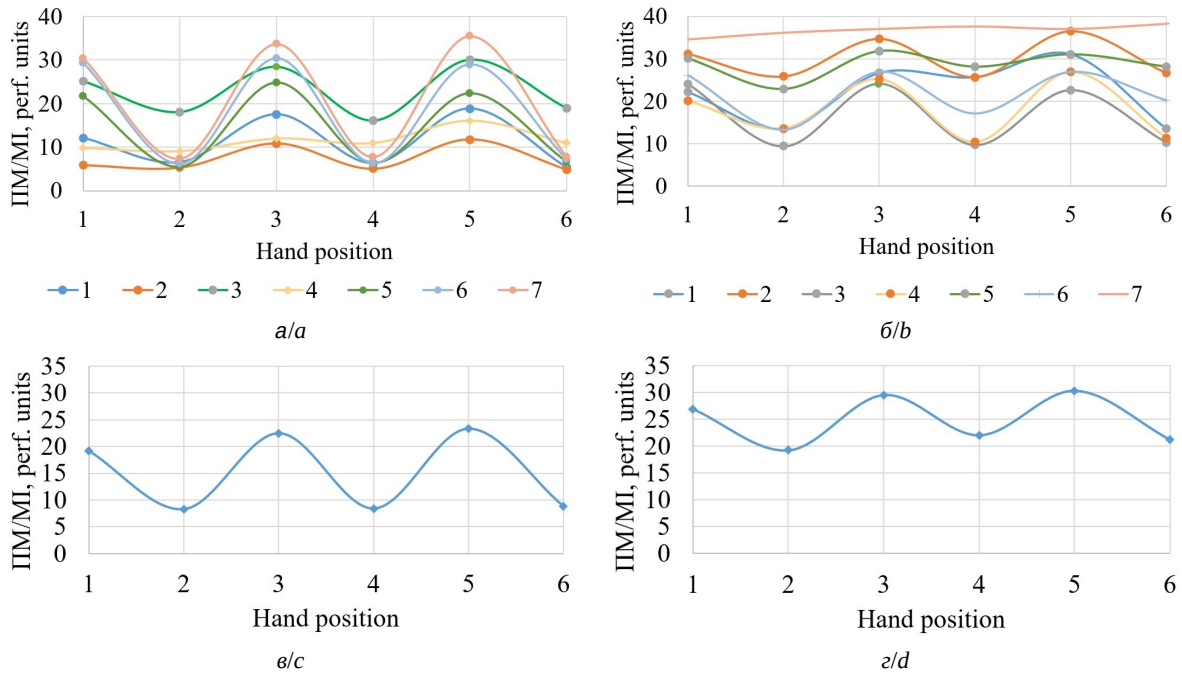


Рис. 2. Динамика показателя микроциркуляции (ПМ) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненного по всей группе показателя микроциркуляции здоровых молодых добровольцев, г – возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 2. Dynamics of the microcirculation index (MI) with a change in arm position: а – 7 healthy young volunteers of the first group, б – 7 age-related volunteers of the second group, в – the microcirculation index averaged over the entire group of healthy young volunteers, г – age-related volunteers (color online)

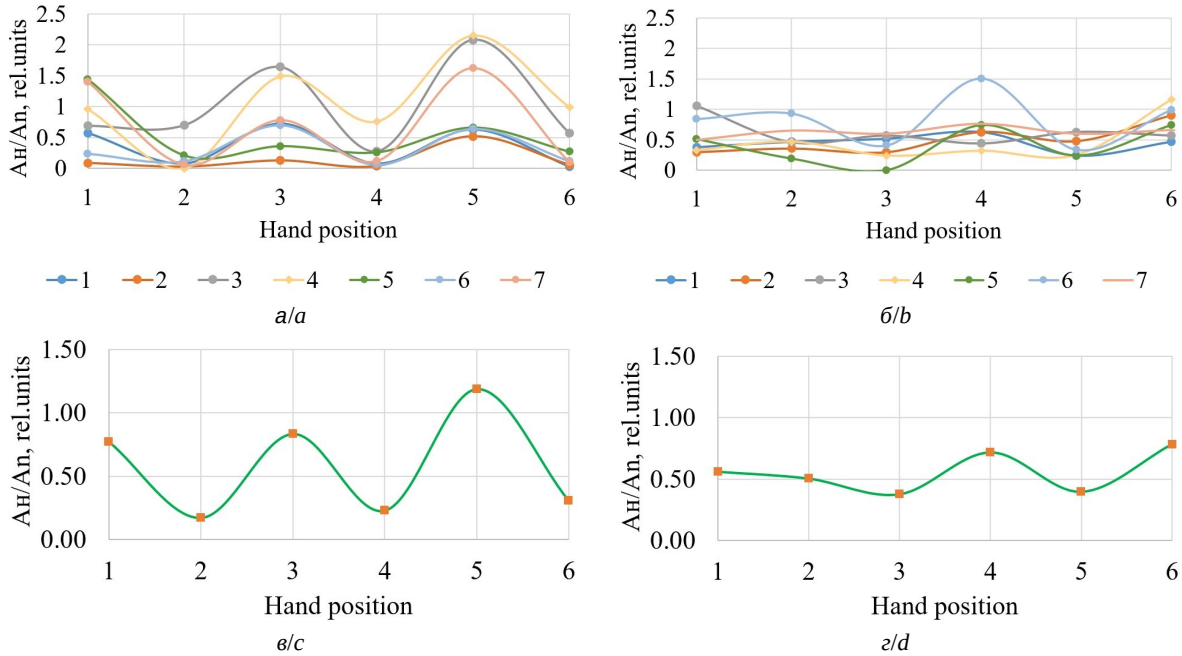


Рис. 3. Динамика амплитуды нейрогенных колебаний (Ан) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды нейрогенных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 3. Dynamics of the amplitude of neurogenic oscillations (An) when changing the position of the arm: а – 7 healthy young volunteers of the first group, б – 7 age-related volunteers of the second group, в – averaged over the entire group of amplitude of neurogenic oscillations of healthy young volunteers, г – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)



На рис. 4 приведены графики изменения амплитуды миогенных колебаний при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 4, графики изменения амплитуды миогенных колебаний у двух групп также существенно различаются. В положениях руки «вверх» у группы молодых добровольцев наблюдается уменьшение амплитуды миогенных колебаний, в то время как у группы возрастных добровольцев наблюдается ее увеличение, и с каждым следующим изменением положения руки это различие увеличивается.

На рис. 5 приведены графики изменения амплитуды дыхательных колебаний A_d при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 5, а–б, в первой группе у большинства молодых добровольцев при поднимании руки амплитуда дыхательных колебаний уменьшается, в то время как у возрастной группы наблюдается разнонаправленное изменение амплитуды дыхательных колебаний. Однако графики изменения усредненных значений амплитуды дыхательных колебаний у двух групп

имеют схожую динамику (рис. 5, в–г). Различие проявляется в величине размаха этого изменения, что может быть связано с физиологическими особенностями дыхательной функции молодых и возрастных групп при физической нагрузке, а также проявлением венозного застоя в возрастной группе.

На рис. 6 приведены графики изменения амплитуды сердечных колебаний A_c при изменении положения руки молодых и возрастных добровольцев.

Как видно из рис. 6, графики изменения амплитуды сердечных колебаний у двух групп имеют разнонаправленную динамику. Различие проявляется также в величине размаха этого изменения, что может быть связано с физиологическими особенностями работы сердца молодых и возрастных групп при физической нагрузке.

На рис. 7 приведены диаграммы разброса набора параметров при изменении положения руки.

Как видно из рис. 7, а, разброс величины показателя микроциркуляции у группы молодых добровольцев в положении руки «на уровне сердца» уменьшается, а в положении руки «вверх» увеличивается (рис. 7, б). У группы возраст-

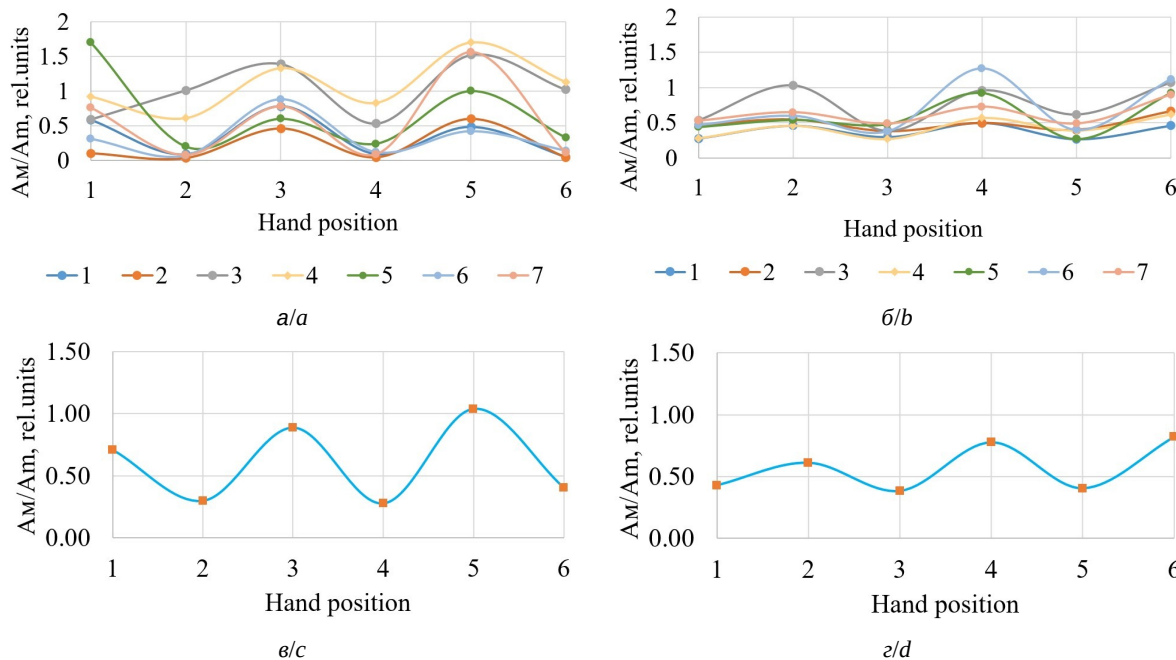


Рис. 4. Динамика амплитуды миогенных колебаний (A_m) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды миогенных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 4. Dynamics of the amplitude of myogenic oscillations (A_m) when changing the position of the arm: а – 7 healthy young volunteers of the first group, б – 7 age-related volunteers of the second group, в – averaged over the entire group of the amplitude of myogenic oscillations of healthy young volunteers, г – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)

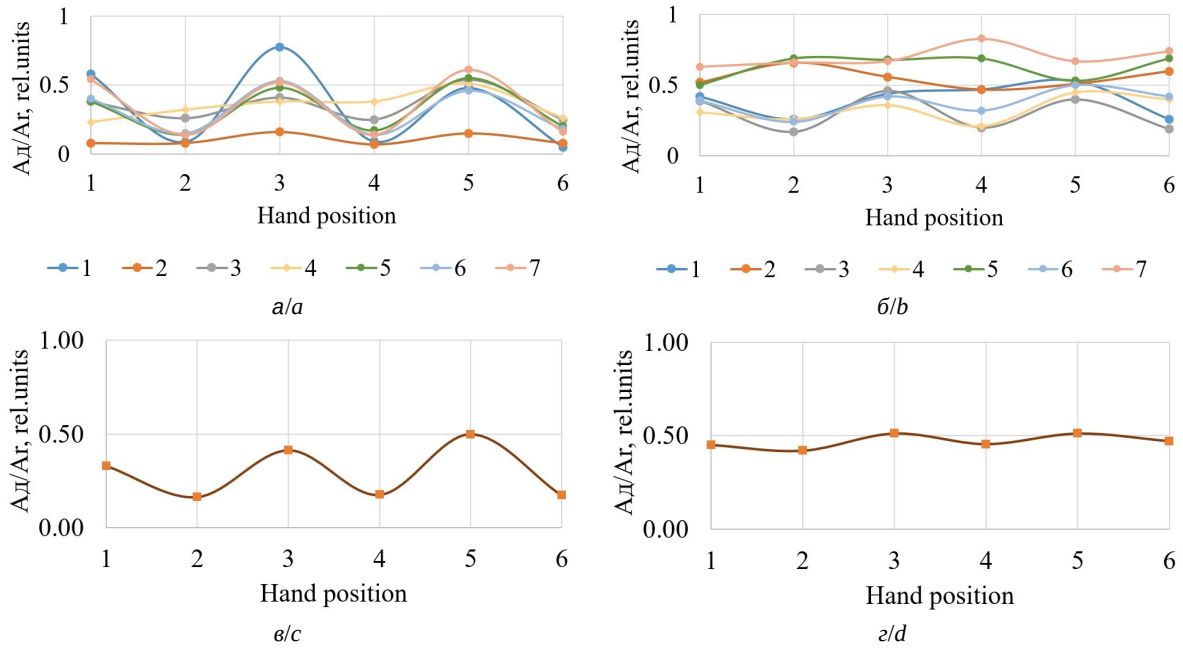


Рис. 5. Динамика амплитуды дыхательных колебаний (Ад) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды дыхательных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 5. Dynamics of the amplitude of respiratory oscillations (Ar) when changing the position of the arm: a – 7 healthy young volunteers of the first group, b – 7 age-related volunteers of the second group, c – averaged over the entire group of amplitude of respiratory oscillations of healthy young volunteers, d – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)

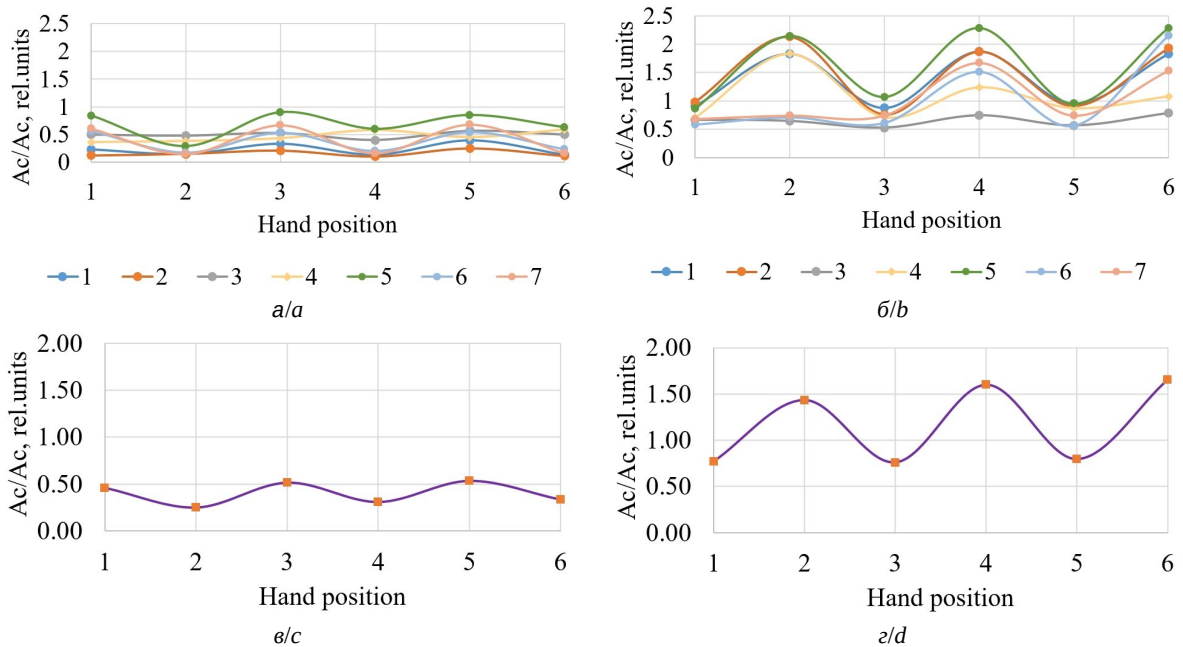


Рис. 6. Динамика амплитуды сердечных колебаний (Ac) при изменении положения руки: а – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы, б – 7 возрастных добровольцев второй группы, в – усредненной по всей группе амплитуды сердечных колебаний здоровых молодых добровольцев, г – усредненной по всей группе возрастных добровольцев (цвет онлайн)

Fig. 6. Dynamics of the amplitude of cardiac oscillations (Ac) when changing the position of the arm: a – 7 healthy young volunteers of the first group, b – 7 age-related volunteers of the second group, c – averaged over the entire group of amplitude of cardiac oscillations of healthy young volunteers, d – averaged over the entire group of age-related volunteers (color online)

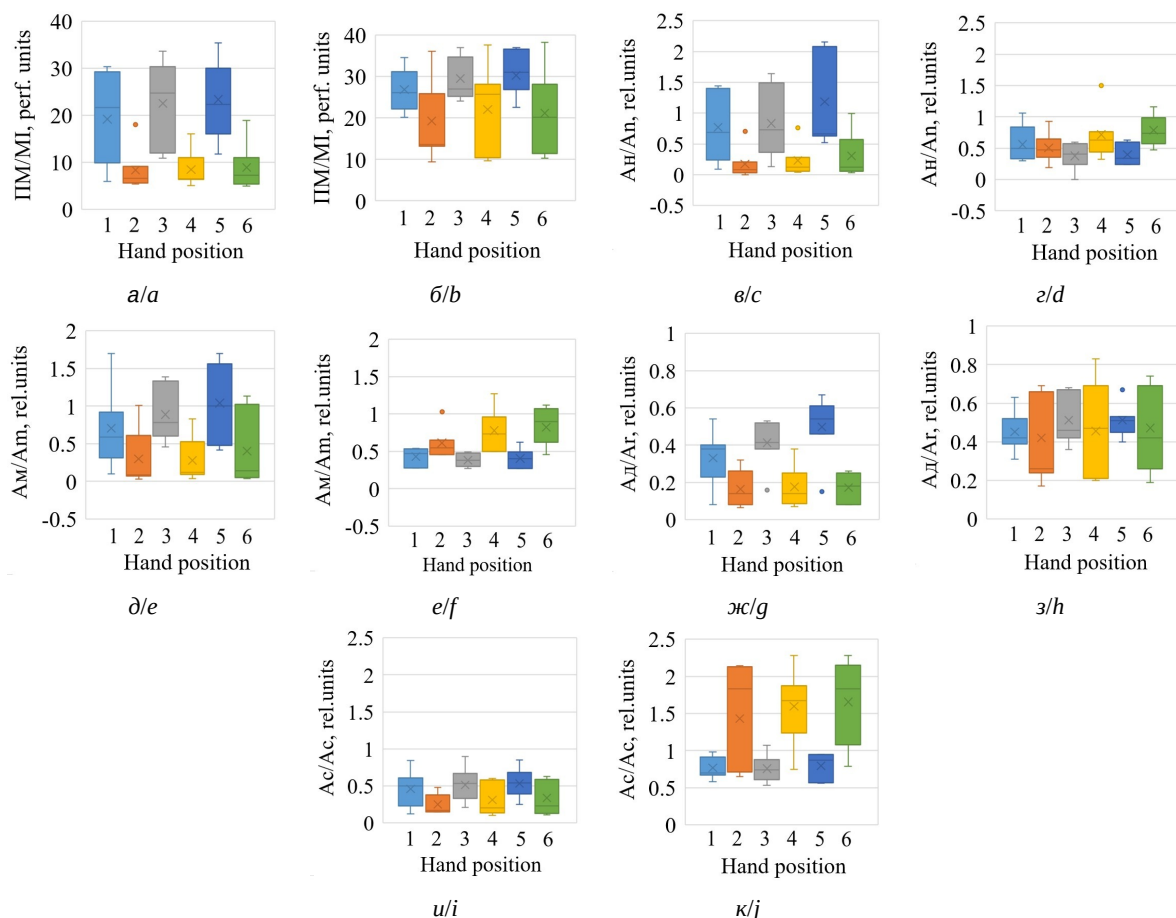


Рис. 7. Разброс набора параметров при изменении положения руки: а, в, д, ж, и – 7 здоровых молодых добровольцев первой группы; б, г, е, з, к – 7 возрастных добровольцев второй группы (цвет онлайн)

Fig. 7. The spread of the set of parameters when changing the position of the arm: a, c, e, g, i – 7 healthy young volunteers of the first group; b, d, f, h, j – 7 age-related volunteers of the second group (color online)

ных добровольцев разброс величины показателя микроциркуляции в положении руки «на уровне сердца» слабо изменяется, а в положении руки «вверх» увеличивается. Причем разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «на уровне сердца» у группы молодых добровольцев, в то время как у группы возрастных добровольцев разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «вверх». Такое различие в поведении разброса величины показателя микроциркуляции может быть объяснено изменением метаболизма человека с возрастом, приводящим к проявлению вено-артериолярного рефлекса.

Разброс амплитуды нейрогенных колебаний Ан у группы молодых добровольцев слабо изменяется при положении руки «на уровне сердца» и возрастает при положении руки «вверх» (рис. 7, в). У группы возрастных доброволь-

цев разброс амплитуды нейрогенных колебаний Ан слабо изменяется при обоих положениях руки (рис. 7, г). Разброс амплитуды миогенных колебаний при двух положениях руки у группы молодых добровольцев возрастает к третьему этапу (рис. 7, д). У группы возрастных добровольцев разброс амплитуды миогенных колебаний Ам возрастает к третьему этапу только при положении поднятой вверх руки (рис. 7, е). Низкий разброс амплитуд нейрогенных колебаний и миогенных колебаний можно связать с тем, что у молодых добровольцев в отсутствие проявлений ВАР вариабельность показателей больше по сравнению с разбросом у возрастных добровольцев, у которых проявление ВАР при поднятии руки приводит к ярко выраженному росту амплитуд миогенных колебаний.

Разброс амплитуды дыхательных Ад и сердечных Ас колебаний больше у группы возрастных добровольцев в положении руки «вверх»



(рис. 7, з, к), что может быть связано с физиологическими особенностями дыхательной и сердечной функции молодых и возрастных групп при физической нагрузке. При положении руки «вверх» амплитуда дыхательных волн и величина показателя микроциркуляции у молодых значительно падает, а у возрастных и ПМ высокий и амплитуды Ад остаются высокими, что может указывать на проявление застойных явлений в микроциркуляторном русле в группе возрастных.

Обращает на себя внимание увеличение среднего уровня амплитуды сердечных колебаний в положении руки «вверх» в группе возрастных (см. рис. 7, к). Это можно объяснить снижением венозного давления и опорожнением вен, приводящим к снижению сопротивления кровотоку и беспрепятственному поступлению артериальной крови через капилляры в венозное русло в данном положении руки. Вследствие таких процессов в период систолы регистрируется значительное увеличение ПМ в диапазоне сердечных колебаний, в период диастолы – значительное уменьшение ПМ по причине беспрепятственного оттока крови через систему венозных сосудов.

Обсуждение

Большинство проведенных исследований биомедицинского применения ВАР посвящено диагностике нарушений кровотока в нижних конечностях, осложнений сахарного диабета и регуляции тонуса артериальных сосудов [8–18]. Обсуждения результатов работ, посвященных физиологии данного рефлекса, зачастую противоречивы [5, 8]. При этом обычно проверяют сосудистую реакцию на повышение артериального давления при опускании руки ниже уровня сердца. Нами исследована реакция на понижение давления при поднимании руки выше сердца. Причем рука поднимается не на 25–30 см выше сердца [11], а на максимальную высоту строго вертикально вверх. И такой тест показал различия микрососудистого кровотока в группе молодых и в группе возрастных в состоянии руки вертикально вверх. В предложенной нами пробе исследуется реакция гемодинамики как на понижение артериального давления, так и на ее повышение до исходного уровня.

Картина изменения кровотока в микроциркуляторном русле при проведении функциональной пробы здорового молодого человека выглядит следующим образом. При поднимании руки происходит уменьшение кровяного давления

в артериях, венах и связанное с этим уменьшение кровенаполнения микроциркуляторного русла, регистрируемое методом ЛДФ по уменьшению показателя микроциркуляции. При этом резкое за 3–5 с понижение показателя микроциркуляции и уменьшение кровенаполнения микроциркуляторного русла свидетельствуют о влиянии сил гравитации на венозный возврат крови. В течение следующих 10–14 с происходит замедление этого процесса, что свидетельствует о появлении миогенной реакции гладкомышечных клеток.

При опускании руки происходит увеличение кровяного давления в артериях, венах и наблюдается связанное с этим увеличение кровенаполнения микроциркуляторного русла, регистрируемое по увеличению показателя микроциркуляции. При этом наблюдаются и резкое за 1–2 с изменение показателя микроциркуляции, и реактивная гиперемия за 8–10 с, выражающаяся в превышении исходных значений показателя микроциркуляции, и миогенная реакция гладкомышечных клеток, регулирующая восстановление кровенаполнения микроциркуляторного русла до исходных значений. Более быстрое наполнение кровеносного русла при опускании руки по сравнению с более медленным наполнением кровеносного русла при поднимании руки, возможно, свидетельствует о том, что тонус микрососудов в положении руки «вверх» меньше, чем тонус микроциркуляторного русла с базовым кровенаполнением, когда рука находится на уровне сердца.

Уменьшение тонуса микрососудов, когда рука находится в положении «вверх», и связанное с этим уменьшение упругости стенок кровеносных сосудов, также объясняет развитие состояния гиперемии с последующей ее компенсацией за счет миогенной реакции Бейлисса, приводящей к снижению и нормализации уровня показателя микроциркуляции.

Симпатический отдел вегетативной нервной системы человека по-разному реагирует на поднимание руки. У здорового молодого человека в течение продолжительного времени (от нескольких десятков секунд до минут) кровенаполнение микрососудов в положении руки «вверх» может не изменяться. У человека в возрасте или с нарушениями регуляции микрососудистого кровотока проявляется венуло-артериолярный рефлекс, приводящий к симпатической активации и нарастанию амплитуды нейрогенных колебаний кровотока в микрососудах при каждом следующем поднимании руки,



что способствует восстановлению величины объемного кровенаполнения.

Увеличение амплитуды нейрогенных и миогенных колебаний кровотока при поднимании руки должно приводить к уменьшению тонуса микрососудов и, следовательно, к сужению микрососудов. Однако сопутствующее этому явлению медленное нарастание кровенаполнения микрососудов русла при поднятой руке человека в возрасте свидетельствует о проявлении веноуло-артериолярного рефлекса. В работе [27] предложено объяснять изменения микрососудистого кровотока исключительно реакцией Бейлисса. Но миогенная реакция Бейлисса не может объяснить различную реакцию гладкомышечных клеток на одну и ту же функциональную пробу, связанную с уменьшением давления в сосудах поднятой руки: в одном случае происходит уменьшение амплитуды миогенных колебаний (у группы молодых добровольцев), в другом случае – ее увеличение (у группы возрастных добровольцев).

Заключение

Проявление веноуло-артериолярного рефлекса при проведении последовательности проб с изменением положения руки наблюдалось в группе возрастных добровольцев. При поднимании руки показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» у молодых добровольцев значительно уменьшался (см. рис. 1, а), в то время как в возрастной группе показатель микроциркуляции в положении руки «вверх» после резкого снижения имел тенденцию к увеличению (см. рис. 1, б). При этом среднее значение показателя микроциркуляции в положении руки «вверх» уменьшалось и в отсутствие проявления веноуло-артериолярного рефлекса, и при его наличии (рис. 2).

Уменьшение тонуса микрососудов по сравнению с базовым кровенаполнением, когда рука находится в положении «вверх», и связанное с этим уменьшение упругости стенок кровеносных сосудов приводят к резкому возрастанию скорости кровотока при ее опускании, быстрому увеличению показателя микроциркуляции, развитию состояния гиперемии с последующей компенсацией за счет миогенной реакции Бейлисса, снижением и стабилизацией среднего уровня показателя микроциркуляции.

Амплитуды нейрогенных и миогенных колебаний микрососудистого кровотока имели в основном разнонаправленный характер в отсут-

ствии веноуло-артериолярного рефлекса, и при его наличии (см. рис. 3, 4). Такое различие объясняется нарастающей активизацией нейрогенных и миогенных колебаний микрососудистого кровотока при возникновении веноуло-артериолярного рефлекса, что способствует восстановлению величины объемного кровенаполнения.

Изменения усредненных значений амплитуды дыхательных колебаний у двух групп имеют схожий характер (см. рис. 5). Различие проявляется в величине размаха этого изменения, что может быть связано с физиологическими особенностями дыхательной функции молодых и возрастных групп при физической нагрузке и указывает на проявление застойных явлений в микроциркуляторном русле в группе возрастных добровольцев.

Изменения амплитуды сердечных колебаний у двух групп имеют разнонаправленный характер (см. рис. 6). Различие проявляется также в величине размаха этого изменения, что может быть также связано с физиологическими особенностями работы сердца молодых и возрастных групп при физической нагрузке.

Разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «на уровне сердца» у группы молодых добровольцев, в то время как у группы возрастных добровольцев разброс величины показателя микроциркуляции значительно больше в положении руки «вверх». У молодых добровольцев в отсутствие проявлений ВАР вариабельность показателей больше в положении руки «вверх», в то время как в возрастной группе вариабельность показателей больше в положении руки «на уровне сердца».

Таким образом, тест с изменением положения конечности может давать ценную информацию о сохранности периферической иннервации микрососудов, что обосновывает перспективу применения данного теста в области выявления различных форм нейропатий и возрастных особенностей регуляции кровотока.

Список литературы

1. Silva H., Ferreira H. A., da Silva H. P., Monteiro R. L. The venoarteriolar reflex significantly reduces contralateral perfusion as part of the lower limb circulatory homeostasis *in vivo* // *Frontiers in Physiology*. 2018. Vol. 9. Art. 1123. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01123>
2. Silva H., Rezendes C. Revisiting the Venoarteriolar Reflex—Further Insights from Upper Limb Dependency



- in Healthy Subjects // *Biology*. 2024. Vol. 13, № 9. Art. 715. <https://doi.org/10.3390/biology13090715>
3. Федорович А. А. Микрососудистое русло кожи человека как объект исследования // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2017. Т. 16, № 4. С. 11–26. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2017-16-4-11-26>
 4. Boegehold M. A. Shear-dependent release of venular nitric oxide: Effect on arteriolar tone in rat striated muscle // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 1996. Vol. 271, № 2. P. H387–H395. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1996.271.2.H387>
 5. Gelman S., Warner D. S., Warner M. A. Venous function and central venous pressure: A physiologic story // *The Journal of the American Society of Anesthesiologists*. 2008. Vol. 108, № 4. P. 735–748. <https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e3181672607>
 6. Cracowski J. L., Roustit M. Human skin microcirculation // *Compr. Physiol.* 2020. Vol. 10, № 3. P. 1105–1154. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190008>
 7. Low P. A. Venous Arteriolar Reflex // *Primer on the Autonomic Nervous System* / 2nd ed. Elsevier Inc., 2004. P. 152–153. <https://doi.org/10.1016/B978-012589762-4/50039-6>
 8. Leyk D., Hoffmann U., Baum K., Wackerhage H., Essfeld D. Leg blood flow during slow head-down tilt with and without leg venous congestion // *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1998. Vol. 78. P. 538–543. <https://doi.org/10.1007/s004210050457>
 9. Monteiro R. L., Rocha C., Andrade S., Granja T., Gregório J. The acute adaptation of skin microcirculatory perfusion *in vivo* does not involve a local response but rather a centrally mediated adaptive reflex // *Frontiers in Physiology*. 2023. Vol. 14. Art. 1177583. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1177583>
 10. Estanol-Vidal B., Gutierrez-Manjarrez F., Martinez-Memije R., Senties-Madrid H., Berenguer-Sanchez M. J., Magana-Zamora L., Delgado-Garcia G., Chiquete-Anaya E. The two faces of venous arteriolar reflex: Cutaneous vasodilatation and vasoconstriction to raise and to lower the arm // *Revista de Neurología*. 2016. Vol. 62, № 9. Art. 403–407.
 11. Snyder K. A. M., Shamimi-Noori S., Wilson T. E., Monahan K. D. Age- and limb-related differences in the vasoconstrictor response to limb dependency are not mediated by a sympathetic mechanism in humans // *Acta Physiologica*. 2012. Vol. 205, № 3. P. 372–380. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2012.02416.x>
 12. Tikhonova I. V., Grinevich A. A., Guseva I. E., Tankanag A. V. Effect of orthostasis on the regulation of skin blood flow in upper and lower extremities in human // *Microcirculation*. 2021. Vol. 28, № 1. Art. 12655. <https://doi.org/10.1111/micc.126>
 13. Tschakovsky M. E., Hughson R. L. Venous emptying mediates a transient vasodilation in the human forearm // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2000. Vol. 279, № 3. P. H1007–H1014. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.279.3.H1007>
 14. Федорович А. А. Взаимосвязь функционального состояния артериолярного и веноулярного отделов сосудистого русла кожи с уровнем артериального давления // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2009. Т. 8, № 4. С. 47–53.
 15. Федорович А. А. Функциональное состояние регуляторных механизмов микроциркуляторного кровотока в норме и при артериальной гипертензии по данным лазерной доплеровской флоуметрии // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2010. Т. 9, № 1. С. 49–60.
 16. Wilson T. E., Zhang R., Levine B. D., Crandall C. G. Dynamic autoregulation of cutaneous circulation: Differential control in glabrous versus nonglabrous skin // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2005. Vol. 289, № 1. P. H385–H391. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00622.2004>
 17. Куликов Д. А., Красулина К. А., Глазкова П. А., Ковалева Ю. А., Глазков А. А., Барсуков И. А. Метод лазерной доплеровской флоуметрии в оценке нарушенной кожной микроциркуляции крови у пациентов с диабетической полинейропатией. Часть 2 // *Вестник Национального медико-хирургического центра имени Н. И. Пирогова*. 2021. Т. 16, № 3. С. 77–83. https://doi.org/10.25881/20728255_2021_16_3_77
 18. Yosipovitch G., Schneiderman J., van Dyk D. J., Chetrit A., Milo G., Boner G. Impairment of the postural venous arteriolar response in young type 1 diabetic patients: A study by laser doppler flowmetry // *Angiology*. 1996. Vol. 47, № 7. P. 687–691. <https://doi.org/10.1177/000331979604700708>
 19. Cacciatori V., Deller A., Bellavere F., Bongiovanni L. G., Teatini F., Gemma M. L., Muggeo M. Comparative assessment of peripheral sympathetic function by postural vasoconstriction arteriolar reflex and sympathetic skin response in NIDDM patients // *The American Journal of Medicine*. 1997. Vol. 102, № 4. P. 365–370. [https://doi.org/10.1016/S0002-9343\(97\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0002-9343(97)00088-0)
 20. Зеленина Т. А., Салухов В. В., Земляной А. Б., Железняк С. Г., Клиценко О. А. Нарушение микроциркуляторного кровотока у больных сахарным диабетом 2 типа и кардиоваскулярной автономной нейропатией // *Сахарный диабет*. 2021. Т. 24, № 1. С. 35–47. <https://doi.org/10.14341/DM12372>
 21. Tikhonova I. V., Tankanag A. V., Guseva I. E., Grinevich A. A. Analysis of interactions between cardiovascular oscillations for discrimination of early vascular disorders in arterial hypertension and type 2 diabetes // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2023. Vol. 79. Art. 104222.
 22. Cracowski J. L., Roustit M. Human skin microcirculation // *Compr. Physiol.* 2020. Vol. 10, № 3. P. 1105–1154. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190008>
 23. Zhrebtsov E. A., Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Zhrebtsova A. I., Sidorov V. V., Rafailov E. U., Dunaev A. V. Wireless dynamic light scattering sensors detect microvascular changes associated with ageing and diabetes // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2023. Vol. 70, № 11. P. 3073–3081. <https://doi.org/10.1109/TBME.2023.3275654>



24. Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Fedorovich A. A., Gorshkov A. Y., Dunaev A. V. Assessment of blood microcirculation changes after COVID-19 using wearable laser Doppler flowmetry // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13, № 5. Art. 920. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050920>
25. Фролов А. В., Локтионова Ю. И., Жарких Е. В., Сидоров В. В., Крупаткин А. И., Дунаев А. В. Исследование изменений кожной микроциркуляции крови при выполнении дыхательной техники хатха-йоги // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2021. Т. 20, № 4. С. 33–44. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44>
26. Скрипаль Ан. В., Фаркад Аль-Бадри, Машков К. В., Усанов А. Д., Аверьянов А. П. Лазерная флоуметрия микроциркуляции крови пальца руки в зависимости от внешней температуры и положения конечности // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2023. Т. 22, № 4. С. 35–41. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2023-22-4-35-41>
27. Tusman G., Sipmann F. S., Böhm S. H. A skeptical look about the existence of the veno-arteriolar reflex // *The Journal of Physiology*. 2024. Vol. 602, № 9. P. 1855–1861.
8. Leyk D., Hoffmann U., Baum K., Wackerhage H., Essfeld D. Leg blood flow during slow head-down tilt with and without leg venous congestion. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1998, vol. 78, pp. 538–543. <https://doi.org/10.1007/s004210050457>
9. Monteiro R. L., Rocha C., Andrade S., Granja T., Gregório J. The acute adaptation of skin microcirculatory perfusion *in vivo* does not involve a local response but rather a centrally mediated adaptive reflex. *Frontiers in Physiology*, 2023, vol. 14, art. 1177583. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1177583>
10. Estanol-Vidal B., Gutierrez-Manjarrez F., Martinez-Memije R., Senties-Madrid H., Berenguer-Sanchez M. J., Magana-Zamora L., Delgado-Garcia G., Chiquete-Anaya E. The two faces of venoarteriolar reflex: Cutaneous vasodilatation and vasoconstriction to raise and to lower the arm. *Revista de Neurología*, 2016, vol. 62, no. 9, pp. 403–407.
11. Snyder K. A. M., Shamimi-Noori S., Wilson T. E., Monahan K. D. Age- and limb-related differences in the vasoconstrictor response to limb dependency are not mediated by a sympathetic mechanism in humans. *Acta Physiologica*, 2012, vol. 205, no. 3, pp. 372–380. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2012.02416.x>
12. Tikhonova I. V., Grinevich A. A., Guseva I. E., Tankanag A. V. Effect of orthostasis on the regulation of skin blood flow in upper and lower extremities in human. *Microcirculation*, 2021, vol. 28, no. 1, art. 12655. <https://doi.org/10.1111/micc.126>
13. Tschakovsky M. E., Hughson R. L. Venous emptying mediates a transient vasodilation in the human forearm. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 2000, vol. 279, no. 3, pp. H1007–H1014. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.279.3.H1007>
14. Fedorovich A. A. The relationship of the functional state of the arteriolar and venular sections of the vascular bed of the skin with the level of blood pressure. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulatsiia* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2009, vol. 8, no. 4, pp. 47–53 (in Russian).
15. Fedorovich A. A. The functional state of the regulatory mechanisms of microcirculatory blood flow in normal and arterial hypertension according to laser Doppler flowmetry. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulatsiia* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2010, vol. 9, no. 1, pp. 49–60 (in Russian).
16. Wilson T. E., Zhang R., Levine B. D., Crandall C. G. Dynamic autoregulation of cutaneous circulation: Differential control in glabrous versus nonglabrous skin. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 2005, vol. 289, no. 1, pp. H385–H391. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00622.2004>
17. Kulikov D. A., Krasulina K. A., Glazkova P. A., Kovaleva Yu. A., Glazkov A. A., Barsukov I. A. The method of laser Doppler flowmetry in the assessment of disorders of skin microcirculation in patients with diabetic polyneuropathy. Part 2. *Vestnik Natsional'nogo mediko-khirurgicheskogo tsentra imeni N. I. Pirogova*. [Bulletin of the National Medical and Surgical Center



- named after N. I. Pirogov], 2021, vol. 16, no. 3, pp. 77–83. https://doi.org/10.25881/20728255_2021_16_3_77 (in Russian).
18. Yosipovitch G., Schneiderman J., van Dyk D. J., Chetrit A., Milo G., Boner G. Impairment of the Postural Venous Arteriolar Response in Young Type 1 Diabetic Patients: A Study by Laser Doppler Flowmetry. *Angiology*, 1996, vol. 47, no. 7, pp. 687–691. <https://doi.org/10.1177/000331979604700708>
 19. Cacciatori V., Deller A., Bellavere F., Bongiovanni L. G., Teatini F., Gemma M. L., Muggeo M. Comparative assessment of peripheral sympathetic function by postural vasoconstriction arteriolar reflex and sympathetic skin response in NIDDM patients. *The American Journal of Medicine*, 1997, vol. 102, no. 4, pp. 365–370. [https://doi.org/10.1016/S0002-9343\(97\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0002-9343(97)00088-0)
 20. Zelenina T. A., Salukhov V. V., Zemlyanoi A. B., Zheleznyak S. G., Klitsenko O. A. Violation of microcirculatory blood flow in patients with type 2 diabetes mellitus and cardiovascular autonomic neuropathy. *Sakharnyi diabet* [Diabetes Mellitus], 2021, vol. 24, no. 1, pp. 35–47 (in Russian). <https://doi.org/10.14341/DM12372>
 21. Tikhonova I. V., Tankanag A. V., Guseva I. E., Grinevich A. A. Analysis of interactions between cardiovascular oscillations for discrimination of early vascular disorders in arterial hypertension and type 2 diabetes. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023, vol. 79, art. 104222.
 22. Cracowski J. L., Roustit M. Human skin microcirculation. *Compr. Physiol.*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 1105–1154. <https://doi.org/10.1002/cphy.c190008>
 23. Zhrebtsov E. A., Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Zhrebtsova A. I., Sidorov V. V., Rafailov E. U., Dunaev A. V. Wireless dynamic light scattering sensors detect microvascular changes associated with ageing and diabetes. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2023, vol. 70, no. 1, pp. 3073–3081. <https://doi.org/10.1109/TBME.2023.3275654>
 24. Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Fedorovich A. A., Gorshkov A. Y., Dunaev A. V. Assessment of blood microcirculation changes after COVID-19 using wearable laser Doppler flowmetry. *Diagnostics*, 2023, vol. 13, no. 5, art. 920. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13050920>
 25. Frolov A. V., Loktionova Yu. I., Zharkikh E. V., Sidorov V. V., Krupatkin A. I., Dunaev A. V. Investigation of changes in skin microcirculation of blood during the performance of the hatha yoga breathing technique. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2021, vol. 20, no. 4, pp. 33–44 (in Russian). <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2021-20-4-33-44>
 26. Skripal An. V., Farkad Al-Badri, Mashkov K. V., Usanov A. D., Averyanov A. P. Laser flowmetry of microcirculation of the finger of the hand depending on the external temperature and position of the limb. *Regionarnoe krovoobrashchenie i mikrotsirkulyatsiya* [Regional Blood Circulation and Microcirculation], 2023, vol. 22, no. 4, pp. 35–41. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2023-22-4-35-41>
 27. Tusman G., Sipmann F. S., Böhm S. H. A skeptical look about the existence of the veno-arteriolar reflex. *The Journal of Physiology*, 2024, vol. 602, no. 9, pp. 1855–1861.

Поступила в редакцию 04.10.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 27.11.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 04.10.2024; approved after reviewing 21.11.2024; accepted for publication 27.11.2024; published 31.03.2025